

ALBERT EINSTEIN SPÍNDOLA SARAIVA DE MOURA

BASES PARA GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS: ESTUDO
DE PROCESSOS HIDROLÓGICOS NA BACIA DO RIO
TAPACURÁ

RECIFE – PE

Fevereiro de 2013

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA RURAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

BASES PARA GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS: ESTUDO
DE PROCESSOS HIDROLÓGICOS NA BACIA DO RIO
TAPACURÁ

Tese apresentada à Universidade Federal Rural de Pernambuco como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola para obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola.

Autor: Albert Einstein Spíndola Saraiva de Moura
Orientadora: Suzana Maria Gico Lima Montenegro
Co-orientador: Bernardo Barbosa da Silva

RECIFE – PE

Fevereiro de 2013

Ficha catalográfica

M929b Moura, Albert Einstein Spíndola Saraiva de
Bases para gestão dos recursos hídricos: estudo de
processos hidrológicos na bacia do rio Tapacurá / Albert
Einstein Spíndola Saraiva de Moura. – Recife, 2013.
109 f. : il.

Orientadora: Suzana Maria Gico Lima Montenegro.
Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) –
Universidade Federal Rural de Pernambuco, Departamento
de Tecnologia Rural, Recife, 2013.
Inclui referências e anexo(s).

1. Intercepção 2. Modelo de Gash 3. Precipitação
interna 4. Escoamento pelo tronco I. Montenegro, Suzana
Maria Gico Lima, orientadora II. Título

CDD 630

**BASES PARA GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS: ESTUDO DE
PROCESSOS HIDROLÓGICOS NA BACIA DO RIO TAPACURÁ**

Tese defendida e aprovada em 28 de fevereiro de 2013 pela banca
examinadora:

Orientador:

Profa. Dra. Suzana Maria Gico Lima Montenegro (UFPE)

Examinadores:

Prof. Dr. Abelardo Antônio de Assunção Montenegro (UFRPE)

Prof. Dr. Alfredo Ribeiro Neto (UFPE)

Prof. Dr. Anderson Luiz Ribeiro de Paiva (UFPE)

Prof. Dr. Ênio Farias de França e Silva (UFRPE)

À Deus;

Aos meus amados pais, Carmem e Célio;

Aos meus irmãos, Ana Célia, Glawbber e
Glewbbber;

À minha querida esposa, Kessia;

Dedico

AGRADECIMENTOS

À Deus, por iluminar o caminho e me guiar na vida;

Ao meu anjo da guarda, por nunca me abandonar e sempre me alertar dos fatos despercebidos.

À Kessia Danielle, pelo amor e cumplicidade nas realizações dos sonhos.

Aos meus pais e irmãos, pelo carinho, incentivo e confiança desde os primeiros passos até agora.

Aos meus sobrinhos, Juninho, Ana Cecília, Mariana, Guilherme e Davi, pela alegria que trouxeram a minha família e por fazerem lembrar que o bom mesmo é ser criança.

À Dona Maria do Carmo (minha sogra) e Yslla Beatriz pelo apoio e alegria em todos os momentos.

À professora Suzana Montenegro, pela paciência, orientação e disposição para ajudar.

Ao professor Bernardo Barbosa da Silva, pela co-orientação e reflexões sobre a vida.

Aos professores da banca avaliadora, Abelardo Montenegro, Alfredo Ribeiro Neto, Anderson Paiva e Ênio Silva, pelas sugestões e críticas construtivas.

Aos suplentes da banca, Professor João Audifax e professor Bernardo Barbosa pela disponibilidade oferecida.

À Oliveira, L. M. M., ou simplesmente, Leidjane, por toda ajuda e companheirismo. Obrigado, "Leid"! com sua ajuda foi mais fácil (*Aos amigos, tudo*).

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola da UFRPE (PPGEA), pela oportunidade da realização do doutorado.

Aos professores da UFRPE, que contribuíram para minha formação, em especial os professores do Departamento de Tecnologia Rural – DTR.

Ao Departamento de Engenharia Civil da UFPE – Laboratório de Hidráulica, pela estadia e ajuda material.

Aos professores da UFPE, Jaime Cabral, Roberto Azevedo, Anderson Paiva, Alfredo Ribeiro, Antonino e Ricardo Braga, pelo apoio destinado a minha pesquisa.

Aos amigos da UFRPE, cujos nomes dariam para fazer uma lista maior que esta tese, em especial ao amigo Joaquim Ramalho de Alencar Neto “Juca”, pela alegria dividida desde o início da graduação em 1998.

Aos amigos da UFPE: Leidjane, Janaina, Pedro, Ada, Ana Cláudia, Cláudia, Leidiane, Freire, EdibertoEdvânia, Fernandha, Dayana, Flaviana, Felipe, as duas Simones, Manuela, Edevaldo, Iane, Carlos; Cássio, Angelim, Yuri, Eduardo, Victor, Fernanda, Fernandha, José Guimarães, Edilson, Carol, Mariana, Osvalcéllo, Gracielle, Dijalena, Lopes, Kildere, Richarde, Leonardo, Fábio, Saul.

Aos amigos que conviveram comigo na sala do laboratório de hidráulica da UFPE, Cristiane, Tássia, Tatiane, Artur e Priscila, pelo bom convívio e eternas conversas sobre ciência, futebol e religião.

À Janaina (Jana-Janinha), por estar sempre à disposição e com disposição, além das boas gargalhadas (É muito bom ter amigo na praça).

À secretária do Departamento de Engenharia Civil (DECIV) Dona Walquíria (*in memorian*), pelos ótimos momentos vividos no Laboratório de Hidráulica.

Ao Sr Ananias, por conceder uma das áreas para realização do experimento e pelas palavras da bíblia a mim oferta.

Ao Instituto Agrônomo de Pernambuco (IPA) de Vitória de Santo Antão pela área disponibilizada

Ao Sr. Luiz Evandro, Diretor do IPA – Vitória de Santo Antão, por conceder à área e permitir a instrumentação no cafezal; além das sugestões, paciência e disponibilidade.

Ao Sr Heleno (*in memorian*), por conceder uma das áreas experimentais e pelas boas conversas regadas de poesias. “*Um velhinho, bem velhinho,*

mesmo estando moribundo ele abre a boca diz: o dinheiro e a mulher bonita são a imagem do mundo”.

À Allephe (aluno do IFPE – Vitória de Santo Antão), Diana (estagiária do IPA - Vitória de Santo Antão) e Vado (agricultor), pelas coletas realizadas e responsabilidade com a pesquisa. Obrigado por tudo.

À Paulo Henrique (Bolsista PIBIC/UFPE), pela ajuda nas coletas e digitação dos dados.

À Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco – FACEPE, pela concessão da minha bolsa de doutorado.

Ao CNPq, pela concessão de bolsas PQ, doutorado, ITI e PIBIC/UFPE a pessoas que tanto ajudaram nesse trabalho.

Ao CT-HIDRO/FINEP (Projeto de Cooperação Internacional do Semiárido – CISA; Estudos Hidrológicos e Sedimentológicos em Bacias Experimentais e Representativas do Semiárido e Serrado – BEER).

Ao MCT-INSA/CNPq/CT-Hidro/Ação (Projeto recuperação de áreas degradadas e difusão de tecnologias para convivência com o semiárido).

Aos amigos virtuais, em especial Sir Henrique, pela grande ajuda nos momentos de muito trabalho e diversão.

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS	xiii
LISTA DE SÍMBOLOS	xv
RESUMO	xvii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Justificativa	1
1.2 Hipótese da pesquisa	3
1.3 Objetivos da pesquisa	3
2 REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1 Recursos hídricos	4
2.2 Interceptação	5
2.3 Modelos de perda por interceptação	8
3 MATERIAIS E MÉTODOS	20
3.1 Área de estudo	20
3.2 Vegetações estudadas	20
3.2.1 Cultura do café (<i>Coffea canephora</i> Pierre ex Froehner)	20
Figura 5. Pluviômetros utilizados para medir a precipitação total	21
Figura 7. Sistema para coletar escoamento pelo tronco na cultura do café.	23
3.2.2 Cultura do limão	23
Figura 8. Interceptômetros instalados na cultura do limão	23
Figura 9. Sistema para coletar escoamento pelo tronco na cultura do limão	24
3.2.3 Vegetação natural (Fragmento de mata)	24
Figura 10. Interceptômetros instalados na mata	25
Figura 11. Disposição dos interceptômetros no interior da mata.	25
Figura 12. Sistema de captação de escoamento pelo tronco no sub-bosque	26
Figura 13. Sistema para coletar escoamento pelo tronco das árvores do estrato superior	26

3.3 Determinação da interceptação.....	27
3.3.1 Precipitação total	28
3.3.2 Perda por interceptação.....	28
3.3.3 Modelo linear	28
3.3.4 Modelo de Gash	28
Tabela 1. Componentes da interceptação do modelo analítico de Gash.....	29
3.3.4.1 Determinação dos parâmetros da cobertura vegetal.....	30
Figura 15. Estação meteorológica instalada na cultura do café.....	33
Determinação da constante psicrométrica (γ).....	34
3.4 Estatística	37
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
4.1 Interceptação na cultura do café	39
4.1.1 Precipitação – café	39
4.1.2 Precipitação interna, escoamento pelo tronco e perda por interceptação - café	40
Figura 19. Distribuição de frequência da PI (%)... Erro! Indicador não definido.	
Tabela 8. Escoamento pelo tronco em diferentes classes de chuva	47
4.1.3 Modelo linear	51
4.2 Interceptação na cultura do limão	54
4.2.1 Precipitação - limão	54
4.2.2 Precipitação interna, escoamento pelo tronco e perda por interceptação	55
Tabela 11. Análise de variância da precipitação interna nos três limoeiros.....	55
Figura 28. Distribuição de frequência relativa de PI (%).	56
4.2.3 Modelo linear	59
Tabela 13. Repartição das chuvas observada e estimada pelo modelo linear .	60
4.3 Interceptação na vegetação natural	62
4.3.1 Precipitação	62

4.3.2 Precipitação interna, escoamento pelo tronco e perda por interceptação	62
Tabela 14. Partição das chuvas observada de 2010 a 2012	63
Figura 33. Relação entre a precipitação interna PI (mm) e a precipitação total PT (mm).....	65
Figura 36. Distribuição de frequência relativa de PI (%).	67
Figura 38. Relação entre a perda por interceptação relativa – I (%) e a precipitação total - PT (mm), para a média de cada classe de chuva.....	70
4.3.3 Modelo linear	74
4.4 Resumo geral dos processos de repartição das chuvas na cultura do café, na cultura do limão e no fragmento de mata	76
4.5 Aplicação do modelo de Gash na cultura do café	77
Tabela 20. Perda por interceptação observada e estimada pelo modelo de Gash	84
5 CONCLUSÕES.....	87
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	89
ANEXO I	103
DESENVOLVIMENTO DO MODELO DE GASH	103
DERIVAÇÃO DO MODELO.....	105

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Processos de repartição das chuvas. PT – precipitação; PI – precipitação interna ou sob a vegetação; EscTr – escoamento pelo tronco; PE – precipitação efetiva; I – perda por interceptação.	6
Figura 2. Sistemas coletores de escoamento pelo tronco	7
Figura 3. Estrutura conceitual do modelo de Rutter. Adaptado de Gash e Morton (1978)	11
Figura 4. Estado de Pernambuco com destaque para as áreas experimentais localizadas na bacia do Tapacurá.....	20
Figura 5. Pluviômetros utilizados para medir a precipitação total	21
Figura 6. Interceptômetros utilizados para quantificação da precipitação interna na cultura do café	22
Figura 7. Sistema para coletar escoamento pelo tronco na cultura do café.	23
Figura 8. Interceptômetros instalados na cultura do limão.....	23
Figura 9. Sistema para coletar escoamento pelo tronco na cultura do limão....	24
Figura 10. Interceptômetros instalados na mata.	25
Figura 11. Disposição dos interceptômetros no interior da mata.	25
Figura 12. Sistema de captação de escoamento pelo tronco no sub-bosque...26	
Figura 13. Sistema para coletar escoamento pelo tronco das árvores do estrato superior.....	26
Figura 14. Projeção horizontal da copa de duas árvores divididas em subáreas.	27
Figura 15. Estação meteorológica instalada na cultura do café.....	33
Figura 16. Precipitação mensal observada durante o período de estudo e a média histórica do município de Vitória de Santo Antão.....	39
Figura 17. Relação entre a precipitação medida pelo pluviômetro automático e a medida pelo pluviômetro artesanal. r – coeficiente de correlação; N – número de pares de valores (X ; Y).	40
Figura 18. Registros da precipitação interna acumulada nas três plantas. PI_A; PI_B; PI_C e PI_média é a precipitação interna acumulada em cada planta e a média.	41
Figura 19. Distribuição de frequência da PI (%).	42
Figura 20. Relação entre PT (mm) e PI (mm) chuvas menores que 5 mm e para chuvas maiores que 5 mm. ** - significativo a 0,01 de probabilidade.	45

Figura 21. Registros do escoamento pelo tronco acumulado nas três plantas. EscTr_A; EscTr_B; EscTr_C e EscTr_média é o escoamento pelo tronco acumulado em cada planta e a média.	46
Figura 22. Relação entre EscTr (mm) e PT (mm) para chuvas menores que 5 mm e para chuvas maiores que 5 mm. ** - significativo a 0,01 de probabilidade; ns – não significativo	48
Figura 23. Relação entre a perda por interceptação relativa - I (%) e a precipitação total - PT (mm).....	50
Figura 24. Relação entre a perda por interceptação relativa - I (%) e a precipitação total - PT (mm), considerando a média das classes de chuva (0 – 5; 5,1 – 10; 10,1 – 20; 20,1 – 40 e > 40).....	50
Figura 25. Correlação entre a perda por interceptação estimada pelo modelo linear – I_{lin} (mm) e a perda por interceptação observada – I (mm).** - significativo a 0,01 de probabilidade;r – coeficiente de correlação; N – número de pares de valores (X; Y).	51
Figura 26. Evolução da perda por interceptação observada I (mm) e estimada pelo modelo linear I_{lin} (mm) durante o período de estudo em 2012.	52
Figura 27. PI (mm) média acumulada nos três cafeeiros. PI_A; PI_B; PI_C e PI_média é a precipitação interna acumulada em cada planta e a média.....	55
Figura 28. Distribuição de frequência relativa de PI (%).	56
Figura 29. Relação entre PT (mm) e PI (mm) chuvas menores 5 mm e para chuvas maiores que 5 mm.A linha tracejada é o prolongamento da linha de tendência para eventos de chuva menores ou iguais a 5 mm.	58
Figura 30. Relação entre PT (mm) e EscTr (mm) chuvas menores ou iguais a 5 mm e para chuvas maiores que 5 mm.A linha tracejada é o prolongamento da linha de tendência para eventos de chuva menores ou iguais a 5 mm.....	58
Figura 31. Correlação entre a perda por interceptação estimada pelo modelo linear – I_{lin} (mm) e a perda por interceptação observada – I (mm). ** - significativo a 0,01 de probabilidade; r – coeficiente de correlação; N – número de pares de valores (X; Y).	59
Figura 32. Evolução da perda por interceptação observada I (mm) e estimada pelo modelo linear I_{lin} (mm) durante o período de estudo em 2012.	60
Figura 33. Relação entre a precipitação interna PI (mm) e a precipitação total PT (mm).....	65

Figura 34. Relação entre o escoamento pelo tronco das árvores do estrato superior EscTr (mm) e a precipitação total PT (mm).	65
Figura 35. Relação entre o escoamento pelo tronco do sub-bosque EscSub (mm) e a precipitação total PT (mm).	66
Figura 36. Distribuição de frequência relativa de PI (%).	67
Figura 37. Relação entre a perda por interceptação relativa – I (%) e a precipitação total - PT (mm), para cada evento.	70
Figura 38. Relação entre a perda por interceptação relativa – I (%) e a precipitação total - PT (mm), para a média de cada classe de chuva.	70
Figura 39. Relação entre a precipitação interna “PI (mm)” e a precipitação total “PT (mm)” nos períodos chuvoso (PC) e menos chuvoso (PMC). ** - significativo a 0,01 de probabilidade.	72
Figura 40. Relação entre o escoamento pelo tronco das árvores do estrato superior “EscTr (mm)” e a precipitação total “PT (mm)” nos períodos chuvoso (PC) e menos chuvoso (PMC). ** - significativo a 0,01 de probabilidade.	73
Figura 41. Relação entre o escoamento pelo tronco do sub-bosque “EscSub (mm)” e a precipitação total “PT (mm)” nos períodos chuvoso (PC) e menos chuvoso (PMC). ** - significativo a 0,01 de probabilidade.	73
Figura 42. Correlação entre a perda por interceptação estimada pelo modelo linear – I _{lin} (mm) e a perda por interceptação observada – I (mm).	74
Figura 43. Evolução da perda por interceptação observada I (mm) e estimada pelo modelo linear I _{lin} (mm) durante o período de abril de 2011 a agosto de 2012.	75
Figura 44. Frequências da precipitação ocorrida no intervalo de uma hora, para chuvas iguais ou maiores que 0,4 mm.	77
Figura 45. Frequências da evaporação ocorrida no intervalo de uma hora, para chuvas iguais ou maiores que 0,4 mm.	78
Figura 46. Capacidade de armazenamento da copa (S) e Coeficiente de precipitação interna livre (p). A linha contínua é a reta de regressão dos pontos de maior relação PI/PT. A linha tracejada é a reta de regressão dos eventos que não saturaram a copa. Temos S = 1,0321 e p = 0,1025. Os eventos de chuva menores que 1,0 mm estão destacados pelo retângulo e ampliados no lado direito. PI – precipitação interna, PT – precipitação total.	79
Figura 47. Capacidade de armazenamento do tronco (S _t) e porção de chuva que é desviada para o tronco (p _t). A linha contínua é a reta de regressão dos	

pontos de maior relação $EscTr/PT$. Temos $S_t = 0,0486mm$ e $p_t = 0,0467mm$. $EscTr$ – escoamento pelo tronco das árvores do estrato superior, PT – precipitação total.	79
Figura 48. Análise de sensibilidade dos parâmetros usados no modelo de Gash. E – taxa de evaporação média, R – intensidade de chuva média, p – coeficiente de precipitação interna livre, S_t – capacidade de armazenamento do tronco, p_t – porção de chuva desviada para o tronco.	81
Figura 49. Relação entre as perdas por interceptação estimadas pelo modelo de Gash e a precipitação total.	82
Figura 50. Relação entre as perdas por interceptação estimadas pelo modelo de Gash. ** - significativo a 0,01 de probabilidade.	83
Figura 51. Perda por interceptação observada e estimada pelo modelo de Gash versão original e revisada. I – é a perda por interceptação observada, I_{Gash} – é a perda estimada pelo modelo original de Gash e I_{Gash_rev} – é a perda estimada pelo modelo revisado de Gash.	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Componentes da interceptação do modelo analítico de Gash.....	29
Tabela 2. Componentes da interceptação do modelo analítico de Gash revisado	32
Tabela 3. Análise de variância da precipitação interna nos três cafeeiros.....	41
Tabela 4. Precipitação interna absoluta “PI (mm)” e relativa “PI (%)” em diferentes classes de chuva.....	43
Tabela 5. Análise de variância da precipitação interna relativa – PI (%) nas cinco classes de chuva (C1, C2, C3, C4 e C5). H_0 : média de C1 = média de C2 = média de C3 = média de C4 = média de C5.....	43
Tabela 6. PT (mm) e PI (mm) obtidas em chuvas maiores que 5 mm e menores ou iguais a 5 mm.....	44
Tabela 7. Análise de Variância do escoamento pelo tronco nas três plantas. ...	47
Tabela 8. Escoamento pelo tronco em diferentes classes de chuva	47
Tabela 9. Processos de repartição das chuvas observados e estimados pelo modelo linear	53
Tabela 10. Análise de variância das perdas por interceptação relativa - I (%) obtidas nas duas classes de chuva.	54
Tabela 11. Análise de variância da precipitação interna nos três limoeiros.....	55
Tabela 12. Análise de variância da precipitação interna relativa - PI (%) em diferentes classes de chuva.....	57
Tabela 13. Repartição das chuvas observada e estimada pelo modelo linear .	60
Tabela 14. Partição das chuvas observada de 2010 a 2012	63
Tabela 15. Repartição das chuvas sob diferentes classes de chuva.....	69
Tabela 16. Partição das chuvas nos períodos chuvosos (PC) e nos períodos menos chuvosos (PMC).....	71
Tabela 17. Repartição das chuvas observada e estimada pelo modelo linear nos períodos chuvoso e menos chuvoso.....	76
Tabela 18. Resumo geral dos processos de repartição das chuvas nos três tipos de vegetação.....	77
Tabela 19. Parâmetros para aplicação do modelo de Gash	79
Tabela 20. Perda por interceptação observada e estimada pelo modelo de Gash	84

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Definição	Unidade
c_p	Calor específico do ar	$\text{MJ.Kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$
D	Déficit da pressão de vapor	KPa
DAP	Diâmetro à altura do peito	mm
DMN	Desvio Médio Normalizado	
d_r	Distância relativa inversa Terra – Sol	
E	Taxa de evaporação	mm.h^{-1}
e_a	Pressão de vapor atual	KPa
EM	Eficiência da Modelagem	
<i>EPM</i>	Erro padrão da média	
e_s	Pressão de vapor na saturação	KPa
EscSub	Escoamento pelo tronco do sub-bosque	mm
EscSub _{lin}	Escoamento pelo tronco do sub-bosque estimado pelo modelo linear	mm
EscTr	Escoamento pelo tronco	mm
EscTr _{lin}	Escoamento pelo tronco estimado pelo modelo linear	mm
G_{sc}	Constante solar	$\text{MJ.m}^2.\text{min}^{-1}$
I	Perda por interceptação	mm
I _{lin}	Perda por interceptação estimada pelo modelo linear	mm
J	Dia sequencial do ano	
K	Constante de Van Karman	
P	Coeficiente de precipitação interna livre	
P	Pressão atmosférica	KPa
PI	Precipitação Interna	mm
PI _{lin}	Precipitação interna estimada pelo modelo linear	mm
PT	Precipitação Total	mm
p_t	Porção de chuva desviada para o tronco	
PT'	Precipitação necessária para saturar a copa	mm
r_a	Resistência aerodinâmica	s.m^{-1}
R_a	Radiação solar no topo da atmosfera	$\text{MJ.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$

Símbolo	Definição	Unidade
R_n	Saldo de radiação	$\text{MJ.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$
R_{oc}	Saldo de radiação de onda curta	$\text{MJ.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$
R_{ol}	Saldo de radiação de onda longa	$\text{MJ.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$
R_s	Radiação solar global	$\text{MJ.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$
R_{so}	Radiação solar a céu claro	$\text{MJ.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$
S	Capacidade de armazenamento da copa	mm
S_t	Capacidade de armazenamento do tronco	mm
T_{max}	Temperatura do ar máxima	$^{\circ}\text{K}$
T_{min}	Temperatura do ar mínima	$^{\circ}\text{K}$
u	Velocidade do vento	m.s^{-1}
UR	Umidade relativa	%
z	Altitude da estação meteorológica	m
α	Albedo da superfície	
γ	Constante psicrométrica	$\text{KPa.}^{\circ}\text{C}^{-1}$
Δ	Declividade da curva de pressão de vapor saturada	$\text{KPa.}^{\circ}\text{C}^{-1}$
δ	Declinação solar	rad
λ	Calor latente de vaporização da água	MJ.Kg^{-1}
ρ	Massa específica do ar	Kg.m^{-3}
σ	Constante de Stefan - Boltzmann	$\text{MJ.m}^2.\text{h}^{-1}$
φ	Latitude	rad
ω	Ângulo solar no momento em que ocorre o ponto médio do período considerado	rad
ω_1	Ângulo horário no início do período	rad
ω_2	Ângulo horário no final do período	rad
\bar{E}	Taxa de evaporação média	mm.h^{-1}
\bar{R}	Intensidade de chuva média	mm.h^{-1}
\bar{T}	Temperatura do ar média	$^{\circ}\text{C}$

Moura, A. E. S. S., Dr., Universidade Federal Rural de Pernambuco, fevereiro de 2013. BASES PARA GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS: ESTUDO DE PROCESSOS HIDROLÓGICOS NA BACIA DO RIO TAPACURÁ. Orientadora: Prof^aDr^a Suzana M. G. L. Montenegro; Co-orientador: ProfDr Bernardo B. da Silva.

RESUMO

O Estado de Pernambuco é dotado de várias bacias hidrográficas onde pode-se destacar a bacia do rio Tapacurá, que abrange sete municípios e é responsável por parte do abastecimento da Região Metropolitana do Recife. Devido a sua importância, vários estudos voltados aos recursos hídricos têm sido realizados, no entanto, até o presente momento, não foi realizado nenhum estudo sobre interceptação, que é um processo hidrológico de grande importância para a gestão dos recursos hídricos, pois, reduz a quantidade de água que chega ao solo, modifica a capacidade erosiva da precipitação, podendo ainda condicionar o balanço de energia da vegetação, além de dar origem à alteração da qualidade da água. Este trabalho trata do estudo da perda por interceptação em diferentes tipos de vegetação (café, limão e vegetação de floresta natural) encontrados na bacia do Tapacurá, através da sua determinação em experimento de campo e da avaliação de modelos de predição, destacando o modelo analítico de Gash, na cultura do café. Para determinação da perda por interceptação, foram instalados, nos três tipos de vegetação, pluviômetros para medir a precipitação total, interceptômetros para medir a precipitação interna e sistemas para coletar a água de chuva que escoou pelo tronco. Próximo ao cafezal, foi instalada uma estação meteorológica para medição das variáveis necessárias à aplicação do modelo de Gash. Foram observadas diferentes taxas de perda por interceptação nas três vegetações estudadas. Chuvas de menor magnitude apresentaram maiores perdas relativas por interceptação. A perda por interceptação também foi maior no período chuvoso do que no período menos chuvoso. O modelo linear em função apenas da precipitação total, de forma geral, não produziu boas estimativas da perda por interceptação, sendo o melhor resultado obtido na vegetação natural, cujo desvio foi de -21%. O modelo analítico de Gash revisado se mostrou uma boa ferramenta para estimar a perda por interceptação e apresentou melhor resultado que a versão original e o modelo linear, com desvio médio normalizado de 9% e eficiência da modelagem de 88%. A aplicação desse modelo é de grande importância, pois, produz estimativas de processos hidrológicos que, em conjunto com outras ações, auxiliam na gestão dos recursos hídricos.

Palavras chave: Interceptação, Modelo de Gash, Precipitação interna e Escoamento pelo tronco

Moura, A. E. S. S., Dr., Universidade Federal Rural de Pernambuco, fevereiro de 2013. BASES FOR WATER RESOURCES MANAGERMENTS: STUDY OF HYDROLOGICAL PROCESSES IN RIVER OF TAPACURA'S BASIN. . Orientadora: Prof^aDr^a Suzana M. G. L. Montenegro; Co-orientador: ProfDr Bernardo B. da Silva.

ABSTRACT

The State of Pernambuco has several watersheds, where we can highlight the Tapacurá basin, which includes seven municipal districts and it is responsible for part of the provisioning of the Metropolitan Area of Recife. Due to its importance, several studies about water resources have been accomplished, however, until the present moment, any study was not accomplished about interception loss, which is a hydrological process of great importance for the water resources managements, it reduces the amount of water that arrives to the soil, it modifies the rainfall erosive capacity, could still condition the swinging of energy of the vegetation, besides giving origin to the alteration of the water quality. This work treats of the study of the loss for interception in different vegetation types (coffee, lemon and vegetation of natural forest) found in the basin of Tapacurá, through his/her determination in field experiment and of the evaluation of prediction models, detaching the analytical model of Gash, in the culture of the coffee. For determination of the loss for interception, they were installed, in the three vegetation types, pluviômetros to measure the total precipitation, interceptômetros to measure the precipitation interns and systems to collect the rain water that drains for the trunk. Close to the coffee plantation, a meteorological station was installed for measurement of the necessary variables to the application of the model of Gash. Different loss taxes were observed by interception in the three studied vegetations. Rains of smaller magnitude presented larger relative losses for interception. The loss for interception was also larger in the rainy period than in the less rainy period. The lineal model in function just of the total precipitation, in a general way, it didn't produce good estimates of the loss for interception, being the best result obtained in the natural vegetation, whose deviation was of -21%. THE analytical model of revised Gash if it showed a good tool to esteem the loss for interception and it presented better result than the original version and the lineal model, with normalized medium deviation of 9% and efficiency of the modelling of 88%. the application of that model is of great importance, because, it produces estimates of processes hidrológicos that, together with other actions, they aid in the administration of the resources hídricos.

Key words: Interception, Gash model, Throughfall and Stemflow

1 INTRODUÇÃO

1.1 Justificativa

O uso racional dos recursos hídricos tem sido objeto de grande preocupação em todo o mundo. O elevado crescimento populacional associado ao crescimento industrial e agrícola aumenta cada vez mais a demanda por água, e esse aumento progressivo da exploração dos recursos hídricos sugere maior atenção na conservação da água por meio do consumo mais racional e controlado, uma vez que a água é um recurso natural limitado.

O conhecimento do comportamento hidrológico é de fundamental importância para o gerenciamento dos recursos hídricos. Para tanto, é necessário um sistema de informações, que forneça dados quantitativos e qualitativos satisfatórios, que auxiliem na formulação matemática dos processos de modo a possibilitar boa compreensão do comportamento espacial das variáveis e dos fenômenos.

O elemento fundamental de análise do ciclo hidrológico é a bacia hidrográfica, que é uma área delimitada topograficamente, onde a chuva que nela incide converge para um rio principal por meio do escoamento superficial e subsuperficial. O comportamento hidrológico e climatológico de uma bacia hidrográfica pode representar outras bacias situadas em uma mesma região homogênea, sendo, portanto, utilizadas para pesquisas do ciclo hidrológico, sob condições naturais e relativamente estáveis. Essas bacias são chamadas de bacias representativas. Outras bacias, relativamente homogêneas, com características físicas uniformes e de pequeno porte, onde são realizados estudos detalhados do ciclo hidrológico, são classificadas de bacias experimentais.

Devido à importância da pesquisa hidrológica no Nordeste brasileiro e com o objetivo de desenvolver pesquisas conjuntas e manter atualizado e ordenado o conhecimento científico e tecnológico, em 2001, foi criada a Rede de Hidrologia do Semiárido (REHISA), composta por pesquisadores das Universidades da Região Nordeste (UFPB, UFCG, UFAL, UFPE, UFRPE, UFRN, UFC / FUNCEME). Em seguida criou-se o Projeto de Implantação de Bacias Experimentais do Semiárido (IBESA), o projeto Bacias Experimental

Representativa da Rede de Hidrologia do Semiárido (BEER) que, de forma integrada, desenvolveram atividades de pesquisa comuns, caracterizando as ações de grupos de pesquisadores através do engajamento com os propósitos do REHISA, e o projeto Gestão Integrada das Microbacias do Rio Tapacurá – PE.

Algumas bacias hidrográficas foram contempladas com esses projetos, dentre elas, a bacia do rio Tapacurá, que é uma das mais importantes para o abastecimento público da Região Metropolitana do Recife (RMR), e apresenta a diversificação de atividades como uma forte característica. A bacia do rio Tapacurá envolve os municípios de Vitória de Santo Antão, Pombos, São Lourenço da Mata, Gravatá, Moreno e Chã Grande, gerando uma considerável parcela da água consumida na Região Metropolitana do Recife (BRAGA, 2001).

A diversificação de atividades presente na bacia do Tapacurá faz com que seja necessária a realização de estudos que relacionem as características de uso e ocupação do solo com os processos hidrológicos que ocorrem naquela bacia, pois além das atividades humanas que demandam água em quantidade e qualidade diferenciada, ocorre também a perda de água através de fenômenos naturais diretamente relacionados com as características da vegetação local.

A influência da vegetação na quantidade de água precipitada que efetivamente chega ao solo ocorre desde o momento em que há o contato com a cobertura vegetal, onde parte dessa água fica retida na planta e retorna à atmosfera em forma de vapor, caracterizando a perda por interceptação.

Vários estudos têm sido realizados na bacia do Tapacurá, onde pode-se destacar temas como infiltração de água no solo, evapotranspiração, variabilidade espacial da precipitação, transporte de sedimentos, dentre outros (OLIVEIRA, 2007; MOURA, 2009; SILVA, 2009; ALBUQUERQUE, 2010; MOURA, 2012; OLIVEIRA, 2012). No entanto, apesar da importância, nenhum trabalho sobre perda por interceptação foi realizado naquela bacia até o momento e, no cenário nacional, raros são os estudos que levam em consideração diferentes tipos de vegetação em uma mesma bacia. Além disso,

a maioria dos estudos foi realizado em ambientes florestais, sendo escassos os realizados em culturas agrícolas.

1.2 Hipótese da pesquisa

As hipóteses que norteiam a pesquisa são: a) é possível determinar a perda por interceptação em função da precipitação em diferentes vegetações na bacia do Tapacurá; b) é possível estimar a perda por interceptação para as condições climáticas reinantes na bacia por meio do modelo analítico de Gash.

1.3 Objetivos da pesquisa

a) Geral:

Estudar o processo hidrológico perda por interceptação em diferentes tipos de vegetação na bacia do rio Tapacurá.

b) Específicos:

- Avaliar a precipitação interna e o escoamento pelo tronco na cultura do café;
- Avaliar a precipitação interna e o escoamento pelo tronco na cultura do limão;
- Avaliar a precipitação interna e o escoamento pelo tronco em vegetação natural (fragmento de Mata);
- Avaliar o desempenho do modelo de perda por interceptação de Gash na cultura do café.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Recursos hídricos

Visando equacionar a demanda crescente de água mediante o crescimento urbano, industrial e agrícola, potenciais conflitos gerados pelo binômio disponibilidade-demanda e o preocupante avanço da degradação ambiental de rios e lagos, em 1997 foi instituída a Lei Federal 9.433/97. Essa Lei é dotada de instrumentos legais para garantir às gerações futuras a disponibilidade de água em condições adequadas. Neste ínterim, a água é conceituada como um bem de domínio público, dotado de valor econômico, sendo seus usos prioritários o abastecimento humano e a dessedentação de animais, cuja gestão tem como unidade territorial a bacia hidrográfica (ANA, 2002).

A ciência que trata da representação dos processos físicos que ocorrem em uma bacia hidrográfica é a Hidrologia. Dentro da Hidrologia, um conceito muito importante é o do Ciclo Hidrológico, que é o processo de circulação contínua da água entre a superfície terrestre e a atmosfera, onde nele atuam vários fenômenos (precipitação, infiltração, escoamento superficial, transpiração, evaporação).

O ciclo hidrológico representa a dinâmica dos fluxos nas direções vertical e horizontal, com a característica que lhe é totalmente peculiar: o comportamento aleatório da natureza. Tal comportamento de aleatoriedade define e altera as configurações do meio ambiente, exigindo assim medidas racionais para que cada etapa não cause tantos transtornos na vida humana, animal e vegetal. A eficiência no manejo dos recursos hídricos compõe uma das principais ações na busca do desenvolvimento para cada país. Tais ações devem ser implementadas de forma que a produção alimentar possa suprir a demanda populacional e, concomitantemente, tornar o meio ambiente sustentável (OLIVEIRA, 2012)

A complexidade dos sistemas hídricos cresceu devido à diminuição da disponibilidade dos recursos hídricos e deterioração da qualidade das águas. Com base nos registros de variáveis hidrológicas envolvidas é possível

entender melhor os fenômenos e procurar representá-los matematicamente (TUCCI, 2009).

A gestão racional dos recursos hídricos passa pela capacidade de prever a influência que as diversas atividades têm sobre eles, o que só é possível se tomar-se como base estudos quantitativos e qualitativos dos diversos processos e fatores intervenientes (VALENTE, 1999).

2.2 Interceptação

A precipitação é toda a água proveniente do meio atmosférico que atinge a superfície terrestre (neblina, chuva, granizo, neve), sendo diferenciado pelo estado em que a água se encontra (TUCCI, 2009). A água da chuva pode ser encontrada tanto numa massa contínua (mar, lago, rio, poça) como numa superfície úmida (planta, solo), onde, pela influência de uma energia externa, a água passa do estado líquido para o de vapor, num processo denominado de evaporação (PEREIRA et al., 1997)

Em áreas vegetadas, o total de chuva que cai sobre a vegetação é subsequentemente distribuído, de forma que parte da chuva fica temporariamente retida na massa vegetal e retorna à atmosfera em forma de vapor; esse processo é chamado de perda por interceptação (MOURA et al., 2009). Por outro lado, a chuva pode transpassar a vegetação e chegar ao solo, e o total de chuva que atinge o solo é denominado de precipitação efetiva (OLIVEIRA JUNIOR & DIAS, 2005).

A precipitação efetiva pode ser proveniente de chuvas que alcançam o solo por diferentes caminhos: pelo gotejamento das folhas e galhos, pelo escoamento sobre galhos e troncos ou de parcela de chuva que chega ao solo sem esbarrar na vegetação (precipitação interna livre). A soma da precipitação interna livre com o montante que goteja das folhas e galhos é chamada de precipitação interna (DAVID et al., 2005).

A interceptação das chuvas é reconhecida como um processo hidrológico de considerável importância, não só na gestão dos recursos hídricos, mas também no contexto das mudanças climáticas (ARNELL, 2002). Por ser fortemente influenciada pelas condições da vegetação, a

interceptação é um item importante a ser considerado no gerenciamento da água, pois é um componente do balanço hídrico passível de manejo (GÊNOVA et al., 2007).

O conhecimento da vegetação predominante na bacia e as consequências hidrológicas causadas pela variação na cobertura vegetal são essenciais no processo de quantificação da interceptação vegetal e no entendimento do comportamento hídrico dessa bacia (VIEIRA&PALMIER, 2006).

Devido às dificuldades de medição, a maneira mais comum de se determinar as perdas por interceptação é através de investigações empíricas, de forma indireta, onde são medidos os processos de entrada (precipitação total) e saída (precipitação interna e escoamento pelo tronco). A diferença entre esses processos é o que fica temporariamente retida na vegetação e retorna à atmosfera (CHAFFE, 2009). Na Figura 1 está apresentado um esquema mostrando os processos de repartição da chuva.

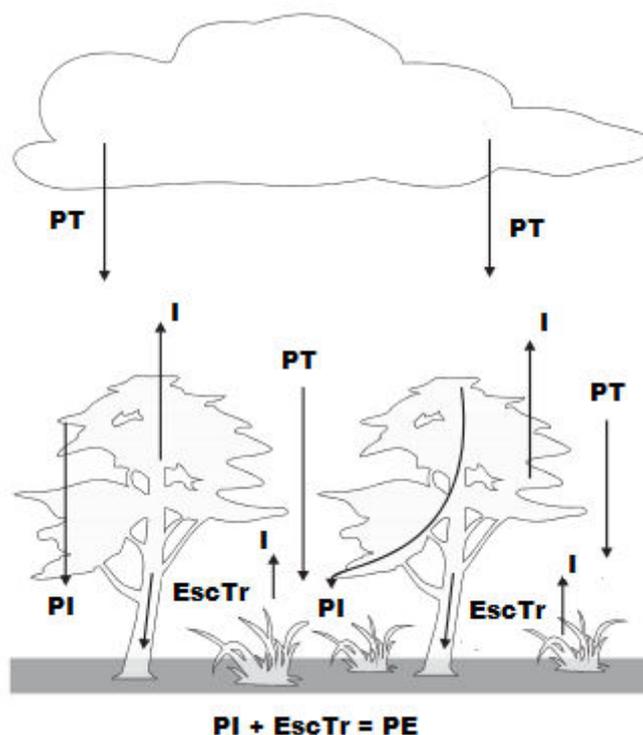


Figura 1. Processos de repartição das chuvas. PT – precipitação; PI – precipitação interna ou sob a vegetação; EscTr – escoamento pelo tronco; PE – precipitação efetiva; I – perda por interceptação.

A medição da precipitação interna geralmente é feita por calhas ou grande número de pluviômetros. Esses pluviômetros muitas vezes são construídos artesanalmente com tubos de PVC, ou simplesmente, usa-se algum recipiente para captar a chuva, a fim de reduzir os custos de implantação, devido à grande quantidade que deve ser utilizada (LIU & ZHAO, 2009; MOURA et al., 2009; SILVA et al., 2009; RODRIGUEZ, 2009;).

Para medir a quantidade de água que escoar pelo tronco, usa-se uma estrutura aderida ao tronco, de forma que possa desviar toda a água que nela chega para um determinado recipiente armazenador. Essas estruturas podem ser construídas com mangueiras cortadas longitudinalmente e fixadas com pregos e grampos nos troncos sob a forma de espiral, sendo vedada a interface mangueira/tronco com silicone, massa para calafetar ou outro tipo de material semelhante (LIMA & LEOPOLDO, 1999; MARIN et al., 2000; MOURA et al., 2009); também podem ser construídas com espuma de poliuretano (ARCOVA et al., 2003 e OLIVEIRA JÚNIOR, 2006;). Na Figura 2 estão apresentados dois esquemas de sistema coletor de escoamento pelo tronco.

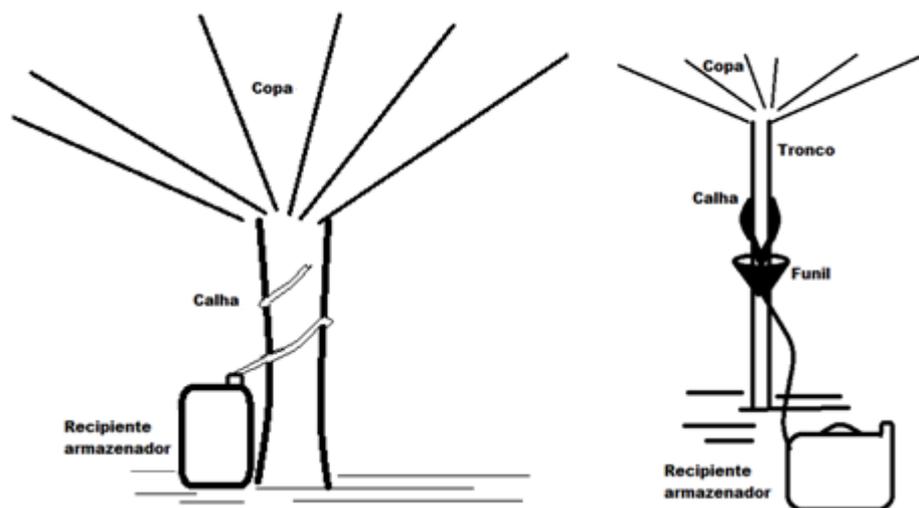


Figura 2. Sistemas coletores de escoamento pelo tronco

O escoamento pelo tronco, muitas vezes, representa um parcela muito pequena da chuva, com valores relativos abaixo de 2% (FRANKEN et al., 1982; LEOPOLDO et al., 1987; LLOYD & MARQUES, 1988; UBARANA,

1996;. VALENTE et al., 1997; VALENTE, 1999;ARCOVA et al., 2003;DIETZ et al., 2006;ZHANG et al., 2006;CUARTAS et al., 2007;PARK & CAMERON, 2008;HERBST et al., 2008;MARIN & MENEZES, 2008;SHANCHNOVICH et al., 2008;MOURA et al., 2009;SOUSA et al., 2011). Por representar uma pequena porção da chuva, juntamente com a dificuldade de se instalar e manter o sistema de coletas, alguns pesquisadores optaram por não implementar esse sistema e, conseqüentemente, não considerar sua participação no cálculo da perda por interceptação, como constatado nos trabalhos de Ferreira et al. (2005), Thomaz (2005) e Murakami (2007).

Apesar de alguns autores terem encontrados pequenos valores relativos de escoamento pelo tronco, não se pode generalizar para todas as áreas e vegetações, pois, em contraste a esses autores, em alguns trabalhos foram apresentados valores percentuais de escoamento pelo tronco acima de 2% da precipitação, chegando até ao extremo de 42% (AISAH et al., 2012; LIU&ZHAO, 2009; MEDEIROS et al. 2009; RODRIGUES, 2009; GERMER et al., 2006;ABOAL et a., 1999; SLATYER, 1965).

2.3 Modelos de perda por interceptação

Na tentativa de se estimar a perda por interceptação, os componentes desse processo têm sido medidos e modelados para diferentes tipos de vegetação, com ênfase na vegetação florestal, e com a aplicação de diferentes modelos (MUZYLO et al., 2009). O primeiro a descrever e apresentar resultados e equações de um modelo conceitual para descrever o comportamento da interceptação vegetal foi Horton (1919), que relacionou o volume interceptado durante uma enchente com a capacidade de interceptação da vegetação e a taxa de evaporação (TUCCI, 2009). Contudo, até o início dos anos setenta, a perda por interceptação foi estimada usando-se relações derivadas empiricamente com a precipitação total, enfatizando a característica da espécie dependente do processo de interceptação (MUZYLO et al., 2009).

A generalidade destas relações correspondia a modelos de regressão linear entre a precipitação total e a perda por interceptação, embora, em alguns casos, a interceptação fosse simplesmente expressa como uma percentagem da precipitação total (PEREIRA, 2009).

Zink (1967) efetuou uma revisão de estudos de interceptação, apresentando vários exemplos de relações empíricas. No estabelecimento de estas relações, os modelos iniciais privilegiaram o uso da quantidade de precipitação em detrimento de outras variáveis, como a intensidade e a duração da precipitação e do intervalo de tempo entre chuvas. Também as características estruturais da vegetação que condicionam a perda por interceptação eram, em geral, ignoradas.

Vários trabalhos evidenciaram as relações empíricas entre a perda por interceptação, ou os componentes do processo (precipitação interna, escoamento pelo tronco e precipitação efetiva), com a precipitação total. É possível mencionar alguns trabalhos que destacam essa relação empírica.

Sousa et al. (2011) realizaram estudo no Parque Estadual da Serra do Mar, Cunha – SP, em um plantio de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) com 30 anos de idade, com árvores entre 15 e 20 metros de altura, com presença de sub-bosque pouco desenvolvido. Os autores observaram forte correlação linear da precipitação com a precipitação interna, independente da época do ano, enquanto que para o escoamento pelo tronco a correlação foi considerada forte apenas na época das chuvas. Já para a interceptação a proporção da variação foi fraca nos dois períodos.

Rodrigues (2009) realizou estudo na microbacia hidrográfica do córrego da Barra Grande, município de José Bonifácio, SP, na vegetação transicional entre o Bioma Cerrado e o Bioma Mata Atlântica. Foi verificado que a precipitação total tem forte correlação linear com todos os processos de repartição das chuvas.

Moura et al. (2009) realizaram estudo na Bacia do Prata, Recife – PE, em uma remanescente de floresta de Mata Atlântica. Os resultados obtidos pelos autores mostraram forte correlação linear entre a precipitação e a precipitação interna, o escoamento pelo tronco e o escoamento pelo sub-bosque.

Ferreira et al. (2005) realizaram estudo em uma área de floresta de terra firme na Amazônia Central submetida à extração seletiva de madeira, de 1994 a 1996. Nesse estudo não foi medido o escoamento pelo tronco. Os

autores apresentaram forte correlação linear entre a precipitação e a precipitação interna.

Oliveira Júnior & Dias (2005) realizaram estudo na Estação Experimental de Pesquisa, Treinamento e Educação Ambiental Mata do Paraíso, situada no município de Viçosa, MG. Os autores observaram forte correlação linear entre a precipitação total e os processos de repartição das chuvas.

Thomaz (2005) realizou estudo em Guarapuava no Estado do Paraná, na vegetação de capoeira e floresta secundária. Para quantificação da perda por interceptação, considerou-se apenas a precipitação e a precipitação interna, que apresentaram forte correlação.

Arcova et al. (2003) realizaram estudo em uma microbacia experimental no Parque Estadual da Serra do Mar, a leste do Estado de São Paulo, coberta por uma vegetação de Mata Atlântica secundária, devido à exploração madeireira ocorrida no passado. Nesse estudo, observou-se forte correlação linear entre a precipitação total e a precipitação interna, o escoamento pelo tronco e a perda por interceptação.

Lima e Leopoldo (1999) realizaram estudo na Fazenda Experimental São Manuel, pertencente à Faculdade de Ciências Agrônomicas, Campus de Botucatu/UNESP, Estado de São Paulo, em uma mata ciliar. Foi observada forte correlação linear da precipitação total com a precipitação interna e com o escoamento pelo tronco. Na perda por interceptação, registrou-se forte correlação potencial com a chuva.

No início dos anos setenta, Rutter et al. (1971) publicaram um modelo conceitual para descrever a perda por interceptação com o processo dirigido pela evaporação. Posteriormente, Rutter et al. (1975) publicaram a versão completa do modelo, inserindo os componentes do escoamento pelo tronco. Na base conceitual do modelo, a quantidade de água retida em cada instante resultou do balanço contínuo entre a precipitação interceptada pelas copas e a água que se perde por drenagem e por evaporação. A organização conceitual do modelo de Rutter está apresentada na Figura 3.

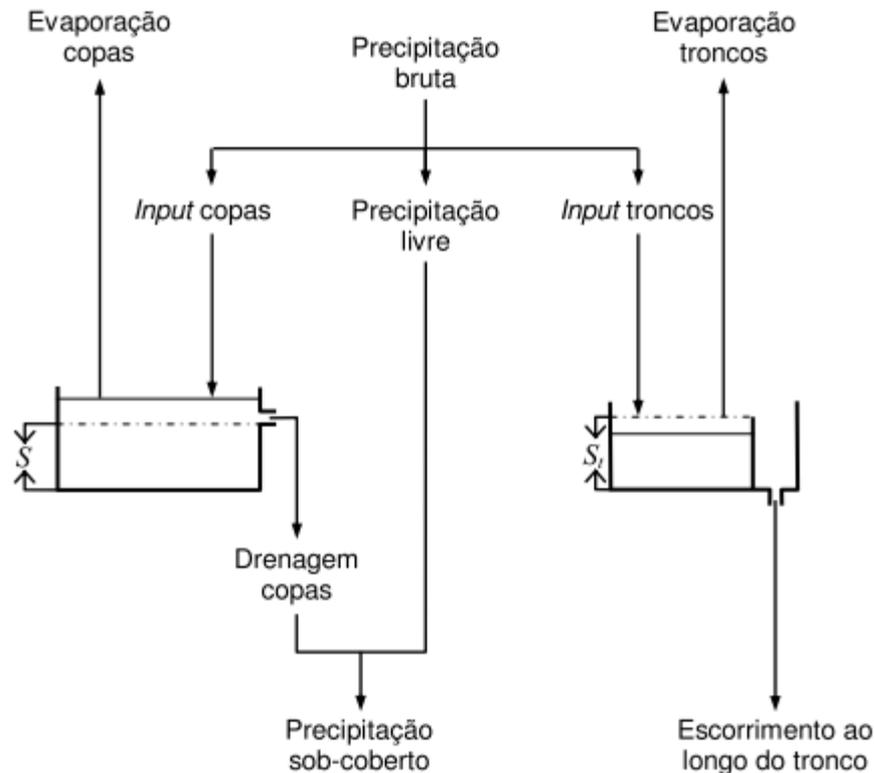


Figura 3. Estrutura conceitual do modelo de Rutter. Adaptado de Gash e Morton (1978)

No final dos anos setenta, Gash (1979) propôs um modelo de interceptação da chuva que é essencialmente uma forma analítica do modelo de Rutter. O modelo de Gash demonstrou que a evaporação da chuva interceptada pode ser estimada pela estrutura florestal, evaporação média, taxa de chuva e pela chuva padrão. Esse modelo de Gash é uma simplificação do modelo de Rutter que incorpora algumas características simples de modelos empíricos de regressão linear dentro do fundo conceitual mais rigoroso do modelo de Rutter.

Para aplicação do modelo, Gash precisou admitir algumas simplificações:

- a) O verdadeiro padrão de precipitação pode ser representado por uma série de chuvas discretas, cada uma compreendendo três fases distintas: 1ª) fase de umedecimento, desde o início da chuva até o momento em que a cobertura vegetal está completamente saturada; 2ª) fase de saturação e 3ª) fase de secagem, desde o fim da chuva até a copa e os troncos estarem completamente secos;

- b) As condições meteorológicas que prevalecem nas duas primeiras fases de uma chuva são consideradas semelhantes e valores médios da intensidade de chuva e da taxa de evaporação, para condições de cobertura vegetal saturada, são calculados para todo o período de simulação e aplicados na forma generalizada para todo evento de chuva individual. Assume-se que a cobertura vegetal e os troncos secam completamente entre eventos de chuva.

Em 1995, Gash et al. (1995) revisaram o modelo analítico de Gash. As equações originais foram reavaliadas levando em conta os novos pressupostos. A estrutura básica do modelo é semelhante à do original, sendo que os cálculos deixam de ser referenciados à área total e passam a ser realizados à proporção de área coberta relativamente à área total. Outra suposição é que o escoamento pelo tronco é desviado para o tronco somente após a copa estar totalmente saturada.

Maiores detalhes do desenvolvimento conceitual do modelo de Gash estão apresentados no ANEXO I.

Várias pesquisas foram realizadas com a aplicação do modelo de Gash, onde podemos citar:

Asdak et al. (1998) realizaram estudo em floresta tropical na Indonésia, considerando áreas onde as árvores são conectadas entre si, e áreas onde as árvores não são conectadas. As perdas por interceptação foram estimadas pelo modelo modificado de Rutter e pelo modelo original e revisado de Gash. Os autores concluíram que, além de outras, o modelo de Gash é conceitualmente forte o suficiente para ser aplicado nessas condições de floresta tropical úmida, e que o modelo funciona adequadamente para longos períodos. O modelo original de Gash superestimou os dados observados em 65%, enquanto que o modelo revisado superestimou em apenas 14%.

Aboal et al. (1999) realizaram estudo em uma floresta temperada nas montanhas Aguas Garcías, nas Ilhas Canárias. As perdas por interceptação observadas foram comparadas com as perdas estimadas pelo modelo de Rutter e pelo modelo de Gash. Na ocasião, os autores observaram que as estimativas obtidas pelo modelo de Gash superestimaram os dados

observados em apenas 2%. Aplicando-se o modelo de Gash para um período de 30 anos (1967 – 1997), observou-se que a perda por interceptação média correspondeu a 30% da precipitação total, tendo como valor máximo 41%, registrado no ano de 1995.

Carlyle-Moses&Price (1999) realizaram estudo em uma vegetação florestal no Sul de Ontário, Canadá. Os autores avaliaram os modelos analíticos original e o revisado de Gash. Ambos os modelos simularam os fluxos de perda por interceptação, precipitação interna e escoamento pelo tronco, sugerindo que eles possam ser apropriados para futuras aplicações com este tipo de floresta. O modelo revisado de Gash é recomendado para futuras aplicações porque ele é fisicamente mais consistente.

Bryant et al. (2005) realizaram estudo na reserva militar FortBenning, localizado no sudoeste da Geórgia nos Estados Unidos. Nesse estudo, os autores tinham como objetivo determinar os parâmetros necessários para aplicação do modelo analítico revisado de Gash, usar o modelo para estimar a perda por interceptação e comparar com os resultados medidos em cinco tipos de florestas e densidades de copa e explorar a influência das mudanças sazonais das características da copa nas perdas por interceptação. Em relação ao modelo, concluiu-se que o modelo analítico revisado de Gash foi capaz de prever as perdas por interceptação para as comunidades florestais estudadas, contanto que a cobertura vegetal seja apropriadamente ajustada.

Zhang et al. (2006) realizaram estudo na floresta Shaoshan, localizada no Sul da China. Os resultados mostraram que o modelo original de Gash superestimou os dados observados em 17,2%, enquanto que o modelo revisado superestimou os dados observados em apenas 7%.

Carlyle-Moses&Price (2007) realizaram estudo na Sierra Madre Oriental, Nordeste do México. Os autores avaliaram o modelo analítico de Liu e o modelo revisado de Gash. Na ocasião, os autores usaram parâmetros obtidos da literatura e parâmetros obtidos durante o período de estudo. A perda por interceptação estimada pelo modelo revisado de Gash com os parâmetros obtidos da literatura subestimou os valores observados em 34%, enquanto que, quando se usou os parâmetros obtidos durante o período de estudo, o modelo superestimou os dados observados em 3%.

Cuartas et al. (2007) realizaram estudo na Reserva Biológica Cuieiras, do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA). Os autores compararam os resultados estimados pelos modelos de Rutter e de Gash reformulado, com observações na reserva. As estimativas geradas pelo modelo de Gash subestimaram os valores observados em aproximadamente 12%.

Embora os modelos originais ou revisados de Rutter e de Gash sejam os mais utilizados no mundo, vale destacar outros modelos de perda por interceptação (MASSMAN, 1983; MULDER, 1985; CALDER, 1986; LIU, 1988; LIU, 1997; XIAO et al., 2000; ZENG et al., 2000; MURAKAMI, 2007). Alguns desses modelos também foram revisados (SELLERS & LOCKWOOD 1981; CALDER, 1996; VAN DIJK & BRUIJNZEEL, 2001).

Os modelos propostos por Massman (1983), Liu (1988), Liu (1997) e Xiao et al. (2000) são baseados no balanço hídrico contínuo da precipitação interceptada pelas copas e a perda por drenagem ou evaporação. Esses modelos são semelhantes ao modelo de Rutter, no entanto, apresentam algumas diferenças. O modelo de Massman difere pela sua equação de drenagem e evaporação. A diferença fundamental do modelo de Liu (1988) é que ele inclui várias camadas de copa e, com o progressivo umedecimento da copa, a água cai de uma camada para a outra. Posteriormente, esse modelo foi desenvolvido para lidar com coberturas vegetais heterogêneas (LIU & LIU, 2008). O modelo de Liu (1997) apresenta diferente forma de lidar com a interceptação do tronco e umedecimento da copa, sendo desenhado estritamente para minimizar a quantidade requerida de dados de entrada (LIU, 2001). O modelo de Xiao foi desenvolvido para estimar a perda por interceptação em árvores simples, onde ele cobre toda a cobertura tri-dimensional da arquitetura da copa e assim requer parâmetros especiais da estrutura da copa.

Outros modelos foram desenvolvidos baseados em soluções analíticas, assim como o modelo de Gash, podendo-se destacar os modelos de Mulder (1985), Zeng et al. (2000) e Murakami (2007). Comparando com o modelo de Gash, o modelo de Mulder usa taxas de evaporação distintas para as duas primeiras fases consideradas no modelo de Gash (fase úmida) e para a terceira fase (fase seca), enquanto que o modelo de Zeng leva em consideração a

característica estatística da precipitação. Já o modelo de Murakami não distingue diferentes fases de eventos.

Na maioria das pesquisas, os modelos de predição de perda por interceptação foram aplicados em áreas com vegetação de florestas (MUZYLO et al., 2009). Poucos são estudos realizados em culturas agrícolas, como o de van Dijk (2001), que estudou a perda por interceptação e modelagem nas culturas de mandioca, milho e arroz.

No Brasil, a maior parte dos estudos relacionados à perda por interceptação também é realizada em ambientes florestais (VIEIRA & PALMIER, 2006; OLIVEIRA et al., 2008; MOURA et al., 2009; RODRIGUES, 2009;). Poucos são os estudos relacionados a culturas agrícolas, podendo se mencionar o realizado por Castilho (2000), que estudou a perda por interceptação na cultura da cana-de-açúcar. Raros também são os estudos que envolvem diferentes vegetações na mesma bacia hidrográfica.

Cada vegetação tem suas próprias características no contexto do balanço hídrico de uma bacia, interferindo de forma variada na quantidade de chuva que chega ao solo, ou, por outro lado, na quantidade de chuva que é interceptada e retorna à atmosfera por meio da evaporação. Gênova et al. (2007) observaram variações nas perdas por interceptação quando compararam diferentes modelos de plantios de mata ciliar.

O modelo de Gashé utilizado em diversas partes do mundo, sendo aplicado em diferentes regiões e tipos de vegetação, como por exemplo, em vegetações típicas de regiões semiáridas, facilmente encontradas no Estado de Pernambuco e, embora em pequena proporção, presente na bacia do Tapacurá. É possível mencionar trabalhos realizados em vegetação típica de regiões áridas e semiáridas:

Návar & Bryan (1990) estudaram a perda por interceptação e redistribuição de chuva em arbustos de *Diospyrus texana*, *Acacia farnesiana* e *Prosopis laevigata* em uma comunidade vegetal semiárida em Nuevo Leon, Nordeste do México, durante o verão de 1987. Foram selecionados 21 arbustos representativos da área de estudo que foram monitorados sob condições de chuva natural para avaliar a capacidade de interceptação e os padrões de

distribuição da água de chuva no solo. A precipitação que atravessa a folhagem foi medida por um conjunto de 6 recipientes (15 cm de diâmetro, 20 cm de altura e capacidade para 3,5 litros) fixos, instalados debaixo da vegetação de cada arbusto, a 10 cm acima do chão. Dois recipientes eram fixos na periferia da coroa, dois próximos ao talo e dois no ponto médio entre a periferia e o centro. A água escoada pelos caules era coletada por colarinhos de mangueira de jardim (24 cm de diâmetro) presas com cola de silicone que desembocavam em caixas coletoras com 3,5, 6,5 e 21 litros de capacidade. A precipitação total foi medida por pluviômetros padrão dispostos em duas estações climatológicas localizadas a 1,5 e 0,8 km da área experimental. Também foram fixados em clareiras próximas à área, três tambores com capacidade de armazenar 150 mm de chuva. Foram realizadas medidas diurnas da precipitação que atravessa a folhagem e do escoamento pelo caule sob condições de precipitação natural e, sob chuva simulada; o escoamento pelo caule foi medido a cada 5 minutos, por uma hora, com intensidade de chuva de 40 mm/h. Durante o período de análise, foram registrados 230 mm de chuva, ocorridos a partir de 17 eventos. A precipitação líquida média foi de 167,6mm dos quais 160,5 mm representaram a precipitação que atravessou a folhagem e 7,1mm o escoamento pelo caule. Foi desenvolvida uma equação de regressão para perda por interceptação (I) em relação à precipitação total (PT): $I = 0,620 + 0,220PT$, $r^2 = 0,75$, onde os valores de perda por interceptação variaram de 0,9 a 8,0mm ou, 21,7% a 62,1% da precipitação total. A perda por interceptação total para o período estudado atingiu 27,2% da precipitação total.

Marinho et al. (2002) realizaram estudo de perda por interceptação na vegetação da caatinga, no município de São João do Cariri – PB. Na ocasião, foi aplicado o modelo de Rutter et al. (1971). A vegetação da área era predominantemente composta por pastagem (capim mimoso), plantas arbóreas (Marmeleiro, Mucungo, Pinhão Branco), plantas lenheiras (Angico, Catingueira) e cactáceas (Facheiro, Palmatória, Palma Doce e Cardeiro). Os resultados mostraram que a precipitação interna correspondeu a 58% da precipitação total. Segundo os autores, os 42% restantes da precipitação deve corresponder às frações armazenadas na vegetação e nos galhos e troncos, evaporadas e escoadas ao longo dos troncos e galhos em direção as raízes das plantas.

Wang et al. (2005) realizaram estudo na região Sudeste do deserto Tengger, na China, com o objetivo de examinar a perda por interceptação de comunidades de arbustos xerófitas, e estimar a perda por interceptação na *Caraganakorshinskii* e *Artemisiaordosica*. A precipitação interna correspondeu por 64,4% da precipitação total na espécie *Caraganakorshinskii* e 66,4% na *Artemisiaordosica*. A perda por interceptação observada foi de 22,9% e 25,4% da precipitação total, respectivamente.

Marin & Menezes (2008) realizaram estudos no município de Esperança, Agreste paraibano, com o objetivo de quantificar a fração de chuva correspondente à precipitação interna, escoamento pelo tronco e perda por interceptação, além dos aportes de N, P e K. O estudo ocorreu num sistema agroflorestal com *Gliricidiasepium*. Nesse estudo, a precipitação interna correspondeu a 67% e o escoamento pelo tronco a 0,74% da precipitação total, conseqüentemente, a perda por interceptação foi de 32,26%.

Liu & Zhao (2009) realizaram estudo na bacia do rio Heihe, no deserto de Gansu, província da China, a fim de avaliar as características da partição das chuvas pela vegetação do deserto, analisar a influência da estrutura da copa e as características da partição das chuvas e revelar o efeito hidrológico pelo escoamento pelo tronco dessas espécies. As espécies estudadas foram *Haloxylonammmodendron*, *Tamarixramosissima*, *Elaeagnusangustifolia* e *Nitrariasphaerocarpa*. Os autores concluíram que o percentual de precipitação interna e escoamento pelo tronco aumentaram significativamente com o aumento das características das chuvas, considerando que o percentual de perda por interceptação diminuiu para todos esses parâmetros, exceto para velocidade média do vento, temperatura do ar e evaporação da copa. Por outro lado, a magnitude dessas diferenças, nas quatro espécies, foi afetada pela intensidade, quantidade de chuva e velocidade do vento. Parece não existir correlações significantes entre as características da copa e o percentual de precipitação interna para as espécies estudadas. No entanto, existe correlação significativa com o percentual de escoamento pelo tronco, exceto para altura da copa e ângulo da folha. Para o percentual de perda por interceptação, as correlações mais fortes foram com o índice de área foliar, ângulo do ramo, comprimento da copa e número de ramo. O escoamento pelo tronco favoreceu a infiltração da água para camadas mais profundas do solo, melhorando a fonte

de umidade disponível para suporte à sobrevivência da planta e ao crescimento sob condições áridas.

Medeiros et al. (2009) realizaram estudo sobre perda por interceptação em área coberta com vegetação de caatinga, na bacia experimental de Aiuaba, no Nordeste brasileiro. Nesse estudo, foi avaliada a perda por interceptação e o desempenho do modelo de Gash. As espécies mais comuns encontradas na área de estudo foram *Bauhinia cheilantha*, *Croton floribundus* Spreng., *Croton nepetifolius* Baill., *Maprounea guianensis* Aubl. e *Machaerium* sp. Os resultados mostraram que a precipitação interna, o escoamento pelo tronco e a perda por interceptação, representam 81%, 6% e 13% da precipitação total, respectivamente. O modelo de Gash apresentou boa concordância com os valores medidos em simulações de períodos longos. O erro acumulado na estimativa da perda por interceptação foi de 9%.

Zhang et al. (2009) realizaram estudos no deserto Tengger, localizado na China. O estudo objetivou analisar as relações da perda por interceptação e precipitação interna com a estrutura da copa e estimar a capacidade de armazenamento da copa e o coeficiente de precipitação interna livre. As espécies estudadas foram *Caragana korshinskii* e *Artemisia ordosica*. Os autores concluíram que a interceptação mudou a distribuição das chuvas e reduziu o rendimento de água nas áreas estudadas. A espécie *Caragana korshinskii*, com maior volume de copa e índice de área foliar, interceptou mais chuvas que a espécie *Artemisia ordosica*, só que a relação entre a perda por interceptação e a precipitação interna com as propriedades da chuva, para ambas as espécies, mostraram padrões similares, porém com diferentes magnitudes. O grau de influência do volume da copa na perda por interceptação relativa e na precipitação interna relativa foi maior que o grau de influência do índice de área foliar. A estrutura da copa influenciou a capacidade de armazenamento da copa e o coeficiente de precipitação interna livre. Esses parâmetros se mostraram diretamente e inversamente proporcional ao índice de área foliar, respectivamente.

Wang et al. (2012) realizaram estudo com plantas oriundas do deserto Tengger, na China. O objetivo do estudo foi quantificar a dinâmica da resposta de armazenamento da chuva para a variação temporal da baixa intensidade de

chuva. As espécies estudadas foram *Caraganakorshinskii*, *Hedysarumscoparium* e *Artemisiaordosica*. Nesse estudo, as diferentes intensidades de chuva foram proporcionadas por um simulador de chuva. Os resultados obtidos destacaram o alto nível da capacidade dos arbustos armazenarem água na copa em regiões desertas. A capacidade de armazenamento da copa variou entre diferentes espécies e intensidades de chuva.

Outras pesquisas também foram realizadas em vegetações típicas de ambientes árido ou semiáridos (WEST e GIFFORD, 1976; NÁVAR & BRYAN, 1994; DUNKERLEY, 2000; CARLYLE-MOSES, 2004;).

Na bacia do Tapacurá, a distribuição relativa dos atuais padrões de uso e ocupação do solo evidencia o caráter transicional de seu meio geográfico, parcialmente inserido na Zona da Mata e no Agreste, onde 37,6% da superfície total são policulturas e horticulturas, 12,4% cana-de-açúcar e 6,4% cobertura florestal - mata, caatinga, capoeira e reflorestamento (BRAGA, 2001).

Na bacia do Tapacurá, a cultura do limão é explorada por pequenos produtores, sendo encontrada também na Estação Experimental do IPA. A cultura do café trata-se de uma variedade desenvolvida pelo IPA, que está apresentando boa adaptação às condições locais e que, futuramente, talvez possa ser explorado comercialmente pelos agricultores. A vegetação florestal representa aproximadamente 6% da cobertura vegetal da bacia. Esta, além de ser caracteristicamente diferente das policulturas pela própria estrutura morfológica, ela é composta por várias espécies vegetais inseridas numa mesma área.

Devido à importância regional e a diversificação das atividades relacionadas ao uso e ocupação do solo existente, a bacia do rio Tapacurá necessita de estudos que levem em consideração a atuação de cada cobertura vegetal frente aos processos hidrológicos, principalmente nas perdas por interceptação.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Área de estudo

O presente estudo foi desenvolvido na bacia do rio Tapacurá, no município de Vitória de Santo Antão. A bacia ocupa uma área de 470,5 Km² e tem precipitação anual média de 1025 mm. O clima dominante é o As', clima quente e úmido do tipo pseudo tropical, de acordo com a classificação de Köppen. Na Figura 4, está apresentado o Estado de Pernambuco e a localização das áreas experimentais na bacia do Tapacurá.

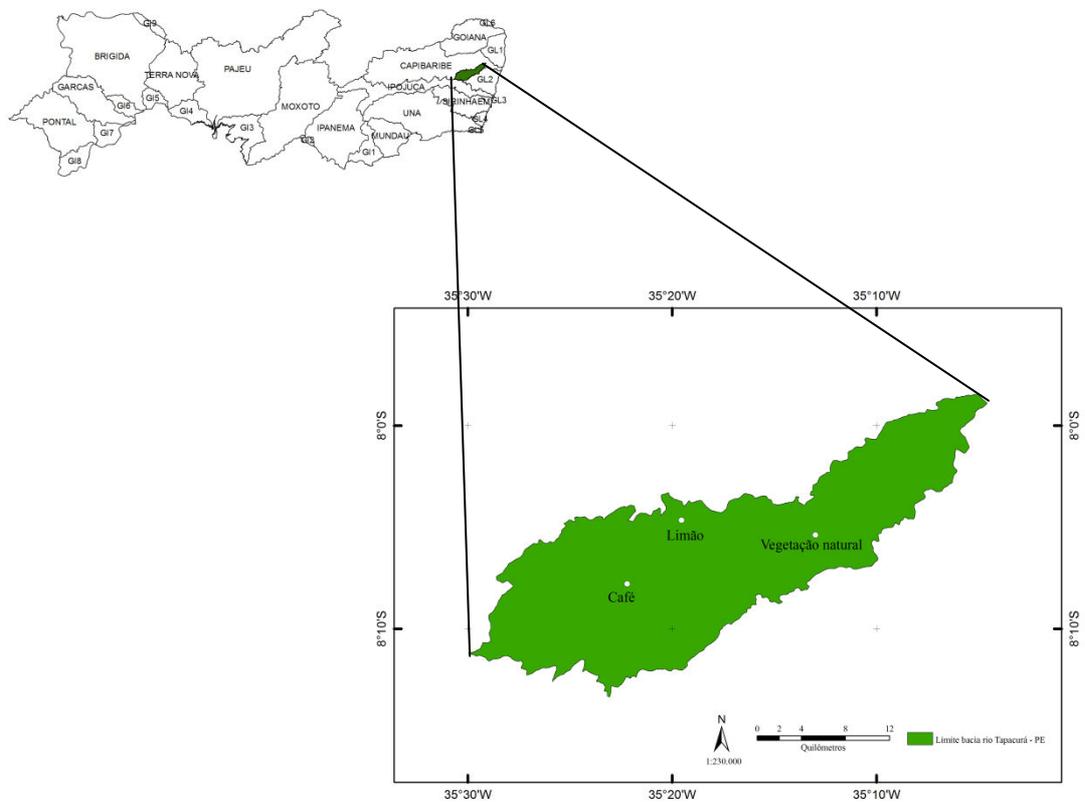


Figura 4. Estado de Pernambuco com destaque para as áreas experimentais localizadas na bacia do Tapacurá.

3.2 Vegetações estudadas

3.2.1 Cultura do café (*Coffeacaneophora* Pierre ex Froehner)

O cafezal abrange uma área 7200 m², com espaçamento de 2,0 m x 1,5 m; e tamanho das parcelas de 1800 m², totalizando 1660 plantas. Os materiais utilizados foram provenientes de propagação vegetativa por estacas do Instituto Capixaba de Pesquisas Agrícolas (INCAPER), Clone 2/Var. Vitória 12; Clone

2/Var. Vitória 2; Clone 3/Precoce e Clone 7/Var. 8121/Clone 3/Var. 8141 Robustão. A altura média das plantas é de 2,7 m e a projeção horizontal da copa é de aproximadamente 4 m².

Para medir a precipitação total, foi instalado um pluviômetro automático de balança a 30 m de distância da área experimental. Ao lado do pluviômetro automático, colocou-se um pluviômetro confeccionado artesanalmente com tubo de PVC de 150 mm de diâmetro, funil e garrafa PET de 2,5 litros (Figura 5).



Figura 5. Pluviômetros utilizados para medir a precipitação total

Foram selecionadas três plantas de café Conilon, as quais apresentavam diferentes alturas (2,45 m, 2,94 m e 2,7 m) e áreas de copa (2,8 m², 6,0 m² e 3,6 m²), o que permitiu avaliar os processos entre plantas com diferentes dimensões. Foram instalados nove interceptômetros para quantificação da precipitação interna, sendo três em cada planta, a uma altura de 50 cm do solo, devido à baixa estatura do cafeeiro. A precipitação interna média de cada planta foi obtida pela média aritmética dos três interceptômetros correspondentes e a precipitação média geral foi obtida pela média aritmética da precipitação interna das três plantas.

Na Figura 6 são mostrados os interceptômetros confeccionados artesanalmente com garrafas PET, redução de PVC de 150 para 100 mm e funil, nos três cafeeiros selecionados.



Figura 6. Interceptômetros utilizados para quantificação da precipitação interna na cultura do café

Devido ao fato do cafeeiro apresentar vários caules, para quantificação do escoamento pelo tronco, foram selecionados três troncos por planta. O escoamento desses três troncos foi direcionado para um único recipiente armazenador. O total armazenado foi dividido por três, obtendo-se o escoamento médio de cada tronco, e o escoamento total foi obtido multiplicando-se o escoamento médio pelo número de troncos da planta correspondente.

O sistema para captação do escoamento pelo tronco foi semelhante ao utilizado por Moura et al. (2009), composto basicamente por uma calha, construída com massa de moldar, funil, mangueira e recipiente armazenador, conforme Figura 7.



Figura 7. Sistema para coletar escoamento pelo tronco na cultura do café.

3.2.2 Cultura do limão

Os limoeiros estudados são enxertos de limão Tahiti (*Citrus latifolia* Tanaka) e ocupam uma área de aproximadamente 2500 m² com espaçamento de 5 m x 5 m entre plantas, sendo a altura média do plantio de 2,3 m.

Instalou-se um sistema com a configuração semelhante à empregada na cultura do café, sendo selecionadas três plantas com diferentes dimensões e utilizando-se três interceptômetros por planta, totalizando nove dispositivos de coleta. O modelo dos interceptômetros foi o mesmo utilizado para o cafeeiro (Figura 8).



Figura 8. Interceptômetros instalados na cultura do limão.

Para quantificação do escoamento pelo tronco, o sistema foi semelhante ao do cafeeiro, com a diferença de que o total armazenado foi proveniente de um único tronco (Figura 9).



Figura 9. Sistema para coletar escoamento pelo tronco na cultura do limão

3.2.3 *Vegetação natural (Fragmento de mata)*

A vegetação natural (fragmento de mata) ocupa uma área de aproximadamente 8000 m², chegando a atingir alturas superiores a 20m e diâmetro à altura do peito (DAP) acima de 50 cm. Os interceptômetros foram semelhantes aos utilizados no cafeeiro e no limoeiro. No entanto, como a área de captação (redução de PVC) ficou a uma altura de 1,5m do solo, o recipiente armazenador (garrafa PET) foi conectado ao funil por uma mangueira, semelhante ao utilizado por Moura et al. (2009), conforme Figura 10.



Figura 10. Interceptômetros instalados na mata.

Foram instalados 30 interceptômetros, distribuídos sob a forma de malha, com espaçamento de 10 m x 10m, conforme Figura 11.

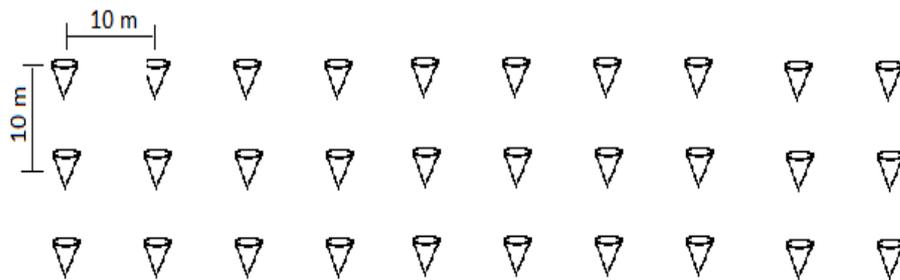


Figura 11. Disposição dos interceptômetros no interior da mata.

O valor da precipitação interna foi obtido pela média aritmética das leituras dos interceptômetros.

Para quantificar o escoamento pelo tronco, as árvores foram classificadas como sendo do estrato superior, que são as árvores de grande porte, e do sub-bosque, que são as árvores menores ou arbustos, mas com altura superior à altura dos interceptômetros. Isso foi feito porque a chuva após transpassar a copa das árvores do estrato superior pode, ainda, ser interceptada pelas copas das árvores do sub-bosque e escoar pelo troco até chegar ao solo.

O sistema de captação de escoamento pelos troncos das árvores do sub-bosque foi semelhante ao utilizado no cafeeiro e no limoeiro, conforme Figura 12.



Figura 12. Sistema de captação de escoamento pelo tronco no sub-bosque

Para as árvores do estrato superior, o sistema foi constituído de mangueira de 3/4", funil e recipiente armazenador. A mangueira foi cortada longitudinalmente, para obter o formato de calha, e fixada no tronco das árvores sob a forma de espiral, de modo que fosse possível coletar o escoamento em qualquer lado do tronco, conforme Figura 13.



Figura 13. Sistema para coletar escoamento pelo tronco das árvores do estrato superior.

Para transformar o volume coletado em lâmina de escoamento, foi utilizada a mesma metodologia usada por Marin et al. (2000) e Moura et al. (2009), onde a área de captação corresponde à área definida pela projeção horizontal da copa (Figura 14). Para definir a área de projeção, tomou-se como base o tronco da árvore, por onde traçaram-se quatro “diâmetros”, de tal forma que as extremidades desses “diâmetros” coincidisse com as extremidades da copa naquela direção. Primeiro, mediu-se dois “diâmetros” perpendiculares entre si, formando quatro ângulos de 90°, depois, mediu-se um “diâmetro” dividindo o ângulo de 90° ao meio e, por fim, mediu-se o outro “diâmetro” perpendicular a este último, o qual, conseqüentemente, dividiu o outro ângulo de 90° ao meio. Ligando-se as extremidades de cada “diâmetro”, são obtidas as sub-áreas em forma de triângulos. A soma das oito subáreas (triângulos A1 a A8) equivale à área de captação da copa. A lâmina escoada foi determinada pela relação entre o volume medido em cada árvore (mm^3) e a área de captação da copa correspondente (mm^2).

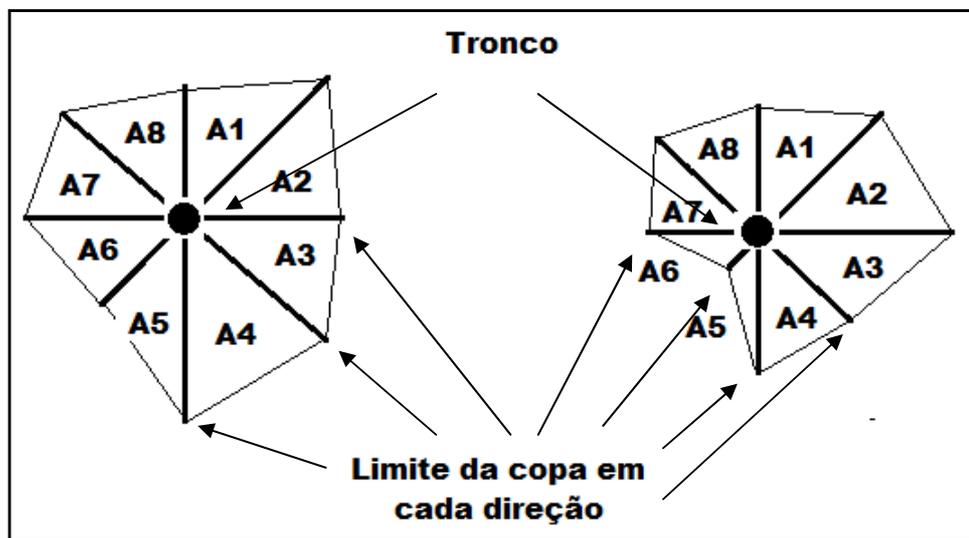


Figura 14. Projeção horizontal da copa de duas árvores divididas em subáreas.

3.3 Determinação da interceptação

3.3.1 Precipitação total

A precipitação total, ou precipitação em aberto, foi obtida por meio de pluviômetros automáticos instalados próximos de cada vegetação estudada.

3.3.2 Perda por interceptação

Foi obtida indiretamente pela diferença entre a precipitação total e a soma da precipitação interna com o escoamento pelo tronco, conforme as equações 1 e 2.

$$I = PT - (PI + EscTr)(1)$$

$$I = PT - (PI + EscTr + EscSub)(2)$$

em que I – perda por interceptação (mm); PT – precipitação total (mm); PI – precipitação interna (mm); EscTr – escoamento pelo tronco (mm); EscSub – escoamento do sub-bosque (mm).

3.3.3 Modelo linear

A perda por interceptação estimada - I_{lin} (mm) foi determinada da mesma forma que se obteve I (mm), ou seja, pela diferença entre PT (mm) e a soma de PI (mm) com EscTr (mm), sendo esses dois processos estimados por equações lineares obtidas de suas relações com PT (mm), conforme equação:

$$I_{lin} = PT - (PI_{lin} + EscTr_{lin})(3)$$

em que I_{lin} é a perda por interceptação estimada (mm), PI_{lin} é a precipitação interna estimada pelo modelo linear $PI_{lin} = aPT + b$ (mm) e $EscTr_{lin}$ - escoamento pelo tronco estimado pelo modelo linear $EscTr_{lin} = aPT + b$ (mm).

3.3.4 Modelo de Gash

Para estimar a perda por interceptação pela vegetação, foi utilizado o Modelo original de Gash (GASH, 1979) e o modelo revisado (GASH et al., 1995). Nesse modelo, a chuva é considerada como uma sucessão de eventos de chuva descontínuos, cada um com três fases distintas:

1. fase de umedecimento, do início da chuva até a cobertura vegetal estar saturada;

2. fase de saturação; e
3. fase de secagem, do final da chuva até a cobertura vegetal e os troncos estarem completamente secos.

As condições meteorológicas que prevalecem nas duas primeiras fases são as mesmas e valores médios de intensidade de chuva e taxa de evaporação, para condições de cobertura vegetal saturada, são calculadas para todo o período de simulação e aplicados na forma generalizada para todo evento de chuva individual. Assume-se que a cobertura vegetal e os troncos secam completamente entre eventos de chuva. A taxa de evaporação também é calculada pela equação de Penman-Monteith.

O modelo analítico de Gash requer prévia estimativa dos parâmetros estruturais da copa: coeficiente de precipitação interna livre (p), porção de chuva que é desviada para o tronco (p_t), capacidade de armazenamento da copa (S) e capacidade de armazenamento do tronco (S_t). A intensidade de chuva média e a taxa de evaporação média foram determinadas seguindo o mesmo procedimento usado por Gash (1979), assumindo que horas com chuva excedendo certo limiar são representativas das condições de copa saturada.

Os componentes do processo de interceptação do modelo original de Gash foram calculados como indicado na Tabela 1.

Componentes da interceptação

Quantidade de chuva necessária para saturar a copa - PT' (mm)

$$PT' = -\frac{\bar{R}}{\bar{E}} \cdot S \cdot \ln\left(1 - \frac{\bar{E}}{(1-p-p_t) \cdot \bar{R}}\right)$$

Perda por interceptação da copa - I_{copa} (mm)

Para m pequenas chuvas
insuficientes para saturar a
copa ($PT < PT'$)

$$I_{copa} = (1-p-p_t) \cdot \sum_{j=1}^m PT_j$$

Para n grandes chuvas
suficientes para saturar a
copa ($PT > PT'$)

$$I_{copa} = n \cdot (1-p-p_t) \cdot PT' + \frac{\bar{E}}{\bar{R}} \cdot \sum_{j=1}^n (PT_j - PT')$$

Perda por interceptação do tronco - I_{tronco} (mm)

Para q chuva capaz de
saturar o tronco ($PT > S_t/p_t$)

$$I_{tronco} = q \cdot S_t$$

Para m + n - q chuva que
não gera escoamento pelo
tronco ($PT < S_t/p_t$)

$$I_{tronco} = p_t \cdot \sum_{j=1}^{m+n-q} PT_j$$

\bar{R} – intensidade média de chuva; \bar{E} – taxa de evaporação média; p – coeficiente de precipitação livre; p_t – porção de chuva desviada para o tronco; S – capacidade de armazenamento da copa; S_t – capacidade de armazenamento do tronco.

3.3.4.1 Determinação dos parâmetros da cobertura vegetal

Para determinar os parâmetros da cobertura vegetal S, S_t , p_t e p, foram utilizados dados dos meses de julho a setembro de 2011. Considerou-se como sendo de um mesmo evento chuvas que ocorreram em um período menor que seis horas, de modo a garantir que no início de cada chuva a copa estivesse enxuta (VALENTE, 1999).

Determinação da capacidade de armazenamento da copa(S)

Foram selecionados eventos com altura de chuva maior que 3,0mm, assumindo que eventos dessa magnitude são suficientes para saturar a copa da vegetação. Seguindo a metodologia de Leyton et al. (1967), observou-se os eventos que apresentaram maior relação de PI/PT e adicionou-se a correlação PT x PI, investigando-se uma equação linear de ajuste do tipo $PT = aPI - b$. Assim, a capacidade de armazenamento de água na copa foi estimada como o valor simétrico da ordenada na origem da reta de regressão envolvente, nesse caso “b”.

Determinação da capacidade de armazenamento do tronco(S_t)e porção de chuva desviada para o tronco (p_t)

Utilizou-se o mesmo procedimento usado para determinar “S”, sendo substituída a precipitação interna pelo escoamento pelo tronco, no qual se gerou uma equação de regressão do tipo $PT = aEscTr - b$, onde “b” é o valor de “S_t” e “a” o valor de “p_t”.

Determinação do coeficiente de precipitação interna livre(p)

Foram selecionados eventos com altura de chuva menor ou igual a 1,0mm, uma vez que eventos dessa magnitude são considerados pequenos para saturar a copa da vegetação. Fez-se a regressão, sendo gerada uma equação de ajuste do tipo $PT = aPI + b$. O valor de “p” é a declividade da reta de regressão, nesse caso “a”, conforme Gash&Morton (1978).

O modelo revisado de Gash usa os mesmo parâmetros, com pequena modificação na sua base conceitual. Os componentes do processo de interceptação do modelo revisado de Gash encontram-se na Tabela 2.

Tabela 2. Componentes da interceptação do modelo analítico de Gash revisado

Componentes da interceptação	
Quantidade de chuva necessária para saturar a copa – PT' (mm)	
$PT' = -\frac{\bar{R}}{\bar{E}} \cdot S_c \cdot \ln\left(1 - \frac{\bar{E}_c}{\bar{R}}\right)$	
Perda por interceptação da copa – I_{copa} (mm)	
Para m pequenas chuvas insuficientes para saturar a copa ($PT < PT'$)	$I_{copa} = c \sum_{j=1}^m PT_j$
Para n grandes chuvas suficientes para saturar a copa ($PT > PT'$)	$I_{copa} = n \cdot c \cdot PT' + c \frac{\bar{E}_c}{\bar{R}} \cdot \sum_{j=1}^n (PT_j - PT')$
Perda por interceptação do tronco – I_{tronco} (mm)	
Para q chuva capaz de saturar o tronco ($PT > St/pt$)	$I_{tronco} = q \cdot S_{t,c}$
Para $m + n - q$ chuva que não gera escoamento pelo tronco ($PT < St/pt$)	$I_{tronco} = p_t \sum_{j=1}^{m+n-q} PT_j$
Os parâmetros de armazenamento S e S_t são definidos no modelo revisado como S_c e $S_{t,c}$, sendo $S_c = S/c$ e $S_{t,c} = S_t/c$, em que c é a proporção de área coberta relativamente à área total.	

Para calcular a taxa de evaporação média, foi utilizada a equação de Penman-Monteith, conforme Equação 4. Para aquisição dos dados necessários a aplicação da Equação 4, instalou-se uma estação meteorológica, contendo sensores para medir a velocidade e direção do vento, umidade relativa e temperatura do ar e radiação solar, além da precipitação (Figura 15).

$$E = \frac{\Delta R_n + \rho \cdot c_p \cdot D}{\lambda(\Delta + \gamma)} r_a \quad (4)$$

em que

E – taxa de evaporação ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$);

Δ – declividade da curva de pressão de vapor saturada ($\text{KPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$);

R_n -saldo de radiação ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$);

ρ – massa específica do ar ($\text{Kg} \cdot \text{m}^{-3}$);

c_p – calor específico do ar ($\text{MJ} \cdot \text{Kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$);

D - déficit da pressão de vapor (KPa);

r_a – resistência aerodinâmica ($\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$);

λ – calor de vaporização da água ($\text{MJ} \cdot \text{Kg}^{-1}$)

γ – constante psicrométrica ($\text{KPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$).



Figura 15. Estação meteorológica instalada na cultura do café.

A taxa de evaporação média \bar{E} e a intensidade média de chuva \bar{R} foram calculadas nos períodos em que a precipitação foi grande o suficiente para saturar a copa. Considerou-se que chuvas acima de 0,4 mm no período de uma hora seriam suficientes para manter a copa saturada.

Os parâmetros necessários para obtenção da taxa de evaporação média foram determinados pelas Equações 5 a 24.

Determinação da constante psicrométrica (γ)

$$\gamma = a.P(5)$$

em que “a” é um coeficiente que depende do tipo de ventilação do bulbo úmido ($a = 0,000662$) e P é a pressão atmosférica (KPa), podendo ser calculada segundo a expressão (ALLEN et al., 1998):

$$P = 101,3 \left(\frac{293 - 0,0065.z}{293} \right)^{5,26} (6)$$

em que z é a altitude da estação meteorológica (m).

Determinação do calor de vaporização da água (λ)

$$\lambda = 2,501 - 0,002361\bar{T}(7)$$

em que \bar{T} é a temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$)

Determinação do déficit da pressão de vapor (D)

$$D = e_s - e_a(8)$$

Em que e_s é a pressão de vapor na saturação (KPa) e e_a a pressão de vapor atual (KPa), calculados por:

$$e_s = 0,6108 * \exp\left(\frac{17,27*\bar{T}}{(\bar{T}+237,3)}\right) (9)$$

$$e_a = \frac{e_s * UR\%}{100}(10)$$

em que \bar{T} é a temperatura média do ar média ($^{\circ}\text{C}$); UR é a umidade relativa (%) e e_s é a pressão de saturação de vapor na temperatura média.

Determinação da declividade da curva de pressão de vapor saturada (Δ)

$$\Delta = \frac{4098 \left[0,6108 * \exp\left(\frac{17,27 * \bar{T}}{\bar{T} + 237,3}\right) \right]}{(\bar{T} + 237,3)^2} \quad (11)$$

ou

$$\Delta = \frac{4098 * e_s}{(\bar{T} + 237,3)^2} \quad (12)$$

em que \bar{T} é a temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$) e e_s é a pressão de saturação de vapor na temperatura média do ar.

Determinação do saldo de radiação (R_n) para períodos horários

$$R_n = R_{oc} + R_{ol} \quad (13)$$

em que R_{oc} é o saldo de radiação de onda curta ($\text{MJ.m}^2.\text{h}^{-1}$) e R_{ol} o saldo de radiação de onda longa ($\text{MJ.m}^2.\text{h}^{-1}$), sendo os mesmo obtidos por:

$$R_{oc} = (1 - \alpha) * R_s \quad (14)$$

em que α é o albedo da superfície (adimensional) e R_s a radiação solar global ($\text{MJ.m}^2.\text{h}^{-1}$) medida pelo piranômetro.

$$R_{ol} = \sigma * \left(\frac{T_{max,^{\circ}K}^4 + T_{min,^{\circ}K}^4}{2} \right) * (0,34 - 0,14\sqrt{e_a}) * \left(1,35 * \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35 \right) \quad (15)$$

em que σ é a constante de Stefan - Boltzmann (na base horária, $\sigma = 2,043.10^{-10}$ $\text{MJ.m}^2.\text{h}^{-1}$); T_{max} e T_{min} são as temperaturas do ar máxima e mínima ($^{\circ}\text{K}$), respectivamente, e R_{so} é a radiação solar a céu claro ($\text{MJ.m}^2.\text{h}^{-1}$), calculada segundo:

$$R_{so} = (0,75 + 2 * 10^{-5} * z) R_a \quad (16)$$

em que z é a altitude da estação meteorológica (m) e R_a é a radiação solar no topo da atmosfera ($\text{MJ.m}^2.\text{h}^{-1}$), dada por (ALLEN et al., 1998):

$$R_a = \frac{12 \cdot 60}{\pi} * G_{sc} * d_r [(\omega_2 - \omega_1) \text{sen}(\varphi) \cdot \text{sen}(\delta) + \cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot (\text{sen}(\omega_2) - \text{sen}(\omega_1))] \quad (17)$$

em que G_{sc} é a constante solar ($G_{sc} = 0,082 \text{ MJ.m}^2.\text{min}^{-1}$); d_r é a distância relativa inversa Terra – Sol (adimensional); ω_2 é o ângulo horário no final do período (rad); ω_1 é o ângulo horário no início do período (rad); φ é a latitude (rad); e δ é a declinação solar (rad), obtidos por:

$$d_r = 1 + 0,033 * \cos\left(\frac{2\pi * J}{365}\right) \quad (18)$$

$$\omega_1 = \omega - \frac{\pi \cdot t_1}{24} \quad (19)$$

$$\omega_2 = \omega + \frac{\pi \cdot t_1}{24} \quad (20)$$

em que t_1 é a duração do período considerado (h), 1 para períodos horários e 0,5 para períodos de 30 minutos; ω é o ângulo solar no momento em que ocorre o ponto médio do período considerado (rad).

$$\omega = \frac{\pi}{12} * \{[t + 0,06667(L_z - L_m) + S_c] - 12\} \quad (21)$$

em que t é a hora padrão no ponto médio do período considerado (h), para períodos de 13:00 às 14:00, $t = 13,5$; " L_z " é a longitude do centro da zona do tempo local ($-45^\circ = -0,7854 \text{ rad}$); " L_m " é a longitude da zona de medição ($-0,6173 \text{ rad}$) e " S_c " é a correção sazonal para o período solar (h).

$$S_c = 0,1645 * \text{sen}(2b) - 0,1255 * \cos(b) - 0,025 * \text{sen}(b) \quad (22)$$

Sendo,

$$b = \frac{2\pi \cdot (J - 81)}{364} \quad (23)$$

em que J é o dia sequencial do ano.

Determinação da resistência aerodinâmica (r_a)

$$r_a = \left(\frac{1}{K^2 * u} \right) \cdot \left[\ln \left(\frac{z-d}{z_0} \right) \right]^2 \quad (24)$$

em que, K é a constante de Van Karman = 0,41; u é a velocidade do vento média; z é a altura do anemômetro; d = 0,75h e $z_0 = 0,1h$, onde h é a altura da vegetação.

3.4 Estatística

Os dados de precipitação interna, escoamento pelo tronco e perda por interceptação das três vegetações foram relacionados com os dados de precipitação total de cada área. Foram realizadas análises de regressão a fim de se obter equações de ajuste em função da própria precipitação total. Os dados de perda por interceptação estimados foram relacionados com os observados.

Para testar a significância do coeficiente de correlação (r), usou-se a estatística de Student, conforme a seguinte equação:

$$t = \frac{r\sqrt{N-2}}{\sqrt{1-r^2}} \quad (25)$$

Em que r é o coeficiente de correlação e N é o número de pares de valores

Os valores de t calculados foram comparados com os valores de t das tabelas de distribuição de Student.

Para testar a significância das regressões através das variâncias, empregou a distribuição F de Fisher-Snedecor, usando-se a função regressão do programa Microsoft Excel (2007).

Para o limoeiro e o cafeeiro foram feitas análises de variância (ANOVA) entre as três plantas de cada cultura selecionadas para o estudo, a fim de se observar se existe ou não diferença entre as médias dos valores obtidos nas leituras individuais das plantas. O delineamento experimental foi o inteiramente casualizado. O programa usado para realização dos testes foi o Microsoft Excel 2007.

Para a mata, foi calculado o Erro Padrão da Média (EPM), em função do número de coletores (VIEIRA E PALMIER, 2006), definido por:

$$EPM = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}(26)$$

em que σ é desvio padrão da população e n o número de coletores.

A validação do modelo linear e do modelo de Gashfoi feita pelo Desvio Médio Normalizado (DMN) e pela Eficiência da Modelagem (EM), seguindo o mesmo procedimento adotado por Valente (1999). O primeiro permite comparar os valores simulados e os observados a um nível médio, isto é, considerando os desvios existentes na escala de todo o período de validação. O segundo compara os valores observados e estimados a nível individual, isto é, a uma menor escala temporal (VALENTE, 1999). Para tanto, utilizou-se as equações:

$$DMN = \frac{\bar{E} - \bar{O}}{\bar{O}}(27)$$

$$EM = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}(28)$$

em que E_i e O_i representam os valores estimados pelo modelo e observações, respectivamente; \bar{O} representa a média das observações.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Intercepção na cultura do café

4.1.1 Precipitação–café

Na Figura 16 estão representadas as normais climatológicas (1975 – 1993) da precipitação pluviométrica mensal do município de Vitória de Santo Antão, bem como, as precipitações mensais registradas no período maio de 2011 a setembro de 2012 na parcela experimental.

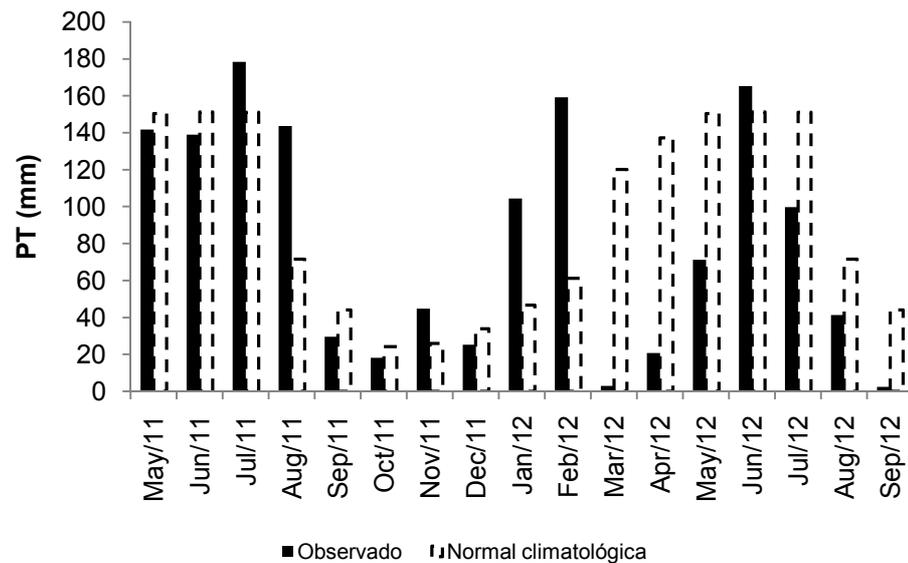


Figura 16. Precipitação mensal observada durante o período de estudo e a média histórica do município de Vitória de Santo Antão.

Observa-se que a precipitação em 2012 foi abaixo da média histórica, com exceção dos meses de janeiro, fevereiro e julho que foram os meses mais chuvosos na bacia. Nos meses de janeiro e fevereiro a precipitação observada foi bem acima da média. De maio a dezembro de 2011 foram registrados 725 mm e de janeiro a setembro de 2012, 663 mm. Nesses mesmos períodos, a média histórica foi igual a 652 mm e 934 mm, respectivamente.

Na pesquisa foram usados pluviômetros, automáticos e artesanais. Considerou-se que os registros do automático possuem maior precisão que os artesanais. Nesse sentido, avaliou-se a relação entre os registros pluviométricos dos dois equipamentos, para, caso haja necessidade, efetuar a correção dos registros dos pluviômetros artesanais. Na Figura 17 estão

representadas 78 leituras pluviométricas de registros realizados nos pluviômetros localizados, durante o período de julho de 2011 a setembro de 2012.

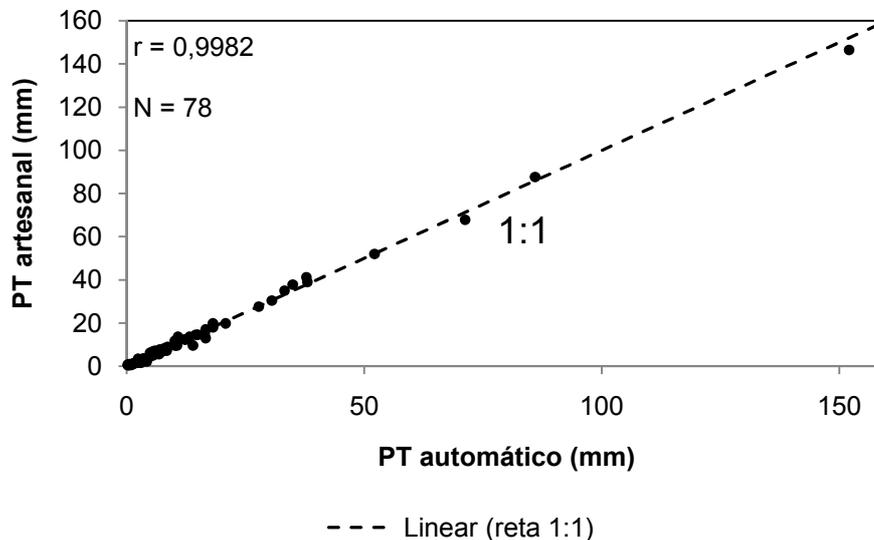


Figura 17. Relação entre a precipitação medida pelo pluviômetro automático e a medida pelo pluviômetro artesanal. r – coeficiente de correlação; N – número de pares de valores (X ; Y).

Como se pode constatar na Figura 17, houve alta correlação entre as leituras do pluviômetro automático e do artesanal, sendo coeficiente de correlação próximo a unidade.

4.1.2 Precipitação interna, escoamento pelo tronco e perda por interceptação - café

A precipitação interna PI (mm) média foi corrigida usando-se a equação de regressão obtida da relação entre os dois tipos de pluviômetros, conforme Figura 17. Em cada planta, o valor médio da precipitação interna observada foi de 998 mm, 785 mm e 1045 mm, também corrigido pela equação linear.

Na Figura 18 é apresentada a evolução da PI (mm) acumulada nos três cafeeiros e também a PI (mm) média.

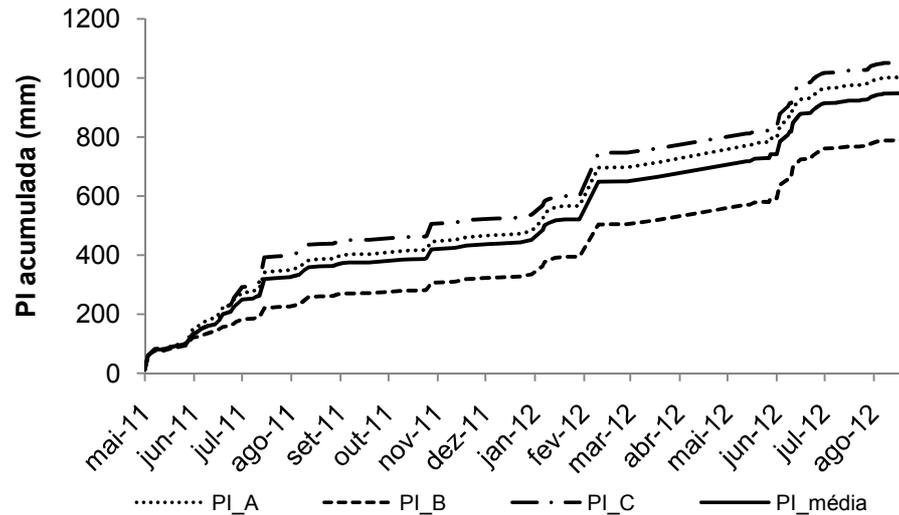


Figura 18. Registros da precipitação interna acumulada nas três plantas. PI_A; PI_B; PI_C e PI_média é a precipitação interna acumulada em cada planta e a média.

Fez-se a análise de variância (ANOVA) entre as médias da PI (mm) dos três cafeeiros (A, B e C) e obteve-se o resultado descrito na **Erro! Fonte de referência não encontrada..** H_0 : média de PI_A = média de PI_B = média PI_C.

Tabela 3. Análise de variância da precipitação interna nos três cafeeiros

ANOVA

Fonte da variação	GL	SQ	QM	F_{calc}	$F_{\text{crit}} (0,05)$
Plantas (A, B e C)	2	406,6	203,3	0,701 ^{ns}	3,027
Resíduo	285	82617,1	289,9		
Total	287	83023,7			

^{ns} - não significativo; GL = graus de liberdade; SQ = soma de quadrados; QM = quadrado médio; F_{calc} = valor de F calculado e F_{crit} = valor de F tabelado.

Como F_{calc} é menor que F_{crit} , aceita-se a hipótese de que não existe diferença entre as média de PI (mm) dos três cafeeiros, ao nível de significância de 0,05.

Para todos os eventos, a PI (mm) não apresentou média maior que a precipitação total, porém, quando as coletas foram analisadas individualmente, ou seja, por cada interceptômetro, observou-se que algumas coletas apresentaram precipitação interna maior que precipitação total. Na **Erro! Fonte**

de referência não encontrada., é mostrada a distribuição de frequência da precipitação interna relativa à precipitação total – PI (%).

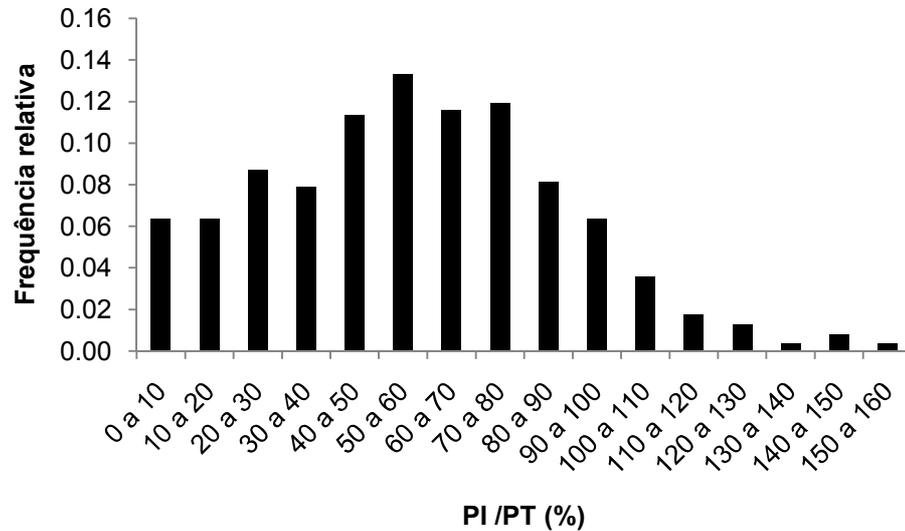


Figura 19. Distribuição de frequência da PI (%)

Das 864 leituras individuais de PI (mm), apenas 8,1% apresentaram valor maior que a PT (mm). Esse percentual pode ser considerado pequeno se comparado com o percentual obtido nos trabalhos de Lloyd & Marques (1988), Germer et al. (2006) e Moura et al. (2009), que registraram 29%, 19% e 35%, respectivamente. Vale salientar que esses resultados citados foram obtidos em áreas com cobertura florestal, onde existem várias espécies vegetais, o que propicia uma maior desuniformidade da cobertura vegetal, favorecendo a ocorrência de caminhos preferenciais e, conseqüentemente, o gotejamento mais intenso em um determinado ponto e menos intenso noutro.

Considerando todas as leituras, a média da PI (%) é de 57%, com desvio padrão de 31%. Dentro do intervalo de 26% a 88% encontram-se 65,6% das coletas, 18,8% e 15,6% encontram-se abaixo e acima do mesmo intervalo, respectivamente.

Analisando-se a PI (mm) sob diferentes classes de PT (mm), é possível observar uma tendência de aumento da PI (%) para as maiores classes de chuva. A Tabela 4 ilustra a variabilidade da PI (mm) e PI (%) em diferentes intervalos de classe de chuva.

Tabela 4. Precipitação interna absoluta “PI (mm)” e relativa “PI (%)” em diferentes classes de chuva

Classes de chuva (mm)	PT (mm)	PI (mm)	PI (%)
≤ 5	69,1	29,4	42,5
]5 – 10]	164,6	99,0	60,1
]10 – 20]	330,3	216,7	65,6
]20 – 40]	338,7	241,6	71,3
> 40	493,7	360,8	73,1

Nota-se na Tabela 4 que, para as chuvas menores ou iguais a 5 mm, a contribuição percentual PI (%) é bem menor que para chuvas maiores que 5 mm. Para as chuvas maiores que 20 mm, a contribuição de PI (%) é praticamente a mesma. Na Tabela 5, está apresentada a análise de variância (ANOVA) da PI (%) nas cinco classes de chuva.

Tabela 5. Análise de variância da precipitação interna relativa – PI (%) nas cinco classes de chuva (C1, C2, C3, C4 e C5). H_0 : média de C1 = média de C2 = média de C3 = média de C4 = média de C5

ANOVA

Fonte da variação	GL	SQ	QM	F_{calc}	$F_{\text{crit}} (0,01)$
Classes de chuva	4	1,762	0,441	20,770**	3,533
Resíduo	91	1,930	0,021		
Total	95	3,693			

** estatisticamente diferente a 0,01 de probabilidade; GL = graus de liberdade; SQ = soma de quadrados; QM = quadrado médio; F_{calc} = valor de F calculado; F_{crit} = valor de F tabelado.

Como F_{calc} é maior que F_{crit} , aceita-se a hipótese de que existe diferença significativa de PI (%) entre pelo menos duas classes de chuva, ao nível de 0,01 de significância. Confrontando-se a PI (%) nas classes, constatou-se que, para as classes de chuvas maiores que 5 mm, não houve diferença significativa entre as PI (%) ao nível de 0,05 de significância, e que a PI (%) das chuvas

menores ou iguais a 5 mm diferem estatisticamente das chuvas maiores que 5 mm.

Embora não tenham apresentado teste de significância, Lima e Leopoldo (1999) também obtiveram diferenças aparentes, quando comparados os percentuais de precipitação interna para chuvas menores e maiores que 5 mm. Esse mesmo fato pode ser observado no trabalho de Vieira & Palmier (2006).

Na Tabela 6 é apresentada a PT (mm) e a PI (mm) observada em todo o período de estudo, para as chuvas maiores e menores ou iguais a 5 mm.

Tabela 6. PT (mm) e PI (mm) obtidas em chuvas maiores que 5 mm e menores ou iguais a 5 mm

Classes de chuva	Unidade	PT	PI
≤ 5 mm	mm	69,1	29,4
	%	100,0	42,5
> 5 mm	mm	1327,3	918,0
	%	100,0	69,2
Todas	mm	1396,4	947,4
	%	100,0	67,8

PT – precipitação total, PI – precipitação interna

Observa-se na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** que a PI (%) para huvas maiores ou iguais a 5 mm apresentou aumento de 54% em relação a PI (%) obtida em chuvas menores que 5 mm. Isso, provavelmente, deve-se ao fato de que as chuvas de alta magnitude contribuem para um maior umedecimento da vegetação. Com a continuação da chuva, há uma maior turbulência nas folhas e ramos fazendo com que a chuva retida na vegetação seja movimentada e venha a cair, aumentando PI (mm). Além disso, quando a copa está saturada, a chuva, praticamente, não é retida, e isso também contribui para o aumento. Resultados semelhantes foram observados por Moura et al. (2009) e Lima & Leopoldo (1999). Thomaz (2005), estudando a precipitação interna na vegetação de capoeira e floresta secundária, observou que a precipitação interna relativa, na vegetação de floresta secundária, aumentou à medida que as chuvas foram crescendo e diminuiu na vegetação de capoeira.

Na Figura 20 estão apresentadas as relações entre PI (mm) e PT (mm) para chuvas menores que 5 mm e para chuvas maiores que 5 mm.

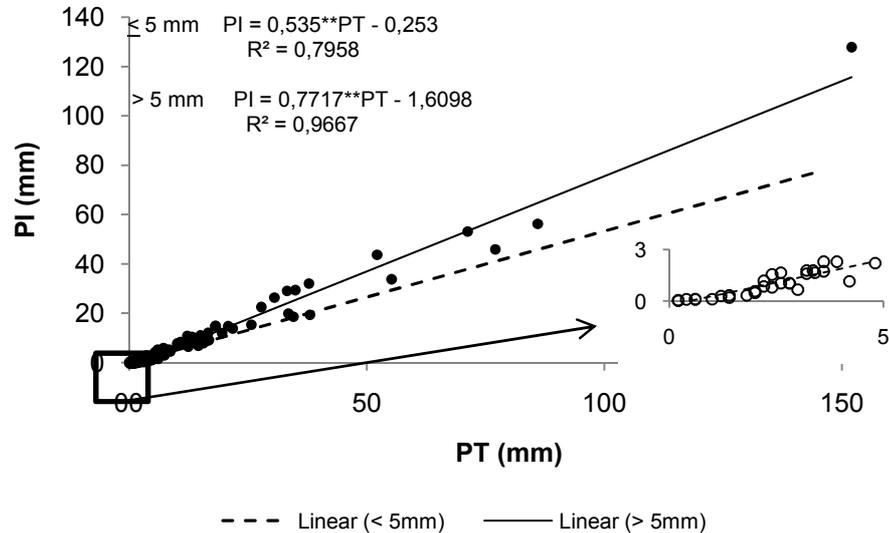


Figura 20. Relação entre PT (mm) e PI (mm) chuvas menores que 5 mm e para chuvas maiores que 5 mm. ** - significativo a 0,01 de probabilidade.

Nota-se na Figura 20 que a variância de PI (mm) pôde ser explicada por, aproximadamente, 80% e 97% da variância de PT (mm) para as chuvas menores ou iguais a 5 mm e para as chuvas maiores que 5 mm, respectivamente. O menor ângulo de inclinação da linha de tendência tracejada indica que a precipitação interna tende a ser uma menor porção da precipitação total nas chuvas menores ou iguais a 5 mm. Esse resultado pode ser justificado pela própria composição da precipitação interna. A precipitação interna é composta pelas gotas de chuva que atravessam livremente a copa, sem esbarrar na vegetação, e pelas gotas de chuva que esbarram na vegetação e caem, imediatamente ou posteriormente. A copa tem capacidade de armazenar determinada quantidade de chuva podendo atingir a saturação, que é o ponto no qual a taxa precipitação interna é máxima. Antes da saturação, parte da precipitação total que esbarra na vegetação fica armazenada, devido à capacidade de armazenamento da copa, o que não ocorre, ou ocorre em menor escala, após a saturação. Portanto, pequenas chuvas podem não saturar a copa ou, mesmo saturando, cessaria imediatamente após, e isso

reduz a contribuição como precipitação interna. Por outro lado, as maiores chuvas são capazes de saturar a copa e, em muitos casos, a lâmina armazenada na copa é insignificante em relação à quantidade de chuva.

Na Figura 21 é apresentada a evolução do escoamento pelo tronco “EscTr (mm)” acumulado nos três cafeeiros, bem como, da média.

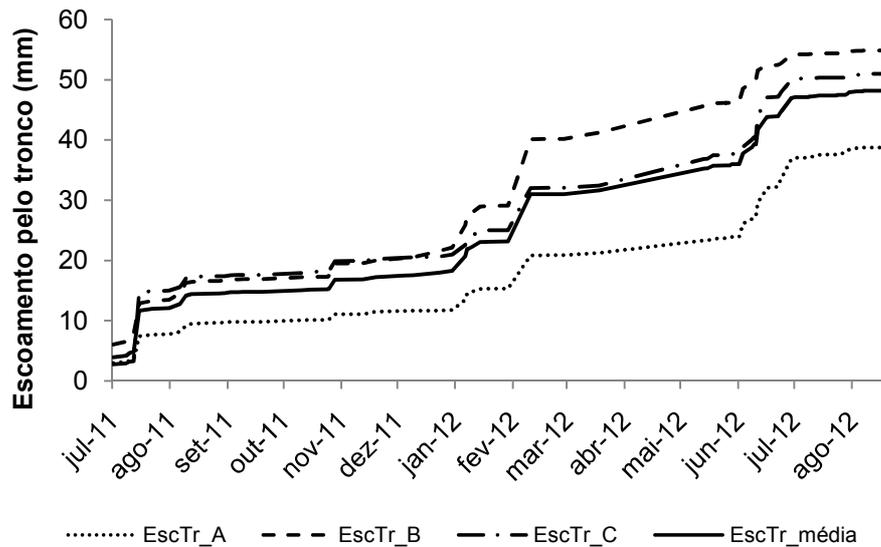


Figura 21. Registros do escoamento pelo tronco acumulado nas três plantas. EscTr_A; EscTr_B; EscTr_C e EscTr_média é o escoamento pelo tronco acumulado em cada planta e a média.

Nota-se que o cafeeiro A apresenta menor valor de EscTr (mm). As características do vegetal provavelmente contribuíram para esse fato. Como se trata da mesma espécie e variedade vegetal, a característica das folhas e troncos pode ser desprezada nesse efeito, no entanto, a quantidade de caules, assim como a altura da planta e a área de projeção da copa, podem ter contribuído para essa diferença. Visualmente, o cafeeiro “A” apresenta menor quantidade de folhas, somando-se a isso, ela apresenta também menor altura, projeção da copa e número de caules.

Na Tabela 7 está apresentada a análise de variância do escoamento pelo tronco nos três cafeeiros (A, B e C). H_0 : média de A = média de B = média C.

Tabela 7. Análise de Variância do escoamento pelo tronco nas três plantas.

ANOVA					
Fonte da variação	GL	SQ	QM	F _{calc}	F _{crit (0,05)}
Plantas (A, B e C)	2	1,8	0,9	0,431 ^{ns}	3,035
Resíduo	228	484,8	2,1		
Total	230	486,7			

^{ns} - não significativo; GL = graus de liberdade; SQ = soma de quadrados; QM = quadrado médio; F_{calc} = valor de F calculado; F_{crit} = valor de F tabelado.

Observa-se na Tabela 7 que não há diferença significativa entre as médias do EscTr (mm) nos três cafeeiros ($F_{\text{calc}} < F_{\text{crit}(0,05)}$), ao nível de 0,05 de probabilidade.

Na Tabela 8, está apresentado o escoamento pelo tronco obtido das chuvas menores ou iguais a 5 mm e das chuvas maiores que 5 mm. Observa-se que a taxa de escoamento pelo tronco EscTr (%), para as chuvas menores que 5 mm, é aproximadamente quatro vezes menor que o percentual de escoamento pelo tronco nas chuvas maiores que 5 mm. Isso pode ser justificado da mesma forma que a precipitação interna, nesse caso, levando em consideração a capacidade de armazenamento do tronco, ou seja, EscTr (%) será maior após a saturação dos troncos.

Tabela 8. Escoamento pelo tronco em diferentes classes de chuva

Classes de chuva	Unidade	PT	EscTr
≤ 5 mm	mm	61,8	0,75
	%	100	1,2
> 5 mm	mm	940,0	48,4
	%	100	5,1
Todas	mm	1001,8	49,2
	%	100	4,9

Analisando-se todos os eventos juntos, observa-se que o escoamento pelo tronco correspondeu a aproximadamente 5% da precipitação total. Esse

percentual foi maior que o encontrado nos trabalhos de Sousa et al. (2011), Moura et al. (2009), Cuartas et al. (2007), Bryant et al. (2005) e Arcova et al. (2003), os quais encontraram valores de EscTr (%) iguais ou abaixo de 1%. Provavelmente, um dos fatores que contribuiu positivamente para que EscTr (mm) na cultura do café tivesse participação considerável na quantidade de chuva que chegou ao solo, foi o ângulo de inclinação e a área de abrangência dos caules. O café *conilon* é formado por vários caules, com ângulos geralmente maiores que 45° e que se estendem por quase toda a área da copa, o que acelera o escoamento e diminui o gotejamento.

Návar (1993) mediu o escoamento pelo tronco em três espécies arbustivas e observou maior escoamento pelo tronco nas espécies cujos galhos tinham maior inclinação. Resultados semelhantes também foram observados por Silva et al. (2009) e Xiao et al. (2000).

Na Figura 22, está apresentada a relação entre EscTr (mm) e PT (mm) para as duas classes de chuva.

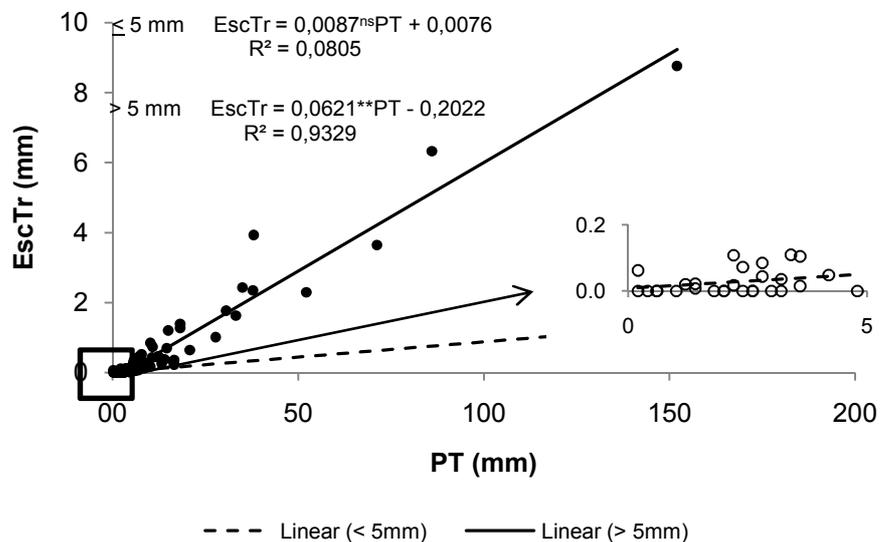


Figura 22. Relação entre EscTr (mm) e PT (mm) para chuvas menores que 5 mm e para chuvas maiores que 5 mm. ** - significativo a 0,01 de probabilidade; ^{ns} – não significativo

Apenas 8,1% da variância do escoamento pelo tronco foram explicadas pela variância da precipitação total ($R^2 = 0,0805$) para as chuvas menores ou iguais a 5 mm. O grau de umedecimento dos troncos no início da chuva pode ter contribuído para a fraca relação com a precipitação total, pois, se no início

da chuva a vegetação estiver bastante seca, haverá pouco escoamento, mas se estiver saturada, ou próxima da saturação, o escoamento será bem maior, e essa diferença será verificada mesmo se as chuvas tivessem as mesmas características. Para chuvas maiores que 5 mm, observou-se que 93% da variância de EscTr (mm) foram explicadas pela variância de PT (mm) ($R^2 = 0,9329$). Em outros trabalhos também foi possível observar forte relação linear entre o escoamento pelo tronco e a precipitação total (MOURA et al., 2009; MOURA et al., 2012; SOUSA et al., 2011; LIU&ZHAO, 2009; OLIVEIRA JUNIOR & DIAS, 2005; ARCOVA et al., 2003).

Para as chuvas menores ou iguais a 5 mm, a regressão na foi significativa. Então, para estimar a perda por interceptação pelo modelo linear, usou-se a média de EscTr (mm) e não a equação de regressão.

A variação de I (%) em função da precipitação e sob as diferentes classes está apresentada nas Figura 23 e Figura 24, respectivamente. Com o aumento da PT (mm), I (%) tendeu a diminuir e se estabilizar. Os dados se ajustaram bem ao modelo potencial, quando considerado o valor média das classes, onde, aproximadamente, 94% da variação de I (%) puderam ser explicadas pela variação de PT (mm). Comportamento semelhante foi observado por Liu e Zhao (2009), Oliveira Junior (2006), Vieira e Palmier (2006), Llorens et al. (1997).

Também foi observado essa tendência à estabilização para PI (%) e EscTr (%), sendo de forma inversa, ou seja, houve um aumento percentual desses processos, à medida que PT (mm) aumentava, apresentando um comportamento similar aos das Figura 23 e Figura 24. Esse comportamento no escoamento pelo tronco também foi observado por Liang et al. (2009).

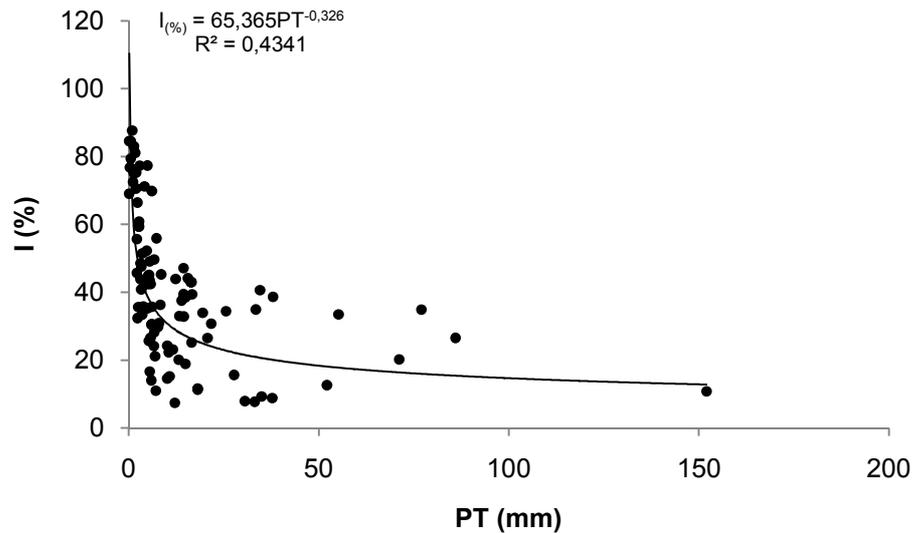


Figura 23. Relação entre a perda por interceptação relativa - I (%) e a precipitação total - PT (mm).

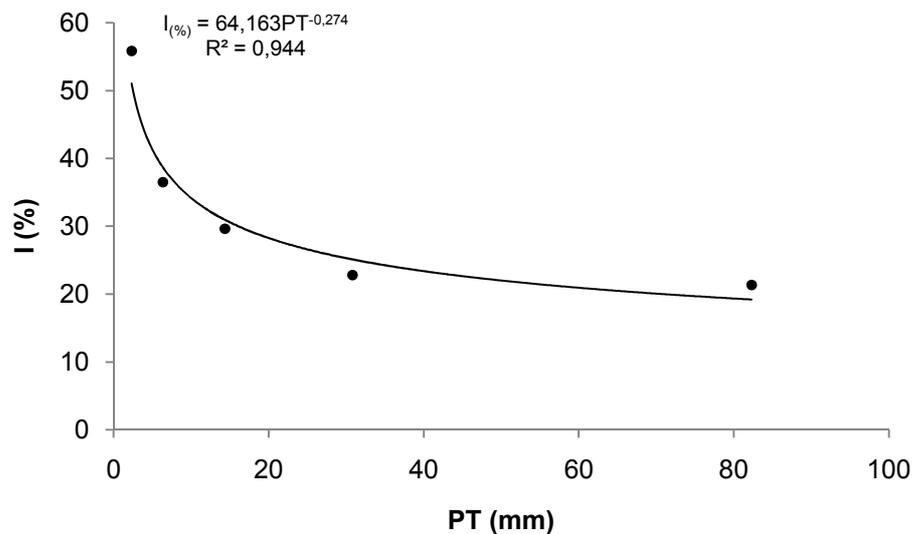


Figura 24. Relação entre a perda por interceptação relativa - I (%) e a precipitação total - PT (mm), considerando a média das classes de chuva (0 – 5; 5,1 – 10; 10,1 – 20; 20,1 – 40 e > 40).

Segundo Carlyle-Moses e Price (2006), com o aumento da precipitação, uma maior proporção de troncos e galhos é saturada, aumentando a área de contribuição, o que, conseqüentemente, aumenta o escoamento até que um determinado limite de chuva, que satura todas as áreas capazes de gerar escoamento, seja alcançado. É possível estender esse raciocínio também à precipitação interna e, conseqüentemente, considerar que o percentual de perda por interceptação diminuirá com o aumento da precipitação.

Apesar de não terem sido observados estudos de perda por interceptação no café conilon, pesquisas realizadas com outros tipos de vegetação, tais como floresta tropical, Pinus e arbustos típicos de regiões desérticas, indicaram comportamento semelhante ao do presente estudo em relação à perda por interceptação relativa (LIU & ZHAO, 2009; OLIVEIRA JUNIOR, 2006; VIEIRA & PALMIER, 2006; LLORENS et al., 1997).

4.1.3 Modelo linear

Com a regressão dos dados observados em 2011, estabeleceu-se o modelos lineares $PI_{lin} = aPT + b$ e $EscTr_{lin} = aPT + b$. Esses modelos foram usados para estimar I_{lin} (mm) em 2012. Observou-se que aproximadamente 66% da variação da precipitação interna puderam ser explicadas pela variação da precipitação total ($R^2 = 0,663$) para chuvas menores ou iguais a 5 mm e 97% ($R^2 = 0,970$) para chuvas maiores que 5mm.No escoamento pelo tronco, observou-se $R^2 = 0,9506$ e $R^2 = 0,9447$, para chuvas menores ou iguais a 5 mm e maiores que 5 mm, respectivamente. Todas as regressões analisadas com os dados de 2011 (PT vs PI e PT vs EscTr) foram significativas a 0,01 de probabilidade.

Nas Figura 25 e Figura 26, são mostradas as relações entre a perda por interceptação estimada pelo modelo linear - I_{lin} (mm) e a observada I (mm), respectivamente, no período de estudo de 2012.

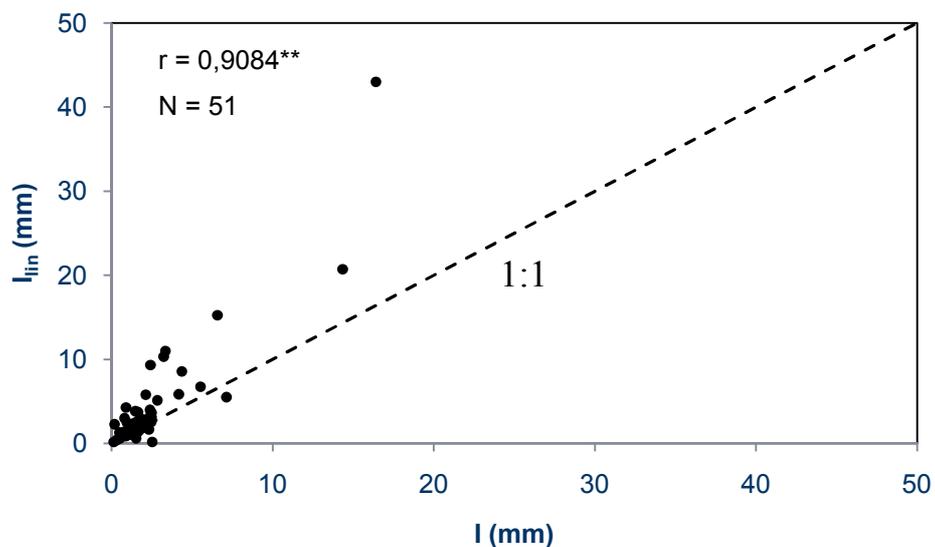


Figura 25. Correlação entre a perda por interceptação estimada pelo modelo linear – I_{lin} (mm) e

a perda por interceptação observada – I (mm).** - significativo a 0,01 de probabilidade; r – coeficiente de correlação; N – número de pares de valores (X ; Y).

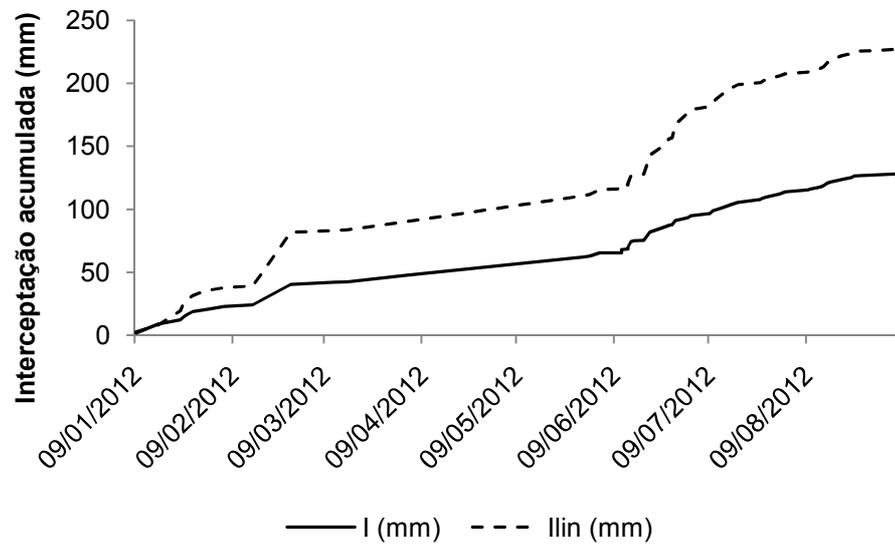


Figura 26. Evolução da perda por interceptação observada I (mm) e estimada pelo modelo linear I_{lin} (mm) durante o período de estudo em 2012.

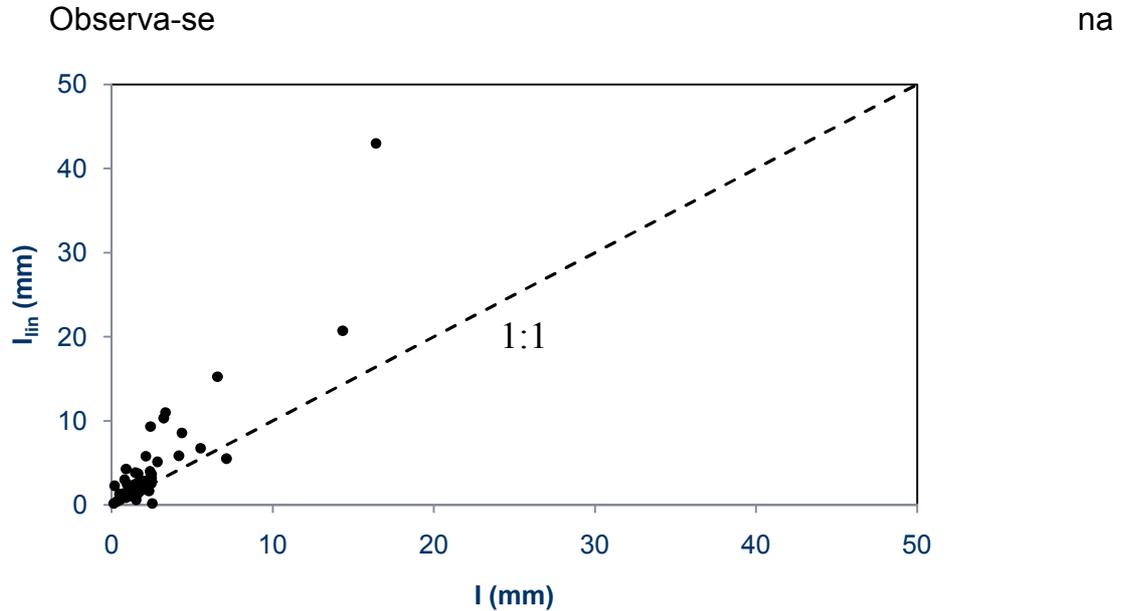


Figura 25

que os pontos correspondentes aos maiores valores de I (mm) encontram-se acima da reta 1:1, indicando uma tendência a superestimativa do modelo linear. Esses também foram os eventos os quais ocorreram os maiores valores de PT (mm).

O DMN e a EM obtidas pelo modelo linear foi de 0,77 e -1,33, respectivamente. O valor de 0,77 é um indicativo de que existe grande desvio positivo dos valores estimados em relação aos observados na escala que compreende todo o período de estudo, como observado na Figura 26. O valor negativo de EM indica que as estimativas obtidas pelo modelo linear são piores do que a simples média dos valores observados.

Está apresentada, na Tabela 9, a perda por interceptação observada e a estimada pelo modelo linear, para duas classes de chuva.

Tabela 9. Processos de repartição das chuvas observados e estimados pelo modelo linear

Classes	Unidade	PT	PI	EscTr	I	PI _{lin}	EscTr _{lin}	I _{lin}
Período inteiro 2011 e 2012								
≤ 5mm	mm	69,1	29,4	1,1	38,6	----	----	----
	%	100,0	42,5	1,6	55,9	----	----	----
> 5mm	mm	1327,1	918,0	68,6	340,5	----	----	----
	%	100,0	69,2	5,2	25,6	----	----	----
Apenas 2012								
≤ 5mm	mm	45,0	19,1	0,5	25,4	17,4	0,9	26,7
	%	100,0	42,4	1,1	56,4	38,7	2	59,3
> 5mm	mm	622,4	489,6	30,2	102,6	384,8	38,4	199,2
	%	100,0	78,7	4,9	16,5	61,8	6,2	32,0

PT – precipitação total; PI – precipitação interna; EscTr – escoamento pelo tronco; I – perda por interceptação. O índice “_{lin}” indica os processos estimados pelo modelo linear.

A perda por interceptação foi mais acentuada para as chuvas menores ou iguais a 5 mm. Nessa classe, I (%) correspondeu a 55,9%, enquanto que para chuvas maiores que 5 mm I (%) foi de 25,6%. Era de se esperar esse resultado, levando-se em consideração que I (mm) foi obtida pela diferença entre a PT (mm) e a soma da PI (mm) com o EscTr (mm), e esses dois últimos apresentaram os menores valores nas chuvas na classe igual ou abaixo de 5

mm, como explicado anteriormente na determinação de PI (mm) e EscTr (mm). Viera&Palmier (2006) e Lima & Leopoldo (1999) também encontraram resultados semelhantes quando analisaram os resultados sob diferentes classes de chuva.

Através da análise de variância, na Tabela 10 é possível comprovar que I (%) é significativamente diferente nas duas classes de chuva. H_0 : média de I (%) para $PT \leq 5$ mm = média I (%) para $PT > 5$ mm.

Tabela 10. Análise de variância das perdas por interceptação relativa - I (%) obtidas nas duas classes de chuva.

ANOVA

Fonte da variação	GL	SQ	QM	F _{calc}	F _{crít(0,01)}
Classes de chuva	1	2,0	2,0	83,455**	6,912
Resíduo	94	2,3	0,02		
Total	95	4,3			

** estatisticamente diferente a 0,01 de probabilidade; GL = graus de liberdade; SQ = soma de quadrados; QM = quadrado médio; F_{calc} = valor de F calculado; F_{crít} = valor de F tabelado.

Observa-se na Tabela 10 que existe diferença significativa entre as médias da perda por interceptação nas duas classes de chuva, ao nível de 0,01 de probabilidade ($F_{calc} > F_{crít}$).

4.2 Interceptação na cultura do limão

4.2.1 Precipitação - limão

Por motivos operacionais, não houve medidas nos meses de novembro e dezembro de 2011. De maio a outubro de 2011 a precipitação observada foi de 786 mm e de janeiro a outubro de 2012 de 810 mm. Nesses mesmos períodos o somatório das médias históricas mensais foi igual a 593 mm e 958 mm, respectivamente.

4.2.2 Precipitação interna, escoamento pelo tronco e perda por interceptação

Na Figura 27, é apresentada a evolução da PI (mm) acumulada nos três limoeiros e também a PI (mm) média.

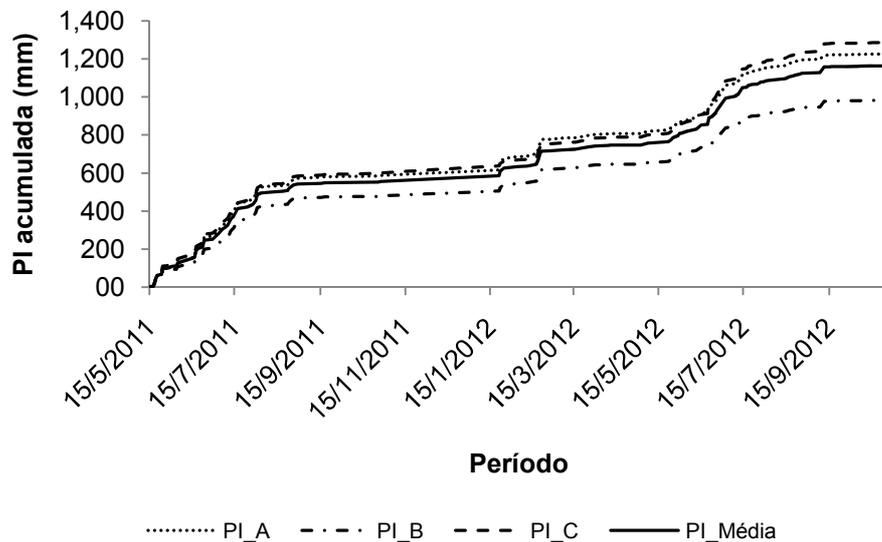


Figura 27. PI (mm) média acumulada nos três cafeeiros. PI_A; PI_B; PI_C e PI_média é a precipitação interna acumulada em cada planta e a média.

Observa-se que o menor valor de PI (mm) foi coletado na planta “B”. Isso, provavelmente, deve-se ao fato dessa planta apresentar maior volume de copa, ou seja, maior área de captação e maior altura, o que contribui para que uma maior quantidade de chuva fosse armazenada. Apesar disso, através de análise de variância (Tabela 11), observou-se que PI (mm) obtida em cada planta (A, B e C) não apresentou diferença significativa entre si. Dessa forma, considerou-se para o cálculo da perda por interceptação a média aritmética da PI (mm) de A, B e C.

Tabela 11. Análise de variância da precipitação interna nos três limoeiros

ANOVA					
Fonte da variação	GL	SQ	QM	F _{calc}	F _{crít}
Plantas (A, B e C)	2	438,7	219,4	1,971 ^{ns}	3,021
Resíduo	351	39071,3	111,3		
Total	353	39510,0			

^{ns} - não significativo; GL = graus de liberdade; SQ = soma de quadrados; QM = quadrado médio; F_{calc} = valor de F calculado; F_{crit} = valor de F tabelado.

Para o total de 118 eventos coletados, apenas quatro apresentaram valor médio de PI (mm) maior que PT (mm). Quando as coletas foram analisadas individualmente, ou seja, por cada interceptômetro, observou-se que algumas coletas apresentaram precipitação interna maior que precipitação total. Na Figura 28 está ilustrada a distribuição de frequência de PI (%).

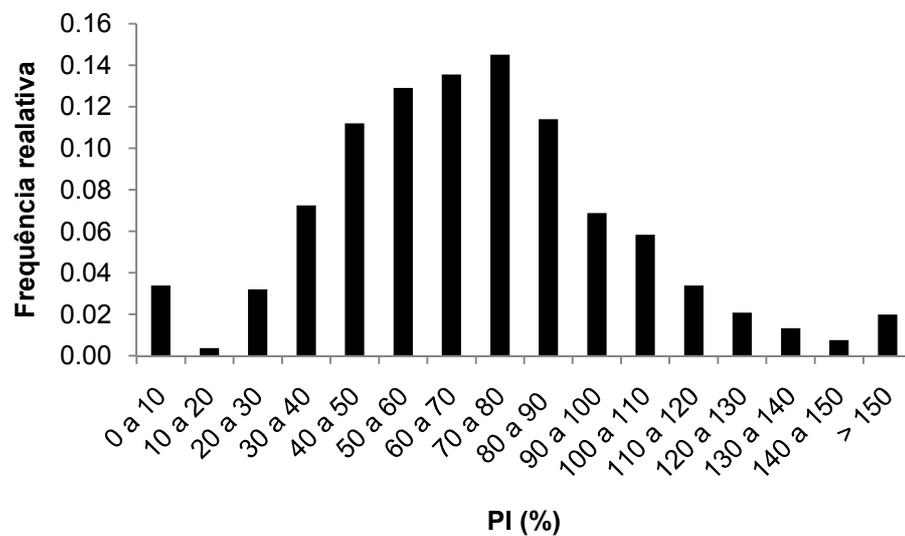


Figura 28. Distribuição de frequência relativa de PI (%).

Das 1062 leituras individuais de PI (mm), 15% apresentaram valor maior que a PT (mm). Esse percentual é menor que os observado por Moura et al. (2009), Germer et al. (2006) e Lloyd e Marques(1988), que registraram 35%, 19% e 29%, respectivamente. Vale salientar que esses resultados citados foram obtidos em áreas com cobertura florestal, onde existem várias espécies vegetais, o que propicia maior desuniformidade da cobertura vegetal, favorecendo a ocorrência de caminhos preferenciais e, conseqüentemente, o gotejamento mais intenso em um determinado ponto e menos intenso em outro. Apesar de não ter sido constatada diferença significativa entre as médias dos três interceptômetros em cada planta, é importante o uso de mais de um equipamento para que ocorra um equilíbrio entre os valores coletados.

Fez-se a análise de variância para verificar se havia diferença significativa entre as médias de PI (%) para as diferentes classes de chuva. O resultado da análise de variância está apresentado na Tabela 12.

Tabela 12. Análise de variância da precipitação interna relativa - PI (%) em diferentes classes de chuva

ANOVA					
Fonte da variação	GL	SQ	QM	F_{calc}	$F_{\text{crit}}(0,01)$
Classes de chuva	4	7725,0	1931,2	4,967**	3,490
Resíduo	113	43939,9	388,8		
Total	117	51664,9			

** - significativo a 0,01 de probabilidade; GL = graus de liberdade; SQ = soma de quadrados; QM = quadrado médio; F_{calc} = valor de F calculado; F_{crit} = valor de F tabelado.

Como F_{calc} é maior que F_{crit} , constata-se que há diferença significativa entre as médias de PI (%) entre pelo menos duas classes. Confrontando-se as classes de chuva entre si, observou-se que PI (%) em eventos de chuva menores ou iguais a 5 mm apresentaram médias diferentes estatisticamente de PI (%) em eventos de chuva maiores que 5 mm. Dessa forma, trabalhou-se com duas classes de chuvas ($PT < 5$ mm e $PT > 5$ mm). As relações de PI (mm) e EscTr (mm) com PT (mm), obtidas nas duas classes de chuva, estão apresentadas nas Figura 29 e Figura 30.

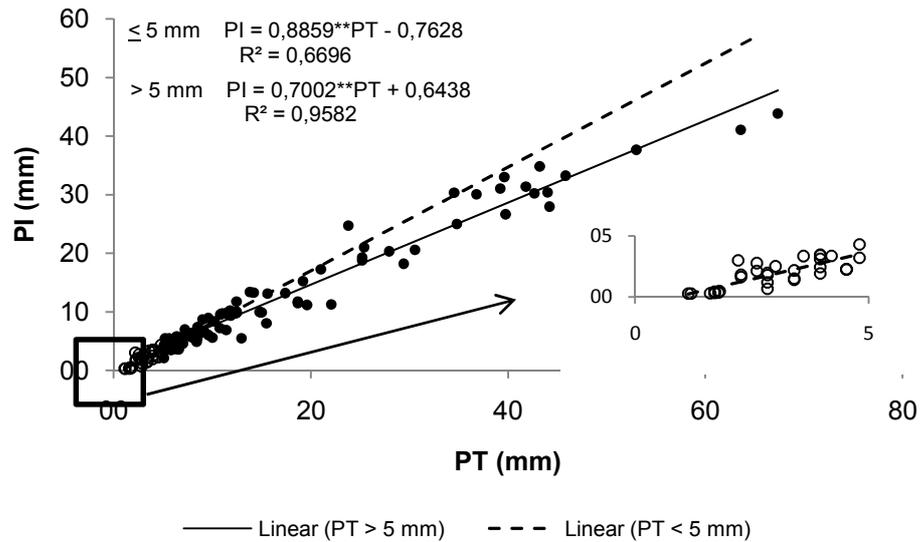


Figura 29. Relação entre PT (mm) e PI (mm) chuvas menores 5 mm e para chuvas maiores que 5 mm. A linha tracejada é o prolongamento da linha de tendência para eventos de chuva menores ou iguais a 5 mm.

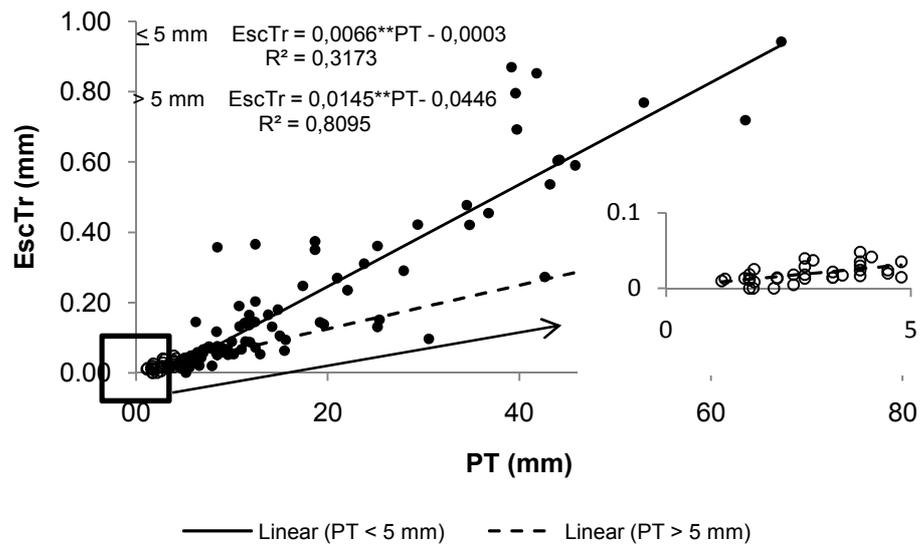


Figura 30. Relação entre PT (mm) e EscTr (mm) chuvas menores ou iguais a 5 mm e para chuvas maiores que 5 mm. A linha tracejada é o prolongamento da linha de tendência para eventos de chuva menores ou iguais a 5 mm.

Observa-se nas Figura 29 e Figura 30 que, para os eventos com precipitação total maior que 5 mm, mais de 80% da variância de PI (mm) e EscTr (mm) foram explicadas pela variância de PT (mm) e, para os eventos menores ou iguais a 5 mm, o percentual da variância explicada foi menor que 70%, sendo o menor valor ($R^2 = 0,3173$) obtido no EscTr (mm). Todas as regressões foram significativas a 0,01 de probabilidade.

4.2.3 Modelo linear

Com a regressão dos dados observados em 2011, estabeleceu-se o modelo linear $PI_{lin} = aPT + b$ e o $EscTr_{lin} = aPT + b$. Esses modelos foram usados para estimar I_{lin} (mm) em 2012. Observou-se que aproximadamente 78% da variação da precipitação interna puderam ser explicadas pela variação da precipitação total ($R^2 = 0,784$) para chuvas menores ou iguais a 5 mm e 97% ($R^2 = 0,968$) para chuvas maiores que 5mm. No escoamento pelo tronco, observou-se $R^2 = 0,232$ e $R^2 = 0,853$, para chuvas menores ou iguais a 5 mm e maiores que 5 mm, respectivamente.

Nas **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e Figura 32 está apresentada a relação entre a perda por interceptação estimada pelo modelo linear e a observada para cada evento e cumulativamente, respectivamente.

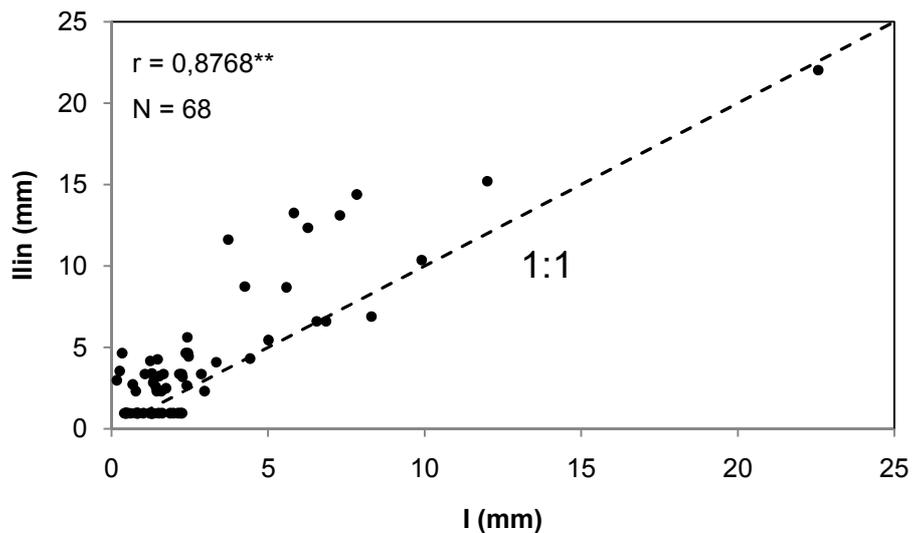


Figura 31. Correlação entre a perda por interceptação estimada pelo modelo linear – I_{lin} (mm) e a perda por interceptação observada – I (mm). ** - significativo a 0,01 de probabilidade; r – coeficiente de correlação; N – número de pares de valores (X; Y).

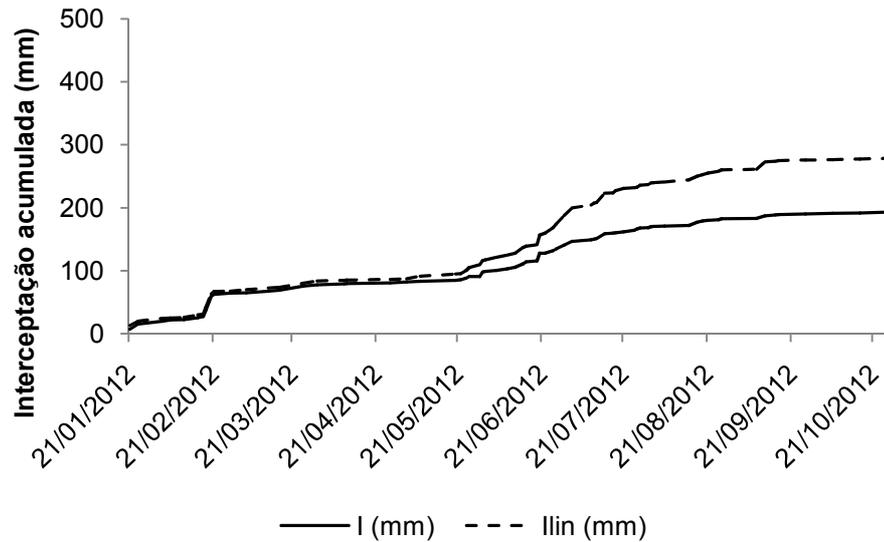


Figura 32. Evolução da perda por interceptação observada I (mm) e estimada pelo modelo linear I_{lin} (mm) durante o período de estudo em 2012.

Observa-se na Figura 31 que a maior parte dos pontos encontram-se acima da reta 1:1, indicando uma tendência a superestimativa do modelo linear.

O Desvio Médio Normalizado (DMN) e a Eficiência da Modelagem (EM) encontrados foram iguais a 0,44 e 0,50, respectivamente. O valor de 0,44 é um indicativo de que existe grande desvio positivo dos valores estimados em relação aos observados em uma escala de todo o período de estudo. O valor positivo de EM indica que as estimativas obtidas pelo modelo linear são melhores do que a simples média dos valores observados.

Na Tabela 13, está apresentada a repartição das chuvas para as duas classes de chuva, bem como, os valores estimados pelo modelo linear.

Tabela 13. Repartição das chuvas observada e estimada pelo modelo linear

Classes	Unidade	PT	PI	EscTr	I	PI_{lin}	$EscTr_{lin}$	I_{lin}
Período inteiro 2011 e 2012								
$\leq 5\text{mm}$	mm	98,8	61,8	0,7	37,3	----	----	----
	%	100,0	62,3	0,7	38,0	----	----	----
$> 5\text{mm}$	mm	1497,4	1102,6	18,0	378,3	----	----	----
	%	100,0	73,6	1,2	25,3	----	----	----

		Apenas 2012						
≤ 5mm	mm	72,6	42,5	0,5	29,6	48,8	0,2	23,7
	%	100,0	58,5	0,7	40,8	67,2	0,3	32,6
> 5mm	mm	711,1	538,7	9,0	163,5	444,0	12,4	254,8
	%	100,0	75,8	1,3	23,0	62,4	1,7	35,8

PT – precipitação total; PI – precipitação interna; EscTr – escoamento pelo tronco; I – perda por interceptação. O índice “ I_{lin} ” indica os processos estimados pelo modelo linear.

Observa-se na Tabela 13 que EscTr (mm) representa pequena parcela de PT (mm), variando de 0,7% a 1,2%. Segundo Moura et al. (2009), apesar de o escoamento pelo tronco parecer insignificante em termos quantitativos, ele promove a distribuição localizada da precipitação ao redor do tronco, sendo favorável à planta, principalmente, nos períodos menos chuvosos.

Como esses processos estão relacionados com a estrutura vegetal, é possível encontrar, em outras pesquisas, resultados bem distintos dos observados na Tabela 13, como os apresentados por Liu & Zhao (2009), Medeiros et al. (2009), Rodrigues (2009), Park & Cameron (2008), Herbst et al. (2008) e Germer et al. (2006), que observaram valores de EscTr (%) acima dos valores observados no presente estudo, variando de 2% a 13%. Por outro lado, Sousa et al. (2011), Moura et al. (2009), Cuartas et al. (2007), Bryant et al. (2005) e Arcova et al. (2003), observaram valores de EscTr (%) iguais ou abaixo dos observados no presente estudo. Ou seja, não se pode esperar que EscTr (%) represente sempre uma pequena parcela de PT (mm), isso vai depender das características das vegetações e das variáveis meteorológicas envolvidas no processo.

Observou-se que I (%) foi maior para os eventos com chuvas abaixo de 5 mm. Em relação à I_{lin} (%), o maior valor obtido ocorreu na classe de chuva com eventos maiores que 5 mm. Isso ocorreu porque PI_{lin} (%) foi menor para essa classe de chuva, devido ao coeficiente angular da equação de regressão linear ser 0,8859 enquanto que, para a menor classe de chuva, o coeficiente angular foi de 0,7002. Isso, provavelmente, poderia não ter acontecido se cada coleta fosse constituída de um único evento de chuva e se a vegetação se

encontrasse nas mesmas condições de umidade antecedente a cada evento. Porém, as coletas são constituídas de um ou mais eventos de chuva, que podem ter ocorrido consecutivamente enquanto a vegetação ainda estava molhada ou com tempo suficiente para que a mesma tenha secado. De acordo com Lima (2008), a condição de copa molhada resulta no aumento da chamada rugosidade aerodinâmica da superfície, dificultando a evaporação da chuva armazenada na copa. Além disso, a intensidade de chuva de cada evento e o tamanho das gotas de chuva também influencia nessa dinâmica. Segundo Calder (1996), a capacidade de retenção da copa tende a aumentar com as menores gotas de chuva e diminuir a intensidade da precipitação interna.

4.3 Interceptação na vegetação natural

4.3.1 Precipitação

Durante o período de abril de 2010 a agosto de 2012 foram registrados 3999,9 mm de PT (mm), dos quais 3076,2 mm foram registrados no período chuvoso (PC) e 923,7 mm no período menos chuvoso (PMC). Esses montantes correspondem aos percentuais de 76,9% e 23,1%, respectivamente. A classificação dos períodos em PC (março a agosto) e PMC (setembro a fevereiro) foi feita baseando-se na normal climatológica do município de Vitória de Santa Antão

4.3.2 Precipitação interna, escoamento pelo tronco e perda por interceptação

A partição da precipitação total “PT (mm)” em precipitação interna “PI (mm)”, escoamento pelo tronco das árvores do estrato superior EscTr (mm), escoamento pelo tronco das árvores do sub-bosque EscSub (mm), precipitação efetiva PE (mm) e perda por interceptação I (mm) está representada na Tabela 14. Observa-se que o escoamento pelo tronco relativo EscTr (%) foi de 0,4%, sendo bem menor que PI(%) e EscSub (%). Segundo Ferreira et al. (2005), os valores de EscTr (%) são geralmente muito baixos, menores que 2% (FRANKEN et al., 1982; LEOPOLDO et al., 1987; LLOYD & MARQUES, 1988; UBARANA, 1996;. VALENTE et al., 1997; VALENTE, 1999; ARCOVA et al., 2003; DIETZ et al., 2006; ZHANG et al., 2006; CUARTAS

et al., 2007;PARK & CAMERON, 2008;HERBST et al., 2008;MARIN & MENEZES, 2008;SHANCHNOVICH et al., 2008;MOURA et al., 2009;SOUSA et al., 2011).Por este motivo, o escoamento pelo tronco, algumas vezes, é negligenciado no cálculo da perda por interceptação, como constatado nos trabalhos de Ferreira et al. (2005) e Murakami (2007). Huber &Oyarzún (1992) observaram que a forma irregular dos ramos dificulta o escoamento pelo tronco, uma vez que a água escorrida pelos mesmos se desprende antes de alcançar o tronco.

Tabela 14. Partição das chuvas observada de 2010 a 2012

Unidade	PT	PI	EscTr	EscSub	I
mm	3999,9	3332,1	17,7	122,1	527,9
%	100,0	83,3	0,4	3,1	13,2

PT – precipitação total; PI – precipitação interna; EscTr – escoamento pelo tronco das árvores do estrato superior; EscSub – escoamento pelo tronco das árvores do sub-bosque; I – perda por interceptação.

Em alguns casos, a vegetação pode ser composta por árvores de grande porte, aquelas cujas copas são vistas de cima, e árvores de pequeno porte (ou arbustos), que ficam abaixo das árvores maiores, mas que também têm a capacidade de armazenar chuva e de gerar escoamento pelo tronco. Essa situação é mais comum em florestas, mas pode ocorrer também em plantios de consórcio de várias culturas. No caso das florestas, a vegetação de menor porte, em geral, é composta de indivíduos mais novos, que apresentam menor rugosidade superficial nos troncos e galhos, além dos galhos ainda estarem situados mais próximos ao tronco e poucos entrelaçados, e isso contribui para aumentar o escoamento. Aboal et al. (1999) concluíram que árvores com maior área de copa, não dominada por seus vizinhos e com cascas mais lisas, proporcionam a coleta de maiores volumes de escoamento pelo tronco.As diferenças entre as espécies estudadas por esses autores ocorreram principalmente devido à aspereza da casca.

Ainda na Tabela 14, é possível observar que o escoamento pelo tronco do sub-bosque é aproximadamente sete vezes maior que o das árvores do estrato superior. Nesse caso, não considerar o escoamento pelo tronco, implica em um aumento de aproximadamente 4% de I (mm). Isso mostra a importância

do escoamento desses indivíduos de menor porte e que, para negligenciar o escoamento pelo tronco no cálculo da perda por interceptação por ele ser pequeno, é preciso observar também a presença ou não desses indivíduos na vegetação.

De acordo com Kellman&Roulet (1990), árvores jovens do estrato superior e arbustos podem ser mais efetivos no escoamento pelo tronco. Os mesmos autores verificaram também que essa camada inferior contribuiu cerca de dez vezes mais do que a camada superior na quantidade de água escoada pelo tronco.

Embora alguns pesquisadores tenham observados valores de EscTr (%) abaixo de 2%, em outros trabalhos, observou-se que o escoamento teve maior participação na quantidade de chuva que chegou ao solo (AISAH et al., 2012; LIU&ZHAO, 2009; MEDEIROS et al. 2009; RODRIGUES, 2009; GERMER et al., 2006; ABOAL et a., 1999). Um valor extremo de 42% de escoamento pelo tronco foi observado por Slatyer (1965).

Os processos de repartição das chuvas foram submetidos à análise de regressão para todos os dados coletados, e estão apresentados nas Figura 33, Figura 34 e Figura 35. Observou-se que PI (mm), EscTr (mm) e EscSub (mm) apresentaram forte relação com PT (mm), com $R^2 = 0,9927$; $R^2 = 0,7519$ e $R^2 = 0,7985$, respectivamente. Em geral, são encontrados altos coeficiente de determinação da relação entre esses processos e a PT (mm), como mostrado nos trabalhos de Sousa et al. (2011), Rodrigues (2009), Pereira et al. (2009), Zhang et al. (2009), Ferreira et al. (2005), Thomaz (2005), Oliveira Júnior & Dias (2005), Arcova et al. (2003), e Lima & Leopoldo (1999).

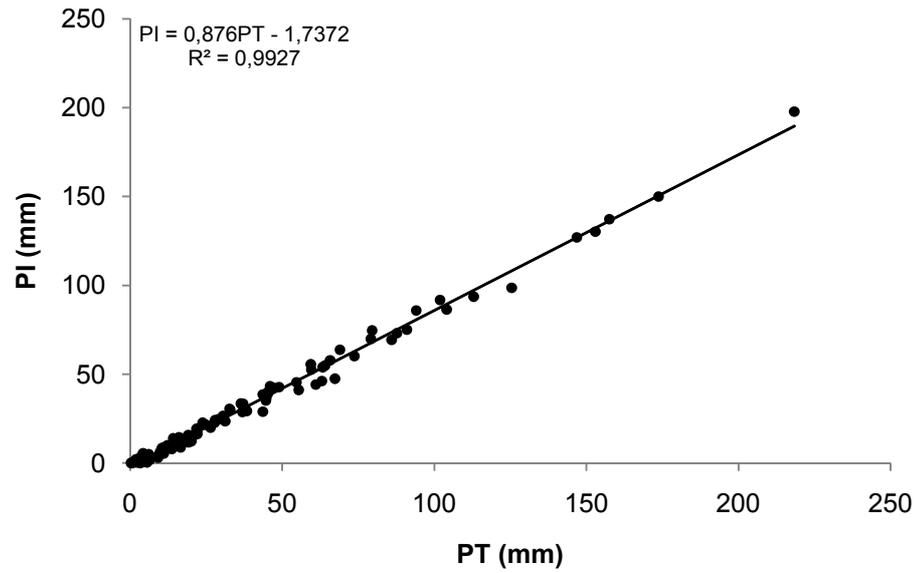


Figura 33. Relação entre a precipitação interna PI (mm) e a precipitação total PT (mm).

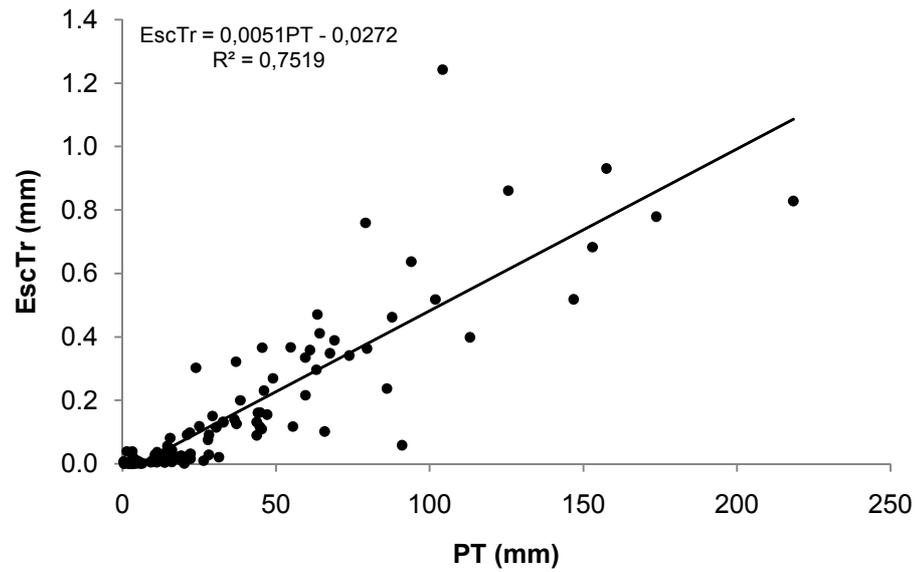


Figura 34. Relação entre o escoamento pelo tronco das árvores do estrato superior EscTr (mm) e a precipitação total PT (mm).

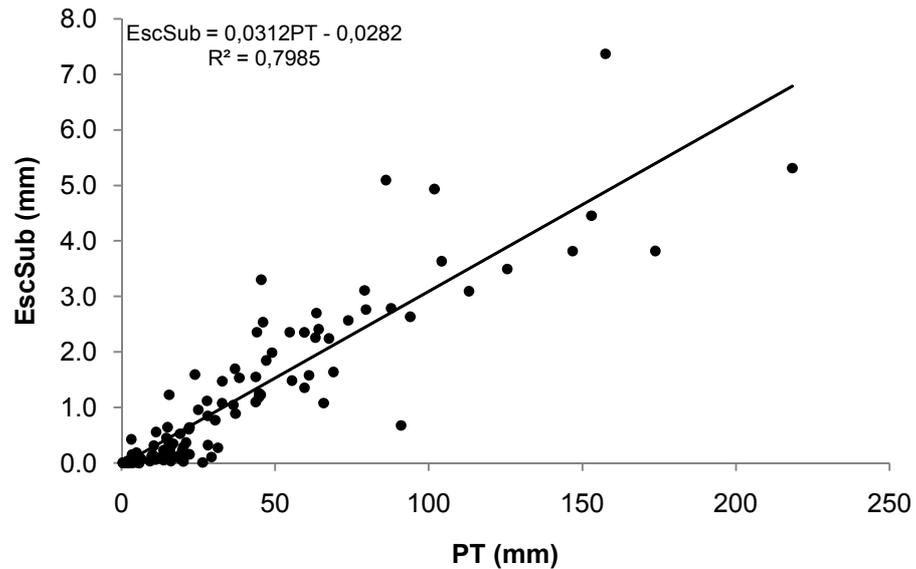


Figura 35. Relação entre o escoamento pelo tronco do sub-bosque EscSub (mm) e a precipitação total PT (mm).

Analisando-se os dados médios, observou-se que PI (mm) superou PT (mm) em cinco eventos, ou seja, I (mm) foi negativo nesses eventos, onde I (%) variou de -0,45% a -33%. Quando se considerou os dados da leitura de cada interceptômetro, observou-se que uma considerável parcela de PI (mm) foi superior a PT (mm).

Na Figura 36 está ilustrada a distribuição de frequência de PI (%). Observou-se que 25,5% das leituras de PI (mm) foram superiores à PT (mm). Esse percentual pode ser considerado médio quando comparado com outros trabalhos realizados em ambientes florestais, como por exemplo, os trabalhos de Moura et al. (2009), Germer et al. (2006), Bryant et al. (2005), Ubarana (1996) e Lloyd & Marques (1988), que registraram 35%, 19%, 10%, 41% e 29%, respectivamente.

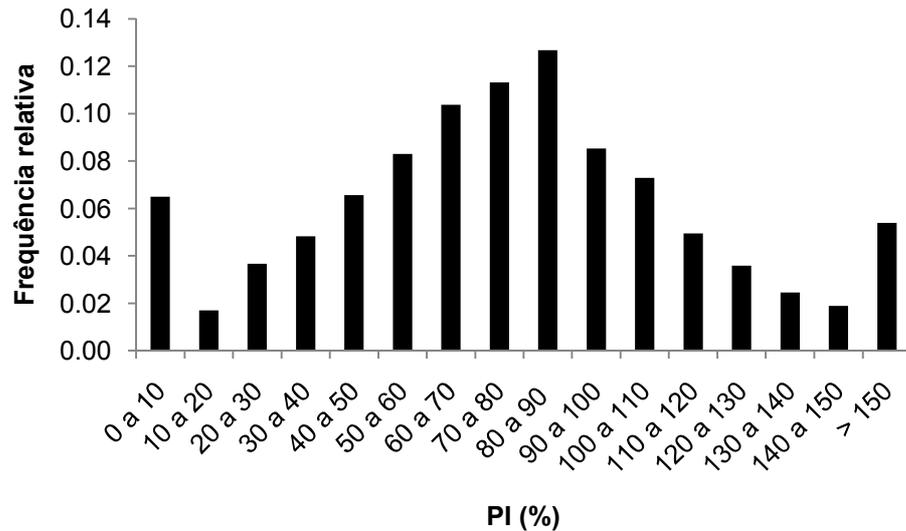


Figura 36. Distribuição de frequência relativa de PI (%).

Provavelmente, o principal fator que contribuiu para que PI (mm) tenha sido maior que PT (mm) foi a ocorrência de caminhos preferenciais que concentraram o fluxo para um determinado ponto “drip points”. A formação de “drip points” através do efeito de canalização pelas folhas, galhos e tronco também foi relatada por Carlyle-Moses et al. (2004). A quantidade de precipitação interna varia fortemente entre coletores devido à presença de “drip points” e coberturas acima desses coletores. (LOESCHER et al., 2002)

Os pontos de gotejamento concentrado tendem a aumentar a contribuição da PI (mm) em alguns interceptômetros, pois, as chuvas que deveriam cair em um determinado local podem ser desviadas pela vegetação e caírem em outro ponto que, somando-se à chuva incidente desse local, pode gerar um valor de PI (mm) maior que PT (mm). De acordo com Aisah et al. (2012), a água da chuva na superfície das folhas pode se agregar e produzir grandes volumes de PI (mm) em certos pontos embaixo da copa. A concentração da água de chuva na superfície das folhas pode também ser influenciada pela direção do vento (SHACHNOVICH et al., 2008; BRYANT et al., 2005).

Em cada coleta realizada, quanto maior o valor de PI (mm) menor é o valor de I (mm), porém, os valores mais altos são balanceados pelas pequenas coletas dos interceptômetros que deixaram de receber aquela chuva,

o que evidencia a importância da utilização de vários interceptômetros para se determinar o valor médio de PI (mm). Helvey&Patric (1965) sugeriram também o reposicionamento aleatório dos interceptômetros para diminuir o erro padrão da média de PI (mm).

Segundo Moura et al. (2009), a ocorrência de diferentes espécies na área e o entrelaçamento entre seus galhos contribuem para que o fluxo de escoamento ocorra por caminhos preferenciais, gerando pontos de gotejamento e áreas protegidas, que tendem a aumentar a contribuição de chuva em alguns interceptômetros e a diminuir em outros, respectivamente. Os autores observaram que, nas áreas vizinhas aos pontos onde foram registrados os maiores valores de precipitação interna, foram registrados pequenos valores de precipitação interna.

Segundo Aisah et al. (2012), a variabilidade nas medidas de precipitação interna sempre ocorreu, e que uma estimativa precisa desse processo é difícil. A grande variabilidade da precipitação interna também é destacada por Ubarana (1996) e Lloyd & Marques (1988), os quais relatam a dificuldade de conduzir este tipo de experimento em florestas tropicais devido à distribuição irregular da precipitação interna.

O EPM da precipitação interna foi de 9%, variando de 3% a 23%. Esse valor foi semelhante aos 8% encontrado por Vieira & Palmier (2006) que utilizaram dez interceptômetros para medir a precipitação interna. Segundo Lloyd & Marques (1988), uma forma de reduzir o erro padrão da média é o reposicionamento dos interceptômetros após determinadas coletas.

A repartição das chuvas foi analisada sob diferentes classes de chuva e está apresentada na Tabela 15. Observa-se que os maiores valores de I (%) ocorreram para as menores classes de chuva. Através de análise de variância, constatou-se que não houve diferença significativa de I (%) entre as chuvas maiores que 20 mm e que a classe com chuvas menores que 10 mm apresentou diferença significativa para todas as outras classes, ao nível de 0,05.

Tabela 15. Repartição das chuvas sob diferentes classes de chuva

Classes de chuva (mm)	PT (mm)	PI (mm)	EscTr (mm)	EscSub (mm)	I (mm)	PI (%)	EscTr (%)	EscSub (%)	I (%)
< 10	83,5	42,6	0,2	1,3	39,4	51,0	0,0	2,0	47,0
[10 - 20[	360,5	270,0	0,6	7,1	82,8	75,0	0,0	2,0	23,0
[20 - 30[	315,3	254,4	1,0	7,1	52,7	81,0	0,0	2,0	17,0
[30 - 40[	275,8	235,7	1,2	8,8	30,1	85,0	0,0	3,0	11,0
[40 - 50[	453,2	385,8	1,8	18,4	47,2	85,0	0,0	4,0	10,0
[50 - 60[	229,0	194,9	1,0	7,5	25,4	85,0	0,0	3,0	11,0
[60 - 70[	453,5	368,3	2,4	13,9	68,9	81,0	1,0	3,0	15,0
≥ 70	1884,7	1621,5	9,6	59,6	193,9	86,0	1,0	3,0	10,0

A precipitação interna foi o principal processo que influenciou na variação de I (%) nas diferentes classes de chuva. O menor percentual de perda por interceptação para chuvas maiores que 10 mm, provavelmente, deve-se ao fato de que as chuvas de alta magnitude contribuem para um maior umedecimento da vegetação. Com a continuação da chuva, há uma maior turbulência nas folhas e ramos fazendo com que a chuva retida na vegetação seja movimentada e venha a cair, aumentando PI (mm). Além disso, quando a copa está saturada, a chuva, praticamente, não é retida, e isso também contribui para o aumento. Resultados semelhantes foram observados por Moura et al. (2009) e Lima & Leopoldo (1999). Thomaz (2005), estudando a precipitação interna na vegetação de capoeira e floresta secundária, observou que a precipitação interna relativa, na vegetação de floresta secundária, aumentou à medida que as chuvas foram crescendo, porém, diminuiu na vegetação de capoeira.

A variação de I (%) em função de PT (mm) está apresentada nas Figura 37, para cada evento, e Figura 38, para a média das classes de chuva. Com o aumento da PT (mm), I (%) tendeu a diminuir e se estabilizar. Os dados se ajustaram bem ao modelo potencial, quando considerada a média das classes de chuva, onde, aproximadamente, 84% da variação de I (%) puderam ser explicadas pela variação de PT (mm). Comportamento semelhante foi observado por Liu & Zhao (2009), Oliveira Junior (2006), Vieira & Palmier (2006), Llorens et al. (1997).

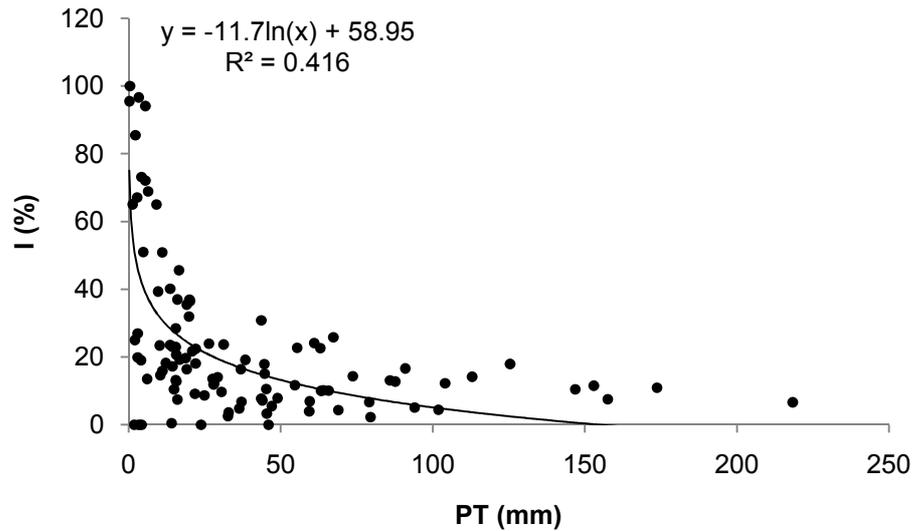


Figura 37. Relação entre a perda por interceptação relativa – I (%) e a precipitação total - PT (mm), para cada evento.

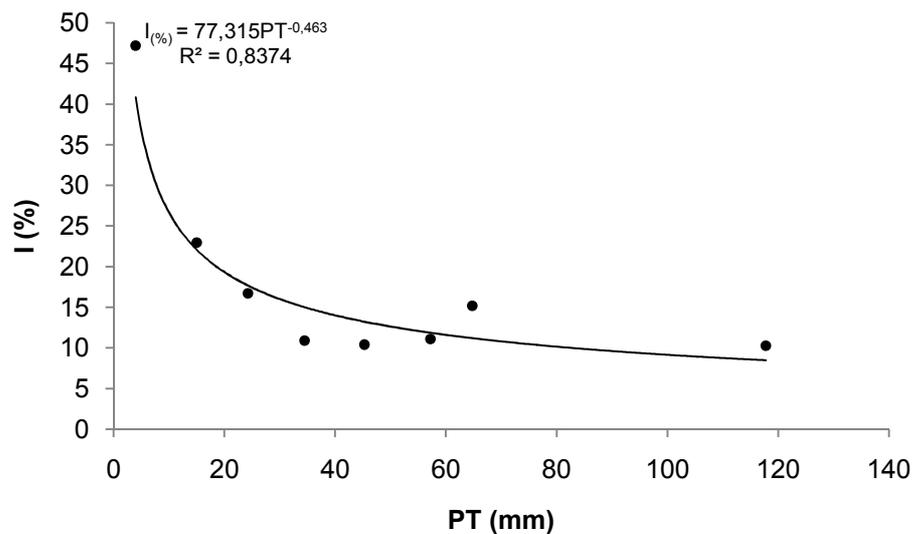


Figura 38. Relação entre a perda por interceptação relativa – I (%) e a precipitação total - PT (mm), para a média de cada classe de chuva.

Segundo Carlyle-Moses&Price (2006), com o aumento da precipitação, uma maior proporção de troncos e galhos é saturada, aumentando a área de contribuição, o que, conseqüentemente, aumenta o escoamento até que um determinado limite de chuva, que satura todas as áreas capazes de gerar escoamento, seja alcançado. É possível estender esse raciocínio também à

precipitação interna e, conseqüentemente, considerar que o percentual de perda por interceptação diminuirá com o aumento da precipitação.

Analisou-se a repartição das chuvas considerando os períodos chuvoso (PC) e menos chuvoso (PMC). Na Tabela 16 estão apresentados os processos de repartição das chuvas nos dois períodos (PC e PMC). Observa-se que no PC a quantidade relativa de chuva que chega ao solo por precipitação interna e escoamentos pelos troncos são maiores que os registrados no PMC. Conseqüentemente, no PC ocorreu menor perda por interceptação. Isso provavelmente ocorreu porque no PC o intervalo entre as chuvas é menor, o que implica em menos tempo para a secagem e favorecimento da manutenção da umidade na cobertura vegetal. Quanto mais úmida a vegetação, menor a quantidade de chuva necessária para saturá-la, conseqüentemente, menor retenção de chuva e maior fluxo de gotejamento e escoamento pelos galhos e troncos.

Tabela 16. Partição das chuvas nos períodos chuvosos (PC) e nos períodos menos chuvosos (PMC)

Período	Unidade	PT	PI	EscTr	EscSub	I (mm)
PC	mm	3131,6	2621,1	15,2	102,6	392,6
	%	100,0	83,7	0,5	3,3	12,5
PMC	mm	923,7	752,2	2,6	21,0	147,9
	%	100,0	81,4	0,3	2,3	16,0

PT – precipitação total; PI – precipitação interna; EscTr – escoamento pelo tronco das árvores do estrato superior; I – perda por interceptação.

Outro fator que contribuiu para que I (%) fosse maior no PC foi que as maiores médias de intensidade de chuva foram observadas no PC, principalmente nos meses de abril a junho em 2010 e 2011. No ano de 2012, os meses de janeiro, fevereiro e março tiveram intensidade de chuva média igual ou superior aos meses do período chuvoso.

Oliveira et al. (2011), Herbst et al. (2008) e Arcova et al. (2003) também observaram diferença entre I (%) registrada nos períodos considerados mais chuvosos e menos chuvosos. As diferenças observadas por esses autores foram mais acentuadas que as observadas no presente estudo, com diferenças de 9,5 a 24,7%. Por outro lado, Deguchi et al. (2006) observaram pequena

diferença percentual, semelhante ao do presente estudo, quando considerado diferentes períodos, sendo 17,6% no PC e 14,3% no PMC. Vale salientar que esses trabalhos foram realizados em diferentes regiões e cobertura vegetal, portanto, comparar seus resultados com o do presente estudo não implica dizer quais estão certos ou errados, mas sim, mostrar que o efeito da sazonalidade também foi observado em outras pesquisas com maior ou menor grau de influência.

Os dados observados nos dois períodos foram submetidos à análise de regressão e estão apresentados nas Figura 39, Figura 40 e Figura 41.

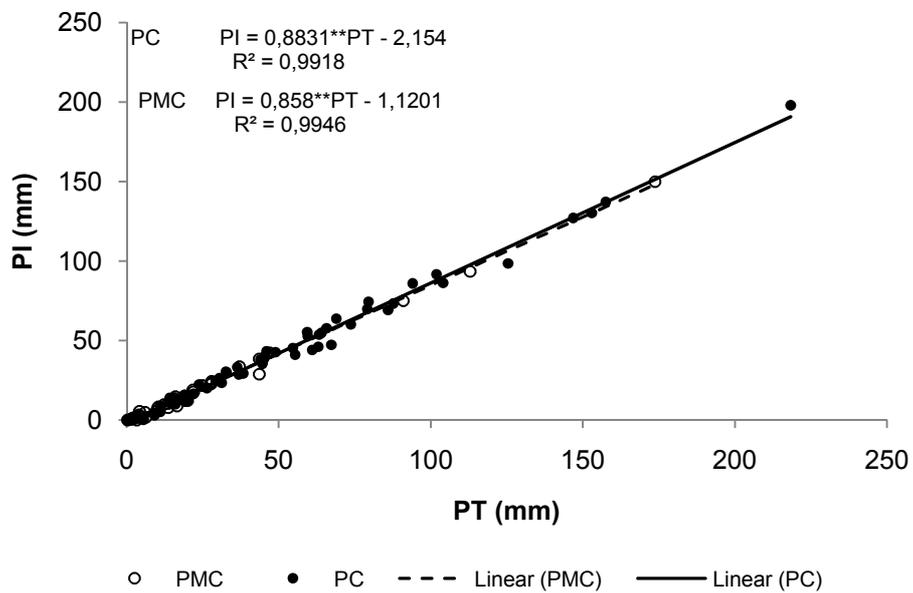


Figura 39. Relação entre a precipitação interna “PI (mm)” e a precipitação total “PT (mm)” nos períodos chuvoso (PC) e menos chuvoso (PMC). ** - significativo a 0,01 de probabilidade.

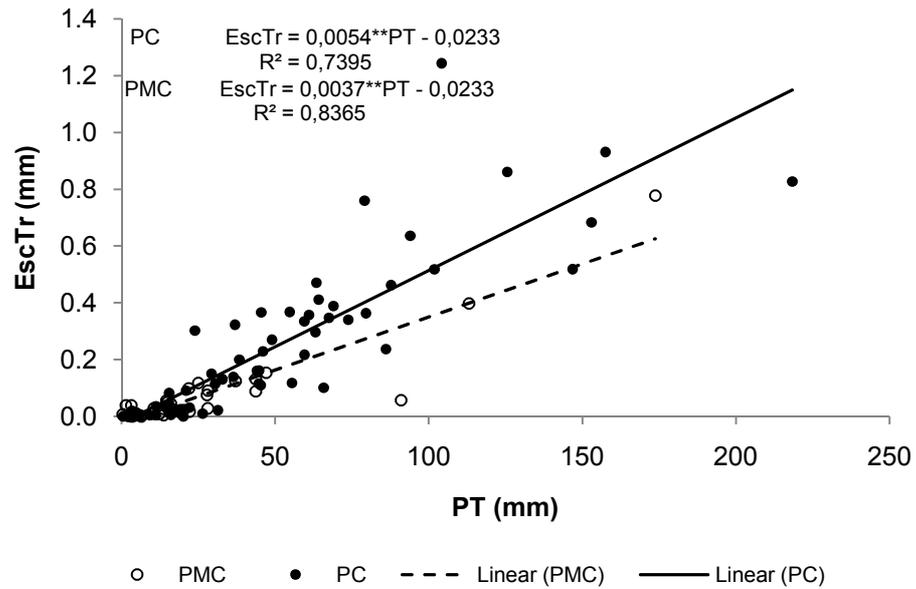


Figura 40. Relação entre o escoamento pelo tronco das árvores do estrato superior “EscTr (mm)” e a precipitação total “PT (mm)” nos períodos chuvoso (PC) e menos chuvoso (PMC). ** - significativo a 0,01 de probabilidade.

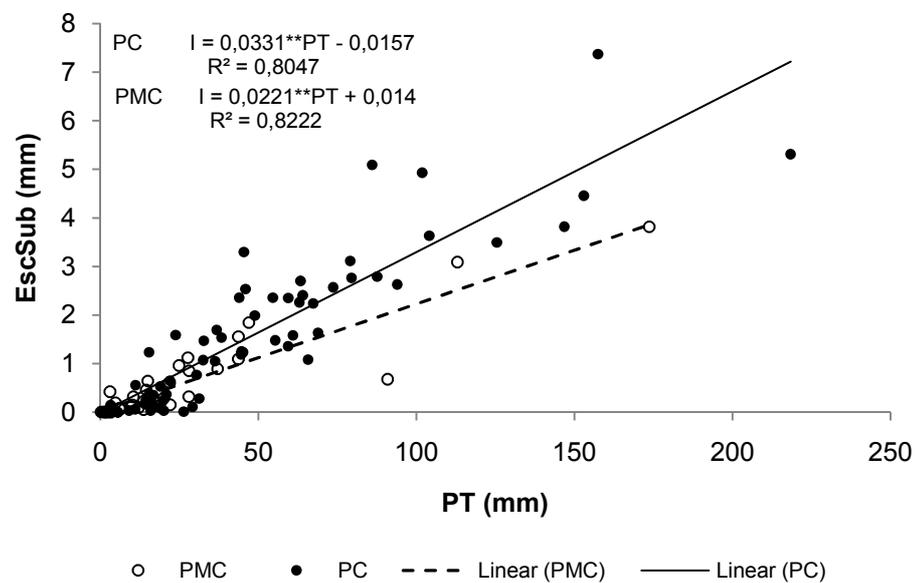


Figura 41. Relação entre o escoamento pelo tronco do sub-bosque “EscSub (mm)” e a precipitação total “PT (mm)” nos períodos chuvoso (PC) e menos chuvoso (PMC). ** - significativo a 0,01 de probabilidade.

Todos os processos apresentaram forte relação com a PT (mm) nos dois períodos considerados. Todas as regressões foram significativas a 0,01 de probabilidade.

4.3.3 Modelo linear

Com a regressão dos dados observados de abril de 2010 a março de 2011, estabeleceu-se o modelo linear $PI_{lin} = aPT + b$, o modelo $EscTr_{lin} = aPT + b$ e o modelo $EscSub_{lin} = aPT + b$, para os períodos PC e PMC. Esses modelos foram usados para estimar I_{lin} (mm) no período de abril de 2011 a agosto de 2012. No período chuvoso, observou-se pela relação entre a precipitação interna, escoamento pelo tronco e escoamento pelo sub-bosque com a precipitação total que R^2 foi igual a 0,992, 0,886 e 0,863, respectivamente. No período menos chuvoso, R^2 foi igual a 0,963, 0,703 e 0,784

Está apresentada na Figura 43 a perda por interceptação acumulada durante o período de estudo.

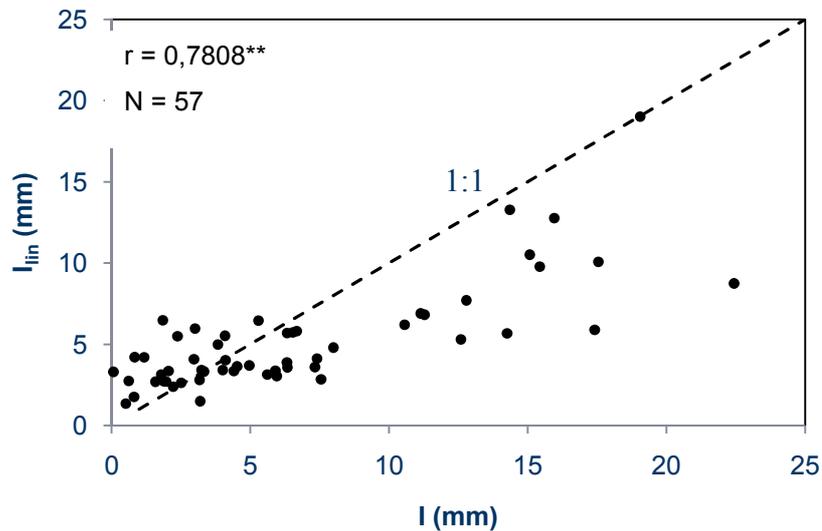


Figura 42. Correlação entre a perda por interceptação estimada pelo modelo linear – I_{lin} (mm) e a perda por interceptação observada – I (mm).

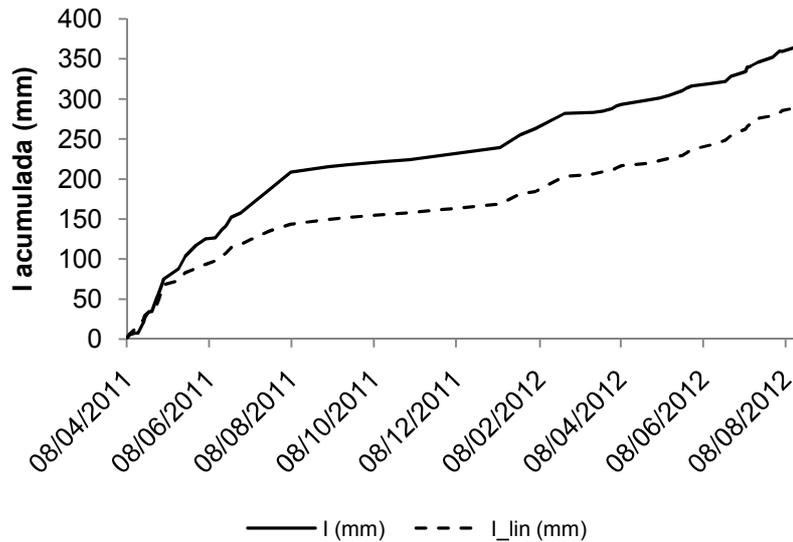


Figura 43. Evolução da perda por interceptação observada I (mm) e estimada pelo modelo linear I_{lin} (mm) durante o período de abril de 2011 a agosto de 2012.

Observa-se na Figura 42 que os pontos com maiores valores de I (mm) encontram-se abaixo da reta 1:1, sugerindo uma subestimativa do modelo linear.

O DMN e a EM encontrados foi de -0,21 e 0,51, respectivamente. O valor de -0,21 é um indicativo de que existe desvio para menos dos valores estimados em relação aos observados a uma escala de todo o período de estudo. O valor positivo de EM indica que as estimativas obtidas pelo modelo linear são melhores do que a simples média dos valores observados.

Na Tabela 17 está apresentada a repartição das chuvas de abril de 2011 a agosto de 2012 para os dois períodos, bem como, os valores estimados pelo modelo linear.

Tabela 17. Repartição das chuvas observada e estimada pelo modelo linear nos períodos chuvoso e menos chuvoso

Unidade	PT	PI	EscTr	EscSub	I	PI _{lin}	EscTr _{lin}	EscSub _{lin}	I _{lin}
Período inteiro									
mm	2690,4	2238,6	11,7	74,3	365,7	2281,2	13,4	106,3	289,4
%	100,0	83,2	0,4	2,8	13,6	84,8	0,5	4,0	10,8
Período chuvoso									
mm	2221,0	1852,2	10,3	65,2	293,3	1888,1	12,2	92,3	228,5
%	100,0	83,4	0,5	2,9	13,2	85,0	0,5	4,2	10,3
Período menos chuvoso									
mm	469,3	386,4	1,4	9,1	72,4	393,1	1,3	14,0	60,9
%	100,0	82,3	0,3	1,9	15,4	83,8	0,3	3,0	13,0

Embora o modelo linear tenha subestimado a perda por interceptação, observa-se que os valores obtidos pelo modelo linear seguiram a mesma tendência dos valores observados, ou seja, I_{lin} (%) foi maior no PC do que no PMC.

4.4 Resumo geral dos processos de repartição das chuvas na cultura do café, na cultura do limão e no fragmento de mata

Na Tabela 18 está apresentado o resumo geral das perdas por interceptação observadas nos três tipos de vegetação.

Tabela 18. Resumo geral dos processos de repartição das chuvas nos três tipos de vegetação

Vegetação	PT (mm)	PI (mm)	EscTr (mm)	EscSub (mm)	I (mm)	PI (%)	EscTr (%)	EscSub (%)	I (%)
Café	1396,2	947,4	69,7	-----	379,1	67,9	5,0	-----	27,2
Limão	1596,2	1164,4	18,7	-----	415,6	72,9	1,2	-----	26,0
Vegetação natural	3999,9	3332,1	17,7	122,1	527,9	83,3	0,4	3,1	13,2

4.5 Aplicação do modelo de Gash na cultura do café

Durante o período de observação foram realizadas 96 coletas, das quais 32 foram usadas no período de calibração do modelo e 64 no período de validação. A frequência absoluta e relativa da precipitação horária para chuvas maiores que 0,4 mm, usadas para calcular a intensidade de chuva média, está apresentada na Figura 44.

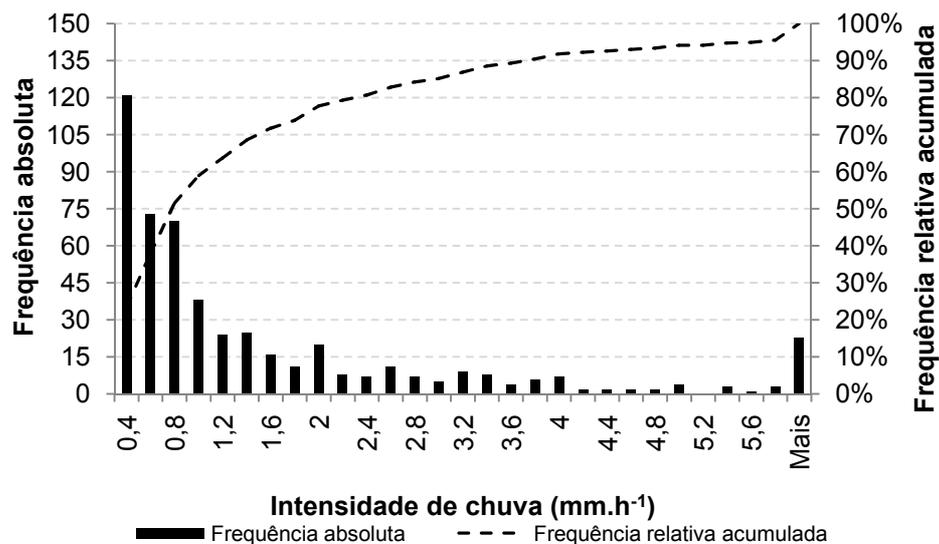


Figura 44. Frequências da precipitação ocorrida no intervalo de uma hora, para chuvas iguais ou maiores que 0,4 mm.

A intensidade de chuva média foi de $1,779 \text{ mm.h}^{-1}$, sendo este valor maior que 74% dos registros da intensidade de chuva. Intensidades acima de $5,8 \text{ mm.h}^{-1}$ apresentaram frequência absoluta de 0 ou 1 evento, sendo observada intensidade máxima de $29,2 \text{ mm.h}^{-1}$.

Para os mesmo intervalos de tempo usados para se determinar a intensidade de chuva média, calculou-se a taxa de evaporação média. Na Figura 45 está apresentada a frequência absoluta e relativa acumulada da evaporação nos intervalos horários em que a precipitação foi igual ou superior a $0,4 \text{ mm}$.

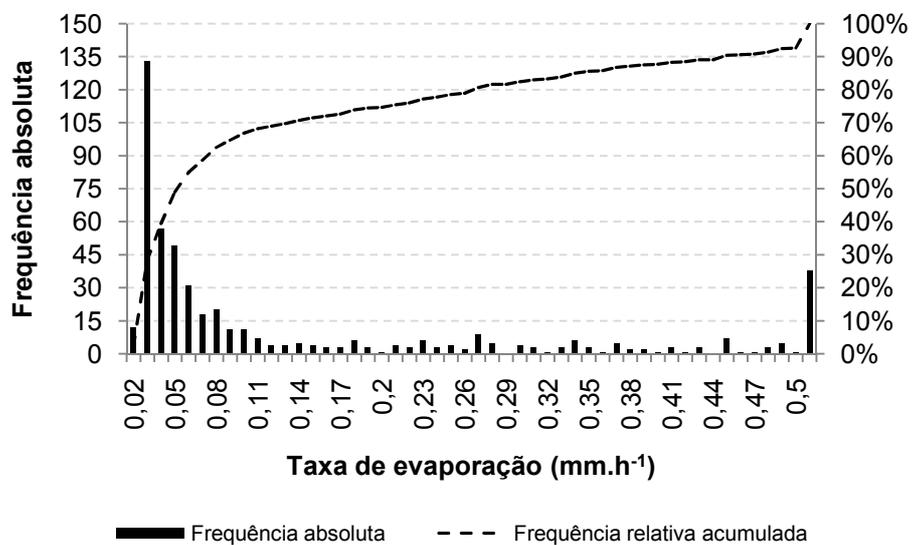


Figura 45. Frequências da evaporação ocorrida no intervalo de uma hora, para chuvas iguais ou maiores que $0,4 \text{ mm}$.

A taxa de evaporação média foi de $0,149 \text{ mm.h}^{-1}$, sendo este valor maior que 70% dos registros da taxa de evaporação horária.

Os parâmetros vegetais do modelo de Gash foram obtidos dos coeficientes das equações de regressão e estão apresentados nas Figura 46 e Figura 47, conforme Gash & Morton (1978).

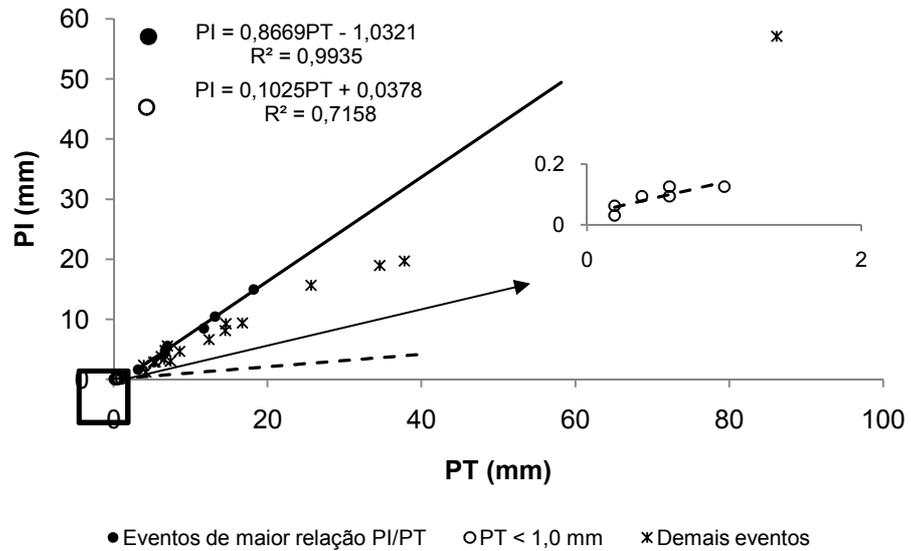


Figura 46. Capacidade de armazenamento da copa (S) e Coeficiente de precipitação interna livre (p). A linha contínua é a reta de regressão dos pontos de maior relação PI/PT. A linha tracejada é a reta de regressão dos eventos que não saturaram a copa. Temos $S = 1,0321$ e $p = 0,1025$. Os eventos de chuva menores que 1,0 mm estão destacados pelo retângulo e ampliados no lado direito. PI – precipitação interna, PT – precipitação total.

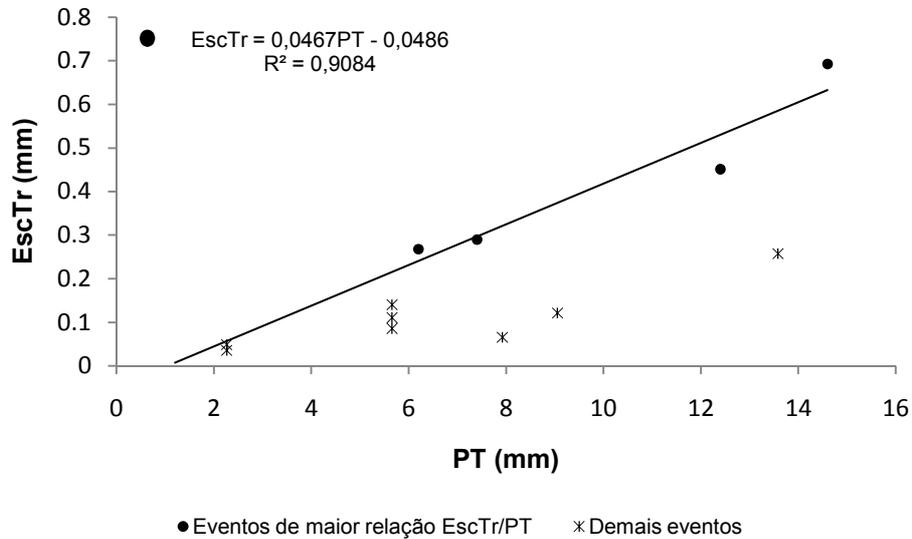


Figura 47. Capacidade de armazenamento do tronco (S_t) e porção de chuva que é desviada para o tronco (p_t). A linha contínua é a reta de regressão dos pontos de maior relação EscTr/PT. Temos $S_t = 0,0486$ mm e $p_t = 0,0467$ mm. EscTr – escoamento pelo tronco das árvores do estrato superior, PT – precipitação total.

Na Tabela 19, estão apresentados os parâmetros obtidos para aplicação do modelo de Gash.

Tabela 19. Parâmetros para aplicação do modelo de Gash

Parâmetro	Símbolo	Unidade	Valor
Coeficiente de precipitação interna livre	p	----	0,10
Capacidade de armazenamento da copa	S	mm	1,03
Capacidade de armazenamento do tronco	S_t	mm	0,05
Porção de chuva desviada para o tronco	p_t	----	0,05
Intensidade média da chuva na saturação	\bar{R}	mm.h ⁻¹	1,779
Taxa de evaporação média na saturação	\bar{E}	mm.h ⁻¹	0,149
Chuva necessária para saturar a copa	PT'	mm	1,270

Os valores dos parâmetros da estrutura vegetal S , p , S_t e p_t encontram-se relativamente próximos dos valores obtidos em outras pesquisas (Medeiros et al., 2009; Gash e Morton, 1978; Rutter et al., 1971). Embora não seja conveniente comparar esses parâmetros, porque a estrutura vegetal de cada espécie é bastante variada, em alguns trabalhos foram encontrados parâmetros com valores bem acima dos encontrados nesta pesquisa, como no caso do parâmetro “ p ” encontrado nos trabalhos de Oliveira et al. (2008) e Zhang et al. (2006), cujos valores foram 0,85 e 0,81, respectivamente. Vale ressaltar que diferentes metodologias também são utilizadas para determinação desses parâmetros e isso contribui ainda mais para essa variação. Pereira et al. (2009) apresentaram nova metodologia para determinar S , onde são consideradas a taxa de evaporação e a intensidade de chuva, e Klaassen et al. (1998) compararam três metodologias para obtenção de S e encontraram valores de 0,4 mm, 1,2 mm e 4,6 mm.

Foi realizada uma análise de sensibilidade dos parâmetros usados no modelo de Gash, de modo a averiguar a sensibilidade do modelo ante a variação dos parâmetros. Cada parâmetro do modelo foi submetido a uma variação de -50% a +50% do valor obtido inicialmente. Na Figura 48 está apresentada a análise de sensibilidade de cada parâmetro.

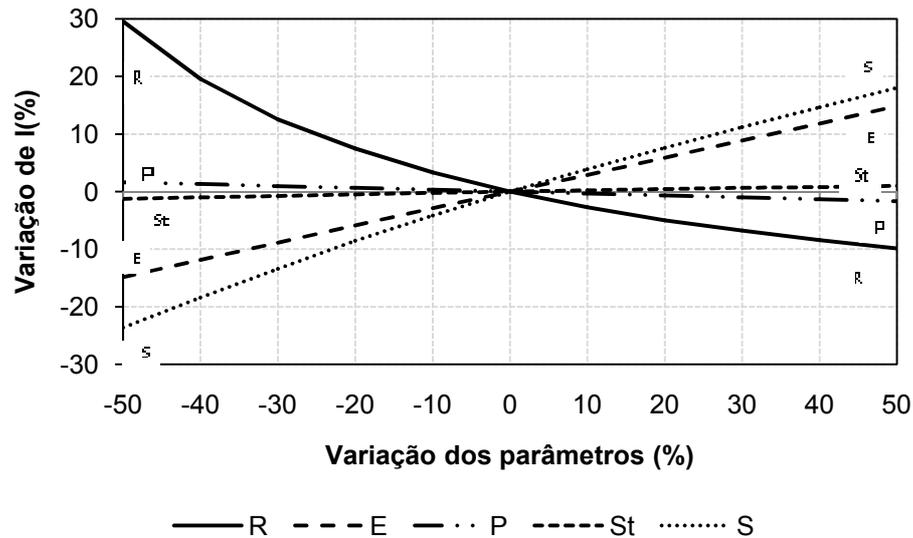


Figura 48. Análise de sensibilidade dos parâmetros usados no modelo de Gash. E – taxa de evaporação média, R – intensidade de chuva média, p – coeficiente de precipitação interna livre, S_t – capacidade de armazenamento do tronco, p_t – porção de chuva desviada para o tronco.

Observa-se que os parâmetros que mais influenciam na perda por interceptação são os parâmetros meteorológicos (\bar{E} e \bar{R}) e o parâmetro vegetal S. Uma variação de -50% a +50% na intensidade de chuva média acarreta uma variação de +30% a -10% na perda por interceptação. Para a mesma amplitude de variação de \bar{E} e de S, a perda por interceptação variou de -15% a +15% e de -24% a +18%, respectivamente. A capacidade de armazenamento do tronco, o coeficiente de precipitação interna livre e a porção de chuva que é desviada para o tronco pouco influenciaram na variação da perda por interceptação, onde as respectivas variações na perda por interceptação foram: S_t (-1,3% a +1,0%), p (+1,6% a -1,7%) e p_t (+0,05 a -0,33). Esses resultados sugerem que a taxa de evaporação média e a intensidade média de chuva devem ser obtidas próximo a área de estudo, a fim de minimizar os erros associados à variabilidade espacial. A metodologia usada para se determinar os parâmetros vegetais também podem influenciar na estimativa da perda por interceptação, principalmente em relação ao parâmetro S, ao qual o modelo acusou ser mais sensível.

Gash & Morton (1978), Valente et al. (1997) e Medeiros et al. (2009), assim como no presente trabalho, observaram que a perda por interceptação é pouco sensível aos parâmetros da vegetação. Entretanto, Klaassen et al. (1998) mostraram, por meio de uma observação direta da capacidade de

armazenamento da copa e da evaporação, que, se tratando de uma floresta densa, a capacidade de armazenamento “S” é o processo dominante na interceptação da floresta e a evaporação durante chuvas contínuas é de menor importância.

As perdas por interceptação estimadas pelo modelo de Gash foram relacionadas com a precipitação total (Figura 49) e a relação entre a perda por interceptação estimada e a observada estão apresentadas na Figura 50.

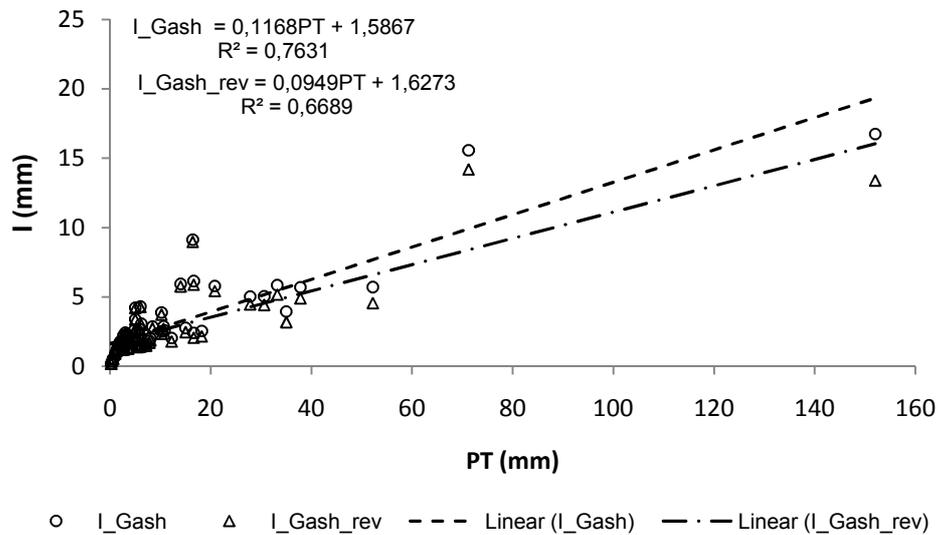


Figura 49. Relação entre as perdas por interceptação estimadas pelo modelo de Gash e a precipitação total.

Nota-se na Figura 49 que 76% e 67% da variância da perda por interceptação estimada pelo modelo original de Gash e pelo modelo revisado, respectivamente, puderam ser explicados pela variância da precipitação total.

Os valores de I_{obs} e I_{est} foram submetidas à análise de regressão, cujo resultado está apresentado na Figura 50.

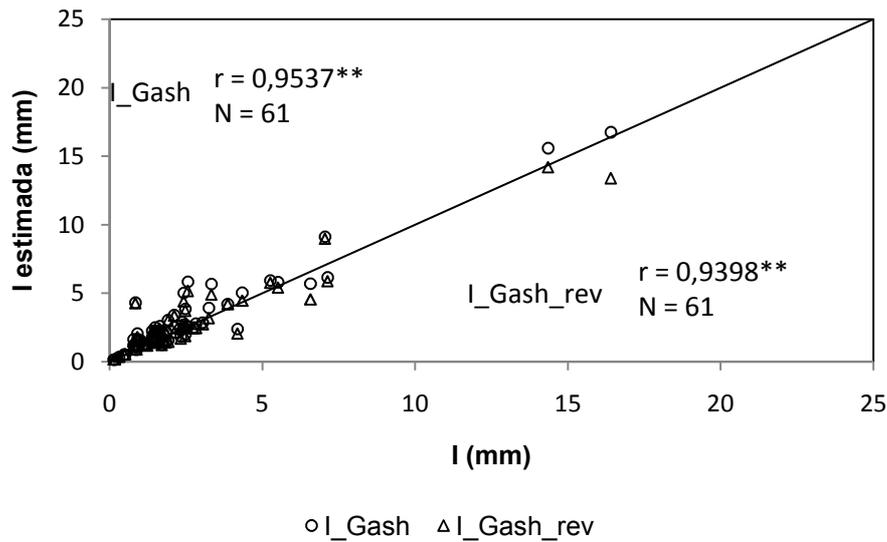


Figura 50. Relação entre as perdas por interceptação estimadas pelo modelo de Gash. ** - significativo a 0,01 de probabilidade.

Observa-se na Figura 50 que as perdas estimadas pelo modelo de Gash apresentam forte correlação com I (mm). Os pontos em torno da linha contínua (reta 1:1) indicam que os erros positivos são balanceados pelos erros negativos. Como o modelo usa uma intensidade média para todos os eventos, supõe-se que haverá uma tendência a superestimativa quando o evento analisado apresentar intensidade de chuva maior que a média da intensidade aplicada no modelo, e uma subestimativa quando a intensidade for menor que a intensidade média. O raciocínio inverso pode ser considerado para a taxa de evaporação.

Os valores estimados foram superiores aos observados quando considerado o somatório da perda por interceptação em todo o período de estudo. Na

Tabela 20, está apresentado um resumo quantitativo da precipitação e das perdas por interceptação. Observa-se que I_{Gash} (mm) superestimou I (mm) em 27,8 mm, correspondendo a um aumento de aproximadamente 18% do valor observado. Esse valor está acima do apresentado por Gash et al. (1979), os quais encontraram uma superestimativa de 5%. Posteriormente, em outros trabalhos de Gash, foram apresentados valores superestimados em relação aos encontrados no presente trabalho. Por exemplo, Gash et al. (1995) superestimaram em 39% os valores observados; Valente et al. (1997) superestimaram em 40,6% e 43,8% os valores observados em uma plantação

de pinus e eucalyptus, respectivamente. Asdak et al. (1998) encontraram superestimativa de 65% em vegetação parcialmente fechada e 14% em vegetação totalmente fechada. Oliveira et al. (2008) e Zhang et al. (2006) encontraram valores próximos aos encontrados no presente estudo. Eles observaram que o modelo original de Gash superestimou os dados observados em torno de 17%.

Tabela 20. Perda por interceptação observada e estimada pelo modelo de Gash

	PT	I	I _{Gash}	I _{Gash_rev}
mm	764,0	158,2	186,0	171,7
%	100	20,7	24,3	22,5
DMN			0,18	0,09
EM			0,87	0,88

DMN – Desvio Médio Normalizado; EM – Eficiência da Modelagem; PT – precipitação total; I – perda por interceptação observada; I_{Gash} – perda por interceptação estimada pelo modelo original de Gash e I_{Gash_rev} - perda por interceptação estimada pelo modelo revisado de Gash.

Segundo Valente (1999), a perda por interceptação foi estimada com sucesso pelo modelo original de Gash nos trabalhos de Pearce & Rowe (1981); Rowe (1983); Lloyd et al. (1988) e Loustau et al. (1992). Vieira & Palmier (2006) também obtiveram sucesso com a aplicação do modelo de Gash, em estudo realizado em floresta semi-decídua, no entanto, eles observaram que o modelo subestimou a perda por interceptação em 3%.

Em relação ao modelo revisado de Gash, verificou-se que este também superestimou a perda por interceptação observada em 13,5 mm, que corresponde a um aumento de 9%, ou seja, metade do aumento verificado pelo modelo original, o que justifica o uso desse modelo revisado no lugar do original, como mencionado por Gash et al. (1995). Na Figura 51 está apresentada a evolução das perdas por interceptação observada e as estimadas pelo modelo de Gash original e revisado.

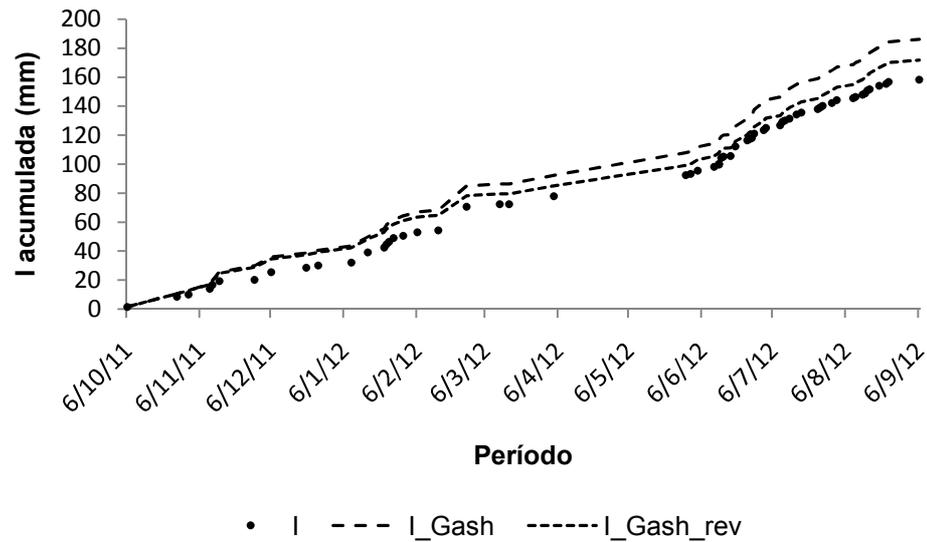


Figura 51. Perda por interceptação observada e estimada pelo modelo de Gash versão original e revisada. I – é a perda por interceptação observada, I_{Gash} – é a perda estimada pelo modelo original de Gash e I_{Gash_rev} – é a perda estimada pelo modelo revisado de Gash.

Ambos os modelos superestimaram os dados observados, no entanto, o modelo de Gash revisado se ajustou melhor. Essa diferença é atribuída ao fato de que o modelo original de Gash considera implicitamente que a vegetação ocupa todo o terreno, sendo ela totalmente fechada, o que altera a taxa de evaporação, a qual deveria ser calculada para um valor proporcional à cobertura da copa. Além disso, a capacidade de armazenamento da copa e do tronco também devem ser referenciados a um valor proporcional da cobertura vegetal.

O modelo de Gash, quando aplicado levando-se em consideração a proporção da cobertura da copa, apresentou melhor aderência aos dados observados do que o modelo original nos trabalhos de Gash et al. (1995), Valente et al. (1997) e Lankreijer et al. (1993). Segundo Valente (1999), a base conceitual do modelo original parece ser consistente somente para a modelagem da perda por interceptação em cobertos relativamente fechados e que, quando c tende à unidade, a formulação da versão revisada do modelo se aproxima da original. Isso pode ser observado no trabalho de Asdak et al. (1998), que encontraram valores semelhantes nas estimativas das duas versões do modelo de Gash, onde, na ocasião, a cobertura vegetal encontrava-se totalmente fechada, sendo o coeficiente de cobertura vegetal “ c ” igual

à unidade. No mesmo trabalho, esses autores observaram grande diferença entre as estimativas da versão original e revisada, quando o modelo foi aplicado em vegetação com cobertura parcialmente fechada.

No presente trabalho, o parâmetro c foi igual a 0,85 ($c = 1 - p - p_t$), o que justifica a diferença entre as estimativas das duas versões do modelo de Gash não ser tão expressiva quanto a observada por Gash et al. (1995) e por Valente et al. (1997), uma vez que “ c ” está mais próxima da unidade, do que o obtido por aqueles autores.

Zhang et al. (2006) observaram que a perda por interceptação estimada pelo modelo revisado de Gash em uma floresta subtropical no Sul da China se aproximou mais dos dados observados do que a estimada pelo modelo original, representando um aumento de 7% e 17,2% dos dados observados, respectivamente. O valor do coeficiente “ c ” obtido neste trabalho foi igual 0,82.

Cuartas et al. (2007) observaram que o modelo de Gash revisado subestimou os dados observados em 13% em estudo realizado na Floresta Amazônica. Já Valente et al. (1997), na vegetação de Eucalyptus, também observaram que o modelo de Gash revisado subestimou os dados observados, sendo essa redução de apenas 2,9%.

5 CONCLUSÕES

Foi possível determinar a perda por interceptação em função apenas da precipitação da vegetação natural (fragmento de mata) e da cultura do limão, na bacia do rio Tapacurá. Na cultura do café, o uso da média da perda por interceptação mostrou-se ser melhor que a estimava do modelo linear.

Foi possível estimar a perda por interceptação por meio do modelo analítico de Gash.

Quando avaliada sob diferentes classes de chuva, a perda por interceptação mostrou-se menor para as classes de maior magnitude. Na cultura do café e do limão, não houve diferenças significativas entre as taxas de perda por interceptação I (%) nas chuvas maiores que 5 mm, e na vegetação natural, nas chuvas maiores que 20 mm.

Na vegetação natural, verificou-se que a sazonalidade influenciou na perda por interceptação, de modo que, no período menos chuvoso, a perda foi mais acentuada do que no período chuvoso. A diferença entre a perda por interceptação observada nos dois períodos foi relativamente menor, quando comparadas com as diferenças observadas em outros estudos.

O modelo linear, de forma geral, não apresentou boa estimativa da perda por interceptação, onde o melhor resultado foi obtido na vegetação natural, cujo desvio médio normalizado foi de -21%.

O modelo de Gash revisado, comparado com o modelo linear e com a versão original de Gash, apresentou melhor aderência aos dados observados, mostrando-se capaz de estimar satisfatoriamente as perdas por interceptação na bacia do Tapacurá, levando em conta a necessidade de se determinar os parâmetros das vegetações a serem consideradas.

O uso do modelo de Gash é uma importante ferramenta, pois, é capaz de estimar satisfatoriamente a perda por interceptação na região em que se encontra a bacia do Tapacurá, sendo mais um elemento para subsidiar a base de conhecimento hidrológica necessária a gestão dos recursos hídricos.

Recomendações

Utilizar pluviômetros automáticos também para medir a precipitação interna e o escoamento pelo tronco, a fim de se evitar que as coletas sejam compostas por mais de um evento de chuva, o que garantiria melhor avaliação dos processos.

Aplicar o modelo revisado de Gash em outros tipos de vegetação na bacia do Tapacurá, uma vez que a cobertura vegetal da bacia é bastante diversificada e que o modelo se mostrou como uma boa ferramenta para estimar a perda por interceptação para as condições climáticas reinantes da bacia.

Testar outros modelos de perda por interceptação e compará-los com o modelo revisado de Gash, visto que existem outros modelos de predição de perda por interceptação e que, atualmente, são menos explorados.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABOAL, J.; JIMENEZ, M.; MORALES, D.; HERNANDEZ, J. Rainfall interception in laurel forest in the Canary Islands. *Agricultural and Forest Meteorology* 97, 73–86, 1999.

AISAH, S. S.; YUSOP, Z.; NOGUCHI, S.; RAHMAN, K. A. Rainfall partitioning in a young *Hopeaodorata* plantation. *Journal of Tropical Forest Science*, v. 24, n. 2, p. 147 – 161, 2012.

ALBUQUERQUE, F. A. Estudos hidrológicos em microbacias com diferentes usos do solo na sub-bacia do alto Natuba-PE. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – UFPE, 182 p., 2010.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration - guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and Drainage paper 56. Rome, 297p., 1998.

ANA – Agência Nacional de Águas. Evolução da gestão dos recursos hídricos no Brasil, 32p., 2002.

ARCOVA, F. C. S.; CICCÒ, V.; ROCHA, P. A. B. Precipitação efetiva e interceptação das chuvas por floresta de mata atlântica em uma microbacia experimental em Cunha, São Paulo. *Revista Árvore*, v. 27, n. 2, p. 257 – 262, 2003.

ARNELL, N. *Hydrology and Global Environmental Change*. Pearson Education, Harlow. 346 p., 2002.

ASDAK, C.; JARVIS, P. G.; GARDINGEN, P. V. Modelling rainfall interception in unlogged and logged forest areas of Central Kalimantan, Indonesia. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 2, p. 211 – 220, 1998.

BRAGA, R.A.P. Gestão ambiental da bacia do rio Tapacurá – Plano de ação. Universidade Federal de Pernambuco / CTG / DECIVIL / GRH, apoio FINEP e FACEPE. Recife. 101 p., 2001.

BRYANT, M. L.; BRAT, S.; JACOSS J. M. Measurements and modeling of throughfall variability for five forest communities in the southeastern US. *Journal of Hydrology*, v. 312, p. 95 – 108, 2005.

CALDER, I. A stochastic model of rainfall interception. *Journal of Hydrology*, v. 89, p. 65 – 71, 1986.

CALDER, I. R. Dependence of rainfall interception on drop size: 1. Development of the two-layer stochastic model. *Journal of Hydrology*, v. 185, p. 363 – 378, 1996.

CARLYLE-MOSES D. E. Throughfall, stemflow and canopy interception loss fluxes in a semiarid Sierra Madre Oriental matorral community. *Journal of Arid Environments*, v. 58, p. 181 – 202, 2004.

CARLYLE-MOSES, D. E. e PRICE, A. G. An evaluation of the Gash interception model in a northern hardwood stand, *Journal of Hydrology*, v. 214, p. 103 – 110, 1999.

CARLYLE-MOSES, D. E. e PRICE, A. G. Growing-season stemflow production within a deciduous forest of southern Ontario. *Hydrological Processes* 20 (17), p. 3651 – 3663, 2006.

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

Carlyle-Moses, D., Price, A., 2007. Modelling canopy interception loss from a Madrean pine-oak stand, northeastern Mexico. *Hydrological Processes* 21, 2572–2580.

CASTILHO, C. P. G. Intercepção de chuvas na cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum Officinarum*ssp.). Dissertação de Mestrado – Universidade Estadual de Campinas. Campinas, SP 2000.

CHAFFE, P. L. B. Monitoramento e modelagem do processo chuva-vazão de uma pequena bacia florestal com ênfase em intercepção. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental - Universidade Federal de Santa Catarina, 100 p., 2009.

CICCO, V. Determinação da evapotranspiração pelos métodos dos balanços hídrico e de cloreto e a quantificação da intercepção das chuvas na Mata Atlântica: São Paulo, SP e Cunha, SP. 2009. 138 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo.

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. *Agriculture Forest Meteorology*, v. 145, p. 69 – 83, 2007.

DAVID, J.; VALENTE, F.; GASH, J. Evaporation of intercepted rainfall. In: Anderson, M. (Ed.), *Encyclopedia of Hydrological Sciences*. John Wiley and Sons. p. 627 – 634, 2005.

DEGUCHI, A.; HATTORI, S.; PARK, H. T. The influence of seasonal changes in canopy structure on interception loss: application of the revised Gash model. *Journal of Hydrology*, v. 318, p. 80 – 102, 2006.

DIETZ, J.; HOLSHER, D.; LEUSCHNER, C. e HENDRAYANTO. Rainfall partitioning in relation to forest structure in differently managed montane forest stands in Central Sulawesi, Indonesia. *Forest Ecology and management*, v. 237. p.170-178, 2006.

DUNKERLEY, D. Measuring interception loss and canopy storage in dryland vegetation: a brief review and evaluation of available research strategies. *Hydrological Processes*, v. 14, p. 669 – 678, 2000.

FERREIRA, S. J. F.; LUIZÃO, F. J.; DALLAROSA, R. L. G. Precipitação interna e interceptação da chuva em floresta de terra firme submetida à extração seletiva de madeira na Amazônia Central. *Revista Acta Amazônica*, v. 35, n. 1, p. 55 – 62, 2005.

GASH, J. H. C. An analytical model of rainfall interception by forests. *Quart. J. R. Met. SOC.* 105, p. 43 - 55, 1979.

GASH, J. H. C. e MORTON, A. J. An application of the Rutter model to the estimation of the interception loss from Thetford Forest, *Journal of Hydrology.*, v.38, p. 49 – 58, 1978.

GASH, J. H. C.; LLOYD, C. R.; LACHAUD, G. Estimating sparse forest rainfall interception with an analytical model. *Journal of Hydrology*, v. 170, p. 79 – 86, 1995.

GASH, J. H. C.; WRIGHT; I. R.; LLOYD, C. R. Comparative estimates of interception loss from three coniferous forests in Great Britain. *J. Hydrol.*, v. 48, p. 89 - 105, 1980, 1980.

GÊNOVA, K. B.; HONDA, E. A.; DURIGAN, G. Processos hidrológicos em diferentes modelos de plantio de estruturação de mata ciliar em região de cerrado. *Rev. Inst. Flor.*, São Paulo, v. 19, n. 2, p. 189-200, 2007.

GERMER, S.; ELSENBEER, H.; MORAES, J. M. Throughfall and temporal trends of rainfall redistribution in an open tropical rainforest, south-western Amazonia (Rondônia, Brazil). *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 10, n. 3, p. 383–393, 2006.

HELVEY, J. D. E. PATRIC, J. H. Design criteria for interception studies. International Association of Hydrological Sciences Bulletin, v. 67, p. 131 - 137, 1965.

HERBST, M.; ROSIER, P. T. W.; MCNEIL, D. D.; HARDING, R. J. GOWING, D. J. Seasonal variability of interception evaporation from the canopy of a mixed deciduous forest. Agricultural and Forest Meteorology, v. 148, p. 1655 - 1667, 2008.

HORTON, R. E. Rainfall interception. Monthly weather review, v. 47, p. 603 – 623, 1919.

HUBER, A. M. e OYARZUN, C. E. Redistribución de las precipitaciones en un bosque siempreverde del Sur de Chile. Turrialba, v. 42, p. 192 - 99, 1992.

IPA - EMPRESA PERNAMBUCANA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Introdução e Seleção de Clones e Variedades de Cafeeiro Conilon (*Coffeacanephora*) Pierre ex Froehner, na Zona da Mata de Pernambuco. Relatório de Pesquisa, Período: Abril/2006 a Maio/2010. Estação Experimental Lauro Ramos Bezerra, Serra Talhada, 14 pag., 2010.

KELLMAN, M. e ROULET, N. Stemflow and throughfall in a tropical dry forest. Earth Surface Processes Landforms, v. 15, p.55 - 61, 1990.

KLAASSEN, W.; BOSVELD, F.; WATER, E. Water storage and evaporation as constituents of rainfall interception. Journal of Hydrology, v. 212 e 213, p. 36 – 50, 1998.

LANGKAMP, P. J.; FARNELL, G .K.; DALLING; M. J. Nutrient cycling in a stand of *Acacia holoserica* A. Cunn. ex G. Don. Measurement of precipitation, interception, seasonal acetylene reduction, plant growth and nitrogen requirement. Australian Journal of Botany, v. 30, p. 87 – 106, 1982.

LANKREIJER, H. J. M.; HENDRIKS, M. J.; KLAASSEN, W. A comparison of models simulating rainfall interception of forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 64, p. 187 – 199, 1993.

LEVIA, D. F.; VAN STAN II, J. T.; 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, p. 112 – 120, 2010.

LEYTON, L.; REYNOLDS, E. R. C.; THOMPSON, F. B. Rainfall interception in forest and moorland. In: *International Symposium on Forest Hydrology. Proceedings of a National Science Foundation Advanced Science Seminar held at The Pennsylvania State University, Pennsylvania*, Pergamon Press, Oxford, New York, p. 163 – 178, 1967.

LIANG, W. L.; KOSUGI, K.; MIZUYAMA, T. A three-dimensional model of the effect of stemflow on soil water dynamics around a tree on a hillslope. *Journal of Hydrology*, v. 366, p. 62 – 75, 2009.

LIMA, P. R. A.; LEOPOLDO, P. R. Interceptação de chuva por mata ciliar na região central do Estado de São Paulo. *Energia na Agricultura*, v.14, n.3, p. 25 – 33, 1999.

LIMA, W. P. *Hidrologia florestal aplicada ao manejo de bacias hidrográficas*. Piracicaba: ESALQ, p.318, 1996.

LIU, B. e ZHAO, W. Z. Rainfall partitioning by desert shrubs in arid regions. *Sciences in Cold and Arid Regions*, v. 1(3), p. 215 – 229, 2009.

LIU, J. A theoretical model of the process of rainfall interception in forest canopy. *Ecological Modelling*, v. 42, p. 111 – 123, 1988.

LIU, L.; LIU, J. A rainfall interception model for inhomogeneous forest canopy. *Frontiers of Forestry in China*, v. 3, p. 50 – 57, 2008.

LIU, S. A new model for the prediction of rainfall interception in forest canopies. *Ecological Modelling*, v. 99, p. 151 – 159, 1997.

LIU, S. Evaluation of the Liu model for predicting rainfall interception in forests world-wide. *Hydrological Processes*, v. 15, p. 2341 – 2360, 2001.

LLORENS, P.; POCH, R.; LATRON, J.; GALLART, F. Rainfall interception by a *Pinussylvestris* forest patch overgrown in a Mediterranean mountainous abandoned area I. Monitoring design and results down to the event scale. *Journal of Hydrology*, v. 199, p. 331 - 345, 1997.

LLOYD, C. R. e MARQUES, A. O. Spatial variability of throughfall and stemflow measurements in Amazonian rainforest. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 42, p. 63 - 73, 1988.

LLOYD, C. R.; GASH, J. H. C.; SHUTTLEWORTH, W. J. The measurement and modelling of rainfall interception by Amazonian rain forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 43, Issues 3–4, p. 277 – 294, 1988.

LOESCHER, H. W.; POWERS, J. S.; OBERBAUER, S. F.: Spatial variation of throughfall volume in an old-growth tropical wet forest, Costa Rica, *J. Trop. Ecol.*, 18, 397–407, 2002.

LOUSTAU, D.; BERBIGIER, P.; GRANIER, A. Interception loss, throughfall and stemflow in a maritime pine stand. II. An application of Gash's analytical model of interception. *Journal of Hydrology*, v. 138, Issues 3–4, p. 469 – 485, 1992.

MARIN, A. M. P. e MENEZES, R. S. C. Ciclagem de nutrientes via precipitação pluvial total, interna e escoamento pelo tronco em sistema agroflorestal com *Gliricidiasepium*). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 32, p. 2573 - 2579, 2008.

MARIN, C. T.; BOUTEN, W.; SEVINK, J. Gross rainfall and its partitioning into throughfall, stemflow and evaporation of intercepted water in four forest ecosystems in western Amazonia. *Journal of Hydrology*, v.237, n.1, p.40-57, 2000.

MARINHO, L. S.; SILANS, A. M. B. P.; BARBOSA, F. A. R. Intercepção da chuva pela vegetação de caatinga.

MASSMAN, W. The derivation and validation of a new model for the interception of rainfall by forest. *Agricultural Meteorology*, v. 28, p. 261 – 286, 1983.

MEDEIROS, P. H. A.; ARAÚJO, J. C.; BORNSTERT, A. (2009). Interception measurements and assessment of Gash model performance for a tropical semi-arid region. *Revista Ciência Agrônômica*, v. 40, n. 2, p. 165-174.

MERIN, A. M. P.; MENEZES, R. S. Z. Ciclagem de nutrientes via precipitação pluvial total, interna e escoamento pelo tronco em sistema agroflorestal com *Gliricidia sepium*. *REVISTA Brasileira de Ciência do Solo*, v. 32, p. 2573 - 2579, 2008.

MOURA, A. E. S. S.; CORREA, M. M.; SILVA, E. R.; FERREIRA, R. L. C.; FIGUEIREDO, A. C.; POSSAS, J. M.C. Intercepção das chuvas em um fragmento de floresta da Mata Atlântica na Bacia do Prata, Recife, PE. *Revista Árvore*, v. 33, n. 3, p. 461 – 469, 2009.

MOURA, A. R. C. ; MONTENEGRO, S. M. G. L. ; SILVA, B. B. ; ANTONINO, A. C. D. ; OLIVEIRA, Leidjane Maria Maciel de ; AZEVEDO, J.R.G. DE . Evapotranspiração de referência (ET_o) segundo Thornthwaite Modificado, calibrado na bacia do riacho Gameleira - estado de Pernambuco. *Revista de Geografia (UFPE)*, v. 29, p. 153 - 167, 2012

MOURA, A. R. C. Estimativa da evapotranspiração de referência em bacia experimental na Região Nordeste. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – UFPE, 115 p., 2009.

MULDER, J. Simulating interception loss using standard meteorological data. In: HUTCHISON, B.; HICKS, B. (Eds.). *The Forest–Atmosphere Interaction*. Reidel Publishing Company, Dordrecht, p. 77 – 196, 1985.

MURAKAMI, S. Application of three canopy interception models to a young stand of Japanese cypress and interpretation in terms of interception mechanism. *Journal of Hydrology*, v. 342, pp. 305 – 319, 2007.

MUZYLO, A.; LLORENS, P.; VALENTE, F.; KEIZER, J. J.; DOMINGO, F.; GASH, J. H. C. A review of rainfall interception modeling. *Journal of Hydrology* 370, 191–206, 2009.

NÁVAR, J. The causes of stemflow variation in three semiarid growing species of Northeastern México. *Journal of Hidrology, Illinois*, v. v. 145, p. 175 – 190, 1993.

NÁVAR, J. e BRYAN, R. B. Fitting the analytical model of rainfall interception of Gash to individual shrubs of semi-arid vegetation in northeastern Mexico. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 68, p. 133 – 143, 1994.

NÁVAR, J. e BRYAN, R. Interception loss and rainfall redistribution by three semi-arid growing shrubs in northeastern Mexico. *Journal of Hydrology*, v. 115, p. 51- 63, 1990.

OLIVEIRA JÚNIOR, J. C. e DIAS, H. C. T. Precipitação efetiva em fragmento secundário da mata atlântica. *Revista Árvore*, v. 29, n. 1, p. 9 – 15, 2005.

OLIVEIRA JÚNIOR, J. C. Precipitação efetiva em floresta estacional semidecídua na reserva Mata do Paraíso, Viçosa, Minas Gerais. *Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – UFV*, 72 p., 2006.

OLIVEIRA, L. L.; COSTA, R. F.; COSTA, A. C. L.; SOUSA, F. A. S.; BRAGA, A. P. Modelagem da interceptação na Floresta Nacional de Caxiuanã, no Leste da Amazônia. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 23, n. 3, p. 318 - 326, 2008.

OLIVEIRA, L. L.; CUNHA, A. C.; COSTA, A. C. L.; COSTA, R. F. Sazonalidade e interceptação da chuva na Floresta Nacional em Caxiuanã - Amazônia Oriental. *Scientia Plena*, v. 7, n. 10, 2011.

OLIVEIRA, L. M. M. Avaliação da evapotranspiração de referência (ET_o) na Bacia experimental do Riacho Gameleira - PE, utilizando lisímetro de pesagem hidráulica e métodos indiretos. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – UFPE, 89 p., 2007.

OLIVEIRA, L. M. M. Estimativa da evapotranspiração real por sensoriamento remoto na bacia do rio Tapacurá – PE. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – UFPE, 136 p., 2012.

OPAKUNLE, J. S. Throughfall, stemflow and rainfall interception in a Cacao plantation in south western Nigeria. *Tropical Ecology* v. 30, n. 2, p. 244 – 252, 1989.

PARK, A. e CAMERON, J. L. The influence of canopy traits on throughfall and stemflow in five tropical trees growing in a Panamanian plantation. *Forest Ecology and Management*, v. 255, p. 1915 – 1925, 2008.

PEARCE, A. J. E ROWE, L. K. Rainfall interception in a multi-storied evergreen mixed forest: Estimates using Gash's analytical model. *Journal of Hydrology*, v. 49, p. 341 – 353, 1981.

PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDIYAMA, G. C. *Evapo(transpi)ração*. Piracicaba: FEALQ, 1997.

PEREIRA, F. L.; GASH, J. H. C.; DAVID, J. S.; DAVID, T. S.; MONTEIRO, P. R.; VALENTE, F. M. R. T. Modelling interception loss from evergreen oak

Mediterranean savannas: Application of a tree-based modelling approach. *Agricultural and forest meteorology*, v. 149, p. 680 – 688, 2009.

PEREIRA, F. M. L. Intercepção da precipitação em montados de sobreiro e azinheira. Tese de doutorado. Universidade Técnica de Lisboa - Instituto Superior de Agronomia, 127 p., 2009.

PRESSLAND, A. J. Rainfall partitioning by an arid woodland (*Acacia anuera* F. Muell.) in south-western Queensland. *Australian Journal of Botany*, v. 21, p. 235 – 245, 1973.

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

ROWE, L. K. Rainfall interception by an evergreen beech forest, Nelson, New Zealand. *Journal of Hydrology*, v. 66, p. 143 – 158, 1983.

RUTTER, A. J.; MORTON, A. J.; ROBINS, P. C. A predictive model of rainfall interception in forests, II. Generalization of the model and comparison with observations in some coniferous and hardwood stands. *Journal of Applied Ecology*, v.12, p.367-384, 1975.

RUTTER, A.J., KERSHAW, K.A., ROBINS, P.C., MORTON A.J. A predictive model of rainfall interception in forests, I Derivation of the model from observations in a plantation of Corsican pine. *Agriculture Meteorology*, 9, p. 367-384, 1971.

SELLERS, P.; LOCKWOOD, J. A computer simulation of the effects of differing crop types on the water balance of small catchments over a long time periods. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v. 107, p. 395 – 414, 1981.

SHACHNOVICH Y.; BERLINER, P. R. e BAR, P. 2008. Rainfall interception and spatial distribution of throughfall in a pine forest planted in an and zone. *Journal of Hydrology*, v. 349, p. 168 - 177.

SILVA, L. F.; L. F.; LIMA, A. M. L. P.; SILVA FILHO, D. F.; COUTO, H. T. Z. Precipitação interna e interceptação da chuva em duas espécies arbóreas urbanas. *Revista da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana*, São Paulo. v. 4, n. 3, p. 32 – 48, 2009.

SILVA, R. M. Análise da perda de solos na bacia do Rio Tapacurá mediante previsão climática e modelos de erosão. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – UFPE, 133 p., 2010.

SINUN W; WONG, W. M. DOUGLAS, I.; SPENCER, T. Throughfall, stemflow, overland flow and throughflow in the UlaSegama rain forest, Sabah, Malaysia. *Philosophical Transactions of the Royal Society London, Series B*, v. 335, p. 389 – 395, 1992.

SLATYER, R. O. Measurement of precipitation, interception by arid plant community (*Acacia aneura* F. Muell). *Arid zone research* v. 25, p. 181 – 192, 1965.

SOUSA, R. C.; RANZINI, M.; ARCOVA, F. C. S.; CICCIO, V.; CÂMARA, C. D. redistribuição das chuvas pelas copas das árvores em plantio de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze (ARAUCARIACEAE) no Parque Estadual da Serra do Mar, Cunha – SP, *Revista do Instituto Florestal*, v. 23 n. 1 p. 27 – 38, 2011.

THOMAZ, E. L. Avaliação de interceptação e precipitação interna em capoeira e floresta secundária em Guarapuava – PR. *R. Geografia*, v. 14, n. 1, p. 47-60, 2005.

TUCCI, C. E. (2009). *Hidrologia: Ciência e aplicação* (4ª edição). Porto Alegre UFRGS/ABRH.

Ubarana, V. N. Observations and modelling of rainfall interception at two experimental sites in Amazonia. In: GASH, J. H. C.; NOBRE, C. A.; ROBERTS, J. M. e VICTORIA, R. L. (Editores), Amazonian deforestation and climate. Institute of Hydrology, 1996.

VALENTE, F. M. R. T. Interceptação da precipitação em povoamentos florestais esparsos. Modelação do processo e características aerodinâmicas dos cobertos molhados. Tese de doutoramento. Universidade Técnica de Lisboa – Instituto Superior de Agronomia. p.172, 1999.

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.

VAN DIJK, A. I. J. M. e BRUIJNZEEL, L. A. Modelling rainfall interception by vegetation of variable density using an adapted analytical model. Part 1. Model description. Journal of Hydrology, v. 247, n. 3, p. 230 – 238, 2001.

VAN DIJK, A.; BRUIJNZEEL, L. Modelling rainfall interception by vegetation of variable density using an adapted analytical model, part 1. Model description. Journal of Hydrology, v. 247, p. 230 – 238, 2001.

VIEIRA, C. P. e 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, v. 11, n. 03, p. 101 – 112, 2006.

WANG, X. P. ; ZHANG, Y. F.; HU, R.; PAN, Y. X.; BERNDTSSON, R. Canopy storage capacity of xerophytic shrubs in Northwestern China. Journal of Hydrology v. 454 – 455, p. 152–159, 2012.

WANG, X. P., LI, X. R., ZHANG, J. G., ZHANG, Z. S., BERNDTSSON, R. Measurement of rainfall interception by xerophytic shrubs in re-vegetated sand dunes. Hydrological Science Journal v. 50, p. 897 – 910, 2005.

WEST, N. E. e GIFFORD, G. F. Rainfall interception by cool-desert shrubs. *Journal of Range Management*, v. 29, p. 171 – 172, 1976.

XIAO, Q.; MCPERSON, E.; USTIN, S.; GRISMER, M. A new approach to modeling tree rainfall interception. *Journal of Geophysical Research*, v. 105, p. 173 – 188, 2000.

ZAÚ, A. S.; COELHO NETTO, A. L.; OLIVEIRA, R. R. Cobertura florestal: degradação, resultantes ecológicas e efeitos de borda no Parque Nacional da Tijuca, Rio de Janeiro/RJ. In: ENCONTRO IALE-BR, 1., 2007, São Paulo. Anais... São Paulo: GEOHECO-UFRJ, 2007. p. 63-65.

ZENG, N.; SHUTTLEWORTH, J.; GASH, J. H. C. Influence of temporal variability of rainfall on interception loss. Part 1. Point analysis. *Journal of Hydrology*, v. 228, p. 228 – 241, 2000.

ZHANG, G.; ZENG, G. M.; JIANG, Y. M.; HUANG, G. H.; LI, J. B.; YAO, J. M.; TAN, W.; XIANG, R.; ZHANG, X. L.. Modeling and measurement of two-layer canopy interception loss in a subtropical evergreen forest of central-south China. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 10, n. 1, p. 65-77, 2006.

ZHANG, Z. S.; LI, X. R.; DONG, X. J., JIA, X. H.; HE, M. Z.; TAN, H. J. Rainfall interception by sand-stabilizing shrubs related to crown structure. *Sciences in Cold and Arid Regions* v. 1(2), p. 107 – 119, 2009.

ZINKE, P. J. Forest interception studies in the United States. In: Sopper, W. E.; Lull, H. W. (eds.). *Forest Hydrology*. Oxford: Pergamon Press, p.137 – 161, 1967.

ANEXO I

DESENVOLVIMENTO DO MODELO DE GASH

O Modelo de Gash também é um modelo linear e pode ser escrito na forma:

$$I = aP_G + b \quad (1)$$

em que I é a perda por interceptação, P_G é a precipitação total e a e b são os coeficientes da regressão.

Teoria da regressão

Para eventos grande o suficiente para aturar a copa, Horton (1919) expressou a perda por interceptação como

$$I = \int_0^t E dt + S \quad (2)$$

em que E é a taxa de evaporação da água interceptada durante a chuva; S é a capacidade de armazenamento da copa e t é a duração da chuva.

Considerando a evaporação em dois períodos diferentes, antes da saturação da copa e após a saturação da copa, temos

$$I = \int_0^{t'} E dt + \int_{t'}^t E dt + S \quad (3)$$

em que t' é o tempo necessário para saturar a copa.

A taxa de evaporação média \bar{E} de uma copa saturada durante a chuva pode ser expressa por

$$\bar{E} = \frac{1}{t-t'} \int_{t'}^t E dt \quad (4)$$

De forma semelhante pode-se descrever a intensidade média de chuva \bar{R}

$$\bar{R} = \frac{1}{t-t'} \int_{t'}^t R dt$$

Assim, temos

$$P_G - P'_G = \bar{R}(t - t') \quad (5)$$

em que P'_G é a chuva necessária para saturar a copa.

Assumindo que não existe gotejamento da copa antes da saturação, P'_G é também determinado por

$$(1 - p - p_t)P'_G = S + \int_0^{t'} E dt \quad (6)$$

em que p é o coeficiente de precipitação interna livre e p_t é a proporção de chuva que é desviada para os troncos

Substituindo as Equações (4) e (5) na Equação (3), teremos

$$I = \int_0^{t'} E dt + \left(\frac{\bar{E}}{\bar{R}} \right) (P_G - P'_G) + S$$

Substituindo por P'_G da Equação (6) e reorganizando, teremos

$$I = \left(\frac{\bar{E}}{\bar{R}} \right) P_G + \left(S + \int_0^{t'} E dt \right) \left[1 - \left(\frac{\bar{E}}{\bar{R}} \right) (1 - p - p_t)^{-1} \right] \quad (7)$$

Igualando os coeficientes das Equações (1) e (9), os coeficientes a e b da equação de regressão podem ser definidos como

$$a = \frac{\bar{E}}{\bar{R}}$$

$$b = \left(S + \int_0^{t'} E dt \right) \left[1 - \left(\frac{\bar{E}}{\bar{R}} \right) (1 - p - p_t)^{-1} \right]$$

DERIVAÇÃO DO MODELO

(a) Simplificação das suposições

1 - As condições meteorológicas que prevalecem durante o umedecimento da copa são suficientemente similares a aquelas que prevalecem para o resto dos eventos, a qual as condições médias de chuva e evaporação, sobre todos os eventos no período, podem ser consideradas para aplicar nesta situação transiente.

2 – A dependência logarítmica da taxa de gotejamento no grau de saturação da copa, observada por Rutter et al. (1971), é suficientemente sensível que há em efeito virtual o não gotejamento da copa durante a fase de umedecimento; e a quantidade de água na copa no final da chuva é rapidamente reduzida, com 20 a 30 minutos) para a capacidade de armazenam da copa, independente do valor inicial de quando a chuva cessa.

(b) Evaporação da copa saturada

Considere uma série de n eventos grande o suficiente para saturar a copa e cada separado por um período suficiente para a copa secar. Se a Equação (3) é aplicada a cada evento a perda por interceptação é determinada por

$$\sum_{j=1}^n I_j = \sum_{j=1}^n \left(\int_0^{t_j'} E dt + \int_{t_j'}^{t_j} E dt \right) + nS \quad (8)$$

Se \bar{E} é agora definido por

$$\bar{E} = \frac{\sum_{j=1}^n \int_{t_j'}^{t_j} E dt}{\sum_{j=1}^n (t_j - t_j')}$$

Enquanto similarmente \bar{R} é determinado por

$$\bar{R} = \frac{\sum_{j=1}^n \int_{t_j'}^{t_j} R dt}{\sum_{j=1}^n (t_j - t_j')}$$

Ou

$$\bar{R} = \frac{\sum_{j=1}^n \int_{t'_j}^{t_j} R dt}{\sum_{j=1}^n (t_j - t'_j)}$$

$$\bar{R} = \frac{\sum_{j=1}^n (P_{Gj} - P'_{Gj})}{\sum_{j=1}^n (t_j - t'_j)}$$

Equação (8) pode ser escrita como

$$\sum_{j=1}^n I_j = \sum_{j=1}^n \left[\int_0^{t'_j} E dt + \left(\frac{\bar{E}}{\bar{R}} \right) (P_{Gj} - P'_{Gj}) \right] + nS \quad (9)$$

(c) Umdedecimento da copa

Da Equação (6) a perdapr interceptação para o período antes da saturação é $\int_0^{t'} E dt = (1 - p - p_t)P'_G - S$. Substituindo esta na Equação (9) para todos os n eventos, tem-se

$$\sum_{j=1}^n I_j = (1 - p - p_t) \sum_{j=1}^n P'_{Gj} + \left(\frac{\bar{E}}{\bar{R}} \right) \sum_{j=1}^n (P_{Gj} - P'_{Gj}) \quad (10)$$

Para m pequenos eventos insuficientes para saturar a copa, $I = (1 - p - p_t)PG$. Incluindo estes m eventos, o total de perda por interceptação na copa é

$$\sum_{j=1}^{n+m} I_j = (1 - p - p_t) \sum_{j=1}^n P'_{Gj} + \left(\frac{\bar{E}}{\bar{R}} \right) \sum_{j=1}^n (P_{Gj} - P'_{Gj}) + (1 - p - p_t) \sum_{j=1}^m P_{Gj} \quad (11)$$

(d) Evaporação dos troncos

Ao exemplo do modelo de Rutter, onde o balanço de água no tronco é concebido separadamente do balanço de água da copa, a proporção de chuva que é direcionada para o tronco é removida da chuva incidente antes do balanço de água da copa ser considerado. O escoamento pelo tronco para cada evento maior que St/pt é descrito por $EscTr \text{ (mm)} = ptPG - St$, sendo St a capacidade de armazenamento do tronco, o qual deve ser preenchido antes de algum escoamento está aparente a base dos troncos.

A evaporação dos troncos é consideravelmente pequena quando comparada com a evaporação da copa, sendo negligenciada aqui. A perda por interceptação dos troncos é então somente a quantidade de água que permaneceu nos troncos após o escoamento ter cessado. Se a suposição é feita que o intervalo entre eventos é suficiente para evaporar toda a água armazenada no tronco, então a perda por interceptação dos troncos é dada por

$$\sum_{j=1}^{n+m} I_j = qS_t + p_t \sum_{j=1}^{n+m-q} P_{Gj}$$

Quando, em parte do total dos $(n + m)$ eventos de chuva, existem q eventos acima da chuva crítica para encher (St/pt) para preencher o tronco, a Equação (11) pode ser escrita como

$$\sum_{j=1}^{n+m} I_j = (1 - p - p_t) \sum_{j=1}^n P'_{Gj} + \left(\frac{\bar{E}}{\bar{R}} \right) \sum_{j=1}^n (P_{Gj} - P'_{Gj}) + (1 - p - p_t) \sum_{j=1}^{n+m-q} P_{Gj} + qS_t + p_t \sum_{j=1}^{n+m-q} P_{Gj}$$

(12)

(e) Chuva necessária para saturar a copa

A suposição é que a evaporação da copa é descrita por $E = (C/S)E_p$, em que E_p é a evaporação que deverá ocorrer de uma copa totalmente úmida e C é a quantidade de água na copa. Isto é aplicado para as condições de copa antes da saturação, com a posterior suposição de que a taxa média de

evaporação e a intensidade de chuva média também se aplica. A evaporação durante este período é então dada por $E = (C/S)\bar{E}$. Assumindo que não há gotejamento de água antes da saturação, a taxa de mudança de água na copa pode ser descrita por $dC/dt = (1 - p - p_t)\bar{R} - E$, ou $dC/dt = (1 - p - p_t)\bar{R} - (\bar{E}/S)C$, cuja solução é

$$C = (1 - p - p_t) \left(\bar{R}S/\bar{E} \right) \left[1 - \text{EXP} \left(-\bar{E}t/S \right) \right],$$

ou

$$t = - \left(S/\bar{E} \right) \ln \left[1 - \left(\bar{E}C/\bar{R}S \right) (1 - p - p_t)^{-1} \right].$$

Consequentemente, o tempo necessário para que ocorra a saturação é

$$t' = - \left(S/\bar{E} \right) \ln \left[1 - \left(\bar{E}/\bar{R} \right) (1 - p - p_t)^{-1} \right]$$

Seguindo a suposição de que se aplica a intensidade de chuva média, no momento que a copa chega à saturação a chuva necessária para saturar a copa é dada por $P'_G = \bar{R}_{t'}$, consequentemente

$$P'_G = \left(-\bar{R}S/\bar{E} \right) \ln \left[1 - \left(\bar{E}/\bar{R} \right) (1 - p - p_t^{-1}) \right]$$

E a Equação (12) pode então ser reescrita com com P'_G como uma constante para todo o período:

$$\sum_{j=1}^{n+m} I_j = n(1-p-p_t)P'_G + \left(\frac{\bar{E}}{\bar{R}}\right) \sum_{j=1}^n (P_{Gj} - P'_G) + (1-p-p_t) \sum_{j=1}^m P_{Gj} +$$

$$qSt+ptj=1m+n-qPG$$

(14)