

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PROGRAMA INSTITUCIONAL DE DOUTORADO TEMÁTICO EM RECURSOS NATURAIS

MODELOS MATEMÁTICOS PARA ESTIMATIVA DA GEOMETRIA DO VOLUME DE
BULBO MOLHADO POR IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO SUPERFICIAL NO
AGROPOLO ASSU-MOSSORÓ

CELSEMY ELEUTÉRIO MAIA

CAMPINA GRANDE – PARAÍBA - BRASIL
ABRIL DE 2005

CELSEMY ELEUTÉRIO MAIA

MODELOS MATEMÁTICOS PARA ESTIMATIVA DA GEOMETRIA DO VOLUME DE
BULBO MOLHADO POR IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO SUPERFICIAL NO
AGROPOLO ASSU-MOSSORÓ

Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação em
Recursos Naturais da Universidade Federal de
Campina Grande, em cumprimento às exigências
para obtenção do grau de Doutor em Recursos
Naturais

Área de concentração: Água e solo

ORIENTADORES

Dr. JOSÉ DANTAS NETO

Dr. JOSÉ FRANCISMAR DE MEDEIROS

CAMPINA GRANDE – PARAÍBA - BRASIL

ABRIL DE 2005

UFCG - BIBLIOTECA - CAMPUS I	
423	26-05-05

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

M217m Maia, Celsemy Eleutério
2005 Modelos matemáticos para estimativa da geometria do volume de bulbo
 molhado por irrigação por gotejamento superficial no agropolo Assú-Mossoró
 / Celsemy Eleutério Maia. — Campina Grande: UFCG, 2005.
 127f.

Inclui Bibliografia.

Tese (Doutorado em Recursos Naturais) — Centro de Ciências e
Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande.

1— Irrigação localizada 2— Movimento de água no solo 3— Infiltração de
água no solo 4— Modelagem 1— Título

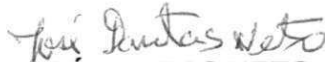
CDU 631.674.6:504.062.2

CELSEMY ELEUTÉRIO MAIA

**MODELOS MATEMÁTICOS PARA ESTIMATIVA DA GEOMETRIA DO VOLUME DE
BULBO MOLHADO POR IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO SUPERFICIAL NO
AGROPOLO ASSÚ-MOSSORÓ**

APROVADA EM: 11/04/2005

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. JOSÉ DANTAS NETO

Departamento de Engenharia Agrícola – DEAg
Centro de Ciências e Tecnologia - CCT
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG



Dr. JOSÉ FRANCISMAR DE MEDEIROS

Departamento de Ciências Ambientais – DCA
Escola Superior de Agricultura de Mossoró - ESAM



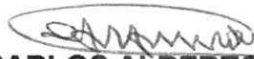
Prof. Dr. SÉRGIO LUIZ AGUILAR LEVIEN

Departamento de Ciências Ambientais – DCA
Escola Superior de Agricultura de Mossoró - ESAM



Prof. Dr. VALDEMÍCIO FERREIRA DE SOUSA

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa Meio Norte



Prof. Dr. CARLOS ALBERTO VIEIRA DE AZEVEDO

Departamento de Engenharia Agrícola – DEAg
Centro de Ciências e Tecnologia - CCT
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG



HUGO ORLANDO CARVALLO GUERRA

Departamento de Engenharia Agrícola – DEAg
Centro de Ciências e Tecnologia - CCT
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

A meu pai, José Teixeira Maia (*In Memoriam*), pela semente plantada do conhecimento.

DEDICO

A minha esposa, Elis Regina Costa de Moraes, por tudo!

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Campina Grande, pelos ensinamentos ministrados e acolhida fraterna do corpo docente e de funcionários.

Ao CAPES pela bolsa concedida durante todo o curso.

Ao CNPq pelo financiamento da pesquisa.

Ao Professor Dr. José Dantas Neto por ter acreditado em nossa pessoa, pela valiosa orientação desta tese e pelo relacionamento amigo, cordial, agradável e sincero.

Ao Dr. José Francismar de Medeiros, pelas valiosas contribuições.

Ao Dr. Sérgio Luiz Aguilár Levien pelas valiosas contribuições, acompanhamento e orientação do início ao final, na condução dos experimentos e na organização e redação desta tese.

Aos alunos de PIBIC do Departamento de Ciências Ambientais da ESAM pela coleta de grande parte dos dados.

Aos colegas da UFCG Marcelo Tavares Gurgel, Paulo César Moura (PC), Frederico Soares (Fred), Cláudio Japa, Magna Soelma e a todos os funcionários do LIS da UFCG.

Finalmente, a todos aqueles que, de uma forma ou outra, contribuíram para o êxito desta tese.

Sumário

LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE FIGURAS.....	xv
RESUMO.....	xix
ABSTRACT.....	xx
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	4
2.1 Geral.....	4
2.2 Específicos	4
3. REVISÃO DE LITERATURA.....	5
3.1 Formação do bulbo molhado	6
3.2 Fatores que afetam a formação do bulbo molhado	6
3.3 Dimensões do bulbo molhado.....	7
3.4 Espaçamento entre emissores	8
3.5 Porcentagem de área molhada	9
3.6 Modelos.....	9
3.7 Principais limitações dos modelos.....	14
3.8 Dinâmica da água no solo e impacto ambiental.....	15
4. MATERIAL E MÉTODOS	17
4.1 Localização e caracterização da área experimental	17
4.2 Os solos.....	17
4.3 Sistema de irrigação.....	23
4.4 Delineamento experimental	24
4.5 Características avaliadas	25
4.6 Determinação da condutividade hidráulica do solo.....	25
4.6.1 Metodologia do perfil instantâneo	25
4.6.2 Metodologia do charco	26
4.6.3 Condutividade hidráulica obtida pela equação de Schwartzman e Zur (1986)	27
4.7 Capacidade de campo (CC) e ponto de murcha permanente (PMP)	28
4.8 Análises físicas do solo.....	29
4.9 Estimativas das dimensões do bulbo molhado.....	29
4.9.1 Diâmetro molhado em função da profundidade molhada	29
4.9.2 Dimensões do bulbo molhado em função de q e t	29

4.9.3	Dimensões do bulbo molhado em função do volume de água aplicado	30
4.9.4	Dimensões do bulbo molhado em função de D_s	30
4.9.5	Relação D_{max}/Z_{max} em função de q e t	30
4.9.6	Modelo proposto para estimativa de D_{max} em função de D_s e V_{ap} – Modelo 1	30
4.9.7	Modelo proposto para estimativa de D_{max} em função de Z_{max} e V_{ap} – Modelo 2	31
4.10	Estimativa do volume molhado	32
4.10.1	Volume molhado pelo método do volume da elipse trucada (Zur, 1996)	32
4.10.2	Modelo proposto para volume molhado usando o modelo quadrático – Modelo 3	32
4.10.3	Volume molhado pelo volume elipsoidal (Narda & Chawla, 2002)	33
4.10.4	Modelo proposto para o volume molhado usando o fator de correção do volume do cilindro – Modelo 4	33
4.11	Relação entre o volume molhado e as dimensões do bulbo.....	33
4.12	Porcentagem de área molhada	34
4.13	Porcentagem de volume molhado.....	34
4.14	Análise estatística.....	34
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	36
5.1	Dimensões do bulbo molhado.....	36
5.1.1	Dimensões do bulbo molhado em função da vazão do emissor (q) e do tempo de aplicação de água (t)	36
5.1.1.1	Modelo potencial	36
5.1.1.2	Modelo de superfície de resposta.....	59
5.1.2	Dimensões do bulbo molhado em função do volume de água aplicado	63
5.1.3	Diâmetro do bulbo molhado em função da profundidade (modelo quadrático)	67
5.1.4	Dimensões do bulbo molhado em função do diâmetro superficial (D_s)	72
5.1.5	Relação D_{max}/Z_{max} usando modelo de superfície de resposta	75
5.1.6	Diâmetro máximo estimado pelo Modelo 1 e Modelo 2	78
5.1.7	Condutividade hidráulica obtida pela equação de Schwartzman & Zur (1986)	80
5.2	Volume do bulbo molhado.....	82
5.2.1	Modelos para determinação do volume do bulbo molhado	82
5.2.2	Volume do bulbo molhado em função do diâmetro superficial (D_s) e da relação $D_{max}/Z_{max}^{1/3}$	87
5.2.3	Relação do volume do bulbo molhado com o volume de água aplicado	89

5.2.4 Comparação do volume do bulbo molhado com o volume do poliedro retangular e do cilindro	89
5.2.5 Comparação de modelos para estimativa do volume do bulbo molhado	92
5.3 Porcentagem de área molhada e porcentagem de volume molhado	93
6. CONCLUSÕES	102
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	103
8. APÊNDICES	113

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Textura do solo onde se realizou o estudo de bulbo molhado sob irrigação por gotejamento superficial: Luvissole Crômico.....	18
Tabela 2. Densidades do solo e de partícula e porosidade total do solo onde se realizou o estudo de bulbo molhado sob irrigação por gotejamento superficial: Luvissole Crômico	18
Tabela 3. Umidade inicial (% base peso) do solo por ocasião do estudo do bulbo molhado: Luvissole Crômico.....	18
Tabela 4. Parâmetros da equação de retenção de água no solo, usando o modelo de van Genuchten (1980), onde se realizou o estudo de bulbo molhado sob irrigação por gotejamento superficial: Luvissole Crômico	18
Tabela 5. Função $K(\psi)$, em mm dia^{-1} , em diferentes profundidades, para ψ_m , em cm.c.a.: Luvissole Crômico.....	18
Tabela 6. Textura do solo onde se realizou o estudo de bulbo molhado sob irrigação por gotejamento superficial: Argissolo Vermelho-Amarelo.....	19
Tabela 7. Densidades do solo e de partícula e porosidade total do solo onde se realizou o estudo de bulbo molhado sob irrigação por gotejamento superficial: Argissolo Vermelho-Amarelo	19
Tabela 8. Umidade inicial (% base peso) do solo por ocasião do estudo do bulbo molhado: Argissolo Vermelho-Amarelo.....	19
Tabela 9. Parâmetros da equação de retenção de água no solo, usando o modelo de van Genuchten, onde se realizou o estudo de bulbo molhado sob irrigação por gotejamento superficial: Argissolo Vermelho-Amarelo.....	19
Tabela 10. Função $K(\psi)$, em mm dia^{-1} , em diferentes profundidades, para ψ_m , em cm.c.a.: Argissolo Vermelho-Amarelo.....	20
Tabela 11. Textura do solo onde se realizou o estudo de bulbo molhado gerado por irrigação por gotejamento superficial: Cambissolo Háplico.....	20
Tabela 12. Densidades do solo e de partícula e porosidade total do solo onde se realizou o estudo de bulbo molhado sob irrigação por gotejamento superficial: Cambissolo Háplico.....	20
Tabela 13. Umidade inicial (% base peso) do solo por ocasião do estudo do bulbo molhado: Cambissolo Háplico.....	20

Tabela 14. Parâmetros da equação de retenção de água no solo, usando o modelo de van Genuchten, onde se realizou o estudo de bulbo molhado sob irrigação por gotejamento superficial: Cambissolo Háplico	20
Tabela 15. Textura do solo onde se realizou o estudo de bulbo molhado gerado por irrigação por gotejamento superficial: Latossolo Vermelho.....	21
Tabela 16. Densidades do solo e de partícula e porosidade total do solo onde se realizou o estudo de bulbo molhado sob irrigação por gotejamento superficial: Latossolo Vermelho	21
Tabela 17. Umidade inicial (% base peso) do solo por ocasião do estudo do bulbo molhado: Latossolo Vermelho.....	21
Tabela 18. Parâmetros da equação de retenção de água no solo, usando o modelo de van Genuchten, onde se realizou o estudo de bulbo molhado sob irrigação por gotejamento superficial: Latossolo Vermelho	21
Tabela 19. Função $K(\psi)$, em mm dia^{-1} , em diferentes profundidades, para ψ_m , em cm.c.a.: Latossolo Vermelho	21
Tabela 20. Textura do solo onde se realizou o estudo de bulbo molhado sob irrigação por gotejamento superficial: Neossolo Quartzarênico	22
Tabela 21. Densidades do solo e de partícula e porosidade total do solo onde se realizou o estudo de bulbo molhado sob irrigação por gotejamento superficial: Neossolo Quartzarênico	22
Tabela 22. Umidade inicial (% base peso) do solo por ocasião do estudo do bulbo molhado: Neossolo Quartzarênico.....	22
Tabela 23. Parâmetros da equação de retenção de água no solo, usando o modelo de van Genuchten, onde se realizou o estudo de bulbo molhado sob irrigação por gotejamento superficial: Neossolo Quartzarênico	22
Tabela 24. Textura do solo onde se realizou o estudo de bulbo molhado gerado por irrigação por gotejamento superficial: Neossolo Flúvico	22
Tabela 25. Densidades do solo e da partícula e porosidade total do solo onde se realizou o estudo de bulbo molhado sob irrigação por gotejamento superficial: Neossolo Flúvico ..	23
Tabela 26. Umidade inicial (% base peso) do solo por ocasião do estudo do bulbo molhado: Neossolo Flúvico	23

Tabela 27. Parâmetros da equação de retenção de água no solo, usando o modelo de van Genuchten, onde se realizou o estudo de bulbo molhado sob irrigação por gotejamento superficial: Neossolo Flúvico.....	23
Tabela 28. Diâmetro máximo molhado (D_{max} , cm) em função da vazão do emissor ($L h^{-1}$) para cada tempo de aplicação de água (h) em cada solo estudado	37
Tabela 29. Profundidade máxima molhada (Z_{max} , cm) em função da vazão do emissor ($L h^{-1}$) para cada tempo de aplicação de água (h) nos solos estudados	38
Tabela 30. Diâmetro superficial molhado (D_s , cm) em função da vazão do emissor ($L h^{-1}$) para tempo de aplicação de água (h) nos solos estudados	39
Tabela 31. Profundidade onde ocorre D_{max} ($Z_{D_{max}}$, cm) em função da vazão do emissor ($L h^{-1}$) para cada tempo de aplicação de água (h) nos solos estudados	40
Tabela 32. Diâmetro máximo molhado (D_{max} , cm) em função do tempo de aplicação de água (h) para cada solo e vazão do emissor (q) nos solos estudados.....	41
Tabela 33. Profundidade máxima molhada (Z_{max} , cm) em função do tempo de aplicação de água (h) para cada vazão do emissor (q) nos solos estudados	42
Tabela 34. Diâmetro superficial molhado (D_s , cm) em função do tempo de aplicação de água (h) para cada vazão do emissor (q) nos solos estudados	43
Tabela 35. Profundidade onde ocorre D_{max} ($Z_{D_{max}}$, cm) em função do tempo de aplicação de água (h) para cada vazão do emissor (q) nos solos estudados	44
Tabela 36. Vazão necessária para aumentar o diâmetro máximo (D_{max}) em 50% e 100% comparada com $q = 1,0 L h^{-1}$ para cada tempo de aplicação de água com base no modelo potencial $D_{max} = a \cdot q^b$	47
Tabela 37. Vazão necessária para aumentar a profundidade máxima (Z_{max}) em 50% e 100% comparada com $q = 1,0 L h^{-1}$ para cada tempo de aplicação de água com base no modelo potencial $Z_{max} = a \cdot q^b$	48
Tabela 38. Vazão necessária para aumentar o diâmetro superficial (D_s) em 50% e 100% comparada com $q = 1,0 L h^{-1}$ para cada tempo de aplicação de água com base no modelo potencial $D_s = a \cdot q^b$	49
Tabela 39. Vazão necessária para aumentar a profundidade onde ocorre D_{max} ($Z_{D_{max}}$) em 50% e 100% comparada com $q = 1,0 L h^{-1}$ para cada tempo de aplicação de água com base no modelo potencial $Z_{D_{max}} = a \cdot q^b$	50

Tabela 40. Tempo de irrigação necessário para aumentar o diâmetro máximo (D_{max}) em 50% e 100% comparada com $t = 1,0$ h para cada vazão do emissor com base no modelo potencial $D_{max} = a \cdot t^b$	51
Tabela 41. Tempo de irrigação necessário para aumentar a profundidade máxima (Z_{max}) em 50% e 100% comparada com $t = 1,0$ h para cada vazão do emissor com base no modelo potencial $Z_{max} = a \cdot t^b$	52
Tabela 42. Tempo de irrigação necessário para aumentar o diâmetro molhado superficial (D_s) em 50% e 100% comparada com $t = 1,0$ h para cada vazão do emissor com base no modelo potencial $D_s = a \cdot t^b$	53
Tabela 43. Tempo de irrigação necessário para aumentar a profundidade onde ocorre D_{max} (Z_{Dmax}) em 50% e 100% comparada com $t = 1,0$ h para cada vazão do emissor com base no modelo potencial $Z_{Dmax} = a \cdot t^b$	54
Tabela 44. Valores de MSD, RMSD e seus componentes SB, NU e LC e coeficiente de determinação (R^2) para avaliação dos valores estimados e observados pelo modelo potencial para Z_{max} , D_{max} , D_s e Z_{Dmax} em função da vazão do emissor (q) para os solos estudados.....	58
Tabela 45. Valores de MSD, RMDS e seus componentes SB, NU e LC e coeficiente de determinação para avaliação dos valores estimados e observados pelo modelo potencial para Z_{max} , D_{max} , D_s e Z_{Dmax} em função do tempo de aplicação de água (t) para os solos estudados	59
Tabela 46. Parâmetros do modelo para superfície de resposta ($y = a \cdot t^b \cdot q^c$) para Z_{max} , D_s , Z_{Dmax} e D_{max} para os solos estudados	61
Tabela 47. Valores da vazão do emissor ($L h^{-1}$), tempo de aplicação de água (h) e volume de água aplicado (V_{ap} , L), para obter a profundidade do bulbo molhado de 40 cm e os valores obtidos de D_{max} , D_s e Z_{Dmax} para os solos estudados.....	62
Tabela 48. Valores de MSD, RMSD e seus componentes SB, NU e LC e coeficiente de determinação para avaliação dos valores estimados e observados pelo modelo superfície de resposta para Z_{max} , D_{max} , D_s e Z_{Dmax} em função do tempo de aplicação de água (t) e vazão do emissor (q) para os solos estudados	65
Tabela 49. Valores de MSD, RMSD e seus componentes SB, NU e LC e coeficiente de determinação (R^2) para avaliação dos valores estimados e observados pelo modelo	

potencial para Z_{max} , D_{max} , D_s e Z_{Dmax} em função do volume de água aplicado (L) para os solos estudados	68
Tabela 50. Parâmetros do modelo quadrático ($D(Z) = a + bZ + cZ^2$), valores estimados de Z_{Dmax} e D_{max} para cada combinação de tempo e vazão para o Luvissole Crômico, Argissolo Vermelho-Amarelo e Cambissolo Háplico	70
Tabela 51. Parâmetros do modelo quadrático ($D(Z) = a + bZ + cZ^2$), valores estimados de Z_{Dmax} e D_{max} para cada combinação de tempo e vazão para o Neossolo Quartzarênico, Latossolo Vermelho e Neossolo Flúvico	71
Tabela 52. Valores de MSD, RMSD e seus componentes SB, NU e LC e coeficiente de determinação para avaliação dos valores estimados e observados pelo modelo quadrático para o diâmetro superficial em função de Z_{max} para os solos estudados	72
Tabela 53. Valores de MSD, RMSD e seus componentes SB, NU e LC e coeficiente de determinação para avaliação dos valores estimados e observados pelo modelo linear para Z_{max} , D_{max} e Z_{Dmax} em função do diâmetro superficial (D_s) para os solos estudados	75
Tabela 54. Coeficientes do modelo superfície de resposta para as relações D_{max}/Z_{max} e $D_{max}/Z_{max}^{1/3}$ em função de q ($L h^{-1}$) e t (h) e coeficiente de determinação para os solos estudados	77
Tabela 55. Valores da relação $D_{max} / Z_{max}^{1/3}$ em função da vazão do emissor ($L h^{-1}$) e do tempo de aplicação de água (h) e valores de D_{max} para obter a profundidade do bulbo molhado de 40 cm para os solos estudados	77
Tabela 56. Valores de MSD, RMSD e seus componentes SB, NU e LC e coeficiente de determinação (R^2) para avaliação dos valores estimados e observados pelos modelos das equações 12 e 14 para D_{max} para os solos estudados	80
Tabela 57. Coeficientes do modelo superfície de resposta para a relação $K(\theta) = a \cdot t^b \cdot q^c$ para os solos estudados	81
Tabela 58. Volume de solo molhado (m^3) estimado segundo Zur (1996), Narda & Chawla (2002) (N&C), pela revolução do modelo quadrático(M3) e pela correção do volume do cilindro (M4) e para Modelo 5 (M5) em função do tempo de aplicação de água e vazão do emissor para o Luvissole Crômico, Argissolo Vermelho-Amarelo e Cambissolo Háplico	84

Tabela 59. Volume de solo molhado (m^3) pelas metodologias propostas por Zur (1996), Narda & Chawla (2002) (N&C), pela revolução do modelo quadrático(M3) e pela correção do volume do cilindro (M4) e para Modelo 5 (M5), em função do tempo de aplicação de água e vazão do emissor para o Neossolo Quartzarênico, Latossolo Vermelho e Neossolo Flúvico.....	85
Tabela 60. Coeficientes para o modelo de superfície de resposta do volume do bulbo molhado (m^3) por várias metodologias em função da vazão do emissor ($L h^{-1}$) e tempo de aplicação de água (h), $V = a \cdot t^b \cdot q^c$, para os solos estudados.....	88
Tabela 61. Valores de MSD, RMSD e seus componentes SB, NU e LC e coeficiente de determinação (R^2) para avaliação dos valores estimados e observados para o volume do bulbo molhado para os solos estudados (volume do solo em dm^3)	93
Tabela 62. Porcentagem de área molhada (PMA), porcentagem de volume molhado (PVM), lâmina de água disponível para as plantas (LAD), porcentagem de área molhada estimada (PMA_e) e porcentagem de volume molhado estimado (PVM_e) em função do tempo de aplicação de água e vazão do emissor para o Luvissole Crômico, Argissolo Vermelho-Amarelo e Cambissolo Háplico	95
Tabela 63. Porcentagem de área molhada (PMA), porcentagem de volume molhado (PVM), lâmina de água disponível para as plantas (LAD), porcentagem de área molhada estimada (PMA_e) e porcentagem de volume molhado estimado (PVM_e) em função do tempo de aplicação de água e vazão do emissor para o Neossolo Quartzarênico, Latossolo Vermelho e Neossolo Flúvico	96
Tabela 64. Coeficientes do modelo superfície de resposta para a porcentagem de área molhada (PAM), $PAM = a \cdot t^b \cdot q^c$, para os solos estudados.....	99
Tabela 65. Coeficientes do modelo superfície de resposta para a porcentagem de volume molhada (PVM), $PVM = a \cdot t^b \cdot q^c$, para os solos estudados.....	99
Tabela 66. Coeficientes do modelo superfície de resposta para lâmina de água disponível para as plantas, $LAD = a \cdot t^b \cdot q^c$, para os solos estudados.....	99

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Detalhes da área experimental, identificando cada parcela e bloco e a distribuição dos tratamentos nas parcelas dentro de cada bloco.....	24
Figura 2. Dimensões avaliadas do bulbo molhado circunscrito em cilindro e poliedro retangular	25
Figura 3. Detalhes da área experimental, identificando cada parcela e bloco e a distribuição dos tratamentos nos blocos para determinação da condutividade hidráulica saturada pela metodologia do charco.....	26
Figura 4. Tela do PAM – Programa para Análise de Modelo	35
Figura 5. Relação entre os valores observados e estimados por $D_q^2 = D_{q/2} \cdot D_{2q}$ para as vazões de 4,0 e 8,0 L h ⁻¹ para todos os solos estudados	56
Figura 6. Valores estimados em função do observado para D_{max} , Z_{max} , D_s e Z_{Dmax} para o modelo superfície de resposta para todos os solos estudados.....	62
Figura 7. Dimensões do bulbo molhado em função do volume de água aplicado para os solos estudados.....	66
Figura 8. Valores estimados em função do observado para D_{max} , Z_{max} , D_s e Z_{Dmax} em função do volume de água aplicado para todos os solos estudados.....	67
Figura 9. Valores de D_{max} , Z_{max} e Z_{Dmax} em função do diâmetro superficial (D_s) para os solos estudados.....	74
Figura 10. Valores da relação $D_{max} / Z_{max}^{1/3}$ em função do diâmetro superficial para todos os solos	78
Figura 11 Diâmetro máximo estimado pelo Modelo 1 (M1) e Modelo 2 (M2) em função do observado para os solos estudados.....	79
Figura 12. Relação entre o volume do bulbo molhado em função da metodologia proposta por Zur (1996) para os solos estudados.....	86
Figura 13. Volume do bulbo molhado em função do diâmetro superficial e da relação $D_{max} / Z_{max}^{1/3}$ para todos os solos estudados	87
Figura 14. Volume do bulbo molhado em função do volume de água aplicado	91
Figura 15. Volume do bulbo molhado estimado por cinco metodologias em função do volume do poliedro retangular e do cilindro.....	92

Figura 16. Relação entre PAM com PAM_e e PVM com PVM_e	100
Figura 17. Relação entre a lâmina de água disponível estimada usando PAM e PVM	100

LISTA DE APÊNDICES

Apêndice 1. Descrição pedológica dos solos estudados do Luvisolo Crômico	114
Apêndice 2. Descrição pedológica dos solos estudados do Argissolo Vermelho-Amarelo ..	115
Apêndice 3. Descrição pedológica dos solos estudados do Cambissolo Háplico.....	116
Apêndice 4. Descrição pedológica dos solos estudados do Latossolo Vermelho.....	117
Apêndice 5. Descrição pedológica dos solos estudados do Neossolo Quartzarênico.....	118
Apêndice 6. Descrição pedológica dos solos estudados do Neossolo Flúvico	119
Apêndice 7. Análise de variância para diâmetro máximo (D_{max}), diâmetro superficial (D_s) e profundidade máxima (Z_{max}) do bulbo molhado, em relação a tempo (t), a vazão (q) e a interação entre vazão e tempo ($q \times t$): Luvisolo Crômico.....	120
Apêndice 8. Análise de variância para diâmetro máximo (D_{max}), diâmetro superficial (D_s) e profundidade máxima (Z_{max}) do bulbo molhado, em relação a tempo (t), a vazão (q) e a interação entre vazão e tempo ($q \times t$): Argissolo Vermelho-Amarelo.....	121
Apêndice 9. Análise de variância para diâmetro máximo (D_{max}), diâmetro superficial (D_s) e profundidade máxima (Z_{max}) do bulbo molhado, em relação a tempo (t), a vazão (q) e a interação entre vazão e tempo ($q \times t$): Cambissolo Háplico	122
Apêndice 10. Análise de variância para diâmetro máximo (D_{max}), diâmetro superficial (D_s) e profundidade máxima (Z_{max}) do bulbo molhado, em relação a tempo (t), a vazão (q) e a interação entre vazão e tempo ($q \times t$): Latossolo Vermelho.....	123
Apêndice 11. Análise de variância para diâmetro máximo (D_{max}), diâmetro superficial (D_s) e profundidade máxima (Z_{max}) do bulbo molhado, em relação a tempo (t), a vazão (q) e a interação entre vazão e tempo ($q \times t$): Neossolo Quartzarênico.....	124
Apêndice 12. Análise de variância para diâmetro máximo (D_{max}), diâmetro superficial (D_s) e profundidade máxima (Z_{max}) do bulbo molhado, em relação a tempo (t), a vazão (q) e a interação entre vazão e tempo ($q \times t$): Neossolo Flúvico	125
Apêndice 13. Umidade do solo (% base peso) no interior do bulbo molhado logo após a aplicação de água: Luvisolo Crômico	126
Apêndice 14. Umidade do solo (% base peso) no interior do bulbo molhado logo após a aplicação de água: Argissolo Vermelho-Amarelo	126
Apêndice 15. Umidade do solo (% base peso) no interior do bulbo molhado logo após a aplicação de água: Cambissolo Háplico	126

Apêndice 16. Umidade do solo (% base peso) no interior do bulbo molhado logo após a aplicação de água: Latossolo Vermelho	127
Apêndice 17. Umidade do solo (% base peso) no interior do bulbo molhado logo após a aplicação de água: Neossolo Quartzarênico	127
Apêndice 18. Umidade do solo (% base peso) no interior do bulbo molhado logo após a aplicação de água: Neossolo Flúvico.....	127

RESUMO

Informações da geometria do bulbo molhado são importantes para o dimensionamento e manejo da irrigação localizada, principalmente para estimar o volume de solo molhado, a vazão do emissor e o tempo de aplicação de água. O objetivo deste estudo foi avaliar modelos matemáticos para o efeito da combinação entre tempo de aplicação de água e vazão do emissor nas dimensões e volume molhado do solo sob irrigação localizada superficial. O estudo foi realizado no agropólo Assu-Mossoró, Rio Grande do Norte, em seis solos classificados como Luvisolo Crômico, Argissolo Vermelho Amarelo, Cambissolo Háptico, Neossolo Quartzarênico, Latossolo Vermelho e Neossolo Flúvico. Os tratamentos foram compostos de quatro tempos de irrigação (1, 2, 4 e 7 h) e quatro vazões dos emissores (1, 2, 4 e 8 L h⁻¹), dispostos em delineamento experimental em blocos inteiramente casualizados no esquema de parcelas subdivididas, com três repetições, tendo o tempo (t) como parcela e a vazão (q) com subparcela. Após a aplicação do volume de água foram abertas trincheiras e medidas as dimensões do diâmetro superficial (D_s), diâmetro máximo (D_{max}), profundidade máxima (Z_{max}) e profundidade onde ocorre o diâmetro máximo (Z_{Dmax}). Foram avaliados modelos matemáticos para estimar as dimensões e volume do bulbo molhado, cuja comparação foi realizada pelo quadrado médio dos desvios (MSD). Observou-se que o modelo potencial e de superfície de resposta estimam satisfatoriamente as dimensões do bulbo molhado em função de q e t ; a relação $D_{max}/Z_{max}^{1/3}$ foi melhor ajustada pelo modelo superfície de resposta que D_{max}/Z_{max} em função de q e t , existe relação linear positiva entre o diâmetro superficial (D_s) e as dimensões do bulbo molhado. Modelos semi-empíricos foram propostos para estimativa do diâmetro máximo e os valores estimados se ajustaram bem aos observados. Os modelos propostos para estimativa do volume molhado estimaram satisfatoriamente o volume do bulbo

ABSTRACT

Information on the geometry of wetted soil volume under trickle irrigation is important for the design and operation of these irrigation systems, and also for the management of irrigation as a function of emitter discharge and wetted volume. This research was carried out in the state of Rio Grande do Norte, Brazil, to study the effect of different combinations of emitter discharge and time of water application on the dimension and volume of wetting in six soils (Entisol, Ultisol, Inceptisol, Psamment, Oxisol, Fluvent). The factors time of water application ($t = 1, 2, 4$ and 7 h) and discharge rate ($q = 1, 2, 4$ and 8 L h^{-1}) were studied in a split split-plot design with three replications. Trenches were open after application of the different water volumes and the following measures were taken: depth (Z_{max}), diameter at soil surface (D_s), maximum width (D_{max}), and depth of maximum width (Z_{Dmax}). Models proposed were evaluated by Mean Squared Deviation (MSD) between predicted and measured values. Empiric equations for $D_{max}(q, t)$, $Z_{max}(q, t)$, $D_s(q, t)$ and $Z_{Dmax}(q, t)$ adjusted well to power and surface response models. Values of the semi-empiric models proposed for maximum width had good agreement with field observed values. Models proposed also predicted wetted soil volume.

1. INTRODUÇÃO

A agricultura irrigada vem se desenvolvendo consideravelmente nos últimos anos em todo o país, em especial com a fruticultura na região Nordeste, onde se destacam as culturas da uva e da manga, no Vale do São Francisco, e do melão e da banana na região oeste do estado do Rio Grande do Norte, que vem contribuindo significativamente para o saldo da balança comercial pelas exportações destas para o mercado europeu e americano.

A agricultura irrigada encontrou na região semi-árida do Brasil um ambiente propício à atividade, tendo como principal fator limitante a água, tanto em termos quantitativos como qualitativos. Com base na disponibilidade hídrica da região Nordeste, estima-se que as áreas irrigadas, em toda região semi-árida brasileira, são de $1,154.10^6$ ha com um total máximo de $3,499.10^6$ ha, o que representam 1,5% e 4,4% do semi-árido (Sampaio & Salcedo, 1997). Com a construção de reservatórios de águas e o aproveitamento das águas subterrâneas, o potencial da área irrigada aumenta consideravelmente, sendo estimada em $4,2 \times 10^6$ hectares apropriados para a irrigação. Atualmente, a disponibilidade hídrica existente é suficiente para irrigar apenas $2,0.10^6$ hectares (Lima et al., 2000). Entretanto, com a construção de algumas barragens como a do Castanhão no Ceará, Santa Cruz em Apodi-RN e Umari em Upanema-RN, só para citar alguns exemplos, sem contar com o projeto de transposição das águas do rio São Francisco, a área irrigada aumentará consideravelmente nos anos vindouros.

O Estado do Rio Grande do Norte se destaca no cenário nacional e mundial, como uma área de aptidão agrícola para a fruticultura irrigada. Além de apresentar solos férteis, clima apropriado para a maioria das culturas irrigadas, também é isenta de algumas pragas e doenças, e internacionalmente conhecida como uma área livre das moscas das frutas, principalmente no pólo Assu-Mossoró. Os produtos oriundos dessa região são inquestionáveis quanto a ação modernizadora, e tem extrapolado os limites geográficos dessas regiões e conquistado espaços geográficos extra nação, incorporando-se ao seletivo cenário mundial da produção capitalista globalizada. Entendida como esforços revitalizados da economia do Estado e alçada à condição de "Pólo de Dinamismo" da atividade agropecuária do Nordeste em geral e do Ceará/Rio Grande do Norte em particular, a produção irrigada de frutas tropicais têm sido alvo constante da atenção do poder público, explicitada pelo favorecimento e transferência de expressiva soma de incentivos financeiros.

Mesmo havendo disponibilidade hídrica abundante, o que não é o caso da região Nordeste, torna-se importante o uso racional desse recurso natural, buscando alternativas para aumentar a eficiência do uso da água na irrigação. Dentre os métodos sistemas de irrigação, a localizada se destaca pela maior eficiência de aplicação de água e pode ser utilizada para aplicação de fertilizante. Este método aplica água em apenas uma fração do solo, onde se desenvolve o sistema radicular das plantas. Dentre os sistemas utilizados na irrigação localizada, o gotejamento é caracterizado pela aplicação da água em um ponto no solo, geralmente na superfície deste, a partir do qual se difunde até certa profundidade.

A irrigação localizada tem aumentado de modo contínuo nos últimos anos em todo o mundo. No Brasil a expansão da irrigação localizada não só tem sido contínua, como tende a acelerar, em decorrência, principalmente, da expectativa de aumento das áreas plantadas com fruteiras em diversas regiões. A irrigação por gotejamento, pelas suas características inerentes de alta uniformidade de aplicação de água e manutenção contínua de ótimos teores de umidade no solo próximo ao sistema radicular, tem sido o sistema mais utilizado. Para Coelho et al. (1999) os altos investimentos requeridos na implantação do sistema de irrigação localizado poderão, entretanto, não ser compensados se não forem utilizadas técnicas adequadas de manejo de irrigação que visem a racionalização do uso da água e o aumento da produtividade. Para os mesmos autores, o conhecimento da distribuição de água no volume molhado sob gotejamento é essencial na determinação do quanto irrigar e do quando irrigar. Ainda para Coelho et al. (1999), o uso de modelos para descrever ou estimar a distribuição de água no volume molhado pode ser uma importante alternativa na definição do manejo da irrigação, permitindo até mesmo antecipar resultados de produção para diferentes opções de manejo. Modelos numéricos e analíticos vêm sendo usados para descrever ou estimar a distribuição de água no bulbo molhado, mas de uso limitado na prática devido a sua complexidade.

Devido à escassez de áreas e água de boa qualidade para a agricultura e, pelo aumento da demanda de produtos agrícolas, há necessidade de aumentar a eficiência de irrigação (Khan et al., 1997). Pela magnitude do volume de água usado na irrigação, pode-se facilmente deduzir que qualquer técnica que reduza a quantidade de água ou que promova melhor utilização dela tem enorme significância. Do ponto de vista agrícola, é necessário produzir cada vez mais alimento por unidade de água aplicada, sendo necessário aumentar a produtividade pelo uso adequado de tecnologia ou reduzir o consumo de água pelas culturas, ou ambos. Economizando-se água, economiza-se também energia dispensada ao seu

bombeamento. Assim, para diminuir o impacto da irrigação no uso da água e da energia, algumas medidas devem ser adotadas. Dentre estas medidas, o manejo da irrigação é de fundamental importância. Para isso, deve-se conhecer o volume de solo umedecido pela água de irrigação e a capacidade de água armazenada no solo para as culturas. Para Righes et al. (2003) a limitação da disponibilidade de água e a sustentabilidade dos sistemas de exploração agrícola constituem um dos principais desafios para as gerações futuras. Considerando que a agricultura consome 69% da disponibilidade mundial de água, o manejo adequado da água de irrigação é de grande importância para a sustentabilidade da agricultura irrigada.

2. OBJETIVOS

2.1 Geral

Desenvolver e avaliar modelos matemáticos para a estimativa das dimensões e volume do bulbo molhado sob irrigação por gotejamento superficial, em função da vazão do emissor e tempo de aplicação de água, sem extração de água pela planta, em seis solos representativos na fruticultura irrigada no Agropolo Assu-Mossoró no Estado do Rio Grande do Norte.

2.2 Específicos

- ✓ Medir em condições de campo o diâmetro máximo, a profundidade máxima, o diâmetro superficial, a profundidade onde ocorre o diâmetro máximo para seis diferentes solos em função do tempo de aplicação de água e da vazão do emissor;
- ✓ Obter relações entre o diâmetro superficial com o diâmetro máximo, profundidade máxima, profundidade do diâmetro máximo e volume de solo molhado;
- ✓ Desenvolver e testar modelos matemáticos que relacionem a geometria do bulbo molhado em função da vazão do emissor e tempo de aplicação de água e do diâmetro superficial;
- ✓ Comparar o uso da porcentagem de área molhada com a porcentagem de volume molhado no cálculo da lâmina da água disponível;

3. REVISÃO DE LITERATURA

A irrigação localizada é um sistema de irrigação que tem como principal vantagem a aplicação de água próxima as raízes das plantas e a economia de água pela maior eficiência de aplicação. Dentre a irrigação localizada, o gotejamento é o sistema mais comum e baseia-se na aplicação de água na superfície do solo junto a planta. Este sistema permite molhar o solo formando um volume de solo molhado, denominado de bulbo molhado, onde se concentram as raízes das plantas. Molhando apenas uma porcentagem do solo, as perdas de água por evaporação e percolação são diminuídas, como também a lixiviação dos nutrientes (Youngs et al., 1999). Assim, o manejo da irrigação por gotejamento requer conhecimento do volume de solo molhado para evitar a sobreposição excessiva que pode diminuir a eficiência na aplicação de água e fertilizantes, principalmente em solos de textura arenosa (Keller & Bliesner, 1990)

Na última década verificou-se avanço no desenvolvimento de equipamentos, no dimensionamento e no manejo da irrigação localizada. Isto se deveu principalmente ao melhor entendimento do movimento de água no solo quando se utiliza o ponto de emissão de água na superfície. Uma das condições para o melhor dimensionamento da irrigação localizada com ponto de emissão superficial é o conhecimento da distribuição da umidade no solo para diferentes vazões dos emissores e tempo de irrigação e este, juntamente com o tipo de solo, influenciam no movimento de água (Lubana & Narda, 1998). Resultados empíricos e simulados da distribuição de água no solo sob irrigação localizada enfatizam duas características práticas: a) quando o solo seco é irrigado, ocorre a formação do volume de solo molhado onde a frente de molhamento separa o solo seco do solo molhado; b) a maior fração do volume de solo úmido tem um relativo teor uniforme de água. Estes dois fatores são usados na fertirrigação onde a frente de molhamento define o volume de solo onde a planta emite raiz e o teor de água e a concentração de nutriente na solução do solo podem ser mantidos próximo do ótimo contribuindo para a maior eficiência na aplicação de fertilizante (Bar-Yosef, 1999). No entanto, Coelho et al. (1999) destacam que, os altos investimentos requeridos para a implantação desse sistema de irrigação poderão, entretanto, não ser compensados se não forem utilizadas técnicas adequadas de manejo de irrigação que visem à racionalização do uso da água e aumento da produtividade.

3.1 Formação do bulbo molhado

O volume molhado do solo é definido como sendo a forma tridimensional que ocupa a frente de molhamento da água de irrigação a partir de um ponto de emissão (Folch & Fábrega, 1999). Na irrigação por gotejamento superficial a água é aplicada diretamente na superfície do solo que, no processo de infiltração, resulta na formação de um volume de solo molhado tridimensional. Nesta condição a equação diferencial que governa o fluxo de água é descrita pela equação de Richards que, em função da difusividade, é igual a

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \right] + \frac{\partial K(\theta)}{\partial z} \quad (\text{Libardi, 2000}).$$

Para a resolução do problema duas pressuposições são assumidas: i) é conhecida a vazão do emissor em função do tempo e ii) durante a infiltração da água no solo existe a formação de uma região circular saturada que, inicialmente pequena, aumenta com o tempo (Brandt et al., 1971). O equilíbrio é obtido quando a vazão do emissor se iguala ao fluxo de água no solo na condição de equilíbrio dinâmico (Jury & Earl, 1977). Além dessa região saturada, o fluxo de água na superfície do solo é não saturado e governado pela capilaridade (Wooding, 1968).

3.2 Fatores que afetam a formação do bulbo molhado

Dentre os fatores que influenciam na formação do bulbo molhado pode-se destacar o tipo de solo e sua estratificação, a vazão do emissor e o tempo de irrigação (Pizarro, 1996). Outros fatores que influenciam nas dimensões do bulbo molhado são a estrutura do solo, sistema de irrigação, altura do emissor em relação ao solo, umidade inicial do solo e presença de concreções e cascalho (Bell et al., 1990 e Folch & Fábrega, 1999). Nos solos mais argilosos, devido a menor taxa de infiltração, verifica-se a formação de bulbo com maior dimensão horizontal, explicado pela maior influência da capilaridade sobre a gravidade. Em solos que apresentam camadas estratificadas, verificam-se camadas com diferentes porosidades, que afetam o fluxo e a retenção de água e, conseqüentemente, o bulbo molhado. Isso implica que, quando a frente de molhamento atinge camadas de diferentes texturas, esta se comporta como uma barreira, principalmente em solos que apresentem gradiente textural no perfil do solo. Para diferentes vazões do emissor e para mesmo tempo de irrigação, menores vazões tenderão a formar bulbos molhados mais profundos e com menor raio

superficial; já para mesma vazão de emissores, quanto maior o tempo de irrigação, maior o raio superficial.

Teoricamente, durante a irrigação por gotejamento, usando um ponto-fonte localizado na superfície do solo, o fluxo de água é dividido em parte que infiltra horizontalmente e outra verticalmente. A quantidade de água infiltrada nestas direções depende da taxa de aplicação e das propriedades hidráulicas do solo que controlam o processo de infiltração. Com o tempo de aplicação irá se formando uma zona saturada, cujo diâmetro aumenta com o tempo de irrigação até se estabilizar, sendo maior em solos argilosos que em solos arenosos (Youngs et al., 1999). Para Al-Jabri et al. (2002) a aplicação de água de um ponto-fonte superficial produz uma área circular (ou quase circular) saturada, denominada de charco. Isto acontece quando a vazão do emissor é maior que a taxa de infiltração da água no solo. No início da aplicação da água, a região saturada aumenta até um tamanho constante com o tempo de irrigação (Bresler, 1978). Uma vez estabilizada a região superficial saturada, ocorre a situação de steady-state e a solução de Wooding (1968) pode ser aplicada. A utilização desta metodologia tem algumas vantagens como a simplicidade, rapidez e reprodutibilidade das medidas das propriedades hidráulicas em condições de campo (Yitayew et al., 1998). Outros autores trabalharam com esta metodologia de campo para obtenção das propriedades hidráulicas do solo, tais como Shani et al. (1987) e Revol et al. (1991).

3.3 Dimensões do bulbo molhado

O conhecimento da forma e do tamanho do volume molhado do solo é um aspecto importante a considerar para otimizar o uso da água, evitando percolação profunda. A avaliação da forma e do tamanho do volume molhado permite definir aspectos importantes, tais como lâmina e frequência de irrigação, número de gotejadores e dimensionamento hidráulico. (Folch & Fábrega, 1999).

O movimento de água no solo sob irrigação localizada com ponto de emissão superficial é utilizado como um índice para o dimensionamento e o manejo da água de irrigação, devido seu conhecimento ser essencial para a determinação do espaçamento entre os emissores (Jury & Earl, 1977). O espaçamento dos emissores deve ser de tal maneira que uma faixa molhada se forme, porém a sobreposição exagerada além do maior custo devido ao maior número de emissores, diminuirá a eficiência de aplicação da água de irrigação. Portanto, o volume de solo molhado por um único emissor é importante para o

dimensionamento da irrigação localizada, determinando-se assim o número total de emissores necessário para molhar parte do solo para aplicar água de acordo com a necessidade hídrica das plantas, sendo esta função da textura do solo, estrutura, taxa de aplicação (vazão do emissor) e volume de água aplicado (relacionado com o tempo de irrigação). Segundo Lubana & Narda (1998) a forma e o volume molhado do solo variam principalmente com as características hidráulicas do solo, número de emissores, vazão dos emissores e frequência de irrigação que precisam ser determinados para que o volume molhado seja suficiente para que as plantas supram suas necessidades hídricas.

A determinação da profundidade máxima atingida pelo bulbo molhado por um emissor na superfície do solo é importante para prever as perdas de água e nutrientes aplicados. Para isso, soluções analíticas, que levam em consideração a assimetria da infiltração da água no solo, são as mais utilizadas, porém são válidas apenas para fluxo em condições de steady-state (Wooding, 1968; Raats, 1971).

3.4 Espaçamento entre emissores

As determinações das dimensões do bulbo molhado são úteis no cálculo da distância entre os emissores na irrigação por gotejamento. O fluxo de água é descrito como uma faixa molhada ou volumes isolados dependendo da distância entre os emissores na lateral de irrigação. O desejado é que o espaçamento dos emissores possa formar uma faixa molhada, mas sem sobreposição muito grande, pois aumenta os custos pelo maior número de emissores (Schwartzman & Zur, 1986).

Estudos que mostram o comportamento do bulbo molhado em função do tipo de solo, vazão do emissor e tempo de aplicação de água podem ser usados para estimar o espaçamento entre os emissores. Trabalhos como os de Brandt et al. (1971), Bresler et al. (1971) e Bresler (1978) mostraram que, em solos com condutividade hidráulica saturada (K_s) e α (coeficiente do solo) pequeno, o espaçamento entre os emissores é maior, como também para culturas pouco sensíveis ao stress de água. Já solos com K_s e α maiores, o espaçamento entre os emissores é menor. Isso implica que, o espaçamento entre os emissores pode ser aumentado com o aumento da vazão do emissor. Isso é mostrado claramente nos trabalhos de Wooding (1968) e Bresler (1978) onde se observa que, com o aumento da vazão do emissor e um decréscimo em K_s , tem-se o aumento do raio superficial molhado.

Schwartzman & Zur (1986) desenvolveram um modelo semi-empírico para determinar o diâmetro máximo do bulbo em função da profundidade máxima, vazão do emissor e de K_s para fluxo cilíndrico em três dimensões. As simulações foram feitas para que não houvesse sobreposição do bulbo molhado. Pela análise de sensibilidade, os autores constataram que com aumento de K_s , pode decrescer o diâmetro em 30% e aumentar a profundidade em 150%; para um decréscimo em K_s , pode aumentar em 50% no diâmetro e decresce a profundidade em 60%. Para vazão do emissor, também pela análise de sensibilidade, os autores concluíram que duplicando a vazão do emissor resulta no aumento de 10% no diâmetro e um decréscimo de 30% na profundidade molhado e que, o efeito na mudança na vazão do emissor é mais pronunciada em solos argilosos que em solos arenosos. Porém deve-se levar em consideração os aspectos econômicos e de dimensionamento do sistema.

3.5 Porcentagem de área molhada

O conhecimento da porcentagem de área molhada e do perfil de molhamento do solo é necessário para o dimensionamento e manejo da irrigação localizada, uma vez que afetam a produção da cultura e o crescimento, tanto do sistema radicular quanto da parte aérea. A porcentagem de área molhada e o perfil de molhamento do solo variam em função do tipo de solo, do tipo de emissor, do espaçamento entre emissores e da vazão do emissor do tempo de aplicação de água e da lâmina de água aplicada. Bielorai (1982) estudou os efeitos da porcentagem de área molhada (PAM) sobre a produção, eficiência do uso da água e qualidade do fruto, em “pomelo” irrigado por gotejamento e aspersão, em Negev, Israel. A maior produtividade ($192,6 \text{ kg.planta}^{-1}$) foi obtida nas plantas irrigadas com PAM igual a 40%, repondo-se 100% das necessidades hídricas das plantas. A quantidade de água aplicada afetou também a qualidade final dos frutos.

3.6 Modelos

O conhecimento da distribuição de água no volume molhado sob gotejamento é essencial na determinação de quanto irrigar e quando irrigar. O uso de modelos para descrever ou estimar a distribuição de água no volume molhado pode ser uma importante alternativa na

definição do manejo da irrigação, permitindo até mesmo antecipar resultados de produção para diferentes opções de manejo (Coelho et al., 1999).

A infiltração multidimensional de água no solo é governada pela equação de Richards definida como $\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla[K(h)\nabla h] - \frac{\partial K(h)}{\partial z}$ em que θ é o teor de água no solo ($L^3 L^{-3}$), $K(h)$ é a condutividade hidráulica ($L.T^{-1}$), z é a profundidade do solo (L) e ∇ é o operador Del. Soluções analíticas para a equação de Richards são obtidas pela semi linearização proposta por Philip (1971) que considera o modelo exponencial para a condutividade hidráulica não saturada de acordo com a equação proposta por Gardner (1958): $K(h) = K_s e^{\alpha h}$, em que $K(h)$ é a condutividade hidráulica não saturada ($L.T^{-1}$), α é uma constante característica do solo. A linearização é obtida usando o potencial de fluxo matricial (ϕ , $L^2.T^{-1}$) que é definido como $\phi = \int_{-\infty}^h K(h)dh$, sendo que, para a condição saturada é igual a $\phi_s = \frac{K(h)}{\alpha}$.

Alguns estudos desenvolvidos por Wooding (1968) e Philip (1969) serviram como base teórica para os modelos de infiltração de água na irrigação por gotejamento, seja ela superficial ou subsuperficial. Os modelos numéricos permitem uma estimativa mais precisa das dimensões do bulbo molhado, porém, devido a sua complexidade, custo e dificuldade de reprodutibilidade no campo, são menos utilizados na prática (Lafolie et al., 1989). Segundo Lockington et al. (1984) os modelos analíticos são preferíveis devido a sua relativa facilidade de aplicação e maior compreensão física. Alguns modelos baseados em soluções analíticas são propostos para modelar a infiltração de água com emissores superficiais, porém, são limitados pela simplificação feita devido às pressuposições do modelo. Os métodos numéricos apresentam maior aplicabilidade prática, porém, necessitam de informações das propriedades do solo e que estes apresentem perfil homogêneo (Lubana & Narda, 2001).

Brandt et al. (1971) desenvolveram um modelo matemático considerando que a equação diferencial que governa no fluxo de água na infiltração multidimensional pode ser expressa em função da difusividade. Esse modelo foi avaliado em campo e em laboratório por Bresler et al. (1971) que verificaram bons ajustes entre os valores estimados e observados, exceto para altas taxas de aplicação de água do emissor (Jury & Earl, 1977). Outros trabalhos levaram em consideração no modelo o efeito da gravidade (Selim & Kirkham, 1973), enquanto outros negligenciaram este efeito (Turner & Parlange, 1974). Para curtos intervalos

de infiltração, a descrição matemática de um fluxo de infiltração constante de uma cavidade semiesférica (Raats, 1971; Warrick, 1974) foi mais simples que quando se levou em consideração a área saturada em forma de disco próximo ao emissor (Wooding, 1968; Warrick & Lomen, 1976). Os modelos propostos que consideram que o fluxo de infiltração é constante para uma cavidade semiesférica é baseado no modelo proposto por Philip (1969).

Para condições de equilíbrio dinâmico (steady-state), Raats (1971) apresentou um modelo que estimava o campo espacial do potencial de fluxo matricial para infiltração de água por gotejamento superficial. Neste mesmo trabalho o autor propôs outros modelos para estimar o potencial e o fluxo de água para as mesmas condições. Avaliando este modelo com três outros propostos por alguns autores, Revol et al. (1996) verificaram que o modelo se sobressaiu sobre os demais, com estreita relação com os dados observados em campo, porém este modelo só é válido para baixas vazões do emissor, que não forma o charco na superfície do solo (Mmolawa & Or, 2000; Lubana & Narda, 2001).

Um método numérico foi proposto por Healy & Warrick (1988) baseado na solução da diferença finita da equação adimensional de Richards para fluxo com eixos simétricos e obtiveram resultados similares aos modelos propostos por Warrick & Amoozegar-Fard (1979) e Warrick et al. (1985). A análise foi simplificada assumindo que o solo é homogêneo, não ocorre evapotranspiração, uniformidade do teor de umidade inicial no perfil do solo, não há efeito da histerese e que a solução generalizada é melhor descrita pela função delta de Dirac.

Outro modelo para avaliar o movimento de água na irrigação localizada por gotejamento superficial foi proposto por Warrick (1974) que linearizou a equação do fluxo da água e apresentou solução para condições de steady-state e transiente com aplicação periódica de água. Este modelo foi testado por Nogueira (1998) e Nogueira et al., (2000) e não se mostrou satisfatório para as condições do estudo. Warrick et al. (1979) propuseram um modelo para simular a dinâmica da água na irrigação por gotejamento superficial levando em consideração a extração de água pelas plantas e a evaporação na superfície do solo. Neste trabalho, foi proposto um modelo tridimensional que leva em consideração a extração de água pelas plantas e estima o raio molhado de um volume semi-esférico.

Com base no modelo analítico proposto por Brandt et al (1971), Bresler (1978) propôs um modelo ressaltando a importância das propriedades hidráulicas do solo para a irrigação localizada e obteve para uma dada condição de solo, vazão do emissor e condição de equilíbrio dinâmico a recomendação do espaçamento dos emissores com base no potencial da

água no ponto mediano entre dois emissores (h_c) e foi testado inicialmente por Russo (1984). Para Revol et al. (1997a), do ponto de vista prático o uso do modelo é questionável, pois leva em consideração a uniformidade de h_c no perfil do solo. Em estudo de campo, com a cultura do milho, os mesmo autores verificaram que a variabilidade espacial de h_c foi superior ao simulado pelo modelo. A explicação pode ser devido ao modelo não levar em consideração a absorção de água pelas raízes ou pelo espaçamento de 1,0 m entre os emissores usado no experimento. Devido a algumas limitações da pressuposição da condição de equilíbrio dinâmico no movimento da frente de molhamento Revol et al. (1997b) propuseram um modelo com base no de Raats (1971) para fluxo transiente. Os autores concluíram que a profundidade do bulbo molhado influenciado pela gravidade foi bem estimada pelo modelo e dependente do valor de α .

Schwartzman & Zur (1986) propuseram um modelo semi-empírico para determinar as dimensões do bulbo molhado sob irrigação localizada superficial onde consideraram que a geometria do bulbo depende do tipo de solo, da vazão do emissor e da quantidade de água aplicada. Para caracterizar o tipo de solo os autores usaram a condutividade hidráulica saturada (K_s). Com base em equações empíricas obtiveram as equações $z = 2,54V^{0,63} \left(\frac{K_s}{q} \right)^{0,45}$ e $d = 1,824V^{0,22} \left(\frac{K_s}{q} \right)^{-0,17}$ em que d, z, V e q são o diâmetro (L), profundidade máxima (L), volume de água aplicado (L^3) e vazão do emissor ($L^3 \cdot T^{-1}$), respectivamente. Igualando os valores de V, chegou-se a equação $d = 1,32z^{0,35} \left(\frac{q}{K_s} \right)^{0,33}$. Este modelo foi testado por Nogueira (1998) e Nogueira et al. (2000) em comparação com o modelo proposto por Warrick (1974) e Ben-Asher et al. (1986) e verificaram que foi o que apresentou as maiores correlações com os dados de campo.

Modelo proposto por Ben-Asher et al. (1986) que considera que a forma do bulbo molhado é uma semi-esfera. Os autores propuseram modelos para as condições do emissor superficial e subsuperficial. Além disso levaram em consideração três casos especiais, com modelos para a condição de infiltração sem extração de água pela planta, com extração de água pelas plantas e sem evaporação e para condição de extração de água pela planta e evaporação da água do solo. Para a condição em que não há extração de água pela planta e evaporação igual a zero, o modelo proposto pelo os autores é dado por $R(t) = \left(\frac{3 \cdot q \cdot t}{\Delta\theta} \right)^{1/3}$ em

que q , t e $\Delta\theta$ são a vazão do emissor ($L^3 T^{-1}$), o tempo de aplicação de água (T) e a variação da umidade do solo ($L^3 L^{-3}$), respectivamente. Bar-Yosef (1999) faz uma pequena modificação nesse modelo substituindo $\Delta\theta$ pela umidade na capacidade de campo do solo (θ_{cc}).

Estudando a largura e a profundidade do bulbo molhado para definir o espaçamento e a vazão do emissor na irrigação localizada superficial, Zur (1996) assumiu que a forma do bulbo segue o comportamento da elipse truncada e o volume molhado é dado por

$$V = \frac{\pi}{12} d^2 \left[2z + h - \frac{h^3}{(z-h)^2} \right]$$

em que V é o volume molhado (L^3), d é o diâmetro máximo (L),

z a profundidade máxima (L) e h é a profundidade onde ocorre d (L). Para seleccionar o espaçamento e vazão dos emissores o autor parte inicialmente do volume molhado máximo

(V_m) desejado e que é estimado por $V_m = \frac{C_p \cdot TR}{CAD \cdot f}$ em que C_p é o pico de consumo de água

diário da planta ($L^3 T^{-1} L^{-2}$), TR é o turno de rega (T), CAD capacidade de água armazenada pelo solo ($L^3 L^{-3}$) e f é o fator de disponibilidade de água no solo (decimal). Usando o modelo proposto por Schwartzman e Zur (1986), Zur (1996) estimou a vazão do emissor para obter o

volume molhado desejado por $q = \frac{12K_s dV_m}{2,3z\pi \left(2z + h - \frac{h^3}{(z-h)^2} \right)}$.

Moncef et al. (2002) propuseram um modelo para estimativa da profundidade do bulbo molhado. Partindo das equações de infiltração da água no sentido horizontal e vertical

no solo e fazendo algumas pressuposições chegaram ao modelo $Z(t) = R(t) + \frac{2K_f t}{2(\theta_f - \theta_i)}$ em

que Z é a profundidade máxima (L), R é o raio superficial (L), t é o tempo de aplicação de água (T), K_f é a condutividade hidráulica final (LT^{-1}), θ_f e θ_i são as umidade do solo final e inicial ($L^3 L^{-3}$), respectivamente. De acordo com este modelo, para todo $t > 0$, Z é maior que R , o que não pode ser verdade para solos com baixa condutividade hidráulica ou para maiores vazões do emissor.

Recentemente Thorburn et al. (2003) propuseram um modelo para estimar a frente de molhamento do bulbo molhado visando o dimensionamento e o manejo da água sob irrigação localizada superficial. Estes autores consideraram a forma do bulbo como sendo

uma elipse, $\left(\frac{z}{z_m}\right)^2 + \left(\frac{r}{r_m}\right)^2 = 1$, em que z , z_m , r e r_m são a profundidade, a profundidade máxima, raio superficial e o raio superficial máximo, respectivamente. Os valores estimados pelo modelo se correlacionaram estreitamente com os observados no campo e com o modelo proposto por Philip (1984). Cook et al. (2003) utilizando o modelo proposto por Thorburn et al. (2003) desenvolveram um software para a simulação deste com outros propostos na literatura. Os autores concluíram que no modelo proposto por Thorburn et al. (2003) a frente de molhamento foi bem estimada para solos com baixa permeabilidade e que, para solos com alta permeabilidade, o modelo subestimou a frente de molhamento, principalmente com altos volumes de água aplicados.

Outros modelos foram propostos por Hachum et al. (1976), Warrick & Lomen (1976), Jury & Earl (1977), Batu (1978), Ben-Asher et al. (1978), Merrill et al. (1978), Clothier (1984), Lockington et al. (1984), Philip (1984), Taghavi et al. (1984), Healy & Warrick (1988), Lafolie et al. (1989), Angelakis et al. (1993) e Revol et al. (1997).

3.7 Principais limitações dos modelos

Considerando a complexidade dos fenômenos físicos envolvidos na infiltração da água na irrigação localizada superficial, a maioria dos modelos propostos não leva em consideração a água extraída pelas raízes das plantas. Além disso, têm sido assumidas pressuposições que, na sua simplificação para facilitar o processo de modelagem, muitas vezes tem levado a maior complexidade (Lubana & Narda, 2001).

As principais limitações dos modelos é que muitos deles são testados em condições não condizente com a prática de campo. Alguns modelos levam em consideração o curto tempo de infiltração de água no solo onde os efeitos da gravidade podem ser negligenciados (Clothier & Scotter, 1982; Ben-Asher et al., 1986), porém para condições de campo, tais condições raramente são observadas (Coelho & Or, 1996). Outros modelos que apresentam soluções analíticas levam em consideração a assimetria da infiltração da água no solo, porém são válidas apenas para fluxo em condições de equilíbrio dinâmico (Wooding, 1968, Raats, 1971), o que não se verifica na prática segundo Coelho & Or (1997). Muitos trabalhos da literatura tentaram modelar o comportamento do bulbo molhado em condições de laboratório, principalmente em solos arenosos. Segundo Lubana & Narda (1998) pouca atenção tem sido dada aos estudos realizados em condições de campo. Ainda não é bem

entendido como a distribuição do teor de água no solo é afetada pelas propriedades hidráulicas do solo não saturado, resultando muitas vezes no manejo sub-ótimo da irrigação e baixa eficiência do uso da água.

Algumas equações deduzidas de resultados numéricos (Healy & Warrick, 1988) poderiam ser úteis, mas precisam ser validadas em experimentos de campo. Modelos semi-empíricos, como o de Schwartzman & Zur (1986), foram desenvolvidos para a predição do diâmetro em função da profundidade, vazão do emissor e condutividade hidráulica saturada. Para Moncef et al. (2002) este modelo é limitado pela necessidade das dimensões do diâmetro ou da profundidade máxima em condições de campo.

Além dessas limitações, os modelos partem do princípio que existe homogeneidade no perfil do solo, ou seja, isotrópico e não existe camada compactada e mudança textural de um horizonte para outro. No caso da anisotropia a relação exponencial entre condutividade hidráulica não saturada em função do potencial matricial (Gardner, 1958), $K(h) = K_s e^{ch}$, não é observada (Merrill et al., 1978). Além disso, os modelos também não levam em consideração o efeito da histerese. Assume-se ainda que a geometria do bulbo molhado é uma semi-esfera ou semi-elipse, com maior diâmetro molhado sendo observado na superfície do solo, o que também não é totalmente verdadeiro, principalmente para solos com textura argilosa ou com baixa condutividade hidráulica.

3.8 Dinâmica da água no solo e impacto ambiental

A modelagem do fluxo da água e o transporte de soluto no solo têm sido comum nos estudos agrícolas e ambientais (Sonnleitner et al., 2003), sendo as principais preocupações voltadas para a contaminação do ambiente, principalmente no tocante aos fatores que contribuem para dispersão dos contaminantes, como a chuva, tipo de solo e o manejo da irrigação (Niemet & Selker, 2002), sendo que este último tem recebido considerável atenção na literatura.

Modelos de simulações numéricas são usados para predizer o fluxo de água e transporte de contaminantes em solos saturados para avaliar o impacto do manejo no ambiente (Mallants et al., 1997). Na irrigação localizada a frente de molhamento tem uma importante função no fenômeno que afeta o fluxo de água e o transporte de contaminantes em solos saturados e não saturados.

O problema do fluxo em condições de equilíbrio e transporte tem recebido muita atenção nas ciências agrícola e do solo devido a suas implicações no movimento de fertilizantes, pesticidas e elementos tóxicos da zona não saturada para as águas subterrâneas (Simunek et al., 2003). O entendimento dos processos de transporte de fertilizante, herbicida e pesticida auxilia na redução da lixiviação destes para as camadas subsuperficiais do solo. Segundo Dodds et al. (1998) quando os fertilizantes são deslocados para partes inferiores do perfil do solo, torna-se inviável economicamente, além de acarretar risco de contaminação para as águas subterrâneas. Devido a isso ocorre em muitas áreas agrícolas a contaminação destas águas pelo nitrato e pesticidas, o que tem se tornado um sério problema ambiental, visto que áreas agrícolas possuem diferentes graus de exploração e potencial de poluição do lençol freático que depende do tipo de solo, da geologia, do clima, do manejo das práticas agrícolas (Singh & Kanwar, 1995). No entanto, a produção agrícola pode ser otimizada do ponto de vista ambiental, pela aplicação de técnicas de manejo e tecnologias. O mau uso da fertirrigação, por exemplo, pode contribuir para problemas de contaminação do solo e da água se mal manejada. O bom manejo contribui para aumentar a eficiência do uso da água com decréscimo na lixiviação de nutrientes (Romic et al., 2003).

De acordo com as teorias que descrevem os processos físicos químicos que ocorrem no solo, aliados às técnicas de resoluções numéricas de equações e aos recursos computacionais disponíveis, é possível, utilizando-se modelos de simulação, prever os riscos de contaminação e impactos que determinado componente químico pode causar ao meio solo-água e às plantas. Um grande número de modelos de simulação tem sido difundido na última década, visando descrever o movimento de solutos através do perfil do solo; o que se observa, porém, é que existe grande dificuldade em envolver todos os parâmetros pertinentes ao meio ambiente, para que o modelo possa realmente prever o processo de deslocamento e retenção dos solutos na natureza (Miranda & Duarte, 2002). Isso implica que nos estudos de lixiviação de contaminantes é fundamental que se conheça a distribuição de água no solo durante o processo de infiltração.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Localização e caracterização da área experimental

Para avaliar o efeito da vazão do emissor e do tempo de aplicação de água na formação do bulbo molhado foram instalados seis experimentos em diferentes solos situados na região oeste do estado do Rio Grande do Norte, no chamado agropólo Assu-Mossoró.

A região é caracterizada, segundo a classificação de Gaussen, com bioclima da região de 4 ath tropical quente de seca acentuada, com índice xerotérmico entre 200 e 150 e sete a oito meses secos. Segundo a classificação de Köppen, o clima da região é do tipo BSw^h, isto é, seco, muito quente e com estação chuvosa no verão atrasando-se para o outono, apresentando temperatura média anual de 27,4°C, precipitação pluviométrica anual bastante irregular, com média de 673,9 mm, e umidade relativa de 68,9% (Carmo Filho et al., 1991).

4.2 Os solos

Para uma compreensão do comportamento do bulbo molhado, foi feito levantamento dos principais solos utilizados na fruticultura irrigada do Rio Grande do Norte, mais precisamente no Agropólo Assu-Mossoró. Foram selecionados seis solos com diferentes características físicas e mineralógicas. De acordo com Embrapa (1999), os solos selecionados para o referido estudo foram classificados como Luvisolo Crômico, Argissolo Vermelho-Amarelo, Cambissolo Háptico, Neossolo Quartizarênico, Latossolo Vermelho e Neossolo Flúvico. Antes da montagem do sistema de irrigação, os solos foram preparados de forma a simular as reais condições de plantio, com aração e passagem da grade de disco de forma cruzada. Foram realizadas coletas de amostras de solo seco e úmido, para determinação da umidade inicial e final em laboratório e, para realizar a caracterização pedológica do solo, foi aberta trincheira vizinha à área experimental. Foram realizadas em todos os solos análises textural e de densidade real e aparente de acordo com Embrapa (1997) (Tabelas 1 a 27).

Tabela 1. Textura do solo onde se realizou o estudo de bulbo molhado sob irrigação por gotejamento superficial: Luvissole Crômico

Horizonte/Camada	Fração Granulométrica (g kg ⁻¹)			Classe Textural
	Argila	Silte	Areia	
A _p (0-25)	247	66	687	Franco-argilo-arenosa
B ₁ (25-65)	330	200	470	Franco-argilo-arenosa
B ₂ (65-80+)	306	180	514	Franco-argilo-arenosa

Tabela 2. Densidades do solo e de partícula e porosidade total do solo onde se realizou o estudo de bulbo molhado sob irrigação por gotejamento superficial: Luvissole Crômico

Horizonte/Camada	Densidade (Mg m ³)		Porosidade Total
	Solo	Partícula	
A _p (0-25)	1,61	2,75	0,413
B ₁ (25-65)	1,63	2,69	0,395
B ₂ (65-80+)	1,57	2,72	0,424

Tabela 3. Umidade inicial (% base peso) do solo por ocasião do estudo do bulbo molhado: Luvissole Crômico

Profundidade (cm)	Umidade Inicial (m ³ m ⁻³)
0-20	0,0092
20-40	0,0229
40-60	0,0653
60-80	0,0636
Média	0,0403

Tabela 4. Parâmetros da equação de retenção de água no solo, usando o modelo de van Genuchten (1980), onde se realizou o estudo de bulbo molhado sob irrigação por gotejamento superficial: Luvissole Crômico

Horizonte/Camada	Parâmetros				
	θ_r (m ³ m ⁻³)	θ_s (m ³ m ⁻³)	α	n	m
A _{p1} (0-25)	0,053	0,419	1,217	1,602	0,376
B ₁ (25-65)	0,092	0,484	4,416	1,293	0,227
B ₂ (65-80+)	0,061	0,455	4,781	1,229	0,186

Tabela 5. Função K(ψ), em mm dia⁻¹, em diferentes profundidades, para ψ_m , em cm.c.a.: Luvissole Crômico

Prof. (cm)	Modelo	R ²
37,5	$K(\psi) = 2,04 \cdot 10^{18} \cdot \psi^{-10,7}$	0,992
52,5	$K(\psi) = 4,21 \cdot 10^{16} \cdot \psi^{-9,13}$	0,988

Tabela 6. Textura do solo onde se realizou o estudo de bulbo molhado sob irrigação por gotejamento superficial: Argissolo Vermelho-Amarelo

Horizonte/Camada	Fração Granulométrica (g kg^{-1})			Classe Textural
	Argila	Silte	Areia	
A _{p1} (0-25)	195	40	765	Franco-arenosa
A _{p2} (25-42)	189	40	771	Franco-arenosa
B ₁ (42-53)	380	90	529	Argilo-arenosa
B ₂ (53-80+)	407	120	473	Argila

Tabela 7. Densidades do solo e de partícula e porosidade total do solo onde se realizou o estudo de bulbo molhado sob irrigação por gotejamento superficial: Argissolo Vermelho-Amarelo

Horizonte/Camada	Densidade (Mg m^{-3})		Porosidade Total
	Solo	Partícula	
A _{p1} (0-25)	1,58	2,74	0,423
A _{p2} (25-42)	1,79	2,80	0,360
B ₁ (42-53)	1,72	2,73	0,371
B ₂ (53-80+)	1,64	2,76	0,406

Tabela 8. Umidade inicial (% base peso) do solo por ocasião do estudo do bulbo molhado: Argissolo Vermelho-Amarelo

Profundidade (cm)	Umidade Inicial ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)
0-20	0,0060
20-40	0,0253
40-60	0,0792
60-80	0,0762
80-100	0,1318
Média	0,0637

Tabela 9. Parâmetros da equação de retenção de água no solo, usando o modelo de van Genuchten, onde se realizou o estudo de bulbo molhado sob irrigação por gotejamento superficial: Argissolo Vermelho-Amarelo

Horizonte/Camada	Parâmetros				
	θ_r ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	θ_s ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	α	n	m
A _{p1} (0-25)	0,024	0,398	0,564	1,924	0,481
A _{p2} (25-42)	0,006	0,388	2,824	1,307	0,235
B ₁ (42-53)	0,026	0,439	8,141	1,206	0,170
B ₂ (53-80+)	0,046	0,478	10,091	1,189	0,159

Tabela 10. Função $K(\psi)$, em mm dia^{-1} , em diferentes profundidades, para ψ_m , em cm.c.a.: Argissolo Vermelho-Amarelo

Prof. (cm)	Modelo	R^2
37,5	$K(\psi) = 1,40 \cdot 10^4 \cdot e^{-0,167 \cdot \psi}$	0,959
52,5	$K(\psi) = 1,90 \cdot 10^5 \cdot \psi^{-3,00}$	0,992

Tabela 11. Textura do solo onde se realizou o estudo de bulbo molhado gerado por irrigação por gotejamento superficial: Cambissolo Háplico

Horizonte/Camada	Fração Granulométrica (g kg^{-1})			Classe Textural
	Argila	Silte	Areia	
A _p (0-25)	400	245	356	Franco-argilosa
B ₁ (25-45)	390	284	326	Franco-argilosa
B ₂ (45-68)	417	259	324	Argila
B ₃ (68-90)	369	276	356	Franco-argilosa

Tabela 12. Densidades do solo e de partícula e porosidade total do solo onde se realizou o estudo de bulbo molhado sob irrigação por gotejamento superficial: Cambissolo Háplico

Horizonte/Camada	Densidade (Mg m^{-3})		Porosidade Total
	Solo	Partícula	
A _p (0-25)	1,33	2,62	0,490
B ₁ (25-45)	1,28	2,63	0,512
B ₂ (45-68)	1,25	2,60	0,517
B ₃ (68-90)	1,24	2,61	0,522

Tabela 13. Umidade inicial (% base peso) do solo por ocasião do estudo do bulbo molhado: Cambissolo Háplico

Profundidade (cm)	Umidade Inicial ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)
0-20	0,0681
20-40	0,1358
40-60	0,1592
60-80	0,1598
Média	0,1307

Tabela 14. Parâmetros da equação de retenção de água no solo, usando o modelo de van Genuchten, onde se realizou o estudo de bulbo molhado sob irrigação por gotejamento superficial: Cambissolo Háplico

Horizonte/Camada	Parâmetros					
	θ_r ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	θ_s ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	α	n	m	K_s (cm h^{-1})
A _p (0-25)	-0,014	0,380	0,141	1,125	0,111	6,649*
B ₁ (25-45)	0,151	0,399	0,047	1,363	0,266	-
B ₂ (45-68)	0,158	0,375	0,022	1,492	0,330	-
B ₃ (68-90)	0,180	0,447	0,021	1,541	0,351	-

(*) metodologia do charco

Tabela 15. Textura do solo onde se realizou o estudo de bulbo molhado gerado por irrigação por gotejamento superficial: Latossolo Vermelho

Horizonte/Camada	Fração Granulométrica (g kg ⁻¹)			Classe Textural
	Argila	Silte	Areia	
A _p (0-46)	95	26	879	Areia franca
B ₁ (46-75)	287	77	636	Franco-argilo-arenosa
B ₂ (75-98+)	270	86	644	Franco-argilo-arenosa

Tabela 16. Densidades do solo e de partícula e porosidade total do solo onde se realizou o estudo de bulbo molhado sob irrigação por gotejamento superficial: Latossolo Vermelho

Horizonte/Camada	Densidade (Mg m ³)		Porosidade Total
	Solo	Partícula	
A _p (0-46)	1,69	2,65	0,360
B ₁ (46-75)	1,61	2,64	0,390
B ₂ (75-98+)	1,56	2,57	0,392

Tabela 17. Umidade inicial (% base peso) do solo por ocasião do estudo do bulbo molhado: Latossolo Vermelho

Profundidade (cm)	Umidade Inicial (m ³ m ⁻³)
0-22	0,0035
22-55	0,0246
55-78	0,0634
78-92	0,0596
Média	0,0378

Tabela 18. Parâmetros da equação de retenção de água no solo, usando o modelo de van Genuchten, onde se realizou o estudo de bulbo molhado sob irrigação por gotejamento superficial: Latossolo Vermelho

Horizonte/Camada	Parâmetros					
	θ_r (m ³ m ⁻³)	θ_s (m ³ m ⁻³)	α	n	m	K _s (cm h ⁻¹)
0 -10	0,064	0,355	0,090	1,543	0,352	10,897*
10-30	0,060	0,366	0,096	1,675	0,403	-
30-50	0,094	0,392	0,082	1,613	0,380	-

(*) metodologia do charco

Tabela 19. Função K(ψ), em mm dia⁻¹, em diferentes profundidades, para ψ_m , em cm.c.a.: Latossolo Vermelho

Prof. (cm)	Modelo	R ²
37,5	$K(\psi) = 3,72 \cdot 10^{11} \cdot \psi^{-5,97}$	1,000
52,5	$K(\psi) = 2,07 \cdot 10^{11} \cdot \psi^{-5,89}$	0,999

Tabela 20. Textura do solo onde se realizou o estudo de bulbo molhado sob irrigação por gotejamento superficial: Neossolo Quartzarênico

Horizonte/Camada	Fração Granulométrica (g kg ⁻¹)			Classe Textural
	Argila	Silte	Areia	
A _p (0-20)	21	72	907	Areia
C ₁ (20-47)	36	84	880	Areia franca
C ₂ (47-75+)	63	108	830	Areia franca

Tabela 21. Densidades do solo e de partícula e porosidade total do solo onde se realizou o estudo de bulbo molhado sob irrigação por gotejamento superficial: Neossolo Quartzarênico

Horizonte/Camada	Densidade (Mg m ³)		Porosidade Total
	Solo	Partícula	
A _p (0-20)	1,65	2,52	0,345
C ₁ (20-47)	1,67	2,57	0,350
C ₂ (47-75+)	1,72	2,55	0,324

Tabela 22. Umidade inicial (% base peso) do solo por ocasião do estudo do bulbo molhado: Neossolo Quartzarênico

Profundidade (cm)	Umidade Inicial (m ³ m ⁻³)
0-20	0,0029
20-40	0,0047
40-60	0,0107
60-80	0,0183
Média	0,0091

Tabela 23. Parâmetros da equação de retenção de água no solo, usando o modelo de van Genuchten, onde se realizou o estudo de bulbo molhado sob irrigação por gotejamento superficial: Neossolo Quartzarênico

Horizonte/Camada	Parâmetros					
	θ_r (m ³ m ⁻³)	θ_s (m ³ m ⁻³)	α	n	m	K _s (cm h ⁻¹)
A _p (0-17)	0,025	0,345	0,0702	2,0795	0,5191	8,4132*
C ₁ (17-47)	0,022	0,350	0,0635	2,2674	0,5590	-
C ₂ (47-72+)	0,028	0,324	0,0992	1,7060	0,4138	-

(*) metodologia do charco

Tabela 24. Textura do solo onde se realizou o estudo de bulbo molhado gerado por irrigação por gotejamento superficial: Neossolo Flúvico

Horizonte/Camada	Fração Granulométrica (g kg ⁻¹)			Classe Textural
	Argila	Silte	Areia	
(0-40)	195	440	365	Franco-argilosa
(40-60+)	70	200	730	Franco-arenosa

Tabela 25. Densidades do solo e da partícula e porosidade total do solo onde se realizou o estudo de bulbo molhado sob irrigação por gotejamento superficial: Neossolo Flúvico

Horizonte/Camada	Densidade (Mg m ³)		Porosidade Total
	Solo	Partícula	
(0-20)	1,39	2,60	0,465
(20-40)	1,39	2,78	0,520
(40-60)	1,41	2,88	0,510
(60-80)	1,41	2,94	0,520

Tabela 26. Umidade inicial (% base peso) do solo por ocasião do estudo do bulbo molhado: Neossolo Flúvico

Profundidade (cm)	Umidade Inicial (m ³ m ⁻³)
0-10	0,0154
10-20	0,0195
20-30	0,0211
Média	0,0187

Tabela 27. Parâmetros da equação de retenção de água no solo, usando o modelo de van Genuchten, onde se realizou o estudo de bulbo molhado sob irrigação por gotejamento superficial: Neossolo Flúvico

Horizonte/Camada	Parâmetros				
	θ_r (m ³ m ⁻³)	θ_s (m ³ m ⁻³)	α	n	m
0-20	0,248	0,465	0,008	2,214	0,548
20-40	0,218	0,500	0,018	1,873	0,466
40-60	0,224	0,510	0,021	1,851	0,460
60-80	0,213	0,520	0,029	1,741	0,426

4.3 Sistema de irrigação

Para determinar com maior exatidão o tamanho do bulbo molhado (diâmetro da área molhada e profundidade) foi desenvolvido um sistema de irrigação portátil, onde foram dispostos oito emissores por linha, distribuídos aleatoriamente na parcela, ao longo de uma tubulação de polietileno de 16 mm de diâmetro, abastecida por dois depósitos de água, sendo um de 1000 L e outro com 500 L. Para regular a vazão e a pressão, foram utilizados reservatórios reguladores, conectados aos primeiros, que mantinham um nível constante através de um sistema de bóia, sendo sua haste alterada de forma que sua carga hidráulica se mantivesse estável (Figura 1).

As diferentes vazões foram obtidas pelos diferentes comprimentos dos microtubos inseridos na tubulação de polietileno. Estes, juntamente com a carga hidráulica constante,

geraram diferentes vazões (1, 2, 4 e 8 L h⁻¹) nas saídas dos mesmos, que eram fechados quando concluído cada tempo de irrigação. O espaçamento entre os emissores foi para que não houvesse sobreposição, ou seja, interferência dos emissores laterais.

4.4 Delineamento experimental

Os experimentos foram instalados em delineamento em blocos inteiramente casualizados, no esquema de parcela subdividida, com três repetições, cujos tratamentos foram compostos pelos fatores tempo de aplicação de água e vazão do emissor, sendo o tempo, a parcela e a vazão, a subparcela (Figura 1), de acordo com Steel et al. (1997). As repetições constaram de duas linhas de irrigação com quatro diferentes tempos (1, 2, 4 e 7 h) e, dentro de cada tempo, as vazões de 1, 2, 4 e 8 L h⁻¹ obtidas por microtubos de tamanhos diferenciados que proporcionam as vazões desejadas sob as mesmas condições de carga hidráulica.

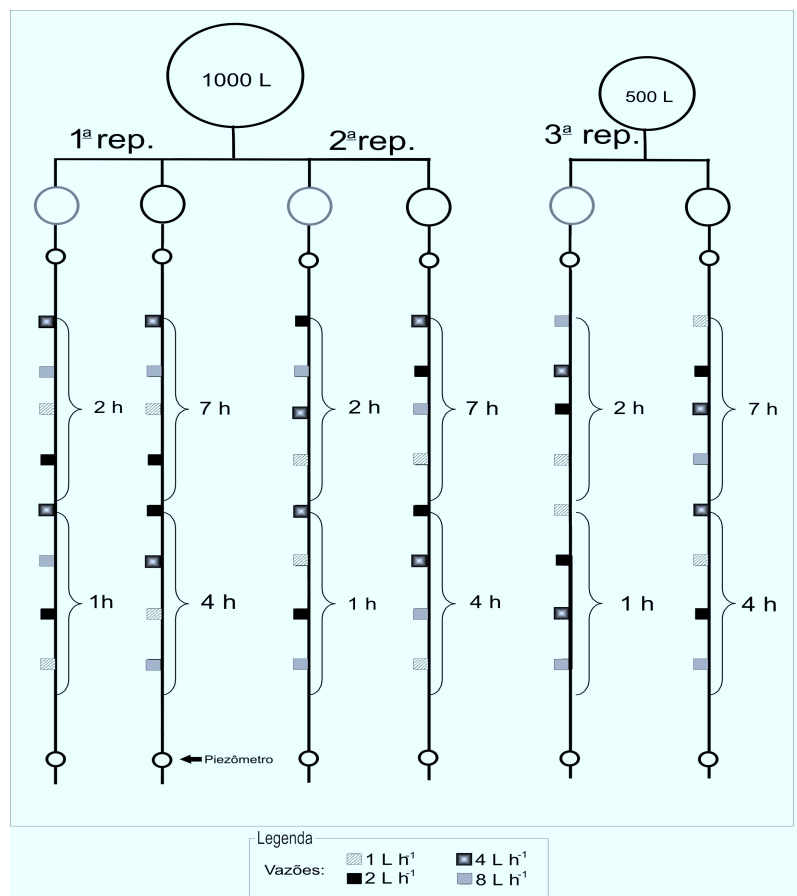


Figura 1. Detalhes da área experimental, identificando cada parcela e bloco e a distribuição dos tratamentos nas parcelas dentro de cada bloco

4.5 Características avaliadas

Para cada vazão, após os tempos pré-determinados de 1, 2, 4 e 7 h, foram abertas trincheiras no centro do bulbo molhado, abaixo do emissor, onde se realizou as medições das dimensões do bulbo com fita métrica com precisão de 1,0 mm. Para avaliar o efeito da vazão do emissor e do tempo de aplicação de água na formação do bulbo molhado avaliaram-se as seguintes características: diâmetro superficial (D_s), diâmetro máximo (D_{max}), profundidade máxima (Z_{max}) e profundidade onde ocorre D_{max} ($Z_{D_{max}}$), Figura 2. Além dessas medidas foram medidos os diâmetros a cada 5 ou 10 cm de profundidade para avaliação do formato do bulbo molhado.

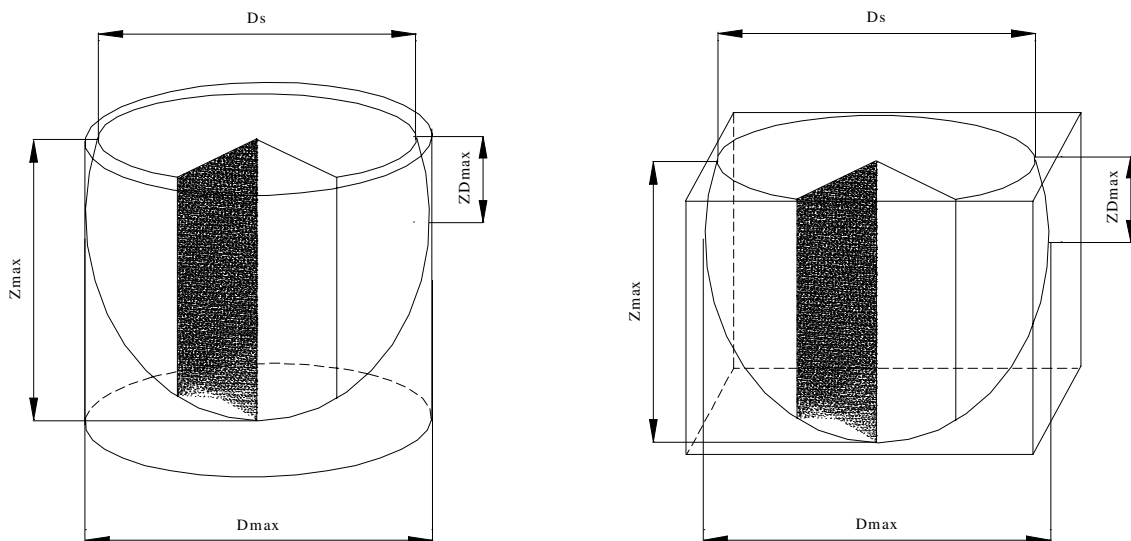


Figura 2. Dimensões avaliadas do bulbo molhado circunscrito em cilindro e poliedro retangular

4.6 Determinação da condutividade hidráulica do solo

4.6.1 Metodologia do perfil instantâneo

Para determinar a condutividade hidráulica do solo em função do potencial matricial do solo ($K(\psi_m)$) foram instalados perfis instantâneos em três dos solos estudados. Em cada área foram utilizadas duas bacias de saturação, de aproximadamente 9 m², com duas baterias de tensiômetros em cada uma, de quatro tensiômetros (15, 30, 45 e 60 cm de

profundidade). Os dados de umidade do solo foram determinados pelo método gravimétrico e os testes foram realizados durante 15 dias, em cada área, seguindo metodologia proposta por Libardi (2000).

4.6.2 Metodologia do charco

Esta metodologia é baseada na premissa que sob a aplicação de água a uma taxa constante em um ponto na superfície do solo, um charco (ou disco molhado) é criado. O charco é uma zona saturada localizada abaixo do emissor, em forma de círculo na superfície do solo, e aumenta com o tempo de aplicação de água, até permanecer constante, assumindo-se nesse ponto a condição de equilíbrio dinâmico.

Para estimar o K_s pelo charco foi montado um experimento em cada solo em delineamento experimental em blocos inteiramente casualizados, com seis repetições, cujos tratamentos foram as vazões dos emissores (Figura 3). As vazões utilizadas foram de 1, 2, 4 e 8 $L.h^{-1}$ também obtidas por microtubos de tamanhos diferenciados que proporcionam as vazões desejadas sob as mesmas condições de carga hidráulica. As medições do diâmetro do charco foram realizadas a cada 15 minutos até o mesmo permanecer constante.

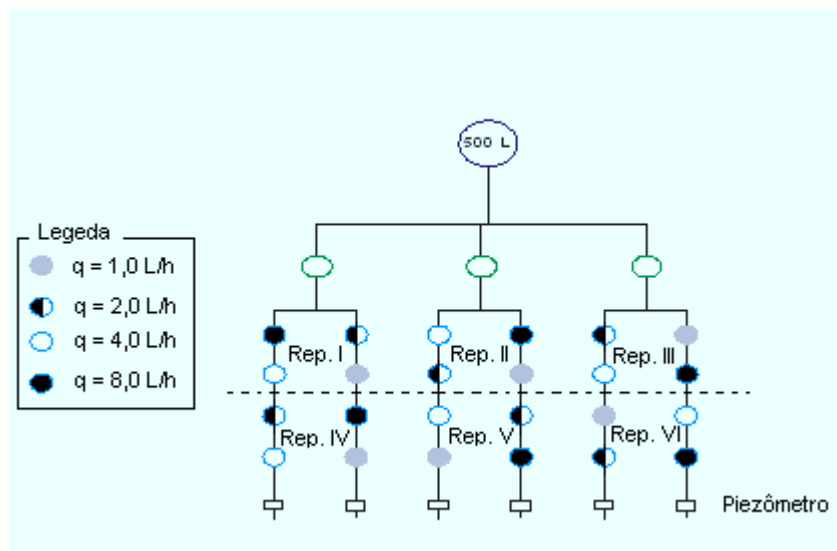


Figura 3. Detalhes da área experimental, identificando cada parcela e bloco e a distribuição dos tratamentos nos blocos para determinação da condutividade hidráulica saturada pela metodologia do charco

Para determinação da condutividade hidráulica saturada (K_s), utilizou-se a metodologia proposta por Shani et al. (1987) que se baseia no modelo proposto por Wooding (1968).

$$q = K_s + \frac{4}{\pi} \frac{1}{r} F \quad (1)$$

em que:

q = fluxo de água ($L T^{-1}$);

r = raio da zona saturada do solo (L);

K_s = condutividade hidráulica saturada do solo ($L T^{-1}$);

F = potencial de fluxo matricial definido com $F = \int_{h_0}^h K(h) dh = \int_{\theta_0}^{\theta} D(\theta) d\theta$ em que $D(\theta)$ é a

difusividade da água no solo, h a tensão da água no solo, $K(h)$ condutividade hidráulica em função da tensão da água do solo com $K(h) = K_s e^{\alpha h}$ com α sendo uma característica do solo e θ a umidade do solo.

Para a condição de saturação $F = \frac{K_s}{\alpha}$. Assim, $q = K_s + \frac{4K_s}{\pi\alpha} \frac{1}{r}$ e assumindo

$K_s = a$ e $\frac{4K_s}{\pi\alpha} = b$, tem-se que $q = a + b \frac{1}{r}$. Ajustando-se os valores de q em função de $1/r$ ao modelo linear, $q = a + b \frac{1}{r}$, o intercepto será igual ao K_s . O valor de α será calculado

igualando o coeficiente angular da reta (b) a $\frac{4K_s}{\pi\alpha}$ em que $\alpha = \frac{4K_s}{\pi b}$.

4.6.3 Condutividade hidráulica obtida pela equação de Schwartzman e Zur (1986)

Sendo a equação proposta por Schwartzman e Zur (1986) igual a $d = 1,32 \cdot z^{0,35} \cdot q^{0,33} \cdot K_s^{-0,33}$, tendo-se os valores de d (diâmetro máximo), z (profundidade máxima) e q (vazão do emissor), determinou-se a condutividade hidráulica no solo pela equação:

$$K_s = \left(\frac{D_{\max}}{1,32 \cdot Z_{\max}^{0,35} \cdot q^{0,33}} \right)^{\frac{-1}{0,33}} \quad (2)$$

4.7 Capacidade de campo (CC) e ponto de murcha permanente (PMP)

Para obtenção da capacidade de campo e ponto de murcha permanente, foram feitas as curvas de retenção de água para cada solo com amostras não deformadas, através do método da câmara de pressão de Richards para $\psi_m < -10$ kPa e em mesa de tensão para os potenciais maiores, e ajustadas utilizando-se o modelo proposto por van Genuchten (1980) que é dada por:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha h)^n]^m} \quad (3)$$

em que:

θ = umidade do solo ($L^3.L^{-3}$);

θ_s = umidade de saturação do solo ($L^3.L^{-3}$);

θ_r = umidade residual do solo ($L^3.L^{-3}$);

h = tensão de água no solo (cm.c.a.);

α , n , m = parâmetros estimados do modelo

A capacidade de campo foi determinada como sendo a umidade do solo referente ao potencial de água onde se observa o ponto de inflexão da curva de retenção de água da equação proposta por van Genuchten (1980). O ponto de inflexão da curva foi obtido pela igualdade da derivada de segunda ordem da curva de retenção de água a zero. Com a tensão correspondente ao ponto de inflexão, se obteve a umidade do solo na capacidade de campo (θ_{cc}). A tensão referente ao ponto de inflexão foi calculada pela equação:

$$h_{cc} = \left[\frac{n-1}{\alpha^n (mn+1)} \right]^{1/n} \quad (4)$$

com $m = 1 - \frac{1}{n}$, tem-se:

$$h_{cc} = \frac{m^{1/n}}{\alpha} \quad (5)$$

Substituindo a tensão referente ao ponto de inflexão na curva de retenção de água (equação 3), a capacidade de campo foi obtida pela equação:

$$\theta_{cc} = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{(m+1)^m} \quad (6)$$

O ponto de murcha permanente foi obtido pela umidade do solo na tensão de 15.000 cm.c.a.

4.8 Análises físicas do solo

A análise granulométrica foi realizada pelo método da pipeta e a densidade de partícula pelo método do balão volumétrico seguindo metodologia da Embrapa (1997). A densidade do solo foi obtida pelo método do anel volumétrico, utilizando-se anéis de 50 cm³. Todas as análises foram realizadas no Laboratório de Irrigação e Salinidade - LIS da Escola Superior de Agricultura de Mossoró-ESAM.

4.9 Estimativas das dimensões do bulbo molhado

4.9.1 Diâmetro molhado em função da profundidade molhada

A partir dos dados do diâmetro molhado obtidos para cada profundidade, assumido como variável dependente o diâmetro do bulbo (D) e como variável independente a profundidade (Z), de acordo como Maia et al. (2003a) e Maia et al. (2003b), ajustou-se o modelo quadrático $D(Z) = a + bZ + cZ^2$ onde foi possível obter as estimativas de D_s , $Z_{D_{max}}$ e D_{max} pelas equações:

$$D_s = a \quad (7)$$

$$Z_{D_{max}} = \frac{b}{-2c} \quad (8)$$

$$D_{max} = c - \frac{b^2}{4c} \quad (9)$$

4.9.2 Dimensões do bulbo molhado em função de q e t

Para avaliar as dimensões do bulbo molhado em função de q e t foram realizadas análise de regressão para avaliar o comportamento do bulbo e o melhor modelo que se ajustou aos dados foi utilizado no modelo de superfície de resposta.

4.9.3 Dimensões do bulbo molhado em função do volume de água aplicado

Também foram avaliadas as dimensões (D_{max} , Z_{max} , D_s e Z_{Dmax}) do bulbo molhado em função do volume de água aplicado usando o modelo potencial e de superfície de resposta.

4.9.4 Dimensões do bulbo molhado em função de D_s

As dimensões do bulbo molhado (D_{max} , Z_{max} e Z_{Dmax}) também foram avaliadas em função das medidas do diâmetro superficial (D_s)

4.9.5 Relação D_{max}/Z_{max} em função de q e t

A relação D_{max}/Z_{max} foi avaliada em função da vazão do emissor e tempo de aplicação de água usando modelo de superfície de resposta. Também se avaliou a relação $D_{max}/Z_{max}^{1/3}$, levando-se em consideração a relação no modelo de Zur (1996) e que esta tem relação com a área do centro do bulbo, onde se obtém D_{max} e Z_{max} .

4.9.6 Modelo proposto para estimativa de D_{max} em função de D_s e V_{ap} – Modelo 1

Para D (m), Z (m), q ($m^3 h^{-1}$) e K_s ($m h^{-1}$) e, sendo $D \propto Z$, $D \propto q$, $D \propto \frac{1}{K_s}$,

implicando em $D = \alpha_1 Z$, $D = \alpha_2 q$, $D = \frac{\alpha_3}{K_s}$. Pode-se afirmar que $D = \alpha_1 Z \cdot \alpha_2 q \cdot \frac{\alpha_3}{K_s}$, com

o produto de $\alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 = \alpha$, tem-se $D = \alpha \cdot Z \cdot q \cdot \frac{1}{K_s}$. Analisando as unidades desta

equação, o lado direito da equação será em m^3 , assim, para a igualdade, deve-se elevar o lado

esquerdo ao cubo, assim: $D^3 = \alpha \cdot Z \cdot q \cdot \frac{1}{K_s}$. Isso implica que

$D = \left(\alpha \cdot Z \cdot q \cdot \frac{1}{K_s} \right)^{1/3}$ resultando em $D = \alpha^{1/3} \cdot Z^{1/3} \cdot q^{1/3} \cdot \left(\frac{1}{K_s} \right)^{1/3}$, sendo $\beta = \alpha^{1/3}$, tem-se:

$$D = \beta \cdot Z^{1/3} \cdot \left(\frac{q}{K_s} \right)^{1/3} \quad (10)$$

Esta equação é semelhante a obtida por Schwartzman e Zur (1986) que obtiveram os valores de $\beta = 1,32$ e $Z^{0,35}$, porém, Zur (1996) assume o valor de $Z^{1/3}$.

Por dedução, utilizou-se a aproximação do valor da relação entre β e $\frac{D_s}{D_{\max}}$ como sendo igual a:

$$\beta = \left[\left(\frac{D_s}{D_{\max}} \right)^{1/6} \cdot 6 \right]^{1/6} \quad (11)$$

Para a dedução de D_{\max} , sendo $D = \alpha^{1/3} \cdot Z^{1/3} \cdot q^{1/3} \cdot K_s^{-1/3}$ e $\alpha^{1/3} = \beta^3$, tem-se $D = \beta^3 \cdot Z^{1/3} \cdot q^{1/3} \cdot K_s^{-1/3}$. Sendo também $Z/K_s = t$ e $t \cdot q = V_{ap}$, com V_{ap} sendo o volume de água aplicado, tem-se $D = \beta^3 \cdot V_{ap}^{1/3}$, que substituindo β da equação 11, obtém-se:

$$D_{\max} = \left(6 \cdot D_s^{1/6} \cdot V_{ap}^{2/3} \right)^{6/13} \quad (12)$$

4.9.7 Modelo proposto para estimativa de D_{\max} em função de Z_{\max} e V_{ap} – Modelo 2

Sendo $Z_{\max} \propto q, t, \frac{1}{A_c}$ e $D_{\max} \propto q, t, A_c$ sendo A_c a área do charco e igual $A_c = \pi r_c^2$, para a igualdade, $Z_{\max} = \alpha_1 \cdot q \cdot t \cdot \frac{1}{A_c}$ e $D_{\max} = \alpha_2 \cdot q \cdot t \cdot A_c$ que, analisando as unidades da segunda equação e, considerando α adimensional, $D_{\max}^5 = \alpha_2 \cdot q \cdot t \cdot A_c$. Igualando A_c das duas equações e, para $\beta = 45,70$ ou $\beta = 2,88$ para q em $L \cdot h^{-1}$ e $cm^3 \cdot h^{-1}$, respectivamente, tem-se :

$$D_{\max} = \frac{\beta \cdot (t \cdot q)^{2/5}}{Z_{\max}^{1/5}} \quad (13)$$

Sendo $V_{ap} = t \cdot q$, tem-se:

$$D_{\max} = \frac{\beta \cdot (V_{ap})^{2/5}}{Z_{\max}^{1/5}} \quad (14)$$

4.10 Estimativa do volume molhado

O volume do bulbo molhado foi estimado por quatro metodologias: volume da elipse truncada (Zur, 1996), revolução do modelo quadrático (RMQ), modelo proposto por Narda & Chawla (2002) e pela correção do volume do cilindro (CVC).

4.10.1 Volume molhado pelo método do volume da elipse truncada (Zur, 1996)

O volume do bulbo molhado foi estimado pela equação 15 proposta por Zur (1996):

$$V = \frac{\pi}{12} D_{\max}^2 \left[2Z_{\max} + Z_{D_{\max}} - \frac{Z_{D_{\max}}^3}{(Z_{\max} - Z_{D_{\max}})^2} \right] \quad (15)$$

ou por

$$V = \frac{\pi D_{\max}^2 (2Z_{\max} - 3Z_{D_{\max}})}{12} \left(\frac{Z_{\max}}{Z_{\max} - Z_{D_{\max}}} \right)^2 \quad (16)$$

4.10.2 Modelo proposto para volume molhado usando o modelo quadrático – Modelo 3

Sendo $D(Z) = a + bZ + cZ^2$, o volume do bulbo molhado pode ser estimado pela revolução do modelo quadrático de acordo com a equação:

$$V = \frac{\pi}{4} \int_0^{Z_{\max}} [D(Z)]^2 dz \quad (17)$$

ou

$$V = \frac{\pi}{4} \left(a^2 Z + abZ^2 + \frac{2acZ^3}{3} + \frac{b^2 Z^3}{3} + \frac{bcZ^4}{2} + \frac{c^2 Z^5}{5} \right) \quad (18)$$

4.10.3 Volume molhado pelo volume elipsoidal (Narda & Chawla, 2002)

Segundo Narda & Chawla (2002) o volume da forma elipsoidal é obtido pela equação:

$$V = \frac{4}{3} \pi r^2 z \quad (19)$$

Substituindo o raio pelo diâmetro, tem-se

$$V = \frac{\pi}{3} D^2 \cdot Z \quad (20)$$

4.10.4 Modelo proposto para o volume molhado usando o fator de correção do volume do cilindro – Modelo 4

Sendo o bulbo molhado circunscrito em um cilindro (Figura 2) de área superficial e altura iguais a $\frac{\pi \cdot D_{\max}^2}{4}$ e Z_{\max} , respectivamente, e o volume do cilindro sendo igual a $V_c = \frac{\pi \cdot D_{\max}^2}{4} Z_{\max}$, o volume do bulbo molhado é obtido fazendo a correção utilizando como fator de correção o f_c dado por:

$$f_c = \left[\left(\frac{D_s}{D_{\max}} \right)^{1/6} \cdot 6 \right]^{1/6} \quad (21)$$

Assim, o volume do bulbo molhado pode ser determinado por:

$$V = \frac{\pi \cdot D_{\max}^2}{4} \frac{Z_{\max}}{f_c} \quad (22)$$

4.11 Relação entre o volume molhado e as dimensões do bulbo

O volume molhado foi avaliado em função do diâmetro superficial (D_s) e da relação $D_{\max}/Z_{\max}^{1/3}$, como também do volume de água aplicado.

4.12 Porcentagem de área molhada

A porcentagem de área molhada (PAM) foi calculada segundo Dandy & Hassanli (1996) de acordo com a equação:

$$PAM = 100 \frac{\pi \cdot D_{max}^2}{4 \cdot E_L \cdot E_E} \quad (23)$$

em que:

D_{max} – diâmetro máximo (m);

E_L – espaçamento entre laterias (m);

E_E – espaçamento entre emissores (m);

4.13 Porcentagem de volume molhado

A porcentagem de volume molhado (PVM) foi calculada por:

$$PVM = 100 \frac{V_{SM}}{Z_{max} \cdot E_E \cdot E_L} \quad (24)$$

em que:

V_{SM} – volume de solo molhado por um gotejador (m³)

4.14 Análise estatística

Os modelos foram avaliados pelo valor estimado em função do observado utilizando a metodologia proposta por Gauch et al. (2003). Esta metodologia propõe a decomposição do quadrado médio dos desvios (MSD) em três componentes: quadrado da bias (SB), declividade não unitária (NU) e falta de correlação (LC), pelas equações 25, 26, 27, 28 e 29. Também foi calculada a raiz quadrada do MSD (RMSD).

$$MSD = \frac{\sum (X_n - Y_n)^2}{N} \quad (25)$$

$$SB = (\bar{X} - \bar{Y})^2 \quad (26)$$

$$NU = (1-b)^2 \cdot \left(\frac{\sum (X_n - \bar{X})^2}{N} \right) \quad (27)$$

$$LC = (1-r^2) \cdot \left(\frac{\sum (Y_n - \bar{Y})^2}{N} \right) \quad (28)$$

$$MSD = SB + NU + LC \quad (29)$$

em que:

X, \bar{X} – valores observados e médios, respectivamente,

Y, \bar{Y} – valores estimados e médios, respectivamente,

N – número de pares do modelo,

r – coeficiente de correlação.

Para as análises de regressão utilizou-se o software SAEG desenvolvido pela Universidade Federal de Viçosa. Os valores do teste t dos coeficientes foram corrigidos pelo Quadrado Médio do Resíduo da análise de variância e foram utilizados apenas os modelos cujos coeficientes foram significativos a pelo menos 5% de probabilidade,. Para análise de comparação de modelos, desenvolveu-se um software em linguagem Clipper 5.2, PAM – Programa Para Análise de Modelo, Figura 4.

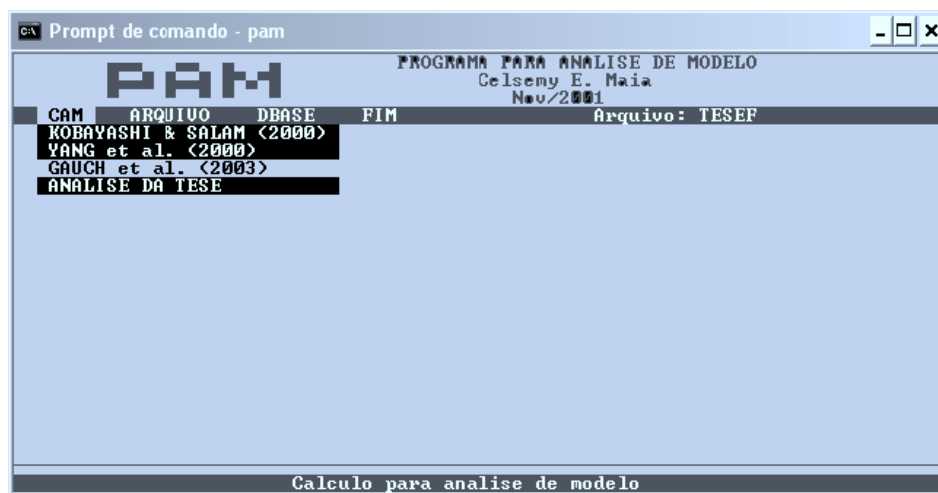


Figura 4. Tela do PAM – Programa para Análise de Modelo

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Dimensões do bulbo molhado

Considerando que as dimensões do bulbo molhado são influenciadas pela vazão do emissor (q) e pelo tempo de aplicação de água (t), ajustou-se o modelo potencial ($y = a \cdot x^b$) e de superfície de resposta para diâmetro máximo (D_{max}), profundidade máxima (Z_{max}), diâmetro superficial (D_s) e profundidade onde ocorre D_{max} (Z_{Dmax}) em função de q e t para cada solo estudado usando as médias das três repetições.

5.1.1 Dimensões do bulbo molhado em função da vazão do emissor (q) e do tempo de aplicação de água (t)

5.1.1.1 Modelo potencial

Para D_{max} , Z_{max} , D_s e Z_{Dmax} em função da vazão do emissor (q), o modelo potencial se ajustou bem aos dados como, se pode observar pelos elevados valores dos coeficientes de determinação (R^2), com exceção para o Neossolo Flúvico que, apesar de se observar os mais baixos valores de R^2 para algumas medições, ainda não se verificou ajuste para algumas delas, principalmente Z_{Dmax} (Tabelas 28, 29, 30 e 31). A mesma falta de ajuste para este solo também foi verificada quando se avaliou as dimensões do bulbo em função do tempo de aplicação de água (t) (Tabelas 32, 33, 34 e 35). A explicação para o baixo ajuste neste solo provavelmente se deva a alta heterogeneidade deste. Segundo Resende et al. (1995), estes solos são provenientes de depósitos aluviais, sendo muito variável a pequenas distâncias, tanto na horizontal, como na vertical.

Outra característica observada nas Tabelas 28 a 35, foi o aumento do coeficiente a do modelo potencial, $y = a \cdot x^b$, tanto para o aumento da vazão do emissor para um mesmo tempo de aplicação de água, como também para o tempo de aplicação de água para cada

vazão testada. Isso implica que as dimensões do bulbo molhado para vazão de 1,0 L h⁻¹, aumentam com o tempo de irrigação, como também, que as dimensões do bulbo molhado para o tempo de 1,0 h aumentam com o aumento da vazão do emissor.

Tabela 28. Diâmetro máximo molhado (D_{max} , cm) em função da vazão do emissor (L h⁻¹) para cada tempo de aplicação de água (h) em cada solo estudado

Solo	Tempo (h)	Equação	R ²
Luvissolo Crômico	1	$D_{max} = 26,05 \cdot q^{0,3102}$	0,9844
	2	$D_{max} = 32,11 \cdot q^{0,3022}$	0,9956
	4	$D_{max} = 37,31 \cdot q^{0,3407}$	0,9991
	7	$D_{max} = 42,66 \cdot q^{0,3747}$	0,9954
Argissolo Vermelho-Amarelo	1	$D_{max} = 25,95 \cdot q^{0,2852}$	0,9771
	2	$D_{max} = 31,27 \cdot q^{0,3285}$	0,9959
	4	$D_{max} = 40,00 \cdot q^{0,2958}$	0,9235
	7	$D_{max} = 43,92 \cdot q^{0,3583}$	0,9721
Cambissolo Háplico	1	$D_{max} = 24,07 \cdot q^{0,3223}$	0,9811
	2	$D_{max} = 30,81 \cdot q^{0,3685}$	0,9974
	4	$D_{max} = 40,07 \cdot q^{0,3136}$	0,9662
	7	$D_{max} = 46,69 \cdot q^{0,3535}$	0,9925
Neossolo Quartzarênico	1	$D_{max} = 27,21 \cdot q^{0,2687}$	0,9655
	2	$D_{max} = 32,19 \cdot q^{0,3033}$	0,9627
	4	$D_{max} = 38,47 \cdot q^{0,3317}$	0,9929
	7	$D_{max} = 44,67 \cdot q^{0,3862}$	0,9827
Latossolo Vermelho	1	$D_{max} = 21,96 \cdot q^{0,3707}$	0,9811
	2	$D_{max} = 26,16 \cdot q^{0,4097}$	0,9978
	4	$D_{max} = 36,07 \cdot q^{0,3545}$	0,9844
	7	$D_{max} = 45,07 \cdot q^{0,3219}$	0,9027
Neossolo Flúvico	1	-	-
	2	$D_{max} = 24,74 \cdot q^{0,4128}$	0,9774
	4	$D_{max} = 35,02 \cdot q^{0,4732}$	0,9427
	7	$D_{max} = 39,87 \cdot q^{0,4270}$	0,9909

Tabela 29. Profundidade máxima molhada (Z_{max} , cm) em função da vazão do emissor ($L h^{-1}$) para cada tempo de aplicação de água (h) nos solos estudados

Solo	Tempo (h)	Equação	R ²
Luvissolo Crômico	1	$Z_{max} = 15,42 \cdot q^{0,3322}$	0,9895
	2	$Z_{max} = 20,13 \cdot q^{0,3485}$	0,9765
	4	$Z_{max} = 26,10 \cdot q^{0,3193}$	0,9703
	7	$Z_{max} = 30,45 \cdot q^{0,4252}$	0,9747
Argissolo Vermelho-Amarelo	1	$Z_{max} = 18,13 \cdot q^{0,3585}$	0,8998
	2	$Z_{max} = 20,99 \cdot q^{0,4381}$	0,9820
	4	$Z_{max} = 29,84 \cdot q^{0,3960}$	0,9894
	7	$Z_{max} = 35,27 \cdot q^{0,4351}$	0,9817
Cambissolo Háplico	1	$Z_{max} = 14,60 \cdot q^{0,4136}$	0,9944
	2	$Z_{max} = 17,70 \cdot q^{0,4288}$	0,9855
	4	$Z_{max} = 21,43 \cdot q^{0,5464}$	0,9752
	7	$Z_{max} = 34,70 \cdot q^{0,3485}$	0,9288
Neossolo Quartzarênico	1	$Z_{max} = 14,56 \cdot q^{0,4472}$	0,9823
	2	$Z_{max} = 18,75 \cdot q^{0,4127}$	0,9154
	4	$Z_{max} = 27,10 \cdot q^{0,4184}$	0,9559
	7	$Z_{max} = 33,06 \cdot q^{0,4062}$	0,8836
Latossolo Vermelho	1	$Z_{max} = 15,54 \cdot q^{0,4330}$	0,9658
	2	$Z_{max} = 22,51 \cdot q^{0,3415}$	0,9855
	4	$Z_{max} = 25,24 \cdot q^{0,4314}$	0,9369
	7	$Z_{max} = 30,36 \cdot q^{0,5170}$	0,9957
Neossolo Flúvico	1	$Z_{max} = 8,50 \cdot q^{0,5211}$	0,8367
	2	$Z_{max} = 12,87 \cdot q^{0,1808}$	0,6740
	4	$Z_{max} = 17,10 \cdot q^{0,1314}$	0,6953
	7	$Z_{max} = 22,21 \cdot q^{0,1453}$	0,9914

Tabela 30. Diâmetro superficial molhado (D_s , cm) em função da vazão do emissor ($L h^{-1}$) para tempo de aplicação de água (h) nos solos estudados

Solo	Tempo (h)	Equação	R ²
Luvissolo Crômico	1	$D_s = 25,38 \cdot q^{0,2895}$	0,9956
	2	$D_s = 29,30 \cdot q^{0,2360}$	0,9877
	4	$D_s = 32,31 \cdot q^{0,2847}$	0,9957
	7	$D_s = 38,94 \cdot q^{0,2579}$	0,9914
Argissolo Vermelho-Amarelo	1	$D_s = 24,20 \cdot q^{0,2592}$	0,9896
	2	$D_s = 29,14 \cdot q^{0,2824}$	0,9988
	4	$D_s = 32,56 \cdot q^{0,2799}$	0,9919
	7	$D_s = 37,87 \cdot q^{0,2481}$	0,9893
Cambissolo Háplico	1	$D_s = 22,63 \cdot q^{0,3449}$	0,9648
	2	$D_s = 28,88 \cdot q^{0,3856}$	0,9935
	4	$D_s = 35,59 \cdot q^{0,3004}$	0,9555
	7	$D_s = 45,16 \cdot q^{0,2246}$	0,8425
Neossolo Quartzarênico	1	$D_s = 25,65 \cdot q^{0,2170}$	0,8923
	2	$D_s = 29,47 \cdot q^{0,2472}$	0,9972
	4	$D_s = 33,64 \cdot q^{0,2343}$	0,9401
	7	$D_s = 37,90 \cdot q^{0,2159}$	0,9767
Latosolo Vermelho	1	$D_s = 21,34 \cdot q^{0,2437}$	0,9718
	2	$D_s = 24,43 \cdot q^{0,2796}$	0,9217
	4	$D_s = 31,25 \cdot q^{0,1945}$	0,8290
	7	$D_s = 32,85 \cdot q^{0,2087}$	0,9289
Neossolo Flúvico	1	$D_s = 19,85 \cdot q^{0,4597}$	0,9742
	2	$D_s = 24,00 \cdot q^{0,4392}$	0,8989
	4	$D_s = 33,63 \cdot q^{0,4531}$	0,9361
	7	$D_s = 38,38 \cdot q^{0,4314}$	0,9987

Tabela 31. Profundidade onde ocorre D_{max} (Z_{Dmax} , cm) em função da vazão do emissor ($L h^{-1}$) para cada tempo de aplicação de água (h) nos solos estudados

Solo	Tempo (h)	Equação	R ²
Luvissolo Crômico	1	$Z_{Dmax} = 2,34 \cdot q^{0,6664}$	0,8570
	2	$Z_{Dmax} = 5,44 \cdot q^{0,5341}$	0,9696
	4	$Z_{Dmax} = 8,36 \cdot q^{0,4457}$	0,9927
	7	$Z_{Dmax} = 9,87 \cdot q^{0,5303}$	0,9052
Argissolo Vermelho-Amarelo	1	$Z_{Dmax} = 4,41 \cdot q^{0,5071}$	0,9385
	2	$Z_{Dmax} = 5,87 \cdot q^{0,5447}$	0,9626
	4	$Z_{Dmax} = 11,26 \cdot q^{0,3722}$	0,9477
	7	$Z_{Dmax} = 13,71 \cdot q^{0,4707}$	0,9736
Cambissolo Háplico	1	-	-
	2	$Z_{Dmax} = 3,99 \cdot q^{0,3197}$	0,7424
	4	$Z_{Dmax} = 6,86 \cdot q^{0,5175}$	0,9324
	7	$Z_{Dmax} = 8,19 \cdot q^{0,6054}$	0,9916
Neossolo Quartzarênico	1	$Z_{Dmax} = 2,96 \cdot q^{0,6355}$	0,8331
	2	$Z_{Dmax} = 4,53 \cdot q^{0,6710}$	0,9604
	4	$Z_{Dmax} = 7,90 \cdot q^{0,6055}$	0,9520
	7	$Z_{Dmax} = 11,79 \cdot q^{0,5862}$	0,9378
Latosolo Vermelho	1	$Z_{Dmax} = 3,81 \cdot q^{0,6767}$	0,9517
	2	$Z_{Dmax} = 7,63 \cdot q^{0,4637}$	0,9501
	4	$Z_{Dmax} = 10,58 \cdot q^{0,4815}$	0,9604
	7	$Z_{Dmax} = 14,88 \cdot q^{0,4311}$	0,9977
Neossolo Flúvico	1	-	-
	2	-	-
	4	-	-
	7	-	-

Tabela 32. Diâmetro máximo molhado (D_{max} , cm) em função do tempo de aplicação de água (h) para cada solo e vazão do emissor (q) nos solos estudados

Solo	Vazão(L h ⁻¹)	Equação	R ²
Luvissolo Crômico	1	$D_{max} = 25,72 \cdot t^{0,2623}$	0,9907
	2	$D_{max} = 33,82 \cdot t^{0,2481}$	0,9950
	4	$D_{max} = 39,73 \cdot t^{0,3134}$	0,9983
	8	$D_{max} = 48,39 \cdot t^{0,3213}$	0,9975
Argissolo Vermelho-Amarelo	1	$D_{max} = 25,38 \cdot t^{0,3105}$	0,9984
	2	$D_{max} = 31,43 \cdot t^{0,3149}$	0,9941
	4	$D_{max} = 40,09 \cdot t^{0,3727}$	0,9971
	8	$D_{max} = 45,64 \cdot t^{0,3551}$	0,9711
Cambissolo Háplico	1	$D_{max} = 23,62 \cdot t^{0,3437}$	0,9973
	2	$D_{max} = 31,12 \cdot t^{0,3582}$	0,9992
	4	$D_{max} = 40,13 \cdot t^{0,3412}$	0,9917
	8	$D_{max} = 46,95 \cdot t^{0,3618}$	0,9633
Neossolo Quartzarênico	1	$D_{max} = 26,02 \cdot t^{0,2594}$	0,9984
	2	$D_{max} = 34,17 \cdot t^{0,2845}$	0,9875
	4	$D_{max} = 40,10 \cdot t^{0,3420}$	0,9939
	8	$D_{max} = 45,44 \cdot t^{0,3737}$	0,9944
Latossolo Vermelho	1	$D_{max} = 21,01 \cdot t^{0,3531}$	0,9920
	2	$D_{max} = 28,05 \cdot t^{0,3848}$	0,9964
	4	$D_{max} = 37,58 \cdot t^{0,3588}$	0,9801
	8	$D_{max} = 47,40 \cdot t^{0,2923}$	0,9649
Neossolo Flúvico	1	$D_{max} = 21,49 \cdot t^{0,3618}$	0,9605
	2	$D_{max} = 26,26 \cdot t^{0,3893}$	0,9393
	4	$D_{max} = 38,52 \cdot t^{0,3921}$	0,9092
	8	$D_{max} = 10,09 \cdot t^{1,3697}$	0,7796

Tabela 33. Profundidade máxima molhada (Z_{max} , cm) em função do tempo de aplicação de água (h) para cada vazão do emissor (q) nos solos estudados

Solo	Vazão(L h ⁻¹)	Equação	R ²
Luvissolo Crômico	1	$Z_{max} = 15,26 \cdot t^{0,3533}$	0,9959
	2	$Z_{max} = 19,91 \cdot t^{0,3714}$	0,9867
	4	$Z_{max} = 24,97 \cdot t^{0,4190}$	0,9542
	8	$Z_{max} = 29,64 \cdot t^{0,4210}$	0,9857
Argissolo Vermelho-Amarelo	1	$Z_{max} = 18,49 \cdot t^{0,3180}$	0,8834
	2	$Z_{max} = 20,70 \cdot t^{0,4665}$	0,9909
	4	$Z_{max} = 30,48 \cdot t^{0,3497}$	0,9953
	8	$Z_{max} = 38,92 \cdot t^{0,4231}$	0,9927
Cambissolo Háptico	1	$Z_{max} = 13,80 \cdot t^{0,3869}$	0,8793
	2	$Z_{max} = 19,15 \cdot t^{0,4291}$	0,9814
	4	$Z_{max} = 23,46 \cdot t^{0,4839}$	0,9717
	8	$Z_{max} = 35,78 \cdot t^{0,3520}$	0,9368
Neossolo Quartzarênico	1	$Z_{max} = 14,41 \cdot t^{0,4175}$	0,9829
	2	$Z_{max} = 18,72 \cdot t^{0,4185}$	0,9708
	4	$Z_{max} = 28,43 \cdot t^{0,4625}$	0,9999
	8	$Z_{max} = 34,60 \cdot t^{0,3611}$	0,9443
Latossolo Vermelho	1	$Z_{max} = 15,47 \cdot t^{0,3553}$	0,9427
	2	$Z_{max} = 23,24 \cdot t^{0,3405}$	0,9979
	4	$Z_{max} = 27,80 \cdot t^{0,3491}$	0,9142
	8	$Z_{max} = 35,09 \cdot t^{0,4680}$	0,9880
Neossolo Flúvico	1	$Z_{max} = 8,85 \cdot t^{0,4529}$	0,9943
	2	$Z_{max} = 13,15 \cdot t^{0,3246}$	0,9903
	4	$Z_{max} = 12,41 \cdot t^{0,3937}$	0,9709
	8	-	-

Tabela 34. Diâmetro superficial molhado (D_s , cm) em função do tempo de aplicação de água (h) para cada vazão do emissor (q) nos solos estudados

Solo	Vazão(L h ⁻¹)	Equação	R ²
Luvissolo Crômico	1	$D_s = 24,68 \cdot t^{0,2223}$	0,9703
	2	$D_s = 31,05 \cdot t^{0,1985}$	0,9786
	4	$D_s = 37,55 \cdot t^{0,1767}$	0,9827
	8	$D_s = 43,62 \cdot t^{0,2136}$	0,9140
Argissolo Vermelho-Amarelo	1	$D_s = 24,40 \cdot t^{0,2234}$	0,9957
	2	$D_s = 29,17 \cdot t^{0,2202}$	0,9680
	4	$D_s = 36,40 \cdot t^{0,2112}$	0,9809
	8	$D_s = 42,49 \cdot t^{0,2158}$	0,9330
Cambissolo Háplico	1	$D_s = 21,79 \cdot t^{0,3330}$	0,9898
	2	$D_s = 30,56 \cdot t^{0,3190}$	0,9990
	4	$D_s = 39,11 \cdot t^{0,2681}$	0,9323
	8	$D_s = 48,41 \cdot t^{0,1957}$	0,7578
Neossolo Quartzarênico	1	$D_s = 25,30 \cdot t^{0,1980}$	0,9984
	2	$D_s = 29,58 \cdot t^{0,2334}$	0,9947
	4	$D_s = 37,96 \cdot t^{0,1309}$	0,9111
	8	$D_s = 39,64 \cdot t^{0,2280}$	0,9339
Latossolo Vermelho	1	$D_s = 20,53 \cdot t^{0,2688}$	0,9279
	2	$D_s = 25,89 \cdot t^{0,1936}$	0,9600
	4	$D_s = 31,52 \cdot t^{0,2645}$	0,9468
	8	$D_s = 34,58 \cdot t^{0,2153}$	0,9941
Neossolo Flúvico	1	$D_s = 19,19 \cdot t^{0,3342}$	0,9039
	2	$D_s = 26,80 \cdot t^{0,3827}$	0,9220
	4	$D_s = 39,39 \cdot t^{0,3362}$	0,9247
	8	$D_s = 48,45 \cdot t^{0,3252}$	0,9291

Tabela 35. Profundidade onde ocorre D_{max} (Z_{Dmax} , cm) em função do tempo de aplicação de água (h) para cada vazão do emissor (q) nos solos estudados

Solo	Vazão(L h ⁻¹)	Equação	R ²
Luvissolo Crômico	1	$Z_{Dmax} = 2,28 \cdot t^{0,7928}$	0,8870
	2	$Z_{Dmax} = 5,24 \cdot t^{0,5901}$	0,9813
	4	$Z_{Dmax} = 6,96 \cdot t^{0,6318}$	0,9856
	8	$Z_{Dmax} = 8,78 \cdot t^{0,5948}$	0,9455
Argissolo Vermelho-Amarelo	1	$Z_{Dmax} = 4,00 \cdot t^{0,6214}$	0,9665
	2	$Z_{Dmax} = 6,15 \cdot t^{0,6287}$	0,9921
	4	$Z_{Dmax} = 10,29 \cdot t^{0,4893}$	0,9978
	8	$Z_{Dmax} = 11,18 \cdot t^{0,5628}$	0,9887
Cambissolo Háplico	1	$Z_{Dmax} = 3,48 \cdot t^{0,4255}$	0,9153
	2	$Z_{Dmax} = 2,05 \cdot t^{1,0144}$	0,9203
	4	$Z_{Dmax} = 4,13 \cdot t^{0,8358}$	0,8494
	8	$Z_{Dmax} = 5,64 \cdot t^{0,8103}$	0,9848
Neossolo Quartzarênico	1	$Z_{Dmax} = 2,62 \cdot t^{0,7482}$	0,9903
	2	$Z_{Dmax} = 5,73 \cdot t^{0,5406}$	0,9519
	4	$Z_{Dmax} = 5,94 \cdot t^{0,9048}$	0,9738
	8	$Z_{Dmax} = 11,83 \cdot t^{0,5524}$	0,9922
Latosolo Vermelho	1	$Z_{Dmax} = 3,71 \cdot t^{0,7294}$	0,9803
	2	$Z_{Dmax} = 7,14 \cdot t^{0,5613}$	0,9561
	4	$Z_{Dmax} = 11,22 \cdot t^{0,4516}$	0,9858
	8	$Z_{Dmax} = 13,53 \cdot t^{0,5086}$	0,9980
Neossolo Flúvico	1	$Z_{Dmax} = 2,56 \cdot t^{0,2763}$	0,7281
	2	-	-
	4	$Z_{Dmax} = 1,21 \cdot t^{0,9075}$	0,7996
	8	-	-

O modelo potencial para avaliar as dimensões do bulbo molhado em função da vazão do emissor e do tempo de aplicação de água também foi usado com bons resultados em outros trabalhos, tais como Añez (1979), Xiyun et al., (1999), Thorburn et al. (2003) e Li et al. (2004). Uma característica do uso do modelo potencial é que a taxa de aumento das dimensões do bulbo molhado é maior para as vazões mais baixas e menores tempos de

irrigação, diminuindo com o aumento de q e t . Esse comportamento também foi observado por Khan et al. (1996) em experimento de campo onde avaliaram o modelo potencial para estimar as dimensões do bulbo molhado para o manejo da irrigação localizada por gotejamento superficial. Porém, mesmo o bulbo aumentando a taxas menores com aumento de q e t , Bresler (1977) observou que, para solos arenosos, o diâmetro máximo do bulbo não excede os 60 cm, mesmo para emissores com alta vazão e algumas horas de aplicação de água, porém DeTar (2004) também trabalhando com solos arenosos observou, para certas condições, diâmetro molhado superior aos obtidos por Bresler (1977). Neste trabalho, para o Neossolo Quartzarênico, D_{max} em função de q e t só não foi superior a 60 cm no tempo de 1,0 h. Isso indica que, para determinada condição, tanto a vazão do emissor como o tempo de aplicação de água, não apenas determina o volume molhado, mas também sua geometria, como verificado por Ghali & Svehlik (1988).

Avaliando os coeficientes a e b do modelo potencial, tanto para as dimensões do bulbo em função de q quanto de t , verificou-se que foram semelhantes, ou seja, para todos os solos a média do coeficiente $a = f(q)$ foi de 34,45, 22,19, 30,62 e 7,73, para D_{max} , Z_{max} , D_s e Z_{Dmax} , respectivamente. Para $a = f(t)$ estes valores foram de 33,67, 22,73, 32,84 e 6,92, também para D_{max} , Z_{max} , D_s e Z_{Dmax} , respectivamente. Para o coeficiente $b = f(q)$ os valores foram de 0,35, 0,38, 0,29 e 0,51, para D_{max} , Z_{max} , D_s e Z_{Dmax} , respectivamente e para $b = f(t)$ de 0,38, 0,40, 0,25 e 0,65, também para D_{max} , Z_{max} , D_s e Z_{Dmax} , respectivamente. É importante salientar que estes resultados foram obtidos em solos que foram previamente preparados de forma semelhantes, simulando o preparo pelo agricultor, o que pode ter contribuído para uma maior uniformidade do perfil entre os solos, principalmente na camada até 30 cm, independente da textura, estrutura e densidade desta camada. Obviamente que a camada superficial contribui sobremaneira para a distribuição de água no solo, porém, a formação do bulbo molhado pode ter sido também influenciada pelas camadas mais subsuperficiais, parte que permaneceram intactas, ou seja, sem preparo, que pode alterar a capacidade de infiltração e/ou funcionar como uma barreira a infiltração de água ou fluxo subterrâneo.

Sendo o coeficiente a do modelo potencial $y = a \cdot q^b$ igual a dimensão do bulbo (y igual a D_{max} , Z_{max} , D_s ou Z_{Dmax}) para $q = 1,0 \text{ L h}^{-1}$ e, desejando saber o valor de q para aumentar em 50% ($q_{A50\%}$) ou 100% ($q_{A100\%}$) as dimensões do bulbo em relação a $q = 1,0 \text{ L h}^{-1}$, os valores de q podem ser obtidos por $q_{A50\%} = (3/2)^{1/b}$ e $q_{A100\%} = 2^{1/b}$, respectivamente.

Devido a diminuição da taxa de crescimento das dimensões em função da vazão, pode-se observar nas Tabelas 36, 37, 38 e 39 que, para aumentar as dimensões do bulbo em 50% em relação a vazão de $1,0 \text{ L h}^{-1}$ as vazões médias para os solos estudados foram de 3,31, 4,38, 4,64, $2,29 \text{ L h}^{-1}$ para D_{max} , Z_{max} , D_s e Z_{Dmax} , respectivamente. Para aumentar em 100%, estes valores são de 7,87, $5,76^1$, 14,66, $4,21 \text{ L h}^{-1}$, também para D_{max} , Z_{max} , D_s e Z_{Dmax} , respectivamente. Vale salientar que estes são valores médios e que algumas vazões necessárias para aumentar em 50% e 100% as dimensões do bulbo foram superiores a vazão máxima avaliada no experimento, $8,0 \text{ L h}^{-1}$, chegando em alguns casos a vazões estimadas para este objetivo de mais de 100 L h^{-1} , como no caso para Z_{max} no Neossolo Flúvico. Isso implica que, para aumentar as dimensões do bulbo de 50% para 100% quando comparada com a vazão de $1,0 \text{ L h}^{-1}$, o aumento da vazão dos emissores serão em média para todos os solos estudados de 2,33, $2,05^1$, 2,94 e 1,79 vezes para D_{max} , Z_{max} , D_s e Z_{Dmax} , respectivamente. Schwartzman & Zur (1986) fazendo simulações para que não houvesse sobreposição do bulbo molhado, observaram pela análise de sensibilidade que, duplicando a vazão do emissor resulta no aumento de 10% no diâmetro e um decréscimo de 30% na profundidade molhada e que, o efeito na mudança na vazão do emissor é mais pronunciada em solos argilosos que em solos arenosos.

Da mesma forma do observado para as dimensões do bulbo em função da vazão do emissor, houve diminuição da taxa de crescimento destas em função do tempo de aplicação de água (Tabelas 40, 41, 42 e 43) que, para aumentar as dimensões do bulbo em 50% e 100% em relação ao tempo de 1,0 h os tempos médios para os solos estudados foram de 3,39 e 8,32, 2,85 e 6,05, 6,42 e 28,51 e 19,6 e 3,22 h para D_{max} , Z_{max} , D_s e Z_{Dmax} , respectivamente. Também pode-se salientar aqui, que estes valores são médios e que alguns tempos de aplicação de água para aumentar em 50% e 100% as dimensões do bulbo foram superiores ao tempo máximo avaliado no experimento, que foi de 7,0 h. Assim, para aumentar as dimensões do bulbo molhado de 50% para 100% quando comparada com o tempo de 1,0 h, o aumento do tempo de aplicação de água será, em média, para todos os solos estudados, de 2,37, 2,08, 3,65 e 1,61 vezes para D_{max} , Z_{max} , D_s e Z_{Dmax} , respectivamente, valores estes muito semelhantes aos obtidos para vazão do emissor, com exceção para o diâmetro superficial.

¹ Não foram computados os valores do Neossolo Flúvico

Tabela 36. Vazão necessária para aumentar o diâmetro máximo (D_{max}) em 50% e 100% comparada com $q = 1,0 \text{ L h}^{-1}$ para cada tempo de aplicação de água com base no modelo potencial $D_{max} = a \cdot q^b$

Solo	Tempo (h)	Coeficientes		50%	100%
		a	b	----- L h ⁻¹ -----	
Luvissole Crômico	1	26,05	0,3102	3,695	9,342
	2	32,11	0,3022	3,826	9,911
	4	37,31	0,3427	3,265	7,558
	7	42,66	0,3747	2,951	6,359
Argissolo Vermelho-Amarelo	1	25,95	0,2852	4,144	11,363
	2	31,27	0,3285	3,436	8,249
	4	40,00	0,2958	3,938	10,416
	7	43,92	0,3583	3,101	6,921
Cambissolo Háplico	1	24,07	0,3223	3,519	8,590
	2	30,81	0,3685	3,005	6,560
	4	40,07	0,3136	3,643	9,118
	7	46,69	0,3535	3,149	7,105
Neossolo Quartzarênico	1	27,21	0,2687	4,522	13,192
	2	32,19	0,3033	3,807	9,829
	4	38,47	0,3317	3,395	8,082
	7	44,67	0,3862	2,857	6,018
Latossole Vermelho	1	21,96	0,3707	2,986	6,487
	2	26,16	0,4097	2,690	5,429
	4	36,07	0,3545	3,139	7,066
	7	45,07	0,3219	3,524	8,613
Neossolo Flúvico	1	-	-	-	-
	2	24,74	0,4128	2,670	5,361
	4	35,02	0,4732	2,356	4,327
	7	39,87	0,4270	2,585	5,070

Tabela 37. Vazão necessária para aumentar a profundidade máxima (Z_{max}) em 50% e 100% comparada com $q = 1,0 \text{ L h}^{-1}$ para cada tempo de aplicação de água com base no modelo potencial $Z_{max} = a \cdot q^b$

Solo	Tempo (h)	a	b	50%	100%
				----- L h ⁻¹ -----	
Luvissolo Crômico	1	15,42	0,3322	3,389	8,057
	2	20,13	0,3485	3,201	7,308
	4	26,10	0,3193	3,560	8,766
	7	30,45	0,4252	2,595	5,105
Argissolo Vermelho-Amarelo	1	18,13	0,3585	3,099	6,913
	2	20,99	0,4381	2,523	4,865
	4	29,84	0,3960	2,784	5,757
	7	35,27	0,4351	2,539	4,919
Cambissolo Háptico	1	14,60	0,4136	2,665	5,344
	2	17,70	0,4288	2,574	5,035
	4	21,43	0,5464	2,100	3,556
	7	34,70	0,3485	3,201	7,308
Neossolo Quartzarênico	1	14,56	0,4472	2,476	4,711
	2	18,75	0,4127	2,671	5,363
	4	27,10	0,4184	2,636	5,242
	7	33,06	0,4062	2,713	5,509
Latossolo Vermelho	1	15,54	0,4330	2,551	4,957
	2	22,51	0,3415	3,278	7,612
	4	25,24	0,4314	2,560	4,987
	7	30,36	0,5170	2,191	3,822
Neossolo Flúvico	1	8,50	0,5211	2,177	3,782
	2	12,87	0,1808	9,418	46,237
	4	17,10	0,1314	21,883	195,409
	7	22,21	0,1453	16,290	117,973

Tabela 38. Vazão necessária para aumentar o diâmetro superficial (D_s) em 50% e 100% comparada com $q = 1,0 \text{ L h}^{-1}$ para cada tempo de aplicação de água com base no modelo potencial $D_s = a \cdot q^b$

Solo	Tempo (h)	a	b	50%	100%
				----- L h ⁻¹ -----	
Luvissole Crômico	1	25,38	0,2895	4,058	10,960
	2	29,30	0,2360	5,574	18,860
	4	32,31	0,2847	4,154	11,412
	7	38,94	0,2579	4,817	14,697
Argissolo Vermelho-Amarelo	1	24,20	0,2592	4,779	14,500
	2	29,14	0,2824	4,203	11,640
	4	32,56	0,2799	4,257	11,898
	7	37,87	0,2481	5,126	16,343
Cambissolo Háplico	1	22,63	0,3449	3,240	7,461
	2	28,88	0,3856	2,862	6,035
	4	35,59	0,3004	3,856	10,048
	7	45,16	0,2246	6,082	21,892
Neossolo Quartzarênico	1	25,65	0,2170	6,479	24,391
	2	29,47	0,2472	5,156	16,510
	4	33,64	0,2343	5,644	19,267
	7	37,90	0,2159	6,541	24,792
Latossole Vermelho	1	21,34	0,2437	5,279	17,189
	2	24,43	0,2796	4,264	11,930
	4	31,25	0,1945	8,042	35,295
	7	32,85	0,2087	6,978	27,695
Neossolo Flúvico	1	19,85	0,4597	2,416	4,517
	2	24,00	0,4392	2,517	4,846
	4	33,63	0,4531	2,447	4,617
	7	38,80	0,4314	2,560	4,987

Tabela 39. Vazão necessária para aumentar a profundidade onde ocorre D_{max} ($Z_{D_{max}}$) em 50% e 100% comparada com $q = 1,0 \text{ L h}^{-1}$ para cada tempo de aplicação de água com base no modelo potencial $Z_{D_{max}} = a \cdot q^b$

Solo	Tempo (h)	a	b	50%	100%
				----- L h ⁻¹ -----	
Luvissole Crômico	1	2,34	0,6664	1,838	2,830
	2	5,44	0,5341	2,136	3,661
	4	8,36	0,4457	2,484	4,736
	7	9,87	0,5303	2,148	3,695
Argissolo Vermelho-Amarelo	1	4,41	0,5071	2,225	3,923
	2	5,87	0,5447	2,105	3,570
	4	11,26	0,3722	2,972	6,439
	7	13,71	0,4707	2,366	4,361
Cambissolo Háptico	1	2,54	0,3619	3,066	6,789
	2	3,99	0,3197	3,555	8,742
	4	6,86	0,5175	2,189	3,817
	7	8,19	0,6054	1,954	3,142
Neossolo Quartzarênico	1	2,96	0,6355	1,893	2,976
	2	4,53	0,6710	1,830	2,809
	4	7,90	0,6055	1,954	3,142
	7	11,79	0,5862	1,997	3,262
Latossole Vermelho	1	3,81	0,6767	1,821	2,785
	2	7,63	0,4637	2,397	4,459
	4	10,58	0,4815	2,321	4,219
	7	14,88	0,4311	2,561	4,992
Neossolo Flúvico	1	-	-	-	-
	2	-	-	-	-
	4	-	-	-	-
	7	-	-	-	-

Tabela 40. Tempo de irrigação necessário para aumentar o diâmetro máximo (D_{max}) em 50% e 100% comparada com $t = 1,0$ h para cada vazão do emissor com base no modelo potencial $D_{max} = a \cdot t^b$

Solo	Vazão (L h ⁻¹)	a	b	50%	100%
				----- h -----	
Luvissolo Crômico	1	25,72	0,2623	4,692	14,049
	2	33,82	0,2481	5,126	16,343
	4	39,73	0,3134	3,646	9,131
	8	48,39	0,3213	3,532	8,648
Argissolo Vermelho- Amarelo	1	25,38	0,3105	3,691	9,322
	2	31,43	0,3149	3,624	9,036
	4	40,09	0,3727	2,968	6,422
	8	45,64	0,3551	3,133	7,043
Cambissolo Háplico	1	23,62	0,3437	3,253	7,514
	2	31,12	0,3582	3,102	6,925
	4	40,13	0,3412	3,282	7,626
	8	46,95	0,3618	3,067	6,793
Neossolo Quartzarênico	1	26,02	0,2594	4,774	14,471
	2	34,17	0,2845	4,159	11,431
	4	40,10	0,3420	3,273	7,589
	8	45,44	0,3737	2,959	6,391
Latossolo Vermelho	1	21,01	0,3531	3,153	7,121
	2	28,05	0,3848	2,868	6,058
	4	37,58	0,3588	3,096	6,902
	8	47,40	0,2923	4,003	10,712
Neossolo Flúvico	1	21,49	0,3618	3,067	6,793
	2	26,26	0,3893	2,834	5,933
	4	38,52	0,3921	2,813	5,858
	8	10,09	1,3697	1,345	1,659

Tabela 41. Tempo de irrigação necessário para aumentar a profundidade máxima (Z_{max}) em 50% e 100% comparada com $t = 1,0$ h para cada vazão do emissor com base no modelo potencial $Z_{max} = a \cdot t^b$

Solo	Vazão (L h ⁻¹)	a	b	----- h -----	
				50%	100%
Luvissole Crômico	1	15,26	0,3533	3,151	7,113
	2	19,91	0,3714	2,979	6,464
	4	24,97	0,4190	2,632	5,229
	8	29,64	0,4210	2,620	5,188
Argissolo Vermelho- Amarelo	1	18,49	0,3180	3,579	8,844
	2	20,70	0,4665	2,385	4,419
	4	30,48	0,3497	3,188	7,258
	8	38,92	0,4231	2,607	5,146
Cambissolo Háplico	1	13,80	0,3869	2,852	5,999
	2	19,15	0,4291	2,573	5,030
	4	23,46	0,4839	2,312	4,189
	8	35,78	0,3520	3,164	7,165
Neossolo Quartzarênico	1	14,41	0,4175	2,641	5,261
	2	18,72	0,4185	2,635	5,240
	4	28,43	0,4625	2,403	4,476
	8	34,60	0,3611	3,074	6,818
Latossole Vermelho	1	15,47	0,3553	3,130	7,035
	2	23,24	0,3405	3,290	7,657
	4	27,80	0,3491	3,195	7,283
	8	35,09	0,4680	2,378	4,398
Neossolo Flúvico	1	8,85	0,4529	2,448	4,620
	2	13,15	0,3246	3,487	8,460
	4	12,41	0,3937	2,801	5,816
	8	-	-	-	-

Tabela 42. Tempo de irrigação necessário para aumentar o diâmetro molhado superficial (D_s) em 50% e 100% comparada com $t = 1,0$ h para cada vazão do emissor com base no modelo potencial $D_s = a \cdot t^b$

Solo	Vazão (L h ⁻¹)	a	b	----- h -----	
				50%	100%
Luvissole Crômico	1	24,68	0,2223	6,196	22,603
	2	31,05	0,1985	7,711	32,849
	4	37,55	0,1767	9,921	50,538
	8	43,62	0,2136	6,674	25,664
Argissolo Vermelho- Amarelo	1	24,40	0,2234	6,141	22,258
	2	29,17	0,2202	6,305	23,285
	4	36,40	0,2112	6,820	26,628
	8	42,49	0,2158	6,546	24,828
Cambissolo Háplico	1	21,79	0,3330	3,379	8,017
	2	30,56	0,3190	3,565	8,784
	4	39,11	0,2681	4,537	13,269
	8	48,41	0,1957	7,940	34,532
Neossolo Quartzarênico	1	25,30	0,1980	7,751	33,140
	2	29,58	0,2334	5,681	19,488
	4	37,96	0,1309	22,143	199,386
	8	39,64	0,2280	5,920	20,908
Latossole Vermelho	1	20,53	0,2688	4,520	13,180
	2	25,89	0,1936	8,120	35,885
	4	31,52	0,2645	4,632	13,744
	8	34,58	0,2153	6,575	25,014
Neossolo Flúvico	1	19,19	0,3342	3,364	7,957
	2	26,80	0,3827	2,885	6,118
	4	39,39	0,3362	3,340	7,859
	8	48,45	0,3252	3,479	8,427

Tabela 43. Tempo de irrigação necessário para aumentar a profundidade onde ocorre D_{max} ($Z_{D_{max}}$) em 50% e 100% comparada com $t = 1,0$ h para cada vazão do emissor com base no modelo potencial $Z_{D_{max}} = a \cdot t^b$

Solo	Vazão (L h ⁻¹)	a	b	----- h -----	
				50%	100%
Luvissole Crômico	1	2,28	0,7928	1,668	2,397
	2	5,24	0,5901	1,988	3,237
	4	6,96	0,6318	1,900	2,995
	8	8,87	0,5948	1,977	3,207
Argissolo Vermelho- Amarelo	1	4,00	0,6214	1,920	3,051
	2	6,15	0,6287	1,906	3,012
	4	10,29	0,4893	2,290	4,123
	8	11,18	0,5628	2,055	3,427
Cambissolo Háplico	1	3,48	0,4255	2,593	5,099
	2	2,05	1,0144	1,491	1,980
	4	4,13	0,8358	1,624	2,292
	8	5,64	0,8103	1,649	2,352
Neossolo Quartzarênico	1	2,62	0,7482	1,719	2,525
	2	5,73	0,5406	2,117	3,604
	4	5,94	0,9048	1,565	2,151
	8	11,83	0,5524	2,083	3,507
Latossole Vermelho	1	3,71	0,7294	1,743	2,586
	2	7,14	0,5613	2,059	3,438
	4	11,22	0,4516	2,454	4,641
	8	13,53	0,5086	2,219	3,907
Neossolo Flúvico	1	2,56	0,2763	4,338	12,289
	2	-	-	-	-
	4	1,21	0,9075	1,563	2,146
	8	-	-	-	-

É importante salientar que, para todos os solos estudados, $D_{max} > Z_{max}$. Provavelmente isso se deve ao impedimento da camada subsuperficial do solo, que não foi possível preparar com aração e gradagem e ter servido como uma camada de impedimento ao fluxo de água, principalmente pela mudança de textura e estrutura, porém Roth (1974) observou para três solos que a aplicação de até 95 L de água o bulbo foi esférico com $D_{max} > Z_{max}$, no entanto, acima dos 95 L, Z_{max} passa a prevalecer em relação a D_{max} . No trabalho de Angelakis et al. (1993), os autores verificaram que, tanto para um solo franco argiloso com para um franco arenoso, valores de $Z_{max} > D_{max}$. Resultados semelhantes também foram obtidos em campo por Arachchi (1998) avaliando a irrigação localizada na cultura do

coqueiro e concluiu que a vazão de 30 L h⁻¹ com tempo de aplicação de 2,5 h, foi a melhor combinação para que não houvesse perda de água por percolação.

Sendo D_q , $D_{q/2}$ e D_{2q} as dimensões do bulbo (D_{max} , Z_{max} , D_s ou Z_{Dmax}) na vazão q , metade de q ($q/2$) e o dobro de q ($2q$), respectivamente, uma característica do modelo potencial é a relação $D_q^2 = D_{q/2} \cdot D_{2q}$. Para esta condição, assumindo que $q/2 = 1$ L h⁻¹,

$D_{(q/2)} = a$, então $D_q^2 = a \cdot D_{2q}$, conseqüentemente $a = \frac{D_q^2}{D_{2q}}$. Assim, para o modelo potencial,

$$D = \frac{D_q^2}{D_{2q}} q^b, \text{ como } q/2 = 1, q = 2 \text{ e } 2q = 4, \text{ tem-se } D = \frac{D_{q=2}^2}{D_{q=4}} q^b \text{ ou } D = \frac{D(2)^2}{D(4)} q^b.$$

Usando a relação $D_q^2 = D_{q/2} \cdot D_{2q}$ foram estimados os valores de D_{max} , Z_{max} , D_s e Z_{Dmax} (Figura 5) para as vazões de 4,0 e 8,0 L h⁻¹ para todos os solos levando em consideração que nos experimentos foram testadas apenas quatro vazões. Os coeficientes de determinação (R^2) entre os valores estimados e os observados variaram de 0,6659 para Z_{max} até 0,8677 para D_{max} . É importante salientar que os dados são para todos os solos estudados, diferentemente dos ajustes feito pelo modelo potencial que são ajustados para cada combinação q e t em cada solo estudado.

A relação $D_q^2 = D_{q/2} \cdot D_{2q}$ é importante para teste prático de campo onde o agricultor pode fazer as medições das dimensões do bulbo molhado na vazão utilizada (q) e aumentando esta para $2q$, pode estimar as dimensões do bulbo molhado para as vazões $q/2$ e $4q$, sem a necessidade da utilização de programas computacionais. Essa metodologia pode ser utilizada para todas as medições do bulbo, D_{max} , Z_{max} , D_s e Z_{Dmax} que, como pode ser visto a seguir, que será útil para determinação do volume molhado.

A relação entre D_{max} , Z_{max} , D_s e Z_{Dmax} em função da vazão do emissor e do tempo de aplicação de água é importante para o dimensionamento e manejo da irrigação, porém uma boa combinação de q e t é necessária para se obter êxito na irrigação. Por exemplo, se usar emissores de baixa vazão, o bulbo molhado pode apresentar a profundidade maior que largura, implicando que pode não haver superposição, porém com a vantagem da menor área de exposição para a evaporação da água do solo, contrário do que acontece quando se usa gotejadores de maior vazão. Para Revol et al. (1997a) e Revol et al. (1997b), usando gotejadores com menor vazão, será necessário um maior número destes para suprir a demanda de água das plantas, porém necessitará de menor tempo de irrigação, o que contribui para maior eficiência do uso da água. Nesse sentido, tanto altas como baixas vazões, juntamente

com o tempo de irrigação, podem apresentar vantagens e desvantagens, porém a combinação de q e t será importante para a obtenção do volume de solo molhado.

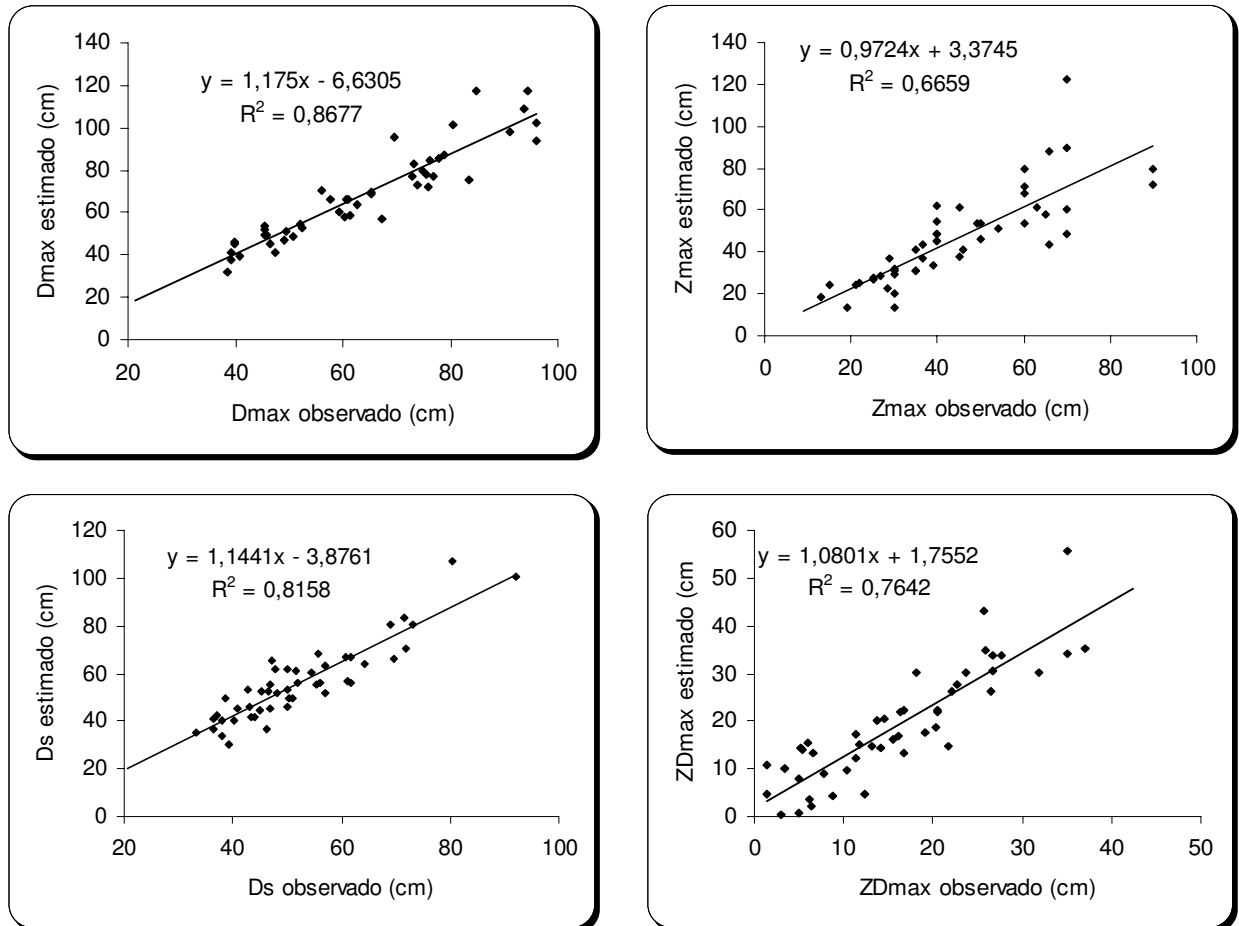


Figura 5. Relação entre os valores observados e estimados por $D_q^2 = D_{q/2} \cdot D_{2q}$ para as vazões de 4,0 e 8,0 L h⁻¹ para todos os solos estudados

As avaliações das estimativas das dimensões do bulbo pelo modelo potencial em relação aos valores observados, tanto para as dimensões em função de q quanto de t , foram realizadas usando a metodologia proposta por Gauch et al. (2003). Segundo os autores, outras metodologias como o uso do coeficiente de correlação, intercepto igual a zero e declividade unitária entre os dados observados e estimados podem apresentar a possibilidade de falha e, nesse sentido, propuseram uma metodologia baseada no Quadrado Médio dos Desvios (MSD) que é decomposto em Quadrado da Bias (SB), Quadrado Médio para Declividade não

Unitária (NU) e Quadrado Médio para Falta de Correlação (LC). Assim tem-se $MSD = SB + NU + LC$. O SB está relacionado com o intercepto da reta ajustada, o NU com a declividade da reta e o LC com a correlação entre os dados observados e estimados pelos modelos e que, quanto menor o valor do MSD melhor o modelo. Pela decomposição do MSD, pode-se ter idéia onde o modelo pode ser melhorado, se pelo SB, NU ou LC e assim, em outra etapa, poder fazer correções nos modelos.

Inicialmente as comparações dos modelos (Tabela 44) foram para o potencial cuja variável independente foi a vazão do emissor ($y = a \cdot q^b$). Para Z_{max} os valores do MSD foram baixos, sendo que para o Neossolo Quartzarênico observou-se o maior valor (19,7563) e que se deve principalmente à falta de correlação que corresponde a mais de 98% do MSD, porém o coeficiente de determinação foi de 0,9316. Observa-se ainda para Z_{max} que para todos os solos, o modelo estimou bem os valores. Para D_{max} os valores de MSD foram baixos, com exceção para o Neossolo Flúvico que, pela decomposição do MSD, observa-se que os valores individuais de SB, NU e LC foram relativamente elevados, indicando que o modelo não estimou satisfatoriamente D_{max} para este solo, apesar do R^2 de 0,8531. Fazendo a avaliação para todos os solos, o modelo baixou o MSD e o principal problema é a falta de correlação com mais de 80% do MSD. Já para o diâmetro superficial (D_s) o modelo potencial apresentou baixos valores de MSD, estimando bem os valores de campo.

Para o modelo potencial cuja variável independente é o tempo de aplicação de água ($y = a \cdot t^b$), se verifica para Z_{max} , D_{max} e D_s valores baixos de MSD (Tabela 45), indicando o bom ajuste dos valores estimados e observados, porém, mais uma vez, o Neossolo Flúvico apresentou os maiores valores de MSD, principalmente em D_{max} e que não houve ajuste para Z_{max} .

Sendo o melhor modelo aquele que apresentar menor valor de MSD, comparando os modelos potenciais, cuja variável independente pode ser q ou t , com exceção do Neossolo Flúvico, os valores médios do MSD para as dimensões em função do tempo de aplicação de água foram ligeiramente inferiores ao estimado em função da vazão do emissor, exceto para o diâmetro superficial.

Tabela 44. Valores de MSD, RMSD e seus componentes SB, NU e LC e coeficiente de determinação (R^2) para avaliação dos valores estimados e observados pelo modelo potencial para Z_{max} , D_{max} , D_s e Z_{Dmax} em função da vazão do emissor (q) para os solos estudados

Solo	MSD	RMSD	SB	NU	LC	R^2
<i>Z_{max}</i>						
LC	3,6693	1,9155	0,0001	0,0842	3,5851	0,9829
AVA	4,5523	2,1336	0,0047	0,0227	4,5248	0,9869
CH	6,821	2,6117	0,0005	0,1333	6,6873	0,9752
NQ	19,7563	4,4448	0,0110	0,2809	19,4644	0,9316
LVA	5,0774	2,2533	0,0035	0,0127	5,0612	0,9852
NF	2,5058	1,5830	0,0334	0,0068	0,8894	0,9250
Todos	7,1117	2,6668	0,0002	0,0114	7,1001	0,9767
<i>D_{max}</i>						
LC	0,9723	0,9761	0,0017	0,0414	0,9292	0,9969
AVA	14,1257	3,7584	1,3704	0,9556	11,7997	0,9660
CH	3,0207	1,7380	0,0002	0,0990	2,9215	0,9919
NQ	4,1301	2,0323	0,0002	0,2055	3,9244	0,9884
LVA	9,8567	3,1395	0,0003	0,2487	9,6077	0,9698
NF	191,9062	13,853	33,5936	85,6436	72,669	0,8531
Todos	35,7082	5,9756	1,2179	5,8917	28,5986	0,9204
<i>D_s</i>						
LC	2,2038	1,4845	1,1651	0,3845	0,6542	0,9951
AVA	1,6372	1,2795	0,0739	0,1366	1,4267	0,9871
CH	9,3392	3,0560	0,1328	0,0687	9,1377	0,9579
NQ	3,9316	1,9828	0,7046	0,1231	3,1039	0,9675
LVA	5,4794	2,3408	1,7739	0,0636	3,6419	0,9504
NF	16,6063	4,0751	0,0162	0,5275	16,0626	0,9646
Todos	6,4269	2,5351	0,4553	0,0218	5,9498	0,9692
<i>Z_{Dmax}</i>						
LC	2,2650	1,5050	0,0001	0,1796	2,0853	0,9546
AVA	1,3813	1,1753	0,0001	0,0800	1,3012	0,9801
CH	1,4926	1,2217	0,0079	0,0469	1,4378	0,9707
NQ	5,1162	2,2619	0,0014	0,2805	4,8343	4,8344
LVA	1,2164	1,1029	0,0001	0,0367	1,1796	0,9835
NF	-	-	-	-	-	-
Todos	2,2943	1,5147	0,0004	0,1076	2,1863	0,9686

LC – Luvisolo Crômico, AVA - Argissolo Vermelho-Amarelo, CH – Cambissolo Háplico, NQ – Neossolo Quartzarênico, LVA – Latossolo Vermelho, NF – Neossolo Flúvico

Tabela 45. Valores de MSD, RMSD e seus componentes SB, NU e LC e coeficiente de determinação para avaliação dos valores estimados e observados pelo modelo potencial para Z_{max} , D_{max} , D_s e Z_{Dmax} em função do tempo de aplicação de água (t) para os solos estudados

Solo	MSD	RMSD	SB	NU	LC	R ²
<i>Z_{max}</i>						
LC	3,7112	1,9265	0,0030	0,0595	3,6487	0,9826
AVA	1,7255	1,3136	0,0011	0,0028	1,7216	0,9950
CH	7,6144	2,7594	0,0152	0,0171	7,5822	0,9719
NQ	3,0609	1,7495	0,0021	0,0041	3,0547	0,9893
LVA	4,9256	2,2194	0,0074	0,1217	4,7964	0,9860
NF	-	-	-	-	-	-
Todos	4,2075	2,0512	0,0047	0,0262	4,1766	0,1123
<i>D_{max}</i>						
LC	0,4156	0,6446	0,0001	0,0038	0,4117	0,9986
AVA	3,0488	1,7461	0,0013	0,0293	3,0182	0,9913
CH	3,3848	1,8398	0,0001	0,0171	3,3676	0,9906
NQ	1,2486	1,1174	0,0005	0,0274	1,2207	0,9964
LVA	2,8024	1,6740	0,0011	0,0014	2,7999	0,9912
NF	270,6085	16,4502	0,6593	131,0553	138,8939	0,7193
Todos	44,5635	6,6756	0,0122	6,8701	37,6812	0,8952
<i>D_s</i>						
LC	3,0026	1,7328	1,2335	0,6204	1,1487	0,9914
AVA	2,2851	1,5117	0,0777	0,1693	2,0381	0,9815
CH	6,1445	2,4788	0,1526	0,4619	5,5300	0,9745
NQ	2,0746	1,4403	0,6755	0,1304	1,2687	0,9867
LVA	6,8188	2,6113	0,3073	0,9435	5,5680	0,9242
NF	16,3325	4,0414	0,0361	0,0652	16,2312	0,9642
Todos	6,0021	2,4499	0,3154	0,0145	5,6722	0,9706
<i>Z_{Dmax}</i>						
LC	1,2742	1,1288	0,0038	0,1479	1,1225	0,9755
AVA	0,5427	0,7367	0,0009	0,0134	0,5284	0,9919
CH	2,0779	1,4415	0,0091	0,0005	2,0683	0,9578
NQ	1,2197	1,1044	0,0001	0,0619	1,1577	0,9871
LVA	0,5550	0,7450	0,0001	0,0024	0,5525	0,9923
NF	-	-	-	-	-	-
Todos	1,1340	1,0649	0,0001	0,0143	1,1196	0,9839

LC – Luvisolo Crômico, AVA - Argissolo Vermelho-Amarelo, CH – Cambissolo Háplico, NQ – Neossolo Quartzarênico, LVA – Latossolo Vermelho, NF – Neossolo Flúvico

5.1.1.2 Modelo de superfície de resposta

Como o estudo feito das dimensões do bulbo molhado em função de q ou t mostrou que o modelo potencial ajustou-se bem aos dados, tendo $y = \alpha_1 \cdot q^{\beta_1}$ e $y = \alpha_2 \cdot t^{\beta_2}$, para uma mesma medida do bulbo, $y = \alpha_1 \cdot q^{\beta_1} \cdot \alpha_2 \cdot t^{\beta_2}$ e, para $\alpha = \alpha_1 \cdot \alpha_2$, tem-se

$y = \alpha \cdot q^{\beta_1} \cdot t^{\beta_2}$ ou $y = a \cdot q^b \cdot t^c$. Este modelo foi ajustado aos dados, Tabela 46, e se observa que, com exceção de Z_{max} , Z_{Dmax} e D_{max} para o Neossolo Flúvico, os coeficientes de determinação foram superiores a 90% para todas as dimensões em todos os solos. Uma das vantagens da superfície de resposta é que, apenas 24 equações foram suficientes para abranger todas as combinações de t e q do experimento, ao contrário do modelo potencial, onde esse número foi de 96.

Os valores estimados em função dos observados, Figura 6, indicam que o modelo da superfície de resposta estimou bem as dimensões do bulbo molhado e que, além dos altos coeficientes de determinação, observa-se que os coeficientes angulares e os interceptos da reta ajustada foram estatisticamente iguais a 1 e 0, respectivamente.

Fazendo simulação para a cultura do melão, desejando-se uma profundidade do bulbo molhado de 40 cm e, utilizando a equação $Z_{max} = f(t, q)$, tem-se o modelo $t = f(q)$, que combina os valores de q e t para obter a profundidade máxima de 40 cm. Utilizando o critério de $\frac{dt}{dq} = 1$, obtém-se o valor de q que, substituindo em $t = f(q)$, tem-se o tempo t para Z de 40 cm. Os valores de D_{max} , D_s e Z_{Dmax} são obtidos pela substituição dos valores de q e t em $D_{max} = f(t, q)$, $D_s = f(t, q)$ e $Z_{Dmax} = f(t, q)$, respectivamente. Usando o critério proposto por Keller & Bliesner (1990), multiplicando o valor de D_{max} por 0,8, tem-se o espaçamento entre os emissores.

Sem considerar o Neossolo Flúvico, os valores de q para um Z de 40 cm variaram de 3,019 a 3,446 L h⁻¹ para o Argissolo Vermelho-Amarelo e o Cambissolo Háplico, respectivamente, e o tempo de irrigação de 2,864 a 3,975 h para Argissolo Vermelho-Amarelo e Luvisolo Crômico, respectivamente (Tabela 47). Os valores obtidos para o Neossolo Flúvico não foram comparados devido a profundidade máxima observada no campo na maior vazão e tempo de aplicação de água ter sido de aproximadamente 30 cm. Desta maneira, os dados deste solo da Tabela 47 são extrapolações, ou seja, os resultados estão fora do espaço experimental, e, a principal explicação para os valores elevados de q e t para se alcançar os 40 cm é a baixa condutividade hidráulica deste solo.

Observa-se ainda que, o volume de água aplicado para atingir os 40 cm de profundidade foi diferente para os solos estudados, sendo maior no Luvisolo Crômico e menor Argissolo Vermelho-Amarelo, sem considerar o Neossolo Flúvico. Analisando a umidade média no perfil do solo antes da aplicação da água, verifica-se que para o Luvisolo Crômico e o Cambissolo Háplico, estes valores foram inferiores a umidade residual, Tabelas 4

e 14, obtida pelo ajuste no modelo de van Genuchten (1980), e foram um pouco superior a θ_r para os demais solos. Apesar do volume de água ter variado entre os solos, quando se verifica a lâmina de água aplicada pelo sistema (mm h^{-1}) os valores se aproximam, com média de $3,788 \text{ mm h}^{-1}$. Isso se deve a diferença no espaçamento entre os emissores, considerado como sendo igual a $0,8D_{\max}$ e este, difere entre os solos.

Tabela 46. Parâmetros do modelo para superfície de resposta ($y = a \cdot t^b \cdot q^c$) para Z_{\max} , D_s , $Z_{D_{\max}}$ e D_{\max} para os solos estudados

Solo	Dimensões	a	b	c	R ²
Luvissolo Crômico	Z_{\max}	14,5658	0,4196	0,3553	0,9710
	D_s	25,1965	0,2100	0,2659	0,9805
	$Z_{D_{\max}}$	3,8550	0,5547	0,4382	0,9524
	D_{\max}	24,8723	0,3025	0,3361	0,9929
Argissolo Vermelho-Amarelo	Z_{\max}	16,3093	0,4047	0,4260	0,9864
	D_s	24,8700	0,2094	0,2640	0,9833
	$Z_{D_{\max}}$	4,8463	0,5727	0,4120	0,9766
	D_{\max}	24,7273	0,3556	0,3107	0,9678
Cambissolo Háptico	Z_{\max}	14,6370	0,4069	0,4001	0,9515
	D_s	26,4790	0,2441	0,2742	0,9165
	$Z_{D_{\max}}$	2,0712	0,7882	0,5162	0,9517
	D_{\max}	24,6262	0,3463	0,3273	0,9851
Neossolo Quartzarênico	Z_{\max}	15,6967	0,4098	0,3763	0,9280
	D_s	25,9539	0,1927	0,2251	0,9634
	$Z_{D_{\max}}$	3,6340	0,6502	0,5208	0,9518
	D_{\max}	24,6603	0,3435	0,3238	0,9804
Latossolo Vermelho	Z_{\max}	13,9914	0,4307	0,4635	0,9696
	D_s	22,5462	0,1945	0,2225	0,9255
	$Z_{D_{\max}}$	5,4593	0,5088	0,4430	0,9855
	D_{\max}	23,4125	0,3329	0,3265	0,9637
Neossolo Flúvico	Z_{\max}	11,7550	0,2548	0,2096	0,6372
	D_s	21,0619	0,3357	0,4086	0,9564
	$Z_{D_{\max}}$	0,0047	-3,2903	4,3771	0,8350
	D_{\max}	17,8365	0,4978	0,3609	0,8075

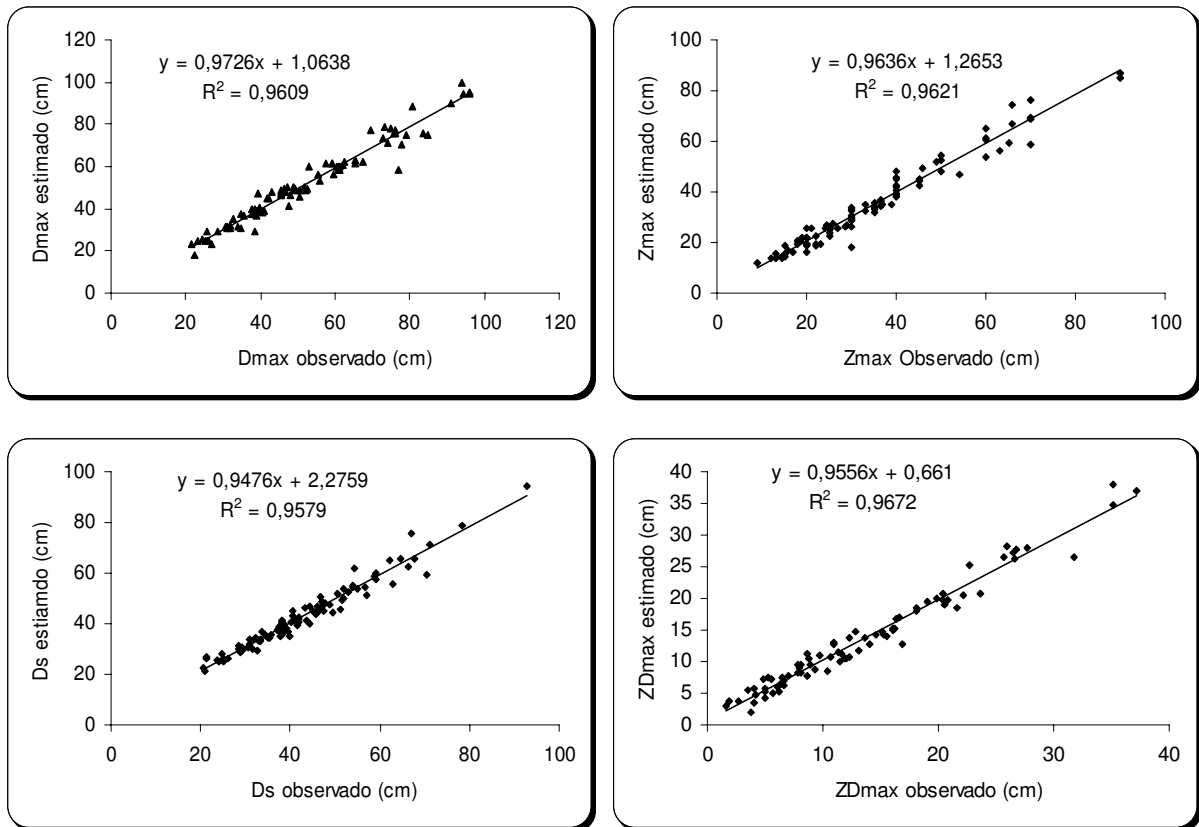


Figura 6. Valores estimados em função do observado para D_{max} , Z_{max} , D_s e Z_{Dmax} para o modelo superfície de resposta para todos os solos estudados

Tabela 47. Valores da vazão do emissor ($L h^{-1}$), tempo de aplicação de água (h) e volume de água aplicado (V_{ap} , L), para obter a profundidade do bulbo molhado de 40 cm e os valores obtidos de D_{max} , D_s e Z_{Dmax} para os solos estudados

	Luvissolo Crômico	Argissolo Vermelho- Amarelo	Cambissolo Háplico	Neossolo Quartzarênico	Latossolo Vermelho	Neossolo Flúvico
q (Z = 40 cm)	3,366	3,019	3,446	3,144	3,354	12,549
t (Z = 40 cm)	3,975	2,868	3,505	3,424	3,117	15,255
V_{ap}	13,378	8,660	12,076	10,765	10,452	191,424
$D_{max}^{(*)}$	56,777	50,696	57,000	54,534	50,746	172,557
$D_s^{(*)}$	46,492	41,514	50,490	42,577	36,817	147,763
$Z_{Dmax}^{(*)}$	14,106	13,970	10,541	14,690	16,638	0,039
$0,8D_{max}$	45,422	40,557	45,600	43,627	40,597	138,045
TAS ^(**)	3,705	3,722	3,778	3,603	4,131	4,545
LAA ^(***)	14,727	10,676	13,242	12,337	12,873	69,334

(*) Estimada pelo modelo superfície de resposta

(**) Taxa de Aplicação de água pelo sistema ($mm h^{-1}$) considerando o espaçamento entre linhas de 2 m e a distância entre emissores de $0,8D_{max}$

(***) Lâmina de água aplicada pelo sistema de irrigação (mm)

Na avaliação do modelo da superfície de resposta pelo MSD, apenas para o Neossolo Flúvico, os valores foram elevados, principalmente para D_{max} , D_s e Z_{Dmax} , e para os demais solos, observa-se bom ajuste do modelo aos dados observados e que, o principal componente que é afetado é a falta de correlação, porém, todos superiores a 93%, com exceção do Neossolo Flúvico (Tabela 48). Fazendo uma comparação dos valores estimados pelo modelo potencial e pela superfície de resposta, observa-se que os valores de MSD foram relativamente baixos, porém com valores ligeiramente superiores para a superfície de resposta para Z_{max} , D_{max} , D_s e Z_{Dmax} , porém este estima as dimensões do bulbo molhado em função de duas variáveis independente, enquanto o modelo potencial, apenas de uma, t ou q .

5.1.2 Dimensões do bulbo molhado em função do volume de água aplicado

As dimensões do bulbo molhado também foram avaliadas em função do volume de água aplicado, verificando-se que as medições do bulbo em função de q e t pelo modelo potencial também se ajustou bem aos dados, Figura 7. A diferença básica entre o modelo de superfície de resposta e do volume de água aplicado é que o segundo considera apenas um expoente para o produto entre q e t , enquanto o primeiro considera um expoente para q e outro para t . No modelo de superfície de resposta, Tabela 46, o quociente entre o expoente t e q , para todos os solos, foi de aproximadamente 1,08, indicando que os dois expoentes são aproximados.

Após o ajuste dos dados de D_{max} , Z_{max} , D_s e Z_{Dmax} em função de volume de água aplicado, fez-se a comparação entre os valores estimados e os observados, Figura 8. Os coeficientes de determinação entre o estimado e o observado foram semelhantes aos obtidos na simulação com o modelo superfície de resposta, sendo superior a 95%, além do intercepto e o coeficiente angular serem iguais estatisticamente a 0 e 1, respectivamente. Assim, pode-se afirmar, para os solos estudados, que as dimensões do bulbo molhado podem ser estimadas pelo volume de água aplicado. Desta maneira foi que Schwartzman & Zur (1986) propuseram o modelo $d = 1,32 \cdot z^{0,35} \cdot q^{0,33} \cdot K_s^{-0,33}$ obtido igualando os volumes de água aplicado das

$$\text{equações } z = 2,54 \cdot V^{0,63} \cdot \left(\frac{K_s}{q}\right)^{0,45} \text{ e } d = 1,82 \cdot V^{0,22} \cdot \left(\frac{K_s}{q}\right)^{-0,17}.$$

Avaliando a formação do bulbo molhado em três localidades do Arizona-EUA, Roth (1974) combinou as vazões de 3,8, 7,6 e 15,2 L h⁻¹ com tempo de aplicação de 12, 6 e 3

h para aplicar, aproximadamente 45,6 L e verificou que as dimensões do bulbo praticamente foram as mesmas; porém Mostaghimi et al. (1981) trabalhando em solo franco argilo siltoso com pequenos volumes de água aplicados, verificaram na formação do bulbo $Z_{max} > D_{max}$. Resultados similares foram obtidos por Souza et al. (2001) trabalhando em Latossolo, tanto para vazão do emissor de 2,0 como de 4,0 L h⁻¹ e aplicando lâmina de 5 mm, porém a medição foi realizada após a redistribuição de água no solo. Para El-Hafedt et al. (2001), a faixa molhada do solo (que é dependente das dimensões do bulbo molhado) não depende diretamente da vazão do emissor, mas, do volume de água aplicado e do espaçamento dos emissores. Desta forma, assumindo para o modelo $D = \alpha \cdot Z^{1/3} \cdot q^{1/3} \cdot K_s^{-1/3}$, se $Z/K_s = t$, tem-se $D = \alpha \cdot t^{1/3} \cdot q^{1/3}$, ou seja, $D = \alpha \cdot (t \cdot q)^{1/3}$, conseqüentemente, $D = \alpha \cdot (V_a)^{1/3}$. Analisando os coeficientes do modelo potencial da Figura 7, observa-se para D_{max} que, retirando o NeossoloFlúvico, a média do coeficiente b foi de 0,3315, ou seja, aproximadamente 1/3.

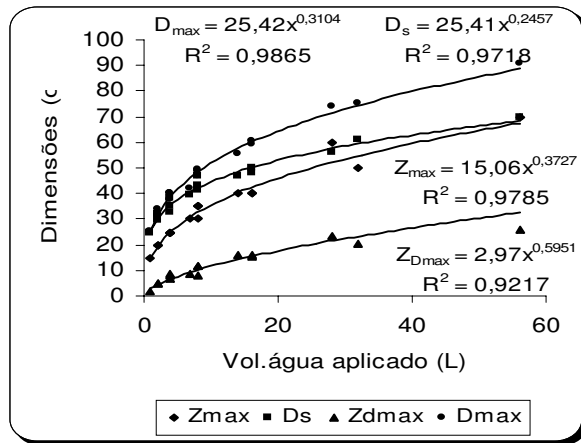
Assim como foi verificado para as dimensões do bulbo molhado pelo modelo potencial em função de t ou q , para o volume de água aplicado, estas também apresentam uma taxa de crescimento maior com os menores volumes de água aplicado, de aproximadamente 3 a 4 L. Thorburn et al. (2003) verificaram para dois solos da Austrália que esta diminuição ocorreu em aproximadamente 2 L. Resultados semelhantes na diminuição da taxa de crescimento foram obtidos por Michelakis et al. (1993) trabalhando com abacate sob irrigação por gotejamento. Estes mesmos autores verificaram que o diâmetro superficial (D_s) aumentou significativamente para o volume de água aplicado, com base na evapotranspiração da cultura (ETc), equivalente a 0,3ETc para, 6ETc, porém não diferiu de 0,6ETc para 0,9ETc.

Ao avaliar o MSD para o modelo potencial usando o volume de água aplicado, os valores foram semelhantes aos observados para o modelo superfície de resposta, sendo que o primeiro apresenta valores ligeiramente superior em 0,0455, 1,6758, 1,2284 e 2,2068 para D_s , Z_{max} , D_{max} e $Z_{D_{max}}$, respectivamente, Tabela 49. Os maiores valores de MSD foram verificados para o Neossolo Flúvico que, na decomposição do MSD, a falta de correlação apresenta o maior percentual, com valores muito baixos para SB e NU, indicando que o intercepto e a declividade da reta entre o valores estimados e observados, são próximos a 0 e 1, respectivamente para os solos, Figura 8.

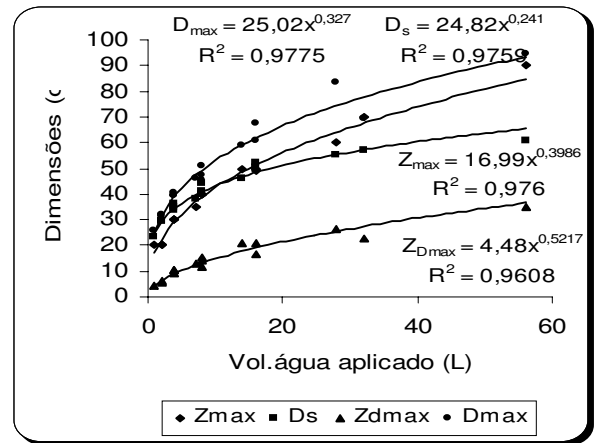
Tabela 48. Valores de MSD, RMSD e seus componentes SB, NU e LC e coeficiente de determinação para avaliação dos valores estimados e observados pelo modelo superfície de resposta para Z_{max} , D_{max} , D_s e Z_{Dmax} em função do tempo de aplicação de água (t) e vazão do emissor (q) para os solos estudados

Solo	MSD	RMSD	SB	NU	LC	R ²
Z_{max}						
LC	6,0713	2,4640	0,0024	0,0144	6,0545	0,9711
AVA	4,7124	2,1708	0,0069	0,0350	4,6705	0,9865
CH	13,1058	3,6202	0,0164	0,0885	13,0009	0,9518
NQ	20,4910	4,5267	0,0140	0,0805	20,3965	0,9283
LVA	10,4310	3,2297	0,0501	0,2174	10,1635	0,9704
NF	6,9807	2,6421	0,3505	0,0416	6,5886	0,7995
Todos	10,3337	3,2146	0,0056	0,0034	10,3247	0,9662
D_{max}						
LC	2,1173	1,4551	0,0018	0,0148	2,1007	0,9929
AVA	11,2125	3,3485	0,0002	0,0018	11,2105	0,9677
CH	5,3537	2,3138	0,0014	0,0102	5,3421	0,9851
NQ	6,6616	2,5810	0,0042	0,0326	6,6248	0,9805
LVA	11,5335	3,3961	0,0161	0,1323	11,3851	0,9642
NF	90,8018	9,5290	10,0067	3,6131	77,1820	0,8440
Todos	20,5481	4,5330	0,2424	0,1815	20,1242	0,9440
D_s						
LC	2,8669	1,6932	1,1854	0,3948	1,2867	0,9904
AVA	2,8772	1,6962	0,0644	0,0782	2,7346	0,9752
CH	14,4673	3,8036	0,0454	1,7363	12,6856	0,9415
NQ	4,1318	2,0327	0,6410	0,2150	3,2758	0,9657
LVA	6,8041	2,6085	1,6113	0,1273	5,0655	0,9310
NF	90,6454	9,5208	0,7581	0,6771	89,2102	0,8034
Todos	19,55851	4,4225	0,5597	0,0094	18,9894	0,9016
Z_{Dmax}						
LC	2,1833	1,4776	0,0100	0,0355	2,1378	0,9534
AVA	1,5309	1,2373	0,0009	0,0032	1,5268	0,9766
CH	2,3670	1,5385	0,0009	0,0018	2,3643	0,9518
NQ	4,3339	2,0818	0,0184	0,0474	4,2681	0,9525
LVA	1,0365	1,0181	0,0032	0,0128	1,0205	0,9857
NF	-	-	-	-	-	-
Todos	2,2904	1,5134	0,0034	0,0097	2,2773	0,9672

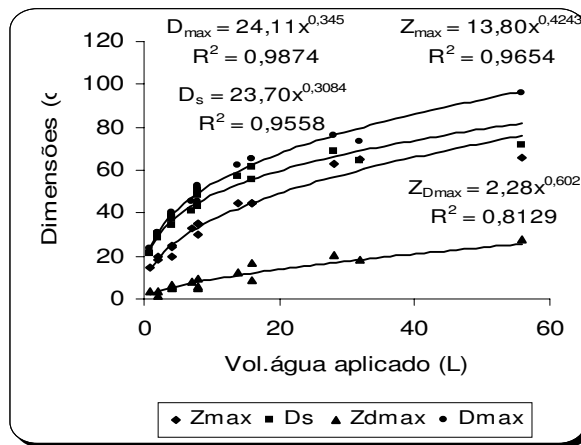
LC – Luvisolo Crômico, AVA - Argissolo Vermelho-Amarelo, CH – Cambissolo Háplico, NQ – Neossolo Quartzarênico, LVA – Latossolo Vermelho, NF – Neossolo Flúvico



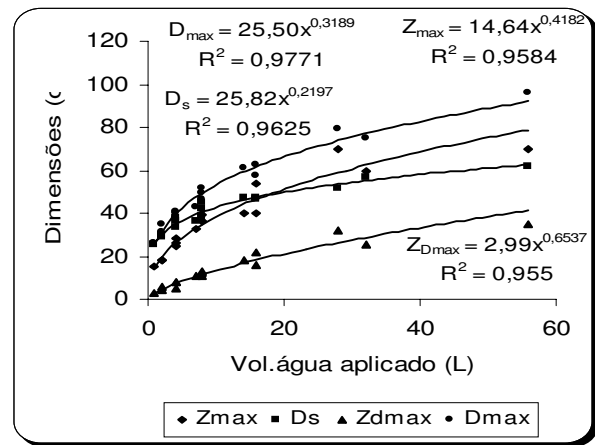
Luvissole Crômico



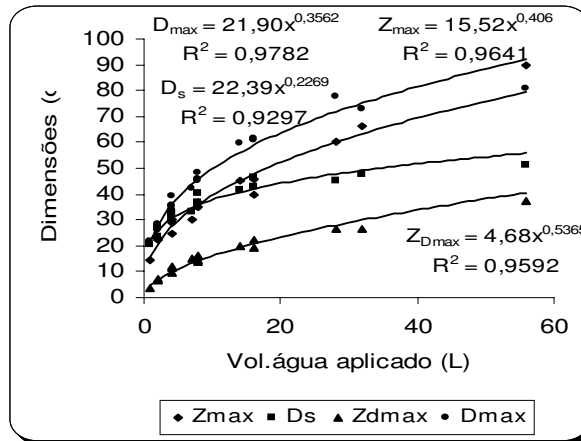
Argissolo Vermelho-Amarelo



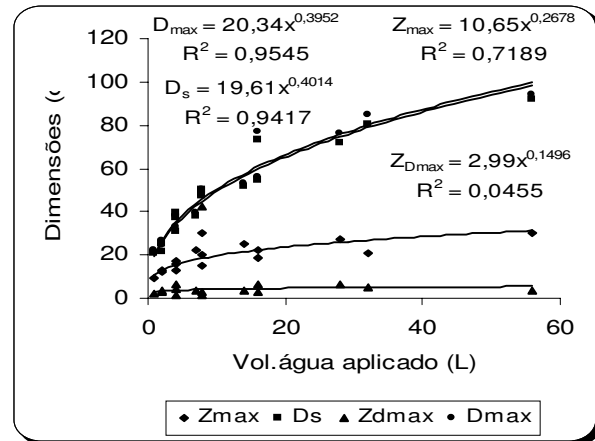
Cambissolo Háplico



Neossolo Quartzarênico



Latossolo Vermelho



Neossolo Flúvico

Figura 7. Dimensões do bulbo molhado em função do volume de água aplicado para os solos estudados

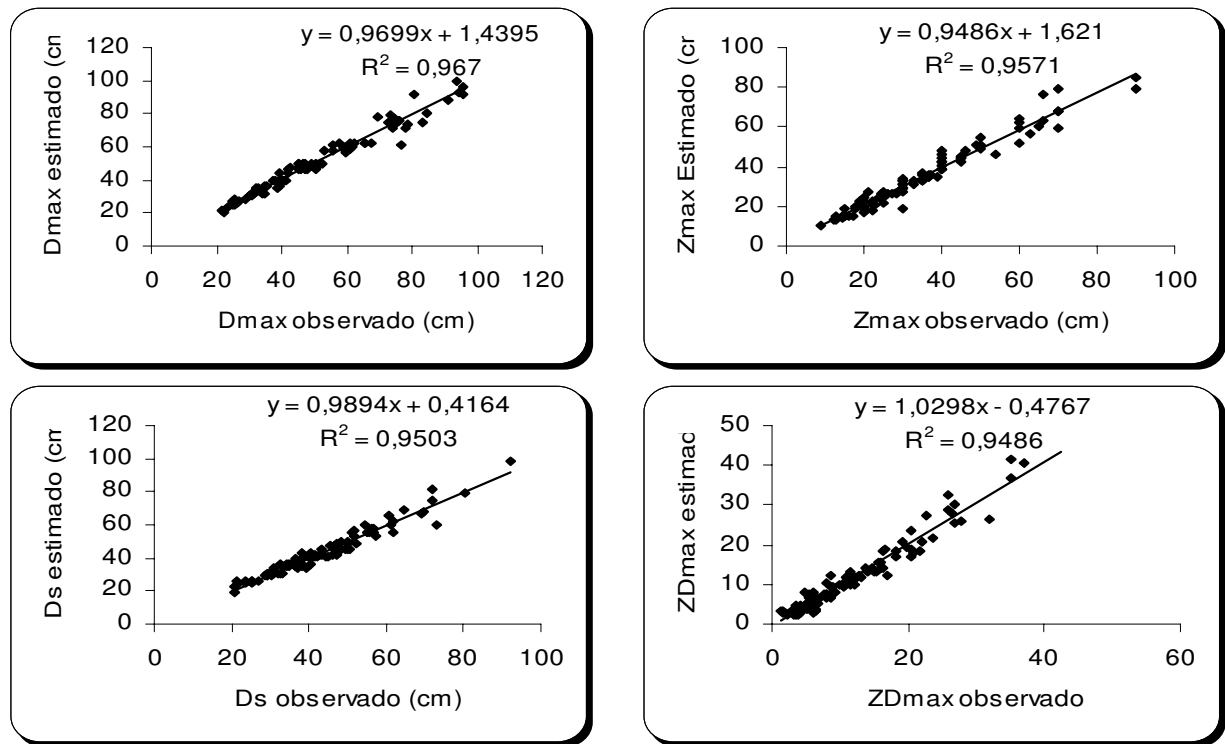


Figura 8. Valores estimados em função do observado para D_{max} , Z_{max} , D_s e Z_{Dmax} em função do volume de água aplicado para todos os solos estudados

5.1.3 Diâmetro do bulbo molhado em função da profundidade (modelo quadrático)

Utilizando a profundidade como abscissa (x) e o diâmetro como ordenada (y), fez-se o ajuste do modelo quadrático $D(Z) = a + bZ + cZ^2$ para todas as combinações q e t em todos os solos estudados, Tabelas 50 e 51. Observa-se que o modelo ajustou bem aos dados com elevado coeficiente de determinação, com média para todos os solos superior a 95%. Uma vantagem de se utilizar esta metodologia é a estimativa dos valores de Z_{Dmax} e D_{max} , como também a obtenção do volume molhado. Além disso, os parâmetros do modelo quadrático estão relacionados com as dimensões do bulbo, da forma que $a = D_s$ e

$b = \frac{2(D_{max} - D_s)}{Z_{Dmax}}$. Para o parâmetro c existem duas condições: 1) para $D(Z_{max}) = 0$,

$c = \frac{-D_{max}}{(Z_{max} - Z_{Dmax})^2}$ e 2) para $D(Z_{max}) \neq 0$ tem-se $c = \frac{D_f - D_{max}}{(Z_{max} - Z_{Dmax})^2}$, em que

$$D_f = a + bZ_{max} + cZ_{max}^2.$$

Tabela 49. Valores de MSD, RMSD e seus componentes SB, NU e LC e coeficiente de determinação (R^2) para avaliação dos valores estimados e observados pelo modelo potencial para Z_{max} , D_{max} , D_s e Z_{Dmax} em função do volume de água aplicado (L) para os solos estudados

Solo	MSD	RMSD	SB	NU	LC	R^2
<i>Z_{max}</i>						
LC	7,6121	2,759	0,0121	0,1257	7,4743	0,9643
AVA	5,6074	2,368	0,0238	0,3910	5,1926	0,9850
CH	13,7663	3,7103	0,0108	0,1951	13,5604	0,9498
NQ	22,1022	4,7013	0,0106	0,5255	21,5661	0,9242
LVA	14,1023	3,7553	0,0729	1,6378	12,3916	0,9639
NF	6,9659	2,6393	0,2310	0,255	6,4799	0,8028
Todos	11,7423	3,4267	0,0024	0,063	11,6769	0,9617
<i>D_{max}</i>						
LC	3,2296	1,7971	0,0067	0,1865	3,0364	0,9898
AVA	12,7420	3,5696	0,0121	0,0542	12,6757	0,9635
CH	5,8666	2,4221	0,0001	0,1491	5,7174	0,9841
NQ	7,5867	2,7544	0,0181	0,3705	7,1981	0,9788
LVA	13,5954	3,6872	0,0004	1,0486	12,5464	0,9605
NF	28,9681	5,3822	0,0449	0,0046	28,9186	0,9416
Todos	11,8192	3,4379	0,0073	0,0024	11,8095	0,9671
<i>D_s</i>						
LC	3,4240	1,8504	0,0015	0,0038	3,4187	0,9745
AVA	3,6657	1,9146	0,0001	0,1791	3,4865	0,9684
CH	15,6523	3,9563	0,0001	1,4132	14,2390	0,9343
NQ	3,5130	1,8743	0,0011	0,0152	3,4967	0,9634
LVA	6,1049	2,4708	0,0009	0,3881	5,7159	0,9222
NF	26,8345	5,1802	0,028	0,7366	26,0699	0,9425
Todos	9,6870	3,1124	0,0001	0,3192	9,3677	0,9515
<i>Z_{Dmax}</i>						
LC	4,8934	2,2121	0,0120	1,5266	3,3548	0,9269
AVA	3,4514	1,8578	0,0001	0,3042	3,1471	0,9518
CH	4,6505	2,1565	0,1655	0,3069	4,1781	0,9148
NQ	6,6631	2,5813	0,0001	0,8123	5,8507	0,9349
LVA	2,8274	1,6815	0,0191	1,1508	1,6575	0,9768
NF	-	-	-	-	-	-
Todos	4,4974	2,1207	0,0008	0,5247	3,9719	0,9429

LC – Luvisolo Crômico, AVA - Argissolo Vermelho-Amarelo, CH – Cambissolo Háplico, NQ – Neossolo Quartzarênico, LVA – Latossolo Vermelho, NF – Neossolo Flúvico

Assim como nos modelos potencial e superfície de resposta, observa-se aumento nas dimensões do bulbo molhado com o aumento da vazão do emissor, sendo maior no diâmetro quando comparado com a profundidade. Estes resultados também foram obtidos por Schwartzman & Zur (1986) e Ah Koon et al. (1990), mas discordante dos obtidos por Assouline (2002), onde o mesmo justifica a diferença por ter trabalhado com microgotejadores com vazão de $0,25 \text{ L h}^{-1}$ e na presença de plantas; comenta ainda sobre a possibilidade das propriedades hidráulicas do solo terem contribuído para o resultado. O que se pode inferir é que a combinação entre os valores de q e t servirão para se obter um bulbo molhado de acordo com o desejado, principalmente com relação à cultura, já que o volume molhado pode ter influência no volume de solo explorado pelas plantas e, conseqüentemente, no padrão de absorção de água (Phene et al., 1991; Coelho & Or, 1999).

Como as dimensões do bulbo, principalmente D_{max} , estão relacionadas com o espaçamento entre os emissores e que, este cresce com o aumento da vazão do emissor (Bresler et al, 1971; Bresler, 1977; Souza, 2004), implica que solos com K_s e α (parâmetro do solo) baixos, o espaçamento entre os emissores é maior e, para solos com K_s e α maiores, o espaçamento entre os emissores é menor, implicando que o espaçamento entre os emissores pode ser aumentado com o aumento da vazão do emissor (Wooding, 1968 e Bresler, 1978).

Sendo o coeficiente a do modelo quadrático ($y = a + bZ + cZ^2$) igual a estimativa do diâmetro superficial (D_s) e fazendo a comparação deste pelo MSD com os valores de D_s observados, observa-se valores muito baixo de MSD para todos os solos, inclusive para o Neossolo Flúvico, que sempre apresenta os mais altos valores de MSD entre os solos estudados. Os baixos valores de MSD indicam a boa estimativa do diâmetro superficial pelo modelo, Tabela 52.

Tabela 50. Parâmetros do modelo quadrático ($D(Z) = a + bZ + cZ^2$), valores estimados de $Z_{D_{max}}$ e D_{max} para cada combinação de tempo e vazão para o Luvissole Crômico, Argissolo Vermelho-Amarelo e Cambissolo Háplico

Solo	Tempo (h)	Vazão (L h ⁻¹)	a	b	c	R ²	Z _{D_{max}} (cm)	D _{max} (cm)
Luvissole Crômico	1	1	24,96	0,3008	-0,0808	0,9998	1,86	25,24
	1	2	31,71	0,9081	-0,0919	0,9995	4,94	33,95
	1	4	38,11	0,5336	-0,0402	0,9966	6,64	39,88
	1	8	45,83	0,8024	-0,0510	0,9880	7,87	48,99
	2	1	28,86	1,0852	-0,1081	0,9832	5,02	31,59
	2	2	34,77	1,2720	-0,0730	0,9864	8,71	40,31
	2	4	41,86	1,2802	-0,0541	0,9794	11,83	49,43
	2	8	46,80	1,6068	-0,0516	0,9168	15,57	59,31
	4	1	32,08	1,3283	-0,0817	0,9857	8,13	37,48
	4	2	40,14	1,1260	-0,0483	0,9833	11,66	46,71
	4	4	47,03	1,6693	-0,0520	0,9619	16,05	60,43
	4	8	58,76	1,6452	-0,0402	0,9399	20,46	75,59
	7	1	39,26	0,6571	-0,0379	0,9866	8,67	42,11
	7	2	46,69	1,0986	-0,0340	0,9734	16,16	55,56
7	4	53,99	1,6786	-0,0354	0,9733	23,71	73,89	
7	8	67,87	1,7818	-0,0343	0,9710	25,97	91,01	
Argissolo Vermelho-Amarelo	1	1	24,13	0,6486	-0,0781	0,9550	4,15	25,48
	1	2	28,58	0,9910	-0,0781	0,9151	6,34	31,72
	1	4	35,86	0,9262	-0,0444	0,9887	10,43	40,69
	1	8	40,71	0,8108	-0,0357	0,9904	11,36	45,32
	2	1	28,98	0,7762	-0,0705	0,9921	5,50	31,11
	2	2	35,56	0,7786	-0,0437	0,9715	8,91	39,02
	2	4	43,57	1,0117	-0,0360	0,9825	14,05	50,68
	2	8	51,99	1,0721	-0,0322	0,9781	16,65	60,92
	4	1	33,27	1,1798	-0,0556	0,9400	10,61	39,52
	4	2	38,40	1,1674	-0,0382	0,9793	15,28	47,31
	4	4	47,70	1,9074	-0,0464	0,9795	20,55	67,30
	4	8	59,08	0,9266	-0,0204	0,9688	22,71	69,60
	7	1	37,44	1,3659	-0,0532	0,9611	12,84	46,21
	7	2	45,02	1,3617	-0,0327	0,9451	20,82	59,20
7	4	55,13	2,1220	-0,0398	0,9499	26,66	83,42	
7	8	62,08	1,8382	-0,0262	0,9458	35,08	94,33	
Cambissolo Háplico	1	1	21,41	1,0047	-0,1325	0,9986	3,79	23,31
	1	2	30,81	0,1480	-0,0452	0,8994	1,64	30,93
	1	4	37,54	0,6656	-0,0665	0,9903	5,00	39,21
	1	8	44,47	0,2942	-0,0244	0,9574	6,03	45,35
	2	1	28,53	0,9591	-0,1201	0,9907	3,99	30,45
	2	2	37,69	0,8565	-0,0763	0,9970	5,61	40,09
	2	4	51,27	0,4500	-0,0459	0,9584	4,90	52,37
	2	8	62,77	0,5701	-0,0326	0,9937	8,74	65,26
	4	1	33,72	1,4138	-0,1062	0,9854	6,66	38,43
	4	2	47,49	0,8776	-0,0468	0,9618	9,38	51,60
	4	4	54,07	1,3397	-0,0398	0,8354	16,83	65,34
	4	8	64,65	0,9560	-0,0264	0,9659	18,11	73,30
	7	1	41,82	0,9108	-0,0563	0,9935	8,09	45,50
	7	2	57,16	0,7795	-0,0318	0,9525	12,26	61,94
7	4	66,15	0,9989	-0,0245	0,9317	20,39	76,33	
7	8	66,93	2,1069	-0,0381	0,9259	27,65	96,06	

Tabela 51. Parâmetros do modelo quadrático ($D(Z) = a + bZ + cZ^2$), valores estimados de $Z_{D_{max}}$ e D_{max} para cada combinação de tempo e vazão para o Neossolo Quartzarênico, Latossolo Vermelho e Neossolo Flúvico

Solo	Tempo (h)	Vazão (L h ⁻¹)	a	b	c	R ²	Z _{D_{max}} (cm)	D _{max} (cm)
Neossolo Quartzarênico	1	1	25,15	0,6799	-0,1267	0,9970	2,68	26,06
	1	2	29,25	1,7994	-0,1459	0,9675	6,17	34,80
	1	4	38,19	0,6236	-0,0588	0,9939	5,30	39,85
	1	8	37,99	1,3648	-0,0557	0,9581	12,25	46,35
	2	1	29,22	0,8199	-0,0996	0,9786	4,12	30,91
	2	2	35,19	1,4870	-0,0953	0,9630	7,80	40,99
	2	4	42,09	1,5151	-0,0580	0,9705	13,06	51,98
	2	8	48,74	1,0783	-0,0330	0,7627	16,34	57,55
	4	1	33,43	1,0778	-0,0675	0,9549	7,98	37,73
	4	2	41,43	1,4252	-0,0655	0,9871	10,88	49,18
	4	4	43,32	1,7823	-0,0412	0,8472	21,63	62,60
	4	8	56,60	1,4250	-0,0277	0,9841	25,72	74,92
	7	1	36,98	1,0774	-0,0493	0,9365	10,93	42,86
	7	2	45,97	1,6617	-0,0458	0,9516	18,14	61,04
7	4	50,50	1,7926	-0,0282	0,9193	31,78	78,99	
7	8	59,02	2,1070	-0,0300	0,9630	35,12	96,01	
Latossolo Vermelho	1	1	20,63	0,4669	-0,0675	0,9993	3,46	21,44
	1	2	26,20	0,7172	-0,0551	0,9766	6,51	28,54
	1	4	30,75	1,4580	-0,0638	0,8989	11,43	39,08
	1	8	34,35	1,6236	-0,0593	0,9614	13,69	45,47
	2	1	23,61	0,6323	-0,0453	0,9526	6,98	25,82
	2	2	29,66	0,9926	-0,0414	0,9641	11,99	35,61
	2	4	39,82	0,8090	-0,0278	0,9431	14,55	45,71
	2	8	40,83	2,1353	-0,0559	0,9602	19,10	61,22
	4	1	32,54	0,4621	-0,0236	0,9599	9,79	34,80
	4	2	32,33	1,9496	-0,0608	0,9237	16,03	47,95
	4	4	44,36	1,4815	-0,0335	0,7895	22,11	60,74
	4	8	45,90	2,0226	-0,0378	0,9071	26,75	72,95
	7	1	33,09	1,1646	-0,0386	0,8881	15,09	41,88
	7	2	38,97	2,0947	-0,0527	0,9398	19,87	59,79
7	4	40,71	2,8086	-0,0530	0,9610	26,50	77,92	
7	8	52,83	1,4994	-0,0202	0,8465	37,11	80,65	
Neossolo Flúvico	1	1	20,80	1,4919	-0,3304	0,9999	2,26	22,48
	1	2	24,85	1,1556	-0,1807	0,9953	3,20	26,69
	1	4	39,43	-0,4706	-0,1615	0,9996	1,46	38,40
	1	8	51,58	-2,1571	0,0254	0,8700	-	-
	2	1	21,21	1,8700	-0,2583	0,9948	3,62	24,59
	2	2	37,88	-0,6432	-0,0519	0,9882	6,20	31,90
	2	4	47,20	0,4733	-0,1667	0,9994	1,42	47,54
	2	8	54,37	0,9836	-0,1597	0,9999	3,08	55,88
	4	1	30,92	0,8941	-0,1093	0,9906	4,09	32,75
	4	2	49,42	0,6257	-0,1076	0,9966	2,91	50,33
	4	4	70,37	2,0397	-0,1584	0,8248	6,44	76,94
	4	8	78,30	2,5688	-0,2523	0,9622	5,09	84,84
	7	1	38,15	0,6390	-0,0820	0,9880	3,90	39,39
	7	2	51,73	0,7450	-0,0974	0,9979	3,82	53,15
7	4	71,17	1,5337	-0,1228	0,9865	2,68	26,06	
7	8	92,93	0,5207	-0,0771	0,9560	6,17	34,80	

Tabela 52. Valores de MSD, RMSD e seus componentes SB, NU e LC e coeficiente de determinação para avaliação dos valores estimados e observados pelo modelo quadrático para o diâmetro superficial em função de Z_{max} para os solos estudados

Solo	MSD	RMSD	SB	NU	LC	R ²
LC	1,9333	1,3904	1,1664	0,3539	0,4130	0,9969
AVA	1,1509	1,0728	0,0732	0,1201	0,9576	0,9913
CH	2,5528	1,5977	0,1122	0,4285	2,0121	0,9907
NQ	2,1630	1,4707	0,6531	0,1211	1,3888	0,9855
LVA	3,8257	1,9560	1,6560	0,0178	2,1519	0,9707
NF	0,8623	0,9286	0,0769	0,1119	0,6735	0,9985
Todos	2,0942	1,4471	0,4631	0,0338	1,5972	0,9917

LC – Luvisolo Crômico, AVA - Argissolo Vermelho-Amarelo (AVA), CH – Cambissolo Háplico, NQ – Neossolo Quartzarênico, LVA – Latossolo Vermelho, NF – Neossolo Flúvico

5.1.4 Dimensões do bulbo molhado em função do diâmetro superficial (D_s)

Devido a grande variabilidade das características hidráulicas dos solos e a necessidade de muitas informações pelos modelos numéricos e analíticos, estes podem ser de pouca utilidade prática. Assim, estudo de calibração das dimensões do bulbo em função de características de fácil medição no campo pode ser útil para o dimensionamento e manejo da irrigação. Desta forma, avaliou-se as dimensões do bulbo molhado D_{max} , Z_{max} e Z_{Dmax} em função do diâmetro superficial (D_s) para os solos estudados, Figura 9.

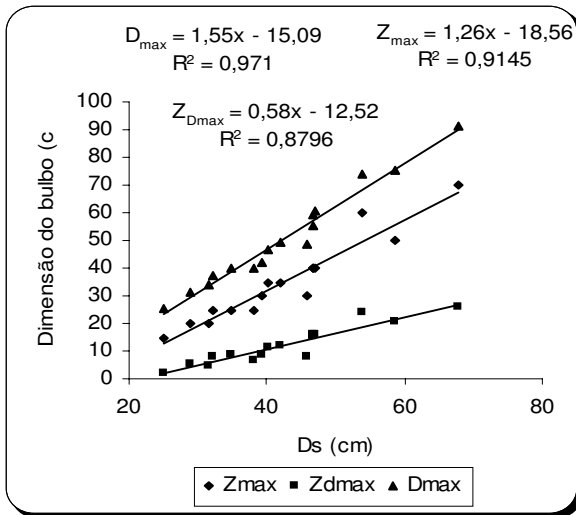
Para os seis solos, observa-se que o diâmetro superficial pode ser utilizado para estimar os valores D_{max} , Z_{max} e Z_{Dmax} , e que a relação é linear positiva. Avaliando a sensibilidade das dimensões em função de D_s pela declividade da reta ajustada (dy/dx), verifica-se que a maior sensibilidade em todos os solos é de D_{max} , ou seja, para uma variação em D_s implica numa variação maior em D_{max} , e a menor sensibilidade foi observada para Z_{Dmax} .

A utilização do diâmetro superficial para estimar as dimensões do bulbo pode estar embasada no princípio de que este depende da condutividade hidráulica do solo e da vazão do emissor, sendo D_s maior para solos com baixa condutividade hidráulica e, para o mesmo solo, D_s é proporcional à vazão do emissor e esta, aumenta D_{max} numa proporção absoluta maior que Z_{max} , o que explica a maior sensibilidade para a relação $D_{max} = f(D_s)$.

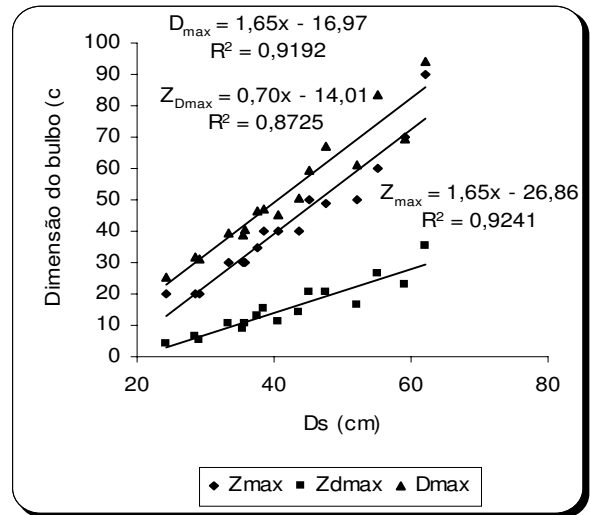
Avaliando os valores do MSD e seus componentes, observa-se na Tabela 53, que os valores de MSD foram maiores que os obtidos com o modelo potencial e superfície de resposta e que os coeficientes de determinação da reta entre os valores estimados e

observados também foram menores, com exceção para D_{max} , porém o principal problema é a falta de correlação (LC), com mais de 90% do MSD, o que pode ser comprovado observando a dispersão dos dados (Figura 9).

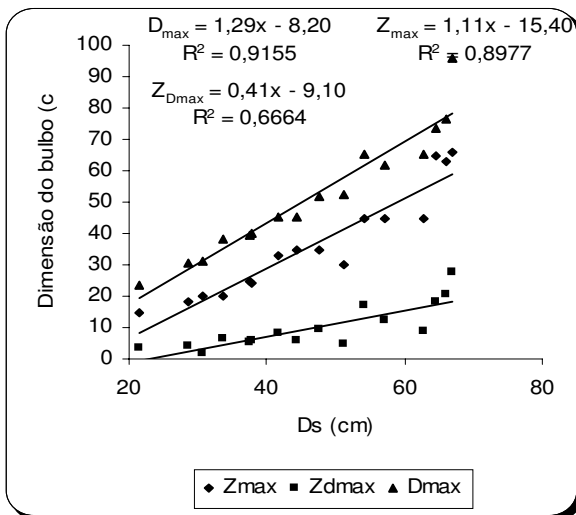
Além da facilidade da medição de D_s no campo e de sua relação com outras dimensões do bulbo, o D_s tem sua importância para o dimensionamento e manejo da irrigação. Para Lubana & Narda (1998) a determinação do diâmetro molhado superficial é necessária para estimar o espaçamento entre os emissores, o comprimento da lateral para uma variedade de solos e condições climáticas, além da estimativa do diâmetro e da profundidade molhada máxima. Os mesmos autores verificaram em experimento com tomate, que o diâmetro molhado foi superior a 2,0 m, sendo que as raízes das plantas não passaram dos 60 cm. A explicação dos autores é que a aplicação de água era realizada a cada 5-7 dias com a ETC acumulada. Essa aplicação acumulada faz com que o diâmetro superficial seja maior do que com aplicação de água com frequência diária. Os mesmos resultados foram obtidos por Jury & Earl (1977), com diâmetro superficial maior quando o mesmo volume de água era aplicado semanalmente, quando comparado com aplicação diária. Desta maneira, a escolha da vazão do emissor pode ser feita baseada na percolação em função do diâmetro molhado. Isso implica que, quanto menor o espaçamento entre os emissores, menor deve ser a vazão para evitar a sobreposição exagerada entre os bulbos. Thorburn et al. (2003) comentam que para cana de açúcar na Austrália, com base na textura do solo, a recomendação de espaçamento entre emissores é de 40 cm para solos arenosos e 60 cm para os demais solos. Porém em três localidades da Austrália, com aplicação de 5 mm de água na irrigação da cana de açúcar o diâmetro do bulbo molhado foi de aproximadamente 24, 38 e 47 cm, para solos arenosos, franco arenoso e argiloso, respectivamente, contrariando a recomendação com base na textura do solo.



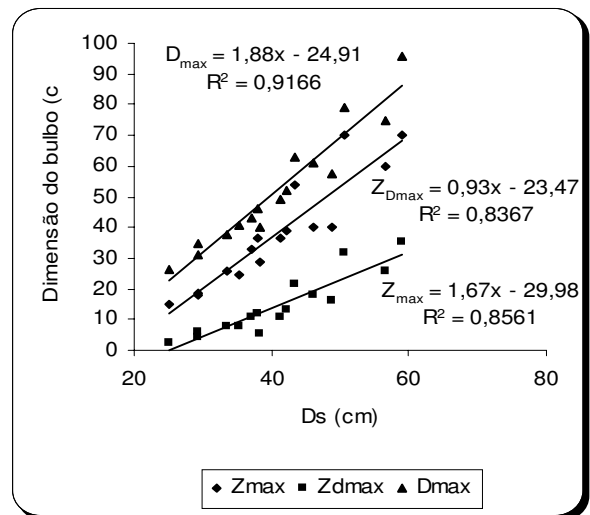
Luvissoilo Crômico



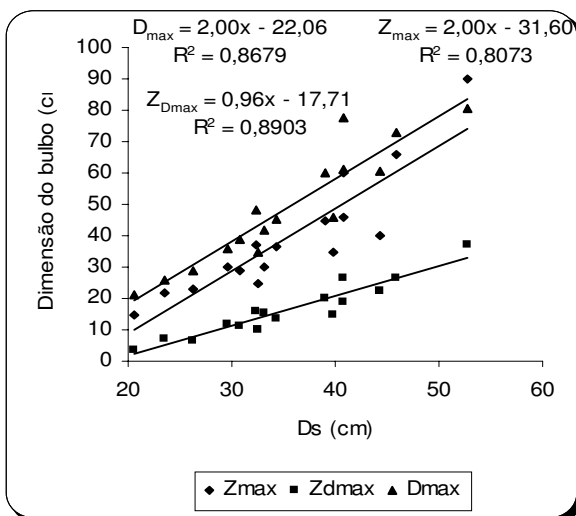
Argissolo Vermelho-Amarelo



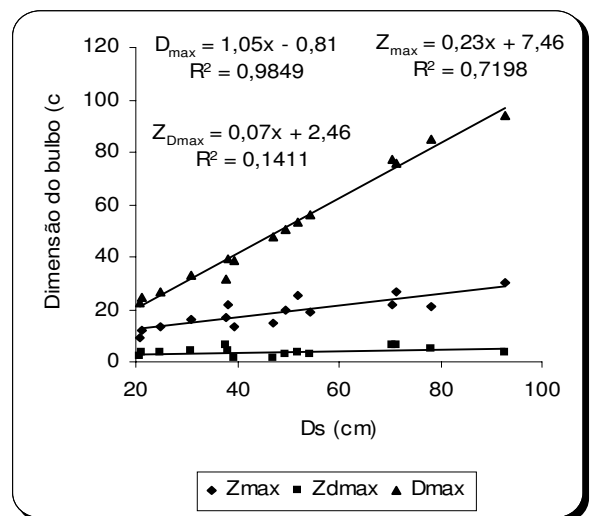
Cambissolo Háplico



Neossolo Quartzarênico



Latossolo Vermelho



Neossolo Flúvico

Figura 9. Valores de D_{max} , Z_{max} e Z_{Dmax} em função do diâmetro superficial (D_s) para os solos estudados

Tabela 53. Valores de MSD, RMSD e seus componentes SB, NU e LC e coeficiente de determinação para avaliação dos valores estimados e observados pelo modelo linear para Z_{max} , D_{max} e Z_{Dmax} em função do diâmetro superficial (D_s) para os solos estudados

Solo	MSD	RMSD	SB	NU	LC	R ²
Z_{max}						
LC	19,4023	4,4048	1,5625	0,5222	17,3176	0,9173
AVA	34,9210	5,9094	0,0885	0,0891	34,7434	0,8995
CH	22,5815	4,752	0,0841	0,3644	22,1330	0,918
NQ	34,2342	5,851	2,0736	0,1903	31,9703	0,8876
LVA	79,7985	8,933	0,2665	0,7884	78,7436	0,7703
NF	9,6852	3,1121	0,0013	0,0071	9,6768	0,7055
Todos	33,6864	5,804	0,2111	0,2068	33,2685	0,891
D_{max}						
LC	10,5820	3,253	2,6188	0,7983	7,1649	0,9759
AVA	25,5166	5,0514	0,1041	0,3777	25,0348	0,9279
CH	16,9645	4,1188	0,0399	0,2409	16,6837	0,9536
NQ	21,0424	4,5872	1,8418	0,2398	18,9608	0,9441
LVA	33,0510	5,749	6,8307	0,004	26,2163	0,9175
NF	4,8514	2,2026	0,0336	0,0694	4,7484	0,9904
Todos	18,8130	4,3374	1,1198	0,075	17,6182	0,9509
Z_{Dmax}						
LC	5,6444	2,3758	0,3996	0,1067	5,1381	0,8881
AVA	7,9784	2,8246	0,0681	0,0494	7,8609	0,8796
CH	12,7713	3,5737	0,0504	0,0002	12,7207	0,7404
NQ	12,7949	3,577	0,7609	0,0694	11,9646	0,8669
LVA	10,6367	3,2614	1,4649	0,1038	9,0680	0,8732
NF	-	-	-	-	-	-
Todos	9,9654	3,1568	0,4096	0,0517	9,5041	0,8633

LC – Luvissolo Crômico, AVA - Argissolo Vermelho-Amarelo, CH – Cambissolo Háplico, NQ – Neossolo Quartzarênico, LVA – Latossolo Vermelho, NF – Neossolo Flúvico

5.1.5 Relação D_{max}/Z_{max} usando modelo de superfície de resposta

Para avaliar a relação D_{max}/Z_{max} ajustou-se o modelo de superfície de resposta em função da vazão do emissor e do tempo de aplicação de água de duas maneiras: a primeira

$\frac{D_{max}}{Z_{max}} = a \cdot t^b \cdot q^c$ e a segunda $\frac{D_{max}}{Z_{max}^{1/3}} = a \cdot t^b \cdot q^c$. Esta última é baseada na equação

$D = \beta \cdot Z^{1/3} \cdot \left(\frac{q}{K_s}\right)^{1/3}$ que pode ser expressada $\frac{D}{Z^{1/3}} = \beta \cdot \left(\frac{q}{K_s}\right)^{1/3}$ e estimou-se $\frac{D_{max}}{Z_{max}^{1/3}}$ em

função de q e t .

Pelo ajuste do modelo de superfície de resposta fica evidente que a relação $\frac{D_{\max}}{Z_{\max}^{1/3}} = a \cdot t^b \cdot q^c$ explica melhor que a relação $\frac{D_{\max}}{Z_{\max}} = a \cdot t^b \cdot q^c$, Tabela 54, principalmente pelos maiores valores do coeficiente de determinação do primeiro. Isso implica que para o cálculo no dimensionamento e manejo da irrigação, pode-se usar a relação $D_{\max} / Z_{\max}^{1/3}$, que também pode ser estimada pelo diâmetro superficial (D_s), Figura 10. Apesar da relação $D_{\max} / Z_{\max}^{1/3}$ ter apresentado melhor relação com q e t , Schwartzman & Zur (1986) verificaram que a relação D_{\max}/Z_{\max} tende a diminuir com o aumento da condutividade hidráulica do solo e que, um aumento no volume de água aplicado pode decrescer a relação, principalmente em solos com textura arenosa. Além disso, um aumento na vazão do emissor pode aumentar D_{\max}/Z_{\max} , principalmente em solos de textura média a argilosa. Segundo Zur (1996) o volume do bulbo também pode ser estimado pelo número de possibilidades da relação D_{\max}/Z_{\max} e a partir daí, escolher o espaçamento e a vazão dos emissores para satisfazer a relação D_{\max}/Z_{\max} .

Utilizando os dados da vazão do emissor e o tempo de aplicação para Z_{\max} de 40 cm da Tabela 47, estimou-se os valores de $D_{\max} / Z_{\max}^{1/3}$ para todos os solos, Tabela 55. Com esses valores foram obtidos os valores estimados de D_{\max} . Analisando os valores obtidos, verifica-se que os valores de D_{\max} , para cada vazão e tempo de aplicação em cada solo, foi praticamente o mesmo, podendo-se inferir que a relação $D_{\max} / Z_{\max}^{1/3}$ pode ser utilizada para auxiliar no dimensionamento do sistema de irrigação.

Tabela 54. Coeficientes do modelo superfície de resposta para as relações D_{max}/Z_{max} e $D_{max}/Z_{max}^{1/3}$ em função de q ($L h^{-1}$) e t (h) e coeficiente de determinação para os solos estudados

Solo	a	b	c	R ²
$\frac{D_{max}}{Z_{max}} = a \cdot t^b \cdot q^c$				
Luvissole Crômico	1,69	-0,1035	-0,0243	0,7630
Argissolo Vermelho-Amarelo	1,47	-0,0512	-0,0843	0,4026
Cambissolo Háplico	1,74	-0,0561	-0,0936	0,4057
Neossolo Quartzarênico	1,78	-0,1082	-0,1056	0,5815
Latossolo Vermelho	1,34	-0,0223	-0,0590	0,1939
Neossolo Flúvico	2,01	-0,0079	0,2646	0,6768
$\frac{D_{max}}{Z_{max}^{1/3}} = a \cdot t^b \cdot q^c$				
Luvissole Crômico	10,22	0,1617	0,2160	0,9864
Argissolo Vermelho-Amarelo	9,71	0,2164	0,1767	0,9014
Cambissolo Háplico	10,14	0,2092	0,1923	0,9324
Neossolo Quartzarênico	10,16	0,1940	0,1892	0,9327
Latossolo Vermelho	9,19	0,2085	0,1962	0,8893
Neossolo Flúvico	9,60	0,2363	0,3637	0,9080

Tabela 55. Valores da relação $D_{max}/Z_{max}^{1/3}$ em função da vazão do emissor ($L h^{-1}$) e do tempo de aplicação de água (h) e valores de D_{max} para obter a profundidade do bulbo molhado de 40 cm para os solos estudados

	Luvissole Crômico	Argissolo Vermelho-Amarelo	Cambissolo Háplico	Neossolo Quartzarênico	Latossolo Vermelho	Neossolo Flúvico
q ($Z=40$ cm) ^(*)	3,366	3,019	3,446	3,144	3,354	12,549
t ($Z=40$ cm) ^(*)	3,975	2,868	3,505	3,424	3,117	15,255
$D_{max}/Z_{max}^{1/3}$	16,604	14,827	16,722	16,022	14,769	45,864
D_{max}	56,784	50,706	57,190	54,794	50,510	156,851
D_{max} ^(*)	56,777	50,696	57,000	54,534	50,746	172,557

^(*) valores obtidos na Tabela 47

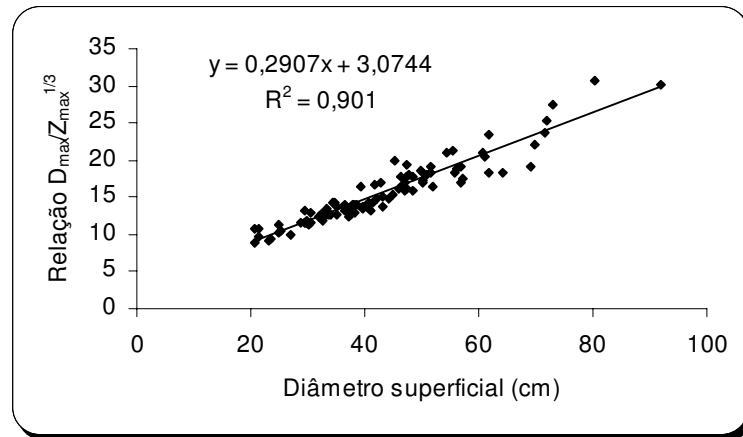
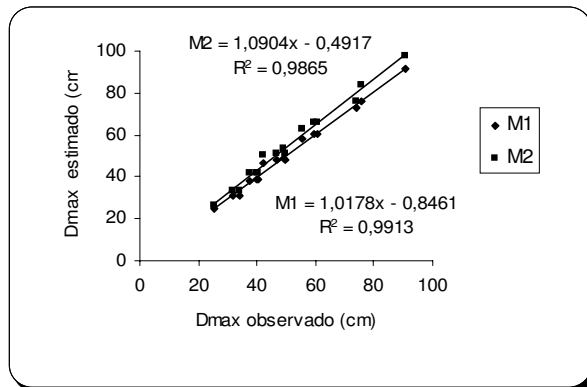


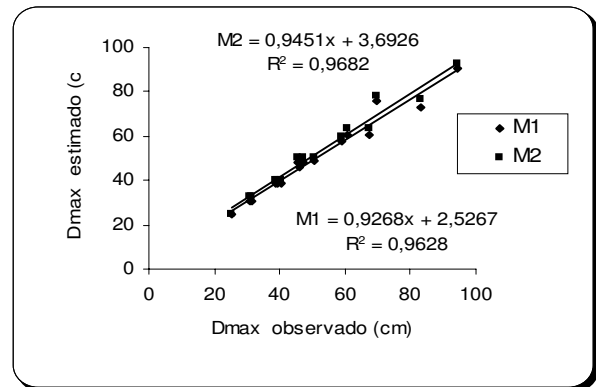
Figura 10. Valores da relação $D_{max} / Z_{max}^{1/3}$ em função do diâmetro superficial para todos os solos

5.1.6 Diâmetro máximo estimado pelo Modelo 1 e Modelo 2

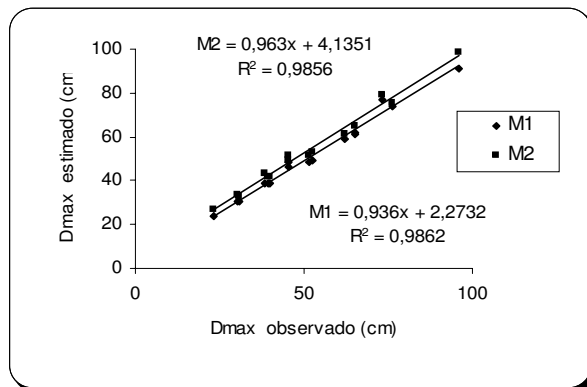
Para avaliar os modelos semi-empíricos das equações 12 e 13, avaliou-se os valores estimados de D_{max} , em função das variáveis independentes de cada modelo e os relacionou com os valores estimados em função dos observados, Figura 11, em que se observa valores estimados pela equação 14 (Modelo 2) ligeiramente superiores aos da equação 12 (Modelo 1), com a declividade da rela superior para o Modelo 2 porém, apesar da declividade maior, esta se aproxima mais de 1. Avaliando o MSD, os valores para o Modelo 2 foram superiores em média em 9,1609 (sem levar em consideração o Neossolo Flúvico), com exceção do Argissolo Vermelho-Amarelo, onde foi menor. Avaliando a decomposição do MSD, apesar dos valores superiores para o Modelo 2, estes foram maiores em 31,776, 0,1278 e 0,3007 para SB, NU e LC, respectivamente. Comparando com os outros modelos que estimam D_{max} , verifica-se que o MSD médio para os solos (sem o Neossolo Flúvico) foi superior para os Modelos 1 e 2, quando comparados com o modelo potencial, tanto em função de q quanto de t , da superfície de resposta em função de q e t e do volume de água aplicado; sendo os dois modelos com valores médios inferiores apenas a estimativa de D_{max} em função de D_s . A vantagem de se utilizar os Modelos 1 e 2 é que estes não dependem de parâmetros que deverão ser estimados de dados de campo e ajustados por regressão, principalmente o Modelo 1 que depende de três variáveis facilmente obtidas, q e t e D_s , facilmente medido no campo. Também não apresenta complexidade em seu cálculo, diferente dos modelos numéricos e analíticos, e que, apesar do MSD superior aos modelos potencial e de superfície



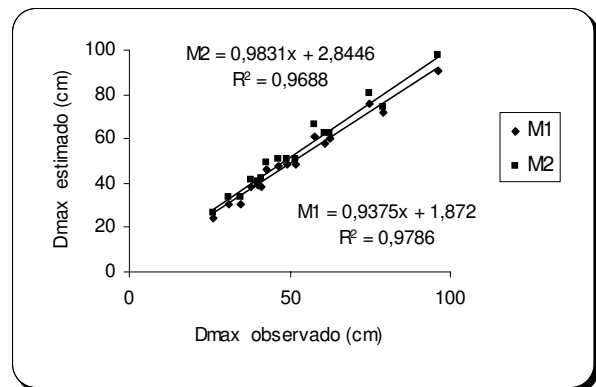
Luvisolo Crômico



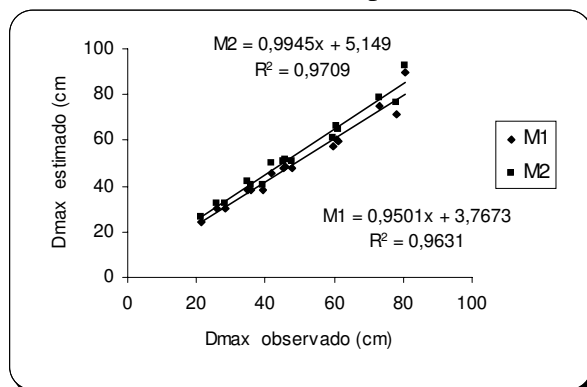
Argissolo Vermelho-Amarelo



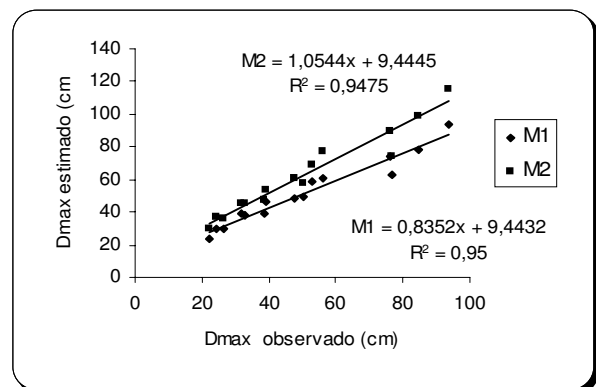
Cambissolo Háplico



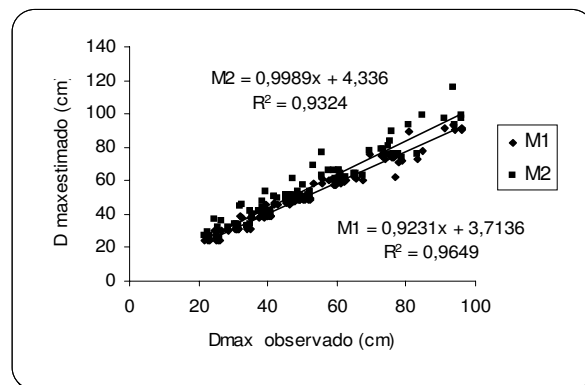
Neossolo Quartzarênico



Latossolo Vermelho



Neossolo Flúvico



Todos os solos

Figura 11 Diâmetro máximo estimado pelo Modelo 1 (M1) e Modelo 2 (M2) em função do observado para os solos estudados

de resposta, estes estão sendo avaliados em seis solos e em condição de campo, diferente da maioria dos trabalhos que são realizados em laboratório e em condições de homogeneidade do solo, principalmente quanto a textura e estrutura dos solos, como Hachum et al. (1976), Folch & Fábrega (1999) e Nogueira et al. (2000).

Tabela 56. Valores de MSD, RMSD e seus componentes SB, NU e LC e coeficiente de determinação (R^2) para avaliação dos valores estimados e observados pelos modelos das equações 12 e 14 para D_{max} para os solos estudados

Solo	MSD	RMSD	SB	NU	LC	R^2
Modelo 1						
LC	2,8133	1,6773	0,0034	0,2118	2,5981	0,9913
AVA	15,0102	3,8743	1,6344	0,4685	12,9073	0,9628
CH	7,0056	2,6468	1,1382	0,9172	4,9502	0,9862
NQ	9,7438	3,1215	1,8903	0,5827	7,2708	0,9786
LVA	13,5564	3,6819	1,7890	0,0559	11,7115	0,9631
NF	32,8512	5,7316	1,3310	6,8352	24,6850	0,9500
Todos	13,2933	3,6460	0,0438	0,6520	12,5975	0,9649
Modelo 2						
LC	24,0208	4,9011	16,7449	3,2562	4,0197	0,9865
AVA	11,9329	3,4544	0,7058	0,1915	11,0356	0,9682
CH	10,2112	3,1955	4,8549	0,1861	5,1702	0,9856
NQ	14,5062	3,8087	3,8598	0,0712	10,5752	0,9688
LVA	33,2629	5,7674	23,8345	0,1825	9,2459	0,9456
NF	180,2736	13,4266	148,4422	5,9507	25,8807	0,9475
Todos	44,2850	6,6547	18,3068	1,7016	24,2766	0,9324

LC – Luvisolo Crômico, AVA - Argissolo Vermelho-Amarelo, CH – Cambissolo Háplico, NQ – Neossolo Quartzarênico, LVA – Latossolo Vermelho, NF – Neossolo Flúvico

5.1.7 Condutividade hidráulica obtida pela equação de Schwartzman & Zur (1986)

Uma das principais propriedades do solo utilizada no manejo da irrigação localizada é a condutividade hidráulica. Na irrigação com ponto de emissão superficial, forma-se uma região próxima ao emissor que é saturada, denominada de charco ou disco molhado e, radialmente ao charco, a umidade diminui até a frente de molhamento, conseqüentemente, a condutividade hidráulica diminui. Sendo a equação proposta por Schwartzman & Zur (1986) igual a $d = 1,32 \cdot z^{0,35} \cdot q^{0,33} \cdot K_s^{-0,33}$ e, substituindo os valores de d , z , q e t , estimou-se a condutividade hidráulica do bulbo por

$K_S = \left(\frac{D_{\max}}{1,32 \cdot Z_{\max}^{0,35} \cdot q^{0,33}} \right)^{-1/0,33}$, e estes foram ajustados em função de q e t pela superfície

de resposta $K(\theta) = a \cdot t^b \cdot q^c$. Os valores dos coeficientes do modelo podem ser observados na Tabela 57.

O modelo de superfície de resposta estimou satisfatoriamente os dados da condutividade hidráulica do solo sendo caracterizada pela diminuição desta em função do tempo de aplicação de água (coeficiente negativo) e um aumento em função da vazão do emissor (coeficiente positivo). Porém para o Neossolo Flúvico, além de se verificar o menor coeficiente de determinação, o mesmo diferiu dos demais solos, com os coeficientes a e b negativos. Possivelmente isto se deva ao que já foi comentado anteriormente, ou seja, maior variabilidade espacial deste solo, tanto na vertical como na horizontal, por serem solos formados por depósitos de material aluvional.

Tabela 57. Coeficientes do modelo superfície de resposta para a relação $K(\theta) = a \cdot t^b \cdot q^c$ para os solos estudados

Solo	a	b	c	R ²
Luvissolo Crômico	2,34	-0,4743	0,4063	0,9768
Argissolo Vermelho-Amarelo	2,46	-0,6222	0,6004	0,9258
Cambissolo Háplico	2,47	-0,7229	0,5232	0,9160
Neossolo Quartzarênico	2,05	-0,6221	0,6238	0,9557
Latossolo Vermelho	3,87	-0,5883	0,3336	0,8887
Neossolo Flúvico	2,83	-0,6457	-0,0156	0,7069

Apesar que no modelo de Schwartzman & Zur (1986) a condutividade hidráulica usada ser a saturada (K_s), sabe-se que apenas no charco (disco saturado) é que a condutividade hidráulica é máxima, ou seja, K_s . Nesse sentido, observando os valores obtidos por

$K_S = \left(\frac{D_{\max}}{1,32 \cdot Z_{\max}^{0,35} \cdot q^{0,33}} \right)^{-1/0,33}$ que estes variam com os valores de q e t . Quando

comparados com os valores de K_s obtidos pela metodologia do charco proposta por Shani et al. (1987), os valores foram menores (Tabelas 14, 18 e 23). Para Nogueira et al. (2000) a condutividade hidráulica saturada usada no modelo de Schwartzman & Zur (1986) representa todo o perfil onde se insere o volume molhado e que a umidade deste, varia radialmente (Zur, 1996). Levin et al. (1979) comentam que a umidade do solo no bulbo molhado não é uniforme

e decresce radialmente do emissor, ou seja, que no interior do bulbo existe região saturada e não saturada e, como a condutividade hidráulica é dependente da umidade do solo, e que esta varia dentro do bulbo, a condutividade hidráulica também variará. Souza et al. (2001) testando o modelo de Schwartzman & Zur (1986), comentam que o aspecto negativo do modelo é o uso da condutividade hidráulica saturada representando todo o volume molhado, não considerando a variabilidade de umidade dentro do bulbo. Avaliando a variabilidade da umidade dentro do bulbo molhado Souza & Matsura (2004) verificaram que o maior armazenamento de água ocorreu na camada de 0 a 20 cm, variando de 55 a 84% da água aplicada que foi distribuída nesta camada, e 16 a 34% na camada de 20-40 cm, para as vazões dos emissores de 2,0 e 4,0 L h⁻¹, respectivamente. Resultados semelhantes também foram obtidos por Assouline (2002) trabalhando com microgotejadores, com maior umidade do solo na camada de 0 a 30 cm.

Souza et al (2001) fazem uma crítica ao modelo de Schwartzman & Zur (1986), afirmando que o mesmo pode ser aplicado apenas para condição de infiltração de água no solo, enquanto que outros modelos, como os propostos por Healy & Warrick (1988) e Simunek et al. (1993), podem ser utilizados tanto para infiltração como para redistribuição, porém, principalmente, no caso do segundo modelo, seu sucesso está amplamente condicionado as informações das condições de contorno do experimento.

5.2 Volume do bulbo molhado

5.2.1 Modelos para determinação do volume do bulbo molhado

O conhecimento das dimensões do bulbo molhado tem importância para a determinação da profundidade e da largura máxima no planejamento da irrigação evitando assim, perdas de água por lixiviação e a superposição exagerada dos emissores. Do ponto de vista agrônomo, as dimensões do bulbo são úteis para se determinar o volume de solo molhado pela irrigação localizada, volume esse onde se concentram as raízes das plantas e útil nos cálculos da lamina de água a aplicar e na quantidade de nutriente no volume molhado, sendo fundamental para o programa de fertirrigação.

Considerando o volume do bulbo obtido pela metodologia proposta por Zur (1996) como referência, observa-se que os volumes dos bulbos obtidos para cada solo em função da vazão do emissor e do tempo de aplicação de água foram semelhantes, diferindo

apenas para a metodologia proposta por Narda & Chawla (2002), que superestima o volume do bulbo em aproximadamente o dobro, Tabelas 58 e 59. Isso se deve a equação utilizada por esses autores para o cálculo do volume apresentar um equívoco. Sendo a equação sugerida pelos autores igual a $V = \frac{4}{3}\pi r^2 z$ (possivelmente com base no volume da esfera que é dado por $V_e = \frac{4}{3}\pi r^3$) e, considerando um bulbo molhado circunscrito em um poliedro retangular (Figura 2), seu volume necessariamente tem que ser menor que o do poliedro. Sendo o volume do poliedro retangular igual $V_p = D_{\max}^2 \cdot Z_{\max}$ (onde D_{\max} equivale ao maior diâmetro do bulbo circunscrito no poliedro que é igual a um dos seus lados). Analisando o modelo sugerido por Narda & Chawla (2002) e fazendo a substituição do raio por $D_{\max}/2$ tem-se $V_b = \frac{\pi}{3} D_{\max}^2 \cdot Z_{\max}$, como $V_p = D_{\max}^2 \cdot Z_{\max}$, tem-se, $V_b = \frac{\pi}{3} V_p$. Como a relação $\pi/3$ é maior que 1, o volume proposto por Narda & Chawla (2002) é superior ao volume do poliedro que o bulbo está circunscrito. Nesse sentido buscou-se uma errata do trabalho em edições posteriores a publicação do trabalho e nada foi encontrado. A correção necessária é inverter 4/3 para 3/4 (como será demonstrado na seqüência). Assim $V = \frac{3}{4}\pi r^2 z$ será chamado de Modelo 5 nas Tabelas 58 e 59, onde se observa boa relação com o volume obtidos pela metodologia proposta por Zur (1996).

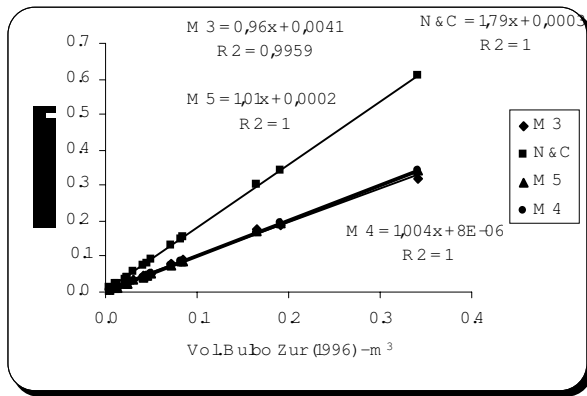
Para comparar as metodologias, plotou-se no eixo das abscissas o volume tomado como referência (Zur, 1996) e na ordenada os valores do volume do bulbo para as outras metodologias, Figura 12. Estatisticamente, para comparação de modelos, o coeficiente angular e o intercepto da reta devem se aproximar de 1 e 0, respectivamente, onde se verifica que, com exceção do modelo proposto por Narda & Chawla (2002), os modelos da revolução do modelo quadrático (Modelo 3), correção para o volume do cilindro (Modelo 4) e o Modelo 5 estimaram satisfatoriamente o volume do bulbo molhado, destacando na Figura 12 o ajuste feito para todos os solos. Assim, pode-se inferir que as metodologias testadas, com exceção do modelo proposto por Narda & Chawla (2002), estimam com bastante precisão o volume molhado.

Tabela 58. Volume de solo molhado (m^3) estimado segundo Zur (1996), Narda & Chawla (2002) (N&C), pela revolução do modelo quadrático(M3) e pela correção do volume do cilindro (M4) e para Modelo 5 (M5) em função do tempo de aplicação de água e vazão do emissor para o Luvissole Crômico, Argissolo Vermelho-Amarelo e Cambissolo Háplico

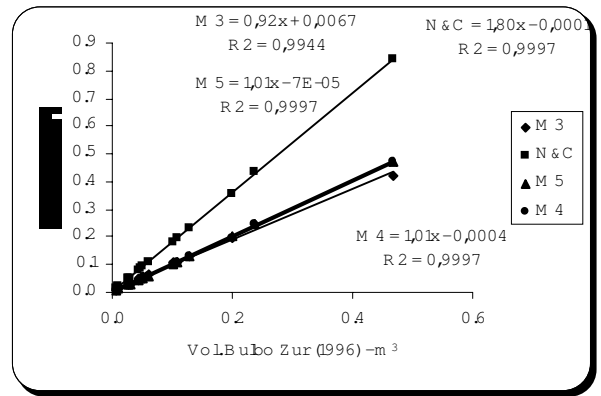
Solo	Tempo (h)	Vazão (L h ⁻¹)	Zur	N&C	M3	M4	M5
Luvissole Crômico	1	1	0,0053	0,0100	0,0055	0,0056	0,0056
	1	2	0,0134	0,0241	0,0134	0,0135	0,0136
	1	4	0,0232	0,0416	0,0263	0,0232	0,0234
	1	8	0,0420	0,0754	0,0439	0,0420	0,0424
	2	1	0,0116	0,0209	0,0108	0,0117	0,0118
	2	2	0,0239	0,0425	0,0252	0,0238	0,0239
	2	4	0,0504	0,0896	0,0506	0,0501	0,0504
	2	8	0,0822	0,1474	0,0851	0,0825	0,0829
	4	1	0,0207	0,0368	0,0205	0,0206	0,0207
	4	2	0,0450	0,0800	0,0457	0,0447	0,0450
	4	4	0,0849	0,1529	0,0891	0,0857	0,0860
	4	8	0,1655	0,2992	0,1764	0,1676	0,1683
	7	1	0,0312	0,0557	0,0341	0,0310	0,0313
	7	2	0,0717	0,1293	0,0810	0,0723	0,0727
	7	4	0,1909	0,3430	0,1874	0,1925	0,1929
7	8	0,3403	0,6071	0,3200	0,3406	0,3415	
Argissolo Vermelho-Amarelo	1	1	0,0075	0,0136	0,0069	0,0076	0,0076
	1	2	0,0119	0,0211	0,0126	0,0118	0,0119
	1	4	0,0292	0,0520	0,0318	0,0290	0,0293
	1	8	0,0482	0,0860	0,0473	0,0480	0,0484
	2	1	0,0113	0,0203	0,0120	0,0113	0,0114
	2	2	0,0268	0,0478	0,0281	0,0267	0,0269
	2	4	0,0605	0,1076	0,0638	0,0601	0,0605
	2	8	0,1093	0,1943	0,1098	0,1086	0,1093
	4	1	0,0276	0,0491	0,0284	0,0274	0,0276
	4	2	0,0524	0,0938	0,0550	0,0525	0,0527
	4	4	0,1279	0,2324	0,1300	0,1306	0,1307
	4	8	0,1997	0,3551	0,1949	0,1985	0,1998
	7	1	0,0439	0,0783	0,0445	0,0438	0,0440
	7	2	0,1011	0,1835	0,1075	0,1029	0,1032
	7	4	0,2361	0,4372	0,2441	0,2461	0,2459
7	8	0,4676	0,8385	0,4183	0,4720	0,4717	
Cambissolo Háplico	1	1	0,0046	0,0083	0,0045	0,0046	0,0046
	1	2	0,0104	0,0200	0,0112	0,0111	0,0113
	1	4	0,0220	0,0402	0,0213	0,0224	0,0226
	1	8	0,0408	0,0754	0,0442	0,0420	0,0424
	2	1	0,0096	0,0175	0,0089	0,0097	0,0098
	2	2	0,0223	0,0404	0,0220	0,0225	0,0227
	2	4	0,0465	0,0862	0,0479	0,0480	0,0485
	2	8	0,1095	0,2007	0,1072	0,1118	0,1129
	4	1	0,0174	0,0309	0,0183	0,0173	0,0174
	4	2	0,0545	0,0976	0,0547	0,0544	0,0549
	4	4	0,1127	0,2012	0,1187	0,1125	0,1132
	4	8	0,2045	0,3657	0,1888	0,2042	0,2057
	7	1	0,0397	0,0716	0,0370	0,0399	0,0402
	7	2	0,1010	0,1808	0,1035	0,1008	0,1017
	7	4	0,2162	0,3844	0,2178	0,2147	0,2162
7	8	0,3510	0,6378	0,3523	0,3584	0,3588	

Tabela 59. Volume de solo molhado (m^3) pelas metodologias propostas por Zur (1996), Narda & Chawla (2002) (N&C), pela revolução do modelo quadrático(M3) e pela correção do volume do cilindro (M4) e para Modelo 5 (M5), em função do tempo de aplicação de água e vazão do emissor para o Neossolo Quartzarênico, Latossolo Vermelho e Neossolo Flúvico

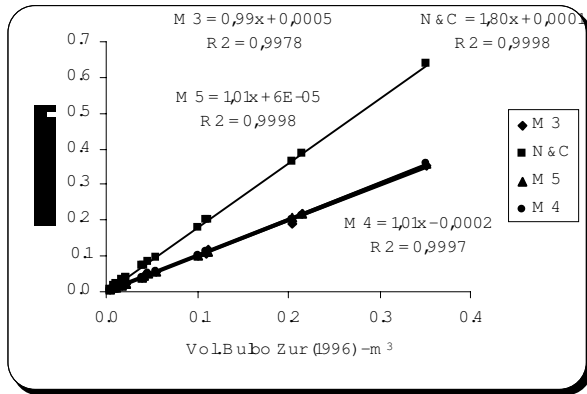
Solo	Tempo (h)	Vazão (L h ⁻¹)	Zur	N&C	M3	M4	M5
Neossolo Quartzarênico	1	1	0,0058	0,0107	0,0055	0,0059	0,0060
	1	2	0,0132	0,0235	0,0130	0,0131	0,0132
	1	4	0,0258	0,0474	0,0237	0,0264	0,0267
	1	8	0,0462	0,0821	0,0440	0,0459	0,0462
	2	1	0,0099	0,0180	0,0099	0,0100	0,0101
	2	2	0,0242	0,0431	0,0237	0,0241	0,0242
	2	4	0,0621	0,1103	0,0581	0,0618	0,0621
	2	8	0,0768	0,1387	0,0880	0,0775	0,0780
	4	1	0,0218	0,0388	0,0220	0,0216	0,0218
	4	2	0,0519	0,0925	0,0463	0,0517	0,0520
	4	4	0,1231	0,2216	0,1174	0,1245	0,1246
	4	8	0,1929	0,3527	0,2093	0,1978	0,1984
	7	1	0,0357	0,0635	0,0363	0,0355	0,0357
	7	2	0,0835	0,1561	0,0953	0,0875	0,0878
7	4	0,2447	0,4573	0,2547	0,2576	0,2572	
7	8	0,3367	0,6757	0,3923	0,3811	0,3801	
Latossolo Vermelho	1	1	0,0039	0,0070	0,0043	0,0039	0,0039
	1	2	0,0110	0,0196	0,0114	0,0109	0,0110
	1	4	0,0258	0,0464	0,0269	0,0260	0,0261
	1	8	0,0442	0,0790	0,0426	0,0443	0,0444
	2	1	0,0086	0,0154	0,0095	0,0086	0,0086
	2	2	0,0221	0,0398	0,0246	0,0223	0,0224
	2	4	0,0422	0,0766	0,0502	0,0428	0,0431
	2	8	0,0996	0,1806	0,0962	0,1016	0,1016
	4	1	0,0177	0,0317	0,0219	0,0177	0,0178
	4	2	0,0486	0,0891	0,0494	0,0501	0,0501
	4	4	0,0660	0,1545	0,0995	0,0867	0,0869
	4	8	0,2039	0,3678	0,1849	0,2073	0,2069
	7	1	0,0274	0,0551	0,0360	0,0309	0,0310
	7	2	0,0912	0,1684	0,0929	0,0948	0,0947
7	4	0,2065	0,3815	0,1890	0,2161	0,2146	
7	8	0,3386	0,6130	0,3210	0,3451	0,3448	
Neossolo Flúvico	1	1	0,0026	0,0048	0,0026	0,0027	0,0027
	1	2	0,0054	0,0097	0,0053	0,0054	0,0055
	1	4	0,0106	0,0201	0,0086	0,0112	0,0113
	1	8	-	-	-	-	-
	2	1	0,0043	0,0076	0,0040	0,0042	0,0043
	2	2	0,0102	0,0181	0,0108	0,0100	0,0102
	2	4	0,0186	0,0355	0,0182	0,0198	0,0200
	2	8	0,0335	0,0621	0,0317	0,0346	0,0350
	4	1	0,0100	0,0180	0,0106	0,0100	0,0101
	4	2	0,0284	0,0531	0,0282	0,0295	0,0298
	4	4	0,0765	0,1364	0,0802	0,0761	0,0767
	4	8	0,0877	0,1583	0,0823	0,0883	0,0890
	7	1	0,0194	0,0357	0,0187	0,0199	0,0201
	7	2	0,0397	0,0740	0,0359	0,0412	0,0416
7	4	0,0902	0,1631	0,0866	0,0909	0,0918	
7	8	0,1459	0,2764	0,1482	0,1538	0,1555	



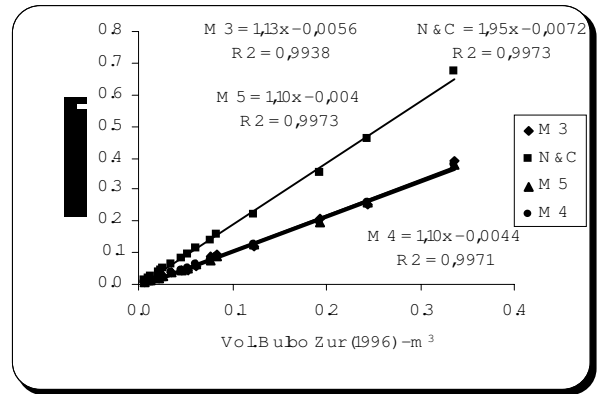
Luvisolo Crômico



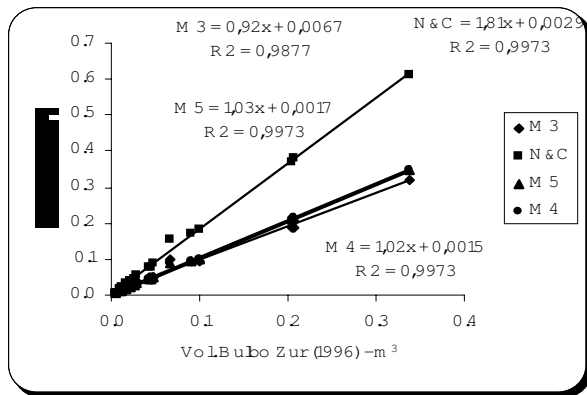
Argissolo Vermelho-Amarelo



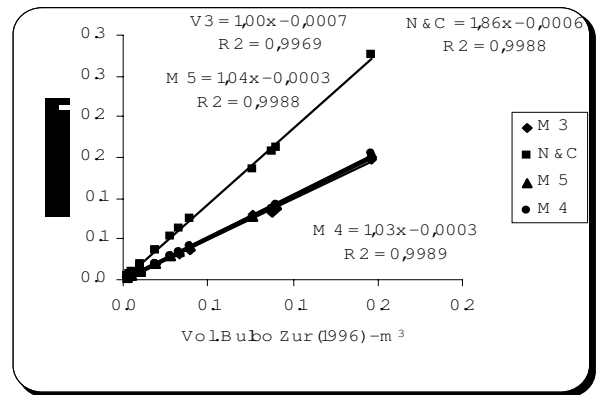
Cambissolo Háptico



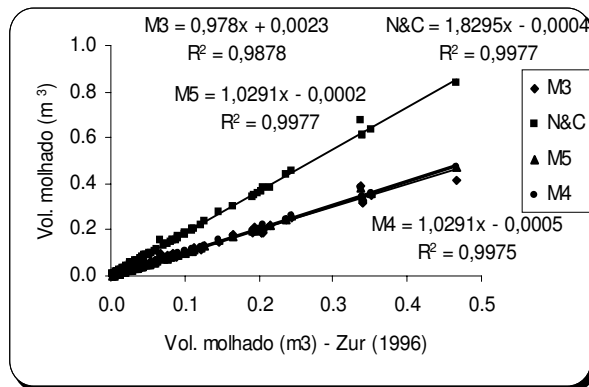
Neossolo Quartzarênico



Latossolo Vermelho



Neossolo Flúvico



Todos os solos

Figura 12. Relação entre o volume do bulbo molhado em função da metodologia proposta por Zur (1996) para os solos estudados

Sendo o volume molhado do solo função da vazão do emissor e do tempo de aplicação de água, nesse sentido ajustou-se o volume molhado em função de q e t pela superfície de resposta $V = a \cdot t^b \cdot q^c$ para os solos estudados, Tabela 60, onde se observa que o modelo da superfície de resposta pode ser utilizado para estimativa do volume molhado, assim como também foi verificado para as dimensões do bulbo. O coeficiente de determinação para o ajuste feito em cada solo, foi superior quando comparado para todos os solos, mesmo assim, considerando a variabilidade entre os solos, o ajuste para todos os solos foi bom, com R^2 médio superior a 95% .

5.2.2 Volume do bulbo molhado em função do diâmetro superficial (D_s) e da relação $D_{max}/Z_{max}^{1/3}$

Buscando outras relações entre o volume e as dimensões do bulbo molhado, verificou-se que o volume se relaciona potencialmente tanto com D_s como também com a relação $D_{max}/Z_{max}^{1/3}$, Figura 13. Nesse sentido, outra aproximação é proposta para estimativa do volume molhado que, ao contrário de Zur (1996) que afirma que o volume de solo molhado sob aspersão é representado pela profundidade do solo molhado, porém para gotejamento, a estimativa do volume molhado é problemática e cita as metodologias de Brandt et al. (1971) e Bresler (1978) que podem ser usadas, porém, segundo o autor, os mesmos são de limitado uso prático devido a sua relativa complexidade.

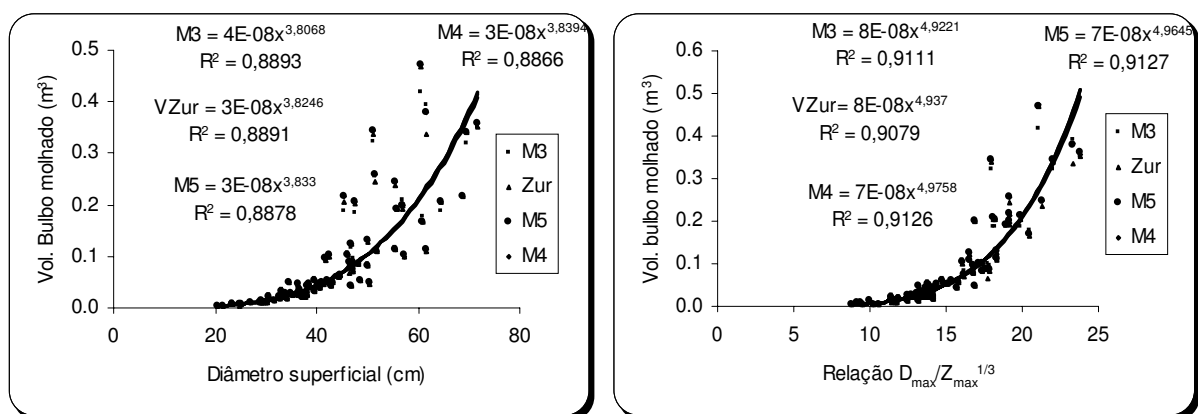


Figura 13. Volume do bulbo molhado em função do diâmetro superficial e da relação $D_{max}/Z_{max}^{1/3}$ para todos os solos estudados

Tabela 60. Coeficientes para o modelo de superfície de resposta do volume do bulbo molhado (m^3) por várias metodologias em função da vazão do emissor ($L h^{-1}$) e tempo de aplicação de água (h), $V = a \cdot t^b \cdot q^c$, para os solos estudados

Solo	Coeficientes			R ²
	a	b	c	
Zur (1996)				
Luvissolo Crômico	0,0045	1,1520	0,9985	0,9903
Argissolo Vermelho-Amarelo	0,0050	1,2372	1,0211	0,9908
Cambissolo Háptico	0,0072	1,0403	0,9136	0,9900
Neossolo Quartzarênico	0,0072	1,0885	0,8541	0,9653
Latossolo Vermelho	0,0056	1,0638	0,9976	0,9803
Neossolo Flúvico	0,0038	1,0029	0,8335	0,9542
Todos os solos	0,0056	1,0991	0,9439	0,8761
Revolução do modelo quadrático – Modelo 3				
Luvissolo Crômico	0,0058	1,0562	0,9452	0,9937
Argissolo Vermelho-Amarelo	0,0067	1,1467	0,9136	0,9883
Cambissolo Háptico	0,0071	1,0664	0,8927	0,9881
Neossolo Quartzarênico	0,0060	1,1750	0,9277	0,9823
Latossolo Vermelho	0,0068	1,0111	0,9136	0,9951
Neossolo Flúvico	0,0034	1,0321	0,8510	0,9424
Todos os solos	0,0060	1,0809	0,9130	0,8800
Correção do Volume do Cilindro – Modelo 4				
Luvissolo Crômico	0,0046	1,1510	0,9968	0,9905
Argissolo Vermelho-Amarelo	0,0050	1,2588	1,0059	0,9894
Cambissolo Háptico	0,0070	1,0424	0,9276	0,9917
Neossolo Quartzarênico	0,0061	1,1814	0,9000	0,9731
Latossolo Vermelho	0,0062	1,0573	0,9595	0,9852
Neossolo Flúvico	0,0036	1,0279	0,8500	0,9623
Todos os solos	0,0055	1,1213	0,9472	0,8802
Modelo 5				
Luvissolo Crômico	0,0046	1,1485	0,9957	0,9906
Argissolo Vermelho-Amarelo	0,0051	1,2508	1,0049	0,9897
Cambissolo Háptico	0,0072	1,0368	0,9240	0,9914
Neossolo Quartzarênico	0,0062	1,1746	0,8981	0,9732
Latossolo Vermelho	0,0062	1,0546	0,9606	0,9860
Neossolo Flúvico	0,0037	1,0288	0,8505	0,9626
Todos os solos	0,0055	1,1165	0,9459	0,8815

5.2.3 Relação do volume do bulbo molhado com o volume de água aplicado

Assim como foi feito para as dimensões do bulbo, também se estimou o volume molhado em função do volume de água aplicado, Figura 14, em que se observa que a variação do volume molhado em função da variação no volume de água aplicado, difere entre os solos. Devido a relação ser linear positiva, aumentando $0,01 \text{ m}^3$ na quantidade de água aplicada, verifica-se um aumento médio de $0,06$, $0,08$, $0,065$, $0,07$, $0,065$ e $0,028 \text{ m}^3$ no volume molhado para o Luvissole Crômico, Argissolo Vermelho-Amarelo, Cambissolo Háptico, Neossolo Quartzarênico, Latossolo Vermelho e Neossolo Flúvico, respectivamente.

Analisando todos os solos conjuntamente com e sem o Neossolo Flúvico, verifica-se que, aumentando em $0,01 \text{ m}^3$ a quantidade de água aplicada, ocorre um aumento médio de $0,062$ e $0,069$, para todos os solos e sem o Neossolo Flúvico, respectivamente. Pouquíssimos trabalhos têm estudado a formação do bulbo molhado em função da vazão do emissor e tempo de aplicação de água, porém Arachchi (1998) estudando a cultura do coqueiro, verificou que usando a vazão do emissor de 30 L h^{-1} aplicado por $2,5 \text{ h}$ proporcionou um volume de solo molhado de $0,5027 \text{ m}^3$.

5.2.4 Comparação do volume do bulbo molhado com o volume do poliedro retangular e do cilindro

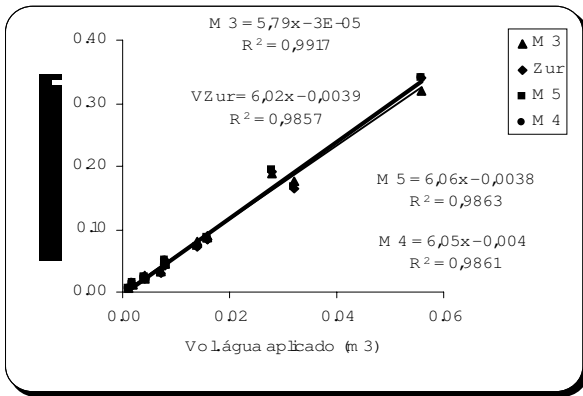
Para determinar o espaçamento entre emissores e a vazão deste, Zur (1996) propõe uma metodologia que leva em consideração o volume do bulbo molhado estimado pelo volume da elipse truncada e o volume de uma coluna retangular. Nesse sentido, avaliando o volume do bulbo molhado, assumindo que este se encontra circunscrito em um poliedro retangular, fez-se a relação entre o volume do bulbo e o volume do poliedro. Para comparação, também se avaliou o volume do bulbo circunscrito em um cilindro (Figura 2).

Sendo o volume do poliedro igual a $V_p = D_{\max}^2 \cdot Z_{\max}$ e do cilindro $V_c = \frac{\pi \cdot D_{\max}^2 \cdot Z_{\max}}{4}$, fez-se a relação desses volumes com os modelos de Zur (1996), Narda & Chawla (2002), Modelo 3, Modelo 4 e Modelo 5 (Figura 15).

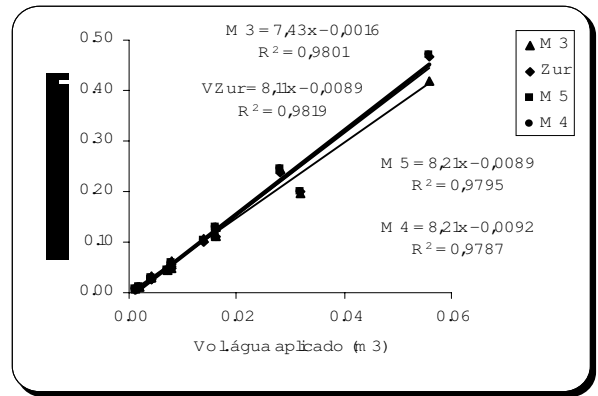
Na relação entre os volumes, verifica-se que os interceptos de todas as equações tendem para zero. Além disso, pode-se afirmar que o coeficiente angular (dy/dx) é o fator que

corrige o volume do bulbo molhado circunscrito no poliedro retangular ou cilindro. Observa-se que o coeficiente angular do modelo proposto por Narda & Chawla (2002) foi superior a 1, implicando em um volume do bulbo estimado pelo modelo superior ao poliedro ou cilindro no qual o mesmo se encontra inserido, o que é impossível. Para a correção do bulbo circunscrito no poliedro retangular, o coeficiente de correção é 0,56, 0,57, 0,59 e 0,59 para Modelo 1, Zur (1996), Modelo 5 e Modelo 4, respectivamente. Esses valores para a correção do cilindro são 0,71, 0,73, 0,75 e 0,75, também para Modelo 1, Zur (1996), Modelo 5 e Modelo 4, respectivamente. Para justificar o Modelo 5 igual a $V = \frac{3}{4}\pi r^2 z$, o coeficiente de correção para o cilindro é de 0,75, ou seja, $3/4$ e, substituindo r por $D_{max}/2$, tem-se $V = \frac{3 \cdot \pi \cdot D_{max}^2 \cdot Z_{max}}{16}$ ou simplesmente, $V = \frac{\pi \cdot D_{max}^2}{4} \cdot 0,75 \cdot Z_{max}$.

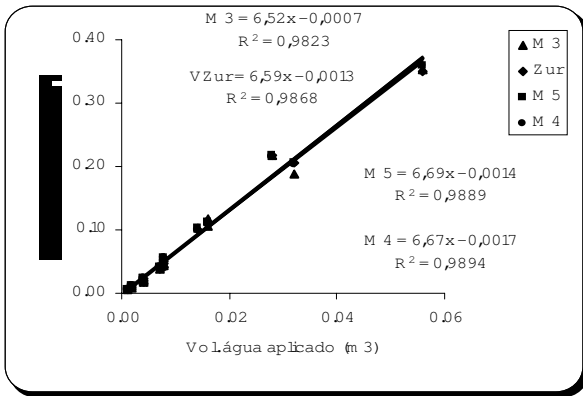
A importância do conhecimento do volume molhado para irrigação está no propósito de estimar a água disponível no solo como sendo o produto da porcentagem da área molhada e a profundidade das raízes e que este, pode ser estimado e controlado pela vazão e espaçamento do emissor e volume de água aplicado (Zur, 1996). Lubana & Narda (2001) citam ainda que a variabilidade do volume molhado em função da frequência de irrigação e do tipo de solo. Para Lubana & Narda (1998) o tipo de solo não influencia o programa da irrigação localizada para determinada cultura, entretanto o tipo de solo e a taxa de aplicação de água influenciam no movimento de água no solo e este, no volume molhado e que será utilizado para determinar o número de emissores necessário para molhar um volume de solo que possa suprir as necessidades hídricas das plantas.



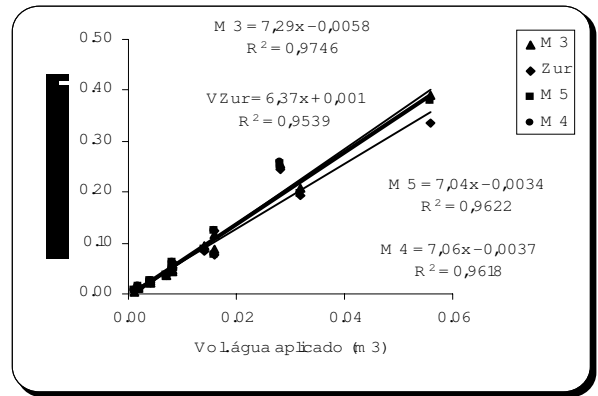
Luvissoil Crômico



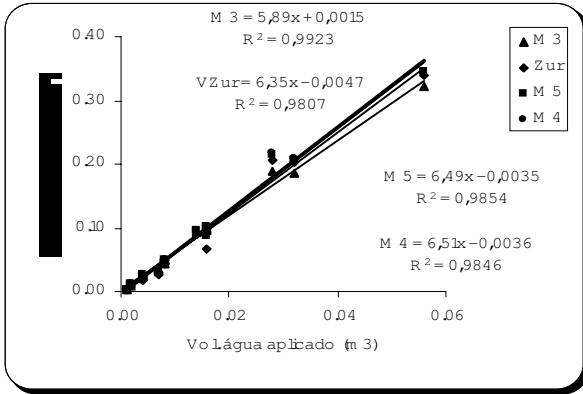
Argissolo Vermelho-Amarelo



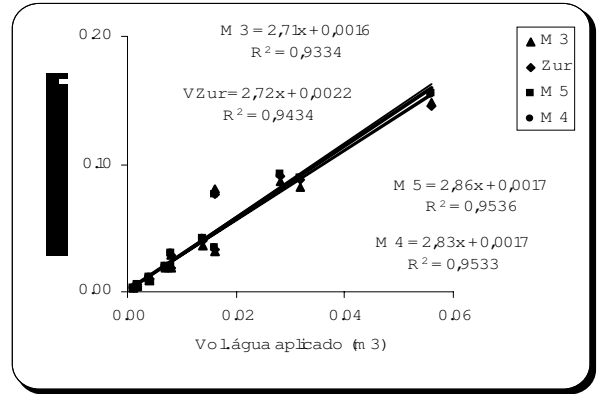
Cambissolo Hápico



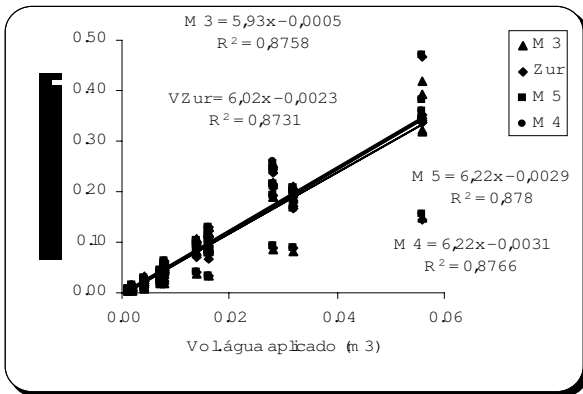
Neossolo Quartzarênico



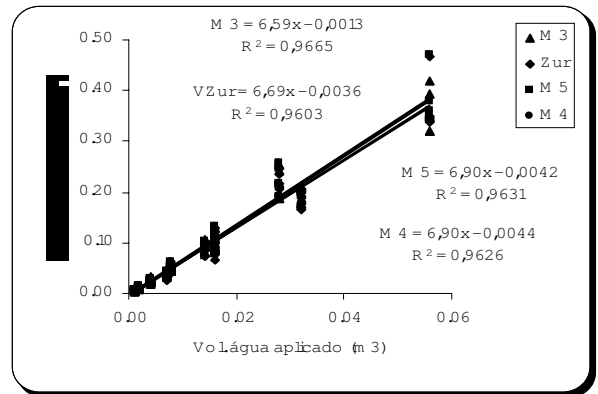
Latossolo Vermelho



Neossolo Flúvico



Todos os solo



Todos os solos sem Neossolo Flúvico

Figura 14. Volume do bulbo molhado em função do volume de água aplicado

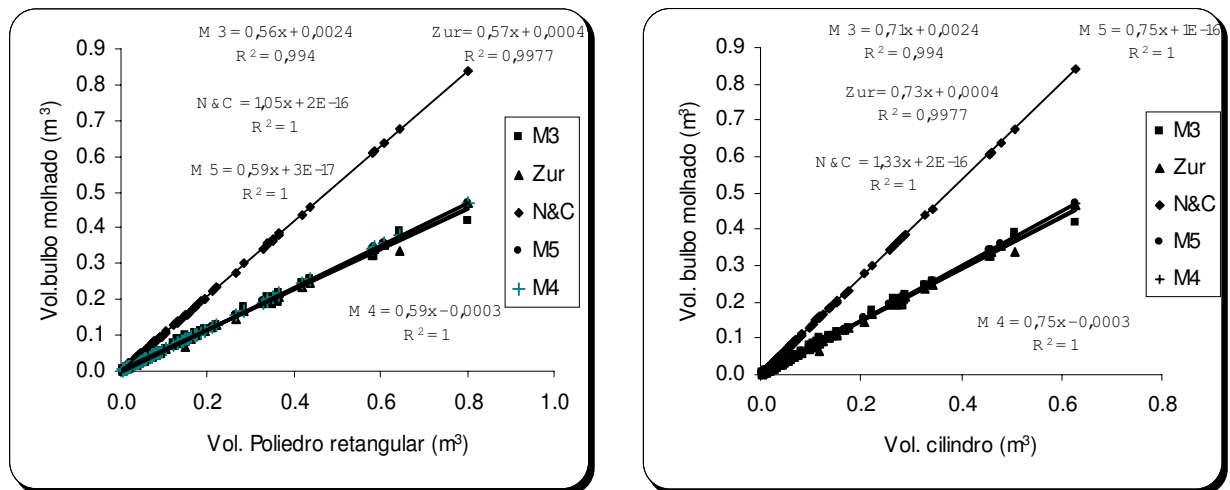


Figura 15. Volume do bulbo molhado estimado por cinco metodologias em função do volume do poliedro retangular e do cilindro

5.2.5 Comparação de modelos para estimativa do volume do bulbo molhado

Considerando como referência o volume do bulbo estimado pelo volume da elipse truncada (Zur, 1996), fez-se a comparação dos valores de MSD para todos os solos estudados. Os maiores valores de MSD foram verificados para o modelo N&C (Narda & Chawla, 2002) que, como demonstrado anteriormente, superestima o volume do solo em comparação a Zur (1996), isto pode ser observado pela decomposição do MSD, onde se observa que os valores de $NU > SB \gg LC$, Tabela 61, implicando que o modelo N&C apresenta como principal problema a declividade não unitária, mas com bom ajuste dos dados, refletido nos altos valores dos coeficientes de determinação para todos os solos. Dos modelos que estimam satisfatoriamente o volume do bulbo, o Modelo 3 foi o que obteve os maiores valores de MSD e, o Modelos 4 e Modelo 5 apresentaram valores similares. O que chama a atenção são os valores do Neossolo Quartzarênico apresentar MSD superior aos demais, com aproximadamente 65% do MSD ser devido a falta da declividade unitária. Para os demais modelos a maior contribuição no MSD é devido a falta de correlação, porém com valores baixos de LC, mas com coeficientes de determinação muito alto (Tabela 61).

Tabela 61. Valores de MSD, RMSD e seus componentes SB, NU e LC e coeficiente de determinação (R^2) para avaliação dos valores estimados e observados para o volume do bulbo molhado para os solos estudados (volume do solo em dm^3)

Solo	MSD	RMSD	SB	NU	LC	R^2
Zur x $V_{N\&C}$						
LC	8127,3651	90,1519	3549,7537	4577,3033	0,3081	1,0000
AVA	14704,1089	121,2605	6099,7594	8600,6139	3,7356	0,9997
CH	10357,1329	101,7700	4691,4611	5663,9395	1,7323	0,9998
NQ	13239,7701	115,0642	5417,8097	7799,0439	22,9165	0,9973
LVA	9940,4290	99,7017	4458,0560	5459,9686	22,4044	0,9973
NF	2234,9634	47,2754	945,9830	1287,0660	1,9144	0,9989
Todos	9846,5929	99,2300	3997,0929	5830,1862	19,3138	0,9977
Zur x Modelo 3						
LC	42,4543	6,5157	0,6375	11,7511	30,0657	0,9959
AVA	162,3433	12,7414	2,6061	84,7892	74,9480	0,9944
CH	20,1745	4,4916	0,0735	0,3716	19,7294	0,9978
NQ	238,4060	15,4404	28,506	157,3401	52,5599	0,9938
LVA	142,7475	11,9477	0,0392	41,9386	100,7697	0,9877
NF	33,3622	5,776	0,5865	0,2079	32,5678	0,9814
Todos	107,3524	10,3611	0,7576	1,0938	105,5010	0,9875
Zur x Modelo 4						
LC	0,5269	0,7259	0,0953	0,1205	0,3111	1,0000
AVA	8,1562	2,8559	0,9680	2,7565	4,4317	0,9997
CH	4,2140	2,0528	0,5364	1,1819	2,4957	0,9997
NQ	136,1376	11,6678	18,0265	93,4318	24,6793	0,9971
LVA	38,0566	6,1690	10,4869	5,1473	22,4224	0,9973
NF	4,6660	2,1601	0,8258	2,0667	1,7735	0,9990
Todos	32,2476	5,6787	3,0451	8,3798	20,8227	0,9975
Zur x Modelo 5						
LC	1,0256	1,0127	0,4081	0,3032	0,3143	1,0000
AVA	7,8350	2,7991	1,5564	2,5333	3,7453	0,9997
CH	5,1520	2,2698	1,6042	1,8127	1,7351	0,9998
NQ	130,7935	11,4365	19,1378	88,7303	22,9254	0,9973
LVA	36,5384	6,0447	1,1084	4,0173	31,4127	0,9973
NF	7,0358	2,6525	1,6331	3,4917	1,9110	0,9989
Todos	31,6530	5,6261	4,0203	8,3239	19,3088	0,9977

LC – Luvisolo Crômico, AVA - Argissolo Vermelho-Amarelo, CH – Cambissolo Háplico, NQ – Neossolo Quartzarênico, LVA – Latossolo Vermelho, NF – Neossolo Flúvico

5.3 Porcentagem de área molhada e porcentagem de volume molhado

Com base no diâmetro máximo estimado pelos modelos, calculou-se a porcentagem de área molhada (*PAM*) pelo emissor, levando-se em consideração o espaçamento entre laterais (E_L) e entre emissores (E_E) de 2,0 m e D_{max} , respectivamente, para que não houvesse sobreposição dos bulbos, segundo metodologia proposta por Dandy & Hassanli (1996). O volume de solo molhado (*VSM*) para os cálculos foi obtido pela metodologia do volume da elipse truncada (Zur, 1996). O fator de disponibilidade de água (f) utilizado foi de 0,35, e a capacidade de campo (*CC*) foi obtida substituindo na curva de retenção de água a tensão referente ao ponto de inflexão da mesma e o ponto de murcha permanente (*PMP*) usando a tensão equivalente a 15.000 cm.c.a.. O valor da capacidade de campo, do ponto de murcha permanente e da densidade do solo usadas nos cálculos foi a média ponderada, tendo como peso a espessura de cada camada.

Para a *PAM* os valores da Tabela 62 e 63 estão abaixo do recomendado de, no mínimo, 33% para regiões áridas (Keller e Bliesner, 1990, Silva, 1996, Pizarro, 1996 e Gomes, 1997), sendo que os 33% mínimos apenas foram observados para as maiores vazão e tempo de aplicação de água, ou seja, com t de 7 h e q de 8 L h⁻¹, com exceção do Luvisolo Crômico que, em nenhuma combinação de q e t observou-se *PAM*, maior ou igual a 33%. Isso provavelmente se deve ao preparo do solo antes dos testes de campo, desestruturando o mesmo que, passaram a funcionar como se fossem de textura arenosa, fato comprovado pelos altos valores de condutividade hidráulica. Na camada superficial, a característica de solo arenoso dificulta a expansão do D_{max} , diminuindo a área molhada e, conseqüentemente, a *PAM*, apesar de $D_{max} > Z_{max}$, porém o preparo do solo foi realizado apenas na camada até 30 cm e, a camada subjacente a esta, como não sofreu alteração, pode ter contribuído para o aumento de D_{max} em relação a Z_{max} . Thornburn et al. (2003) comentam que apenas a textura não controla a expansão do bulbo e que esta também sofre influência da estrutura. Comentam ainda dos cuidados com as condições do solo antes dos testes de campo, como as condições do experimento, camadas compactadas ou condições da camada superficial, que podem afetar as dimensões do bulbo. Além disso, existem críticas à metodologia clássica para o cálculo da *PAM*. Para Abreu (1979) a metodologia proposta por Keller & Karmeli (1974) pode apresentar problema, principalmente para culturas com espaçamento entre plantas maiores e comenta sobre a falha do método nas Ilhas Canárias com a cultura da banana, que para maior eficiência do uso da água, modificaram os cálculos da *PAM* para $PAM' = PAM \cdot \frac{ASP}{AP}$, com *ASP* e *AP* sendo a área sombreada pela planta e a área ocupada por uma planta,

respectivamente. Quanto maior a densidade de plantas, mais os valores de *PAM* e *PAM'* se aproximam. Desta maneira, segundo o autor, resolveram o problema com espaçamento e idade das plantas.

Tabela 62. Porcentagem de área molhada (*PMA*), porcentagem de volume molhado (*PVM*), lâmina de água disponível para as plantas (*LAD*), porcentagem de área molhada estimada (*PMA_e*) e porcentagem de volume molhado estimado (*PVM_e*) em função do tempo de aplicação de água e vazão do emissor para o Luvissole Crômico, Argissolo Vermelho-Amarelo e Cambissolo Háplico

Solo	Tempo (h)	Vazão (L h ⁻¹)	PAM	PVM	LAD (mm)	PAM _e	PVM _e
Luvissole Crômico	1	1	9,913	7,010	2,053	9,700	7,000
	1	2	13,331	9,867	3,853	12,221	8,945
	1	4	15,660	11,645	5,684	15,398	11,271
	1	8	19,238	14,294	8,373	19,400	14,200
	2	1	12,404	9,190	3,589	12,221	8,945
	2	2	15,829	11,866	5,792	15,398	11,271
	2	4	19,413	14,559	9,949	19,400	14,200
	2	8	23,292	17,322	13,529	24,442	17,891
	4	1	14,719	11,038	5,388	15,398	11,271
	4	2	18,342	13,756	9,401	19,400	14,200
	4	4	23,729	17,568	13,721	24,442	17,891
	4	8	29,684	21,895	21,375	30,796	22,541
	7	1	16,535	12,353	7,236	18,555	13,582
	7	2	21,820	16,136	12,602	23,378	17,112
	7	4	29,015	21,534	25,228	29,455	21,560
	7	8	35,739	26,708	36,503	37,111	27,164
Argissolo Vermelho-Amarelo	1	1	10,004	7,314	2,959	9,700	7,100
	1	2	12,458	9,338	3,778	12,221	8,945
	1	4	15,979	11,979	7,270	15,398	11,271
	1	8	17,796	13,284	10,749	19,400	14,200
	2	1	12,218	9,105	3,684	12,221	8,945
	2	2	15,325	11,463	6,957	15,398	11,271
	2	4	19,901	14,914	12,069	19,400	14,200
	2	8	23,922	17,942	18,149	24,442	17,891
	4	1	15,521	11,629	7,058	15,398	11,271
	4	2	18,581	13,849	11,207	19,400	14,200
	4	4	26,429	19,385	19,217	24,442	17,891
	4	8	27,334	20,497	29,026	30,796	22,541
	7	1	18,147	13,572	9,610	18,555	13,582
	7	2	23,248	17,082	17,279	23,378	17,112
	7	4	32,757	23,588	28,632	29,455	21,560
	7	8	37,041	27,543	50,149	37,111	27,164
Cambissolo Háplico	1	1	9,154	6,801	0,828	9,700	7,100
	1	2	12,145	8,425	1,415	12,221	8,945
	1	4	15,397	11,228	2,357	15,398	11,271
	1	8	17,810	12,852	3,777	19,400	14,200
	2	1	11,956	8,783	1,328	12,221	8,945
	2	2	15,745	11,609	2,340	15,398	11,271
	2	4	20,565	14,788	3,726	19,400	14,200
	2	8	25,628	18,649	7,047	24,442	17,891
	4	1	15,091	11,318	1,901	15,398	11,271
	4	2	20,263	15,076	4,431	19,400	14,200
	4	4	25,659	19,163	7,242	24,442	17,891

4	8	28,785	21,464	11,717	30,796	22,541
7	1	17,869	13,219	3,663	18,555	13,582
7	2	24,323	18,114	6,845	23,378	17,112
7	4	29,976	22,477	11,892	29,455	21,560
7	8	37,723	27,678	15,341	37,111	27,164

Tabela 63. Porcentagem de área molhada (*PMA*), porcentagem de volume molhado (*PVM*), lâmina de água disponível para as plantas (*LAD*), porcentagem de área molhada estimada (*PMA_e*) e porcentagem de volume molhado estimado (*PVM_e*) em função do tempo de aplicação de água e vazão do emissor para o Neossolo Quartzarênico, Latossolo Vermelho e Neossolo Flúvico

Solo	Tempo (h)	Vazão (L h ⁻¹)	PAM	PVM	LAD (mm)	PAM _e	PVM _e
Neossolo Quartzarênico	1	1	10,235	7,404	1,671	9,700	7,100
	1	2	13,665	10,249	2,853	12,221	8,945
	1	4	15,648	11,352	4,868	15,398	11,271
	1	8	18,200	13,650	7,497	19,400	14,200
	2	1	12,138	8,936	2,420	12,221	8,945
	2	2	16,096	12,066	4,448	15,398	11,271
	2	4	20,412	15,309	8,984	19,400	14,200
	2	8	22,599	16,676	10,037	24,442	17,891
	4	1	14,816	11,096	4,341	15,398	11,271
	4	2	19,314	14,449	7,936	19,400	14,200
	4	4	24,581	18,204	14,791	24,442	17,891
	4	8	29,422	21,451	19,367	30,796	22,541
	7	1	16,832	12,624	6,269	18,555	13,582
	7	2	23,970	17,108	10,297	23,378	17,112
	7	4	31,018	22,126	23,305	29,455	21,560
7	8	37,904	25,051	26,386	37,111	27,164	
Latossolo Vermelho	1	1	8,420	6,217	1,326	9,700	7,100
	1	2	11,207	8,364	2,829	12,221	8,945
	1	4	15,345	11,393	4,859	15,398	11,271
	1	8	17,854	13,331	7,156	19,400	14,200
	2	1	10,138	7,599	2,459	12,221	8,945
	2	2	13,985	10,361	4,572	15,398	11,271
	2	4	17,949	13,194	6,792	19,400	14,200
	2	8	24,043	17,679	11,960	24,442	17,891
	4	1	13,666	10,156	3,734	15,398	11,271
	4	2	18,831	13,684	7,446	19,400	14,200
	4	4	23,853	13,581	7,990	24,442	17,891
	4	8	28,648	21,171	20,550	30,796	22,541
	7	1	16,445	10,900	4,809	18,555	13,582
	7	2	23,478	16,946	11,215	23,378	17,112
	7	4	30,599	22,087	19,490	29,455	21,560
7	8	31,671	23,324	30,873	37,111	27,164	
Neossolo Flúvico	1	1	8,830	6,542	0,551	9,700	7,100
	1	2	10,482	7,756	0,944	12,221	8,945
	1	4	15,078	10,607	1,291	15,398	11,271
	2	1	9,657	7,228	0,812	12,221	8,945
	2	2	12,529	9,374	1,492	15,398	11,271
	2	4	18,667	13,027	1,830	19,400	14,200
	2	8	21,945	15,771	2,806	24,442	17,891
	4	1	12,861	9,540	1,429	15,398	11,271
	4	2	19,764	14,106	2,642	19,400	14,200
	4	4	30,213	22,585	4,653	24,442	17,891
	4	8	33,315	24,627	4,843	30,796	22,541

7	1	15,469	11,184	2,304	18,555	13,582
7	2	20,872	14,944	3,498	23,378	17,112
7	4	29,830	21,978	5,557	29,455	21,560
7	8	36,837	25,918	7,281	37,111	27,164

Bresler (1977) verificou que em solos arenosos, mesmo para altos valores de q e t o D_{max} destes solos não ultrapassam os 60 cm. Considerando o espaçamento das laterais de 2 m, como utilizado para o cálculo de PAM, encontra-se um valor de área molhada de 0,2827 m² e PAM de 23,56%, inferior aos 33% mínimos exigidos para as regiões áridas. Como solução, pode-se diminuir o espaçamento entre as laterais ou aumentar a frequência de irrigação. Para atingir os 33%, o espaçamento entre laterais teria que ser de 1,43 m. Silva (1996) comenta que, aumentando a PAM implica um maior volume de solo explorado pelas raízes; por outro lado, implica um maior número de emissores por planta, maior vazão do sistema e, conseqüentemente, maior diâmetro das tubulações que conduzem a água até a área, aumentando o custo do equipamento.

Keller & Karmeli (1974) propõem uma tabela, amplamente divulgada na literatura, contendo valores estimados de PAM em função da vazão do emissor, textura do solo e do espaçamento entre linhas laterais. Para um solo de textura grossa (arenoso) para espaçamento de 2 m entre laterais os valores de PAM são de 15%, 20%, 40% e 60% para vazões dos emissores de 1, 2, 4 e 8 L h⁻¹. Comparando com o Neossolo Quartzarênico, esses valores foram de 10,24%, 13,67%, 15,65% e 18,20% para q de 1, 2, 4 e 8 L h⁻¹, respectivamente; para $t = 1$ h; 12,14%, 16,10%, 20,41% e 22,60% para q de 1, 2, 4 e 8 L h⁻¹, respectivamente; para $t = 2$ h; 14,82%, 19,31%, 24,58% e 29,48% para q de 1, 2, 4 e 8 L h⁻¹, respectivamente; para $t = 4$ h e 16,83%, 23,97%, 31,02% e 37,70% para q de 1, 2, 4 e 8 L h⁻¹, respectivamente; para $t = 7$ h. Porém, os valores obtidos por Keller & Karmeli (1974) foram para uma lâmina de água de 40 mm. Para o Neossolo Quartzarênico, os valores que se aproximaram dos recomendados por Keller & Karmeli (1974) foram apenas para q de 1,0 e 2,0 L h⁻¹ com tempo de aplicação de no mínimo 4 h, com PAM de 14,82 e 19,31%, respectivamente, porém com lâmina de irrigação de 5,3 e 8,13 mm, respectivamente. Para a maior vazão (8 L h⁻¹) e tempo de aplicação de água de 7 h, mesmo aplicando 29,16 mm a PAM observada foi de apenas 37,7 %, bem abaixo do 60% recomendado por Keller & Karmeli (1974).

Em um projeto de irrigação é necessário estabelecer o volume mínimo de solo a ser umedecido, que pode ser substituído pela área molhada, por facilidade de obtenção. Apesar dos cálculos para o dimensionamento e manejo da irrigação levar em consideração a área molhada, o principal fator que influencia no fornecimento de água para as plantas é o

volume molhado, volume esse, onde as raízes exploram o solo em busca de água e nutrientes. Sendo assim, se determinou a porcentagem do volume molhado (*PVM*), onde se observa que foi inferior a *PAM*, sendo este último superior, em média para todos os solos, em aproximadamente 36%. Porém para um fator de disponibilidade de água de 0,35, muitas combinações de *q* e *t* armazenam no solo mais de 10 mm de água disponível para as plantas, quantidade de água suficiente para se fazer uma irrigação diária na maioria das áreas cultivadas, considerando que a *ETc* em regiões áridas é de, no máximo 8 mm e uma eficiência mínima de 80%. O que chama a atenção é a baixa capacidade de armazenamento de água para o Cambissolo Háplico, mas se explica pelos valores de *CC* e *PMP* deste solo, que foram de 0,3841 e 0,1860 m³ m⁻³, respectivamente, tendo assim apenas 0,1981 m³ m⁻³ de água disponível.

Considerando o espaçamento entre emissores igual a D_{max} , ajustou-se o modelo de superfície de resposta de *PAM* em função de *q* e *t*, Tabela 64. Como base nos parâmetros ajustados do modelo, verifica-se que os valores de *a*, *b* e *c* são semelhantes para todos os solos e com média de 9,7, 0,33 e 0,33 para os três parâmetros, respectivamente. Desta forma, assumindo que os coeficientes *b* e *c* são iguais, com valor 1/3, determinou-se o valor de *PAM* para todas as combinações de *q* e *t* pelo modelo $PAM_e = 9,7 \cdot (t \cdot q)^{1/3}$ e os resultados são mostrados na Tabela 63 (*PAM_e*). Seguindo o mesmo raciocínio, ajustou-se a superfície de resposta para *PVM*, também em função de *q* e *t*, Tabela 65, e como os valores de *a*, *b* e *c* foram aproximados para todos os solos, determinou-se os valores de *PVM* por $PVM_e = 7 \cdot (t \cdot q)^{1/3}$ e o resultado é mostrado na Tabela 65 (*PVM_e*). Também se avaliou a lâmina de água disponível para as plantas (*LAD*) no volume molhado, pelo modelo da superfície de resposta, Tabela 66, onde se observa que os coeficientes *b* e *c*, se aproximam para todos os solos, diferentemente do coeficiente *a*, que varia de 0,6261 a 2,2498 para o Neossolo Flúvico e Argissolo Vermelho-Amarelo, respectivamente. Verifica-se ainda que, quando ajustado o modelo de superfície de resposta para todos os solos, o coeficiente de determinação foi inferior aos obtidos para cada solo separadamente, o que se explica que a lâmina de água disponível não só é influenciada por *t* e *q*, mas também pela densidade do solo, capacidade de campo e ponto de murcha permanente, que difere entre os solos.

Para avaliar os resultados de *PAM_e* e *PVM_e* em função de *PAM* e *PVM*, respectivamente, ajustaram-se os dados de *PAM_e* em função *PAM* e *PVM_e* em função de *PVM*, Figura 16. Os valores da reta mostraram que o modelo estimado podem ser utilizado para a determinação da porcentagem de área e volume molhado e que, apesar do bom ajuste da

regressão, observa-se que este foi feito para todos os seis solos, melhorando o ajuste para a regressão feita para cada solo individualmente.

Tabela 64. Coeficientes do modelo superfície de resposta para a porcentagem de área molhada (*PAM*), $PAM = a \cdot t^b \cdot q^c$, para os solos estudados

Solo	a	b	c	R²
Luvissolo Crômico	9,7670	0,3025	0,3361	0,9929
Argissolo Vermelho-Amarelo	9,7100	0,3556	0,3107	0,9678
Cambissolo Háplico	9,6710	0,3463	0,3273	0,9851
Neossolo Quartzarênico	9,8620	0,3340	0,3152	0,9700
Latossolo Vermelho	9,1650	0,3325	0,3237	0,9637
Neossolo Flúvico	8,3081	0,3594	0,4062	0,9437
Todos os solos	9,3960	0,3396	0,3369	0,9581

Tabela 65. Coeficientes do modelo superfície de resposta para a porcentagem de volume molhada (*PVM*), $PVM = a \cdot t^b \cdot q^c$, para os solos estudados

Solo	a	b	c	R²
Luvissolo Crômico	7,2370	0,3046	0,3365	0,9926
Argissolo Vermelho-Amarelo	7,2770	0,3457	0,3126	0,9754
Cambissolo Háplico	7,0400	0,3605	0,3231	0,9864
Neossolo Quartzarênico	7,6230	0,3055	0,2975	0,9799
Latossolo Vermelho	6,6194	0,3137	0,3422	0,9426
Neossolo Flúvico	6,1129	0,3565	0,3985	0,9254
Todos os solos	6,9727	0,3316	0,3346	0,9501

Tabela 66. Coeficientes do modelo superfície de resposta para lâmina de água disponível para as plantas, $LAD = a \cdot t^b \cdot q^c$, para os solos estudados

Solo	a	b	c	R²
Luvissolo Crômico	1,9285	0,7753	0,6849	0,9839
Argissolo Vermelho-Amarelo	2,2498	0,7863	0,7438	0,9948
Cambissolo Háplico	1,0103	0,7291	0,6620	0,9790
Neossolo Quartzarênico	1,9963	0,7128	0,6122	0,9470
Latossolo Vermelho	1,3323	0,7728	0,7922	0,9792
Neossolo Flúvico	0,6261	0,7293	0,5131	0,9655
Todos os solos	1,5604	0,7413	0,6949	0,6364

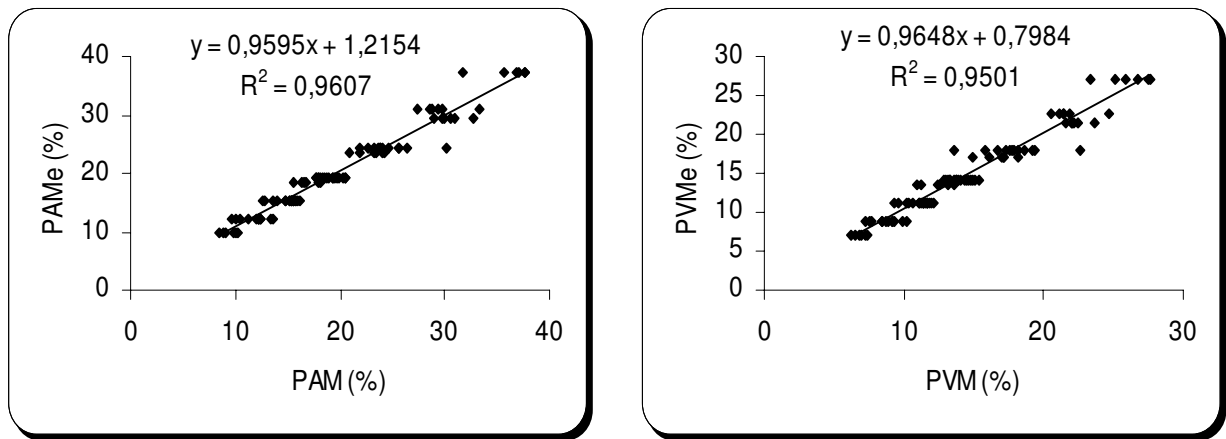


Figura 16. Relação entre PAM com PAM_e e PVM com PVM_e

Estimando a lâmina de água disponível usando a PAM pela metodologia citada por Dandy & Hassanli (1996), $LAM = \frac{CC - PMP}{100} \cdot Z \cdot d_s \cdot f \cdot \frac{PAM}{100}$ sendo LAM a lâmina de água disponível (mm), CC a capacidade de campo (% p/p), PMP o ponto de murcha permanente (% p/p), Z a profundidade das raízes (mm) aqui assumindo como Z_{max} , d_s a densidade do solo ($g\ cm^3$), f o fator de disponibilidade de água no solo e PAM a porcentagem de área molhada (%) e fazendo a comparação da lâmina de água disponível estimada usando PVM , observa-se na Figura 17 que quando utilizou-se o valor de PAM a lâmina de água disponível foi aproximadamente 36% superior a lâmina estimada usando a PVM .

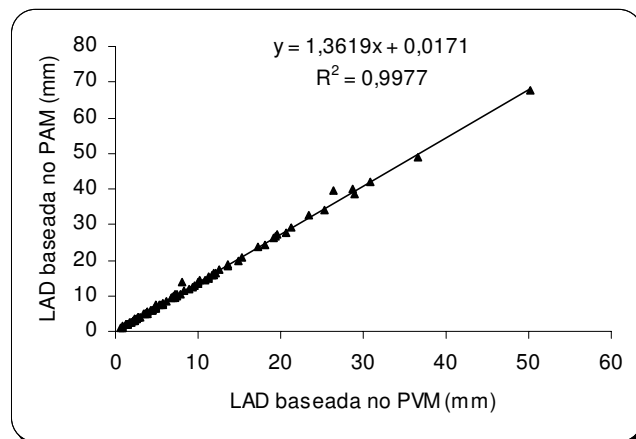


Figura 17. Relação entre a lâmina de água disponível estimada usando PAM e PVM

Esses resultados indicam que o uso da PAM pode superestimar a quantidade de água no solo e conseqüentemente, causar déficit hídrico nas plantas. Desta maneira, a equação para

o cálculo da lâmina de água do solo pode ser alterada de

$$L(mm) = \frac{CC - PMP}{100} \cdot Z(mm) \cdot d \cdot f \cdot \frac{PAM}{100} \quad \text{para} \quad L(mm) = \frac{CC - PMP}{100} \cdot Z(mm) \cdot d \cdot f \cdot \frac{PVM}{100}$$

que, assumindo $PVM = 100 \frac{V_{SM}}{Z_{\max} \cdot E_E \cdot E_L}$, com V_{SM} o volume molhado do solo (m^3), E_E e E_L

o espaçamento entre emissores e laterais (m), respectivamente, substituindo, tem-se:

$$L(mm) = \frac{CC - PMP}{100} \cdot Z(mm) \cdot d \cdot f \cdot \frac{3 \cdot \pi \cdot D_{\max}^2}{16 \cdot E_L \cdot E_E}.$$

6. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos nos experimentos de campo e com o que foi discutido, pode-se concluir que:

1. O modelo potencial estima adequadamente as dimensões do bulbo molhado em função da vazão do emissor ou do tempo de aplicação de água ou do volume de água aplicado;
2. Existe uma relação linear positiva entre o diâmetro superficial e as dimensões do bulbo molhado;
3. Os modelos 1 e 2 estimam adequadamente o diâmetro máximo e os modelos 3, 4 e 5 estimam satisfatoriamente o volume do bulbo quando comparados com o modelo proposto por Zur (1996)
4. A relação $D_{max}/Z_{max}^{1/3}$ foi melhor ajustada pelo modelo superfície de resposta que D_{max}/Z_{max} em função da vazão do emissor e tempo de aplicação de água;
5. O modelo proposto por Narda & Chawla (2002) superestima o volume molhado quando comparado com a da elipse truncada proposto por Zur (1996);
6. O uso da porcentagem de área molhada (*PAM*) superestimou a lâmina de água no solo em aproximadamente 36% quando comparada com a porcentagem do volume molhado (*PVM*).

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, J.M.H. Algunas consideraciones sobre el volumen de suelo mojado y su importancia en el diseño y eficiencia de sistemas de riego localizado. In: SEMINÁRIO LATINOAMERICANO SOBRE RIEGO POR GOTEIO, 3, 1979, Campinas. Anais... Campinas-SP:ABID. 1979. p.296-306.
- AH KOON, P.D., GREGORY, P.J., BELL, J.P. Influence of drip irrigation emission rate on distribution and drainage of water beneath a sugar cane and a fallow plot. *Agricultural Water Management*, v.17, p.267-282, 1990.
- AL-JABRI, S.A., HORTON, R., JAYNES, D.B. A Point-source method for rapid simultaneous estimation of soil hydraulic and chemical transport properties. *Soil Science Society of American Journal*, v.66, p.12-18, 2002.
- AÑEZ, D. Metodología para la evaluación integral del riego por goteo. Maracaibo: Universidad del Zulia. 1979. 333p.
- ANGELAKIS, A.N., ROLSTON, D.E., KADIR, T.N., SCOTT, V.H. Soil-water distribution under trickle source. *Journal of the Irrigation and drainage*, v.119, p.484-500, 1993.
- ARACHCHI, L.P.V. Preliminary requirements to design a suitable drip irrigation system for coconut (*Cocos nucifera* L.) in gravelly soil. *Agricultural Water Management*, v.38, p.169-180, 1998.
- ASSOULINE, S. The effects of microdrip and conventional drip irrigation on water distribution and uptake. *Soil Science Society of America Journal*, v.66, p.1630-1636, 2002.
- BAR-YOSEF, B. Advances in fertigation. *Advances in Agronomy*, v.65, p.1-77, 1999.
- BATU, V. Steady infiltration from single and periodic strip source. *Soil Science Society of America Journal*, v.42, p.543-549, 1978.
- BELL, P., WLLINGS, S.R., HODNETT, M.G., KOON, P.D.A. soil water status: a concept for characterizing soil water conditions beneath a drip irrigated row crop. *Agricultural Water Management*, v.17, p.171-187, 1990.

- BEN-ASHER J., CHARACH, C.H., ZEMEL, A. Infiltration and water extraction from trickle irrigation source: the effective hemisphere model. *Soil Science Society of America Journal*, v.50, p.882-887, 1986.
- BEN-ASHER J., LOMEN, D.O., WARRICK, A.W. Linear and nonlinear models of infiltration from a point source. *Soil Science Society of America Journal*, v.42, p.3-6, 1978.
- BIELORAI, H. The effect of partial wetting on the root zone on yield and water use efficiency in a drip and sprinkler-irrigated mature grapefruit grove. *Irrigation Science*, v.3, p.89-100, 1982.
- BRANDT, A., BRESLER, E., DINER, N., BEN-ASHER, I. HELLER, J., GOLDEBERG, D. Infiltration from a trickle source: I. Mathematical models. *Soil Science Society of America Journal*, v.35, p.675-682, 1971.
- BRESLER, E. Analysis of trickle irrigation with application to design problems. *Irrigation Science*, v.1, p.3-17, 1978.
- BRESLER, E. Trickle-drip irrigation: principles and application to soil water management. *Advances in Agronomy*, v.29, p.343-393, 1977.
- BRESLER, E., HELLER, J., DINER, N., BEN-ASHER, I., BRANDT, A., GOLDEBERG, D. Infiltration theoretical predictions. *Soil Science Society of America Journal*, v.35, p.683-689, 1971.
- CARMO FILHO, F., ESPÍNOLA SOBRINHO, J., MAIA NETO, J. M. Dados meteorológicos de Mossoró (Jan. de 1988 à Dez. de 1990). Mossoró: ESAM/FGD, 1991. 121p. (Coleção Mossoroense).
- CLOTHIER, B.E. Solute travel times during trickle irrigation. *Water Resources Research*, v.20, p.1848-1852, 1984.
- CLOTHIER, B.E., SCOTTER, D.R. Constant flux infiltration from a hemispherical cavity. *Soil Science Society of America Journal*, v.46, p.696-700, 1982.
- COELHO, E.F., OR, D. A parametric model for two-dimensional water uptake intensity by corn roots under drip irrigation. *Soil Science Society of America Journal*, v.60, p.1039-1049, 1996.

- COELHO, E.F., OR, D. Applicability of analytical solutions for flow from point sources to drip irrigation management. *Soil Science Society of America Journal*, v.61, p.1331-1341, 1997.
- COELHO, E.F., OR, D. Root distribution and water uptake patterns of corn under surface and subsurface drip irrigation. *Plant and Soil*, v.206, p.123-136, 1999.
- COELHO, E.F., OR, D., SOUSA, V.F. Avaliação de parâmetros hidráulicos para modelos de distribuição de água no solo sob gotejamento. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.34, n.4, p.651-657, 1999.
- COOK, F.J., THORBURN, P.J., FITCH, P., BRISTOW, K.L. WetUp: a software tool to display approximate wetting patterns from drippers. *Irrigation Science*, v.22, p.129-134, 2003.
- DANDY, G.C., HASSANLI, A.M. Optimum design and operation of multiple subunit drip irrigation systems. *Journal Irrigation and Drainage Engineering*, v.122, n.5, p.265-275, 1996.
- DeTAR, W.R. Using a subsurface drip irrigation system to measure crop water use. *Irrigation Science*, v.23, p.111-122, 2004.
- DODDS, G.T., MANDRAMOOTOO, C.A., SEREM, V.K. Predicting nitrate-N leaching under different tillage systems using LEACHM and NTRM. *St. Joseph: Transactions of the ASAE*, v.41, n.4, p.1025-1034, 1998.
- EL-HAFEDH, A.V.O.M., DAGHARI, H., MAALEJ, M. Analysis of several discharge rate-spacing-duration combinations in drip irrigation system. *Agricultural Water Management*, v.52, p.33-52, 2001.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro, 1997. 212p.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. Rio de Janeiro, 1999. 412p.
- FOLCH, J.R., FÁBREGA, J.A.G. El volumen húmedo del suelo en el riego localizado: importancia y evaluación. In: CARPENA, R.M., RITTER, A., TASCÓN, C. (eds): *Estudios de la zona no saturada del suelo*. ICIA, p.11-17, 1999.

- GARDNER, W.R. Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. *Soil Science*, v.85, p.228-232, 1958.
- GAUCH, G.H., HWANG, J.T.G., FICK, G.W. Model evaluation by comparison of model-based predictions and measured values. *Agronomy Journal*, v.95, p.1442-1446, 2003.
- GHALI, G.S., SVEHLIK, Z.J. Soil-water dynamics and optimum operating regime in trickle-irrigated fields. *Agricultural Water Management*, v.13, p.127-143, 1988.
- GOMES, H.P. Engenharia de irrigação: hidráulica dos sistemas pressurizados, aspersão e gotejamento, 2.ed. Campina Grande:UFPB, 1997, 390p.
- HACHUM, A.Y., ALFARO, J.F., WILLARDSON, L.S. Water movement in soil from trickle source. *Journal of the Irrigation and Drainage*, v.102, p.179-192, 1976.
- HEALY, W., WARRICK, A.W. A generalized solution to infiltration from surface soil point source. *Soil Science Society of America Journal*, v.52, p.1245-1251, 1988.
- JURY, W.A., EARL, K.D. Water movement in bare and cropped soil under isolated trickle emitters: I. Analysis of bare soil experiments. *Soil Science Society of America Journal*, v.41, p.852-856, 1977.
- KELLER, J., BLIESNER, R.D. *Sprinkle and Trickle Irrigation*. New York: AVI Book, 1990. 640p.
- KELLER, J., KARMELI, D. Trickle irrigation design parameters. *Transactions of the ASAE*. p.678-684, 1974.
- KELLER, J., KARMELI, D. *Trickle irrigation desing*. New York: Rain Bird, 1975. 133p.
- KHAN, A.A., YITAYEW, M., WARRICK, A.W. Field evaluation of water and solute distribution from a point source. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v.122, n.4, p.221-227, 1996.
- KHAN, A.H.D., STONE, L.R., LAMM, F.R. Water flux below the root zone vs. drip-line spacing in drip-irrigated corn. *Soil Science Society of America Journal*, v.61, p.1755-1760, 1997.
- LAFOLIE, F., GUENNELON, R., van GENUCHTEN, M.T. Analysis of water under trickle irrigation: I. Theory and numerical solution. *Soil Science Society of America Journal*, v.53, p.1310-1318, 1989.

- LEVIN, I., van ROOYEN, P.C., van ROOYEN, F.C. The effect of discharge rate and intermittent water application by point-source irrigation on the soil moisture distribution pattern. *Soil Science Society of America Journal*, v.43, p.8-16, 1979.
- LI, J., ZHANG, J., RAO, M. Wetting patterns and nitrogen distributions as affected by fertigation strategies from a surface point source. *Agricultural Water Management*, v.67, p.89-104, 2004.
- LIBARDI, P.L. Dinâmica da água no solo, 2ed. Piracicaba: P.L.Libardi, 2000. 509p.
- LIMA, AR.M., FRANÇA, F.M.C., GONDIN, R.S. Novo modelo de irrigação para a região Nordeste do Brasil. In: OLIVEIRA, T.S., ASSIS JR., R.N., ROMERO, R.E. & SILVA, J.R.C. (eds). *Agricultura, sustentabilidade e o semi-árido*. Fortaleza: UFC, Viçosa: SBCS, p.347-355. 2000.
- LOCKINGTON, D., PARLANGE, J.Y, SURIN, A. Optimal prediction of saturation and wetting fronts during trickle irrigation. *Soil Science Society of America Journal*, v.48, p.488-494, 1984.
- LUBANA, P.P.S., NARDA, N.K. Modeling soil water dynamics under trickle emitter: a review. *Journal Agricultural Engineering Resource*, v.78, n.3, p.217-232, 2001.
- LUBANA, P.P.S., NARDA, N.K. Soil water dynamics model for trickle irrigated tomatoes. *Agricultural Water Management*, v.37, p.145-161, 1998.
- MAIA, C.E., LEVIEN, S.L.A., MEDEIROS, J.F., MATOS, J.A., FERNANDES, A.M., MENDONÇA JÚNIOR, C.F, SILVA, C.A., SILVA, F. V. Bulbo úmido em Neossolo Quartzarênico sob irrigação por gotejamento superficial em função da vazão do emissor e tempo de aplicação da água. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 13. Juazeiro-BA, 2003. Anais... Juazeiro-BA, ABID, 2003a. CD ROM.
- MAIA, C.E., LEVIEN, S.L.A., MEDEIROS, J.F., MATOS, J.A., SILVA, C.A., MENDONÇA JÚNIOR, C.F, FERNANDES, A.M., MEDEIROS, P.R.F. Modelos empíricos para avaliação de bulbo molhado em Latossolo Vermelho sob irrigação por gotejamento superficial. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 13. Juazeiro-BA, 2003. Anais... Juazeiro-BA, ABID, 2003b. CD ROM.

- MALLANTS, D., TSENG, P.H., TORIDE, N., TIMMERMAN, A., FEYEN, J. Evaluation of multimodel functions in characterizing a heterogeneous field soil. *Journal of Hydrology*, n.195, p.172-199, 1997.
- MERRILL, S.D., RAATS, P.A.C., DIRKSEN, C. Laterally confined flow from a point source at the surface of an inhomogeneous soil column. *Soil Science Society of America Journal*, v.42, p.851-857, 1978.
- MICHELAKIS, N., VOUGIOUCALOU, E., CLAPAKI, G. Water use, wetted soil volume, root distribution and yield of avocado under drip irrigation. *Agricultural Water Management*, v.24, p.119-131, 1993.
- MIRANDA, J.H., DUARTE, S.N. Modelo para simulação da dinâmica de nitrato em colunas verticais de solo não saturado. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.6, n.2, p.235-241, 2002.
- MMOLAWA, K., OR, D. Root zone solute dynamics under drip irrigation: a review. *Plant and Soil*, n.222, p.163-190, 2000.
- MONCEF, H., HEDI, D., JELLOUL, B., MOHAMED, M. Approach for predicting the wetting front depth beneath a surface point source: theory and numerical aspect. *Irrigation and Drainage*, v.51, p.347-360, 2002.
- MOSTAGHIMI, S., MITCHEL, J.K., LEMBKE, W.D. Effect of discharge rate on distribution of moisture in heavy soils irrigated from a trickle source. *American Society of Agricultural Engineers*, paper 81, 1981.
- NARDA, N.K., CHAWLA, J.K. A simple nitrate submodel for trickle fertigated potatoes. *Irrigation & Drainage*, v.51, p.361-371, 2002.
- NIEMET, R., SELKER, J.S. Imbibition of saline solutions into dry and prewetted porous media. *Advances in Water Resources*, Noam Weisbrod Michael. v.25, p.841 –855, 2002.
- NOGUEIRA, C.C.P. Dinâmica da água num solo Podzólico Vermelho-Amarelo sob irrigação localizada superficial e subsuperficial. Fortaleza: UFC, 1998. 60p. (Dissertação de Mestrado).
- NOGUEIRA, C.C.P., COELHO, E.F., LEÃO, M.C.S. Características e dimensões do volume de um solo molhado sob gotejamento superficial e subsuperficial. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.4, n.3, p.315-320, 2000.

- PHENE, C.J., DAVIS, K.R., HUTCHMAKER, R.B., BAR-YOSEF, B., MEEK, D.W., MISAKI, J. Effect of high frequency surface and subsurface drip irrigation on root distribution of sweet corn. *Irrigation Science*, v.12, p.135-140, 1991.
- PHILIP, J.R. General theorem on steady-state infiltration from surface sources, with application to point and line sources. *Soil Science Society of America Journal*, v.35, p.867-871, 1971.
- PHILIP, J.R. Theory of infiltration. *Advances in Hydrology Science*, v.5, p.215-296, 1969.
- PHILIP, J.R. Travel times from buried and surface infiltration point sources. *Water Resources Research*, v.20, p.990-994, 1984.
- PIZARRO, F. Riegos localizados de alta frecuencia. Madri: Mundi-Prensa, 1996. 511p.
- RAATS P.A.C. Steady infiltration from point sources cavities and basins. *Soil Science Society of America Journal*, v.35, p.689-694, 1971.
- RESENDE, M., CURI, N., REZENDE, S.B., CORRÊA, G.F. *Pedologia: base para distinção de ambientes*. Viçosa-MG: Neput, 1995. 304p.
- REVOL, P., CLOTHIER, B.E., KOSUTH, P., VACHAUD, G. The free-water pond under a trickle source: a field test of existing theories. *Irrigation Science*, v.16, p.169-173, 1996.
- REVOL, P., CLOTHIER, B.E., MAILHOL, J.C., VACHAUD, G., VAUCLIN, M. Infiltration from a surface point and drip irrigation. 2. An approximate time-dependent solution for wet-front position. *Water Resources Research*, v.33, p.1869-1874, 1997b.
- REVOL, P., CLOTHIER, B.E., VACHAUD, G., TONY, J.L. Predicting the field characteristics of drip irrigation. *Soil Technology*, v.4, p.125-134, 1991.
- REVOL, P., VAUCLIN, M., VACHAUD, G., CLOTHIER, B.E. Infiltration from a surface point and drip irrigation. 1. The midpoint soil water pressure. *Water Resources Research*, v.33, p.1861-1867, 1997a.
- RIGHES, A.A., AMARAL, L.G.H., COSTA, R.D., ROSA, G.M., WILLES, J.A., GOMES, A.C.S. *Determinação da água no solo e na planta para irrigação*. Santa Maria: Imprensa Universitária, 2003. 97p.
- ROMIC, D., ROMIC, M., BOROSIC, J., POLJAK, M. Mulching decreases nitrate leaching in bell pepper (*Capsicum annuum* L.) cultivation. *Agricultural Water Management*, n.60, p.87-97, 2003.

- ROTH, R.L. Soil moisture distribution and wetting pattern from a point-source. Proceeding of the second international drip irrigation Congress, p.246-251, 1974.
- RUSSO, D. A Geostatistical approach to the trickle irrigation design in a heterogeneous soil. 1. Theory. Water Resource Research, v.19, p.632-642, 1984.
- SAMPAIO, E.V.S.B., SALCEDO, I. Diretrizes para o manejo sustentável dos solos brasileiros: região semi-árida. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 26, 1997, Rio de Janeiro-RJ. Anais... Rio de Janeiro: SBCS, 1997. (CD ROM)
- SCHWARTZMAN, M., ZUR, B. Emitter spacing and geometry of wetted soil volume. Journal Irrigation and Drainage Engineering, v.112, n.3, p.242-253, 1986.
- SELIM, H.M., KIRKHAN, D. Unsteady two-dimensional flow of water in unsaturated soils above an impervious barrier. Soil Science Society of American Journal, v.37, p.489-495, 1973.
- SHANI, U., HANKS, R.J., BRESLER, E., OLIVEIRA, C.A.S. Field methods for estimating hydraulic conductivity and matric potential-water content relations. Soil Science Society of American Journal, v.51, p.298-302, 1987.
- SILVA, J.G.F. Irrigação localizada: dimensionamento e manejo. Vitória: Emcapa, 1996, 74p.
- SIMUNEK, J., JARVIS, N.J., van GENUCHTEN, M.TH., GARDENAS, A. Review and comparison of models for describing non-equilibrium and preferential flow and transport in the vadose zone. Journal of Hydrology, n.272, p.14-35, 2003.
- SIMUNEK, J., VOGEL, T., van GENUCHTEN, M.TH. SWMS 2D: simulating water flow and solute transport in two-dimensional variably saturated media. Riverside: US Salinity Laboratory. 1993.
- SINGH, P., KANWAR, R.S. Simulating NO₃-N transport to subsurface drain flows as affected by tillage under continuous corn using modified RZWQM. St. Joseph: Transactions of the ASAE, v.38, n.2, p.499-506, 1995.
- SONNLEITNER, M.A., ABBASPOUR, K.C., SCHULIN, R. Hydraulic and transport properties of the plant-soil system estimated by inverse modeling. European Journal Soil Science, n.54, p.127-138, 2003.

- SOUZA, C.F., MATSURA, E.E. Distribuição de água no solo para o dimensionamento da irrigação por gotejamento. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.8, n.1, p.7-15, 2004.
- SOUZA, C.F., MATSURA, E.E., OR, D., COLOMBO, A., TESTEZLAF, R. Avaliação de modelos de infiltração da água no solo para o dimensionamento da irrigação por gotejamento. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE INGENIERIA AGRÍCOLA, 4, Chile, 2001. Anais... Chillán, Chile, 2001.
- STEEL, R.G., TORRIE, J.H., DICKEY, D.A. Principles and procedures of statistics: a biometrical approach. 3.ed. McGraw-Hill. 1997. 666p.
- TAGHAVI, S.A., MARIÑO, M.A., ROLSTON, D. Infiltration from trickle irrigation source. *Journal of the Irrigation and drainage*, v.110, p.331-341, 1984.
- THORBURN, P.J., COOK, F.J., BRISTOW, K.L. Soil-dependent wetting from trickle emitters: implications for system design and management. *Irrigation Science*, v.22, p.121-127, 2003.
- TURNER, N.C., PARLANGE, J.Y. Lateral movement at the periphery of a one dimensional flow of water. *Soil Science*, v.118, p.70-77, 1974.
- van GENUCHTEN, M.T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of American Journal*, v.44, p.892-898, 1980.
- WARRICK, A.W. Solution to one dimensional linear moisture flow equation with water extraction. *Soil Science Society of American Journal*, v.38, p.573-576, 1974.
- WARRICK, A.W., AMMOZEGAR-FARD, A., LOMEN, D.O. Linearized moisture flow from line sources with water extraction. *Transactions of the ASAE*, v.130, p.549-553, 1979.
- WARRICK, A.W., AMOOZEGAR-FARD, A. Infiltration and drainage calculations using spatially scaled hydraulic properties. *Water Resources Research*, v.13, p.355-362, 1979.
- WARRICK, A.W., LOMEN, D.O. Time-dependent linearized infiltration. III. Strip and disc sources. *Soil Science Society of American Journal*, v.40, p.639-643, 1976.
- WARRICK, A.W., LOMEN, D.O., YATES, S.R. A generalized solutions to infiltration. *Soil Science Society of American Journal*, v.49, p.34-38, 1985.

- WOODING, R.A. Steady infiltration from a shallow circular pond. *Water Resource Research*, v.4, p.1259-1273, 1968.
- XIYUN, J., WENYAN, W., ZHIRONG, W., JIANGHUI, Z., XINLI, D. Experimental Research on Surface Flow Characteristics of Film- Hole Irrigation. *Proceedings of 99 International Conference on Agricultural Engineering*. Beijing, China, p.485-48. 1999.
- YITAYEW, M.A., KHAN, A., WARRICK, A.W. In situ measurements of soil hydraulic conductivity using point application of water. *Applied Engineering Agriculture*, v.14, p.115-120, 1998.
- YOUNGS, E.G., LEEDS-HARRINSON, P.B., ALGHUSNI, A. Surface ponding of coarse-textured soil under irrigation with a line of surface emitters. *Journal Agriculture Engineers Resource*, v.73, p.95-100, 1999.
- ZUR, B. Wetted soil volume as a design objective in trickle irrigation. *Irrigation Science*, v.16, p.101-105, 1996.

8. APÊNDICES

Apêndice 1. Descrição pedológica dos solos estudados do Luvissole Crômico

PERFIL 01– Data: 11/11/2002

CLASSIFICAÇÃO: LUVISSOLO CRÔMICO

LOCALIZAÇÃO: Estado do Rio Grande do Norte, município de Mossoró, Fazenda São João, a 300 m do lado esquerdo da rodovia estadual que liga Mossoró à Baraúna, km 2.

SITUAÇÃO E DECLIVE: Perfil descrito em uma trincheira, sob condições de área em pousio, em declive plano.

ALTITUDE: 30 m aproximadamente.

FORMAÇÃO GEOLÓGICA LITOLOGIA: Área de contato entre Cretáceo e Terciário - Sedimentos

MATERIAL ORIGINÁRIO: Calcário misturado com sedimentos franco-arenosos.

PEDREGOSIDADE E ROCHOSIDADE: Ausentes.

RELEVO: LOCAL - plano. REGIONAL – plano a suave ondulado.

EROSÃO: laminar ligeira.

DRENAGEM: bem drenado.

VEGETAÇÃO REGIONAL: caatinga hiperxerófila arbustiva densa.

USO ATUAL: pousio após cultivo de melão

A_{p1} - 0 a 15 cm; bruno avermelhado (5YR 4/4, úmido); franco-argilo-arenoso; blocos subangulares, muito pequenos e pequenos, fraca a moderada; muitos poros muito pequenos e pequenos; duro, friável, plástico e pegajoso; transição clara e plana; raízes muito fina comuns e finas poucas.

A_{p2} - 15 a 25 cm; vermelho (2,5YR 4/6, úmido) e vermelho amarelado (5YR 5/8, seco); franco-argilo-arenoso; blocos subangulares, muito pequenos e pequenos, moderada; muitos poros muito pequenos e pequenos; ligeiramente duro, friável, plástico e pegajoso; transição gradual e plana; raízes muito fina comuns e finas poucas.

B₁ - 25 a 65 cm; vermelho (2,5YR 4/6, úmido) e vermelho amarelado (5YR 5/8, seco); franco-argilo-arenoso; blocos subangulares, muito pequenos e pequenos, moderada; muitos poros muito pequenos; duro, friável, plástico e pegajoso; transição gradual e plana; raízes muito fina e finas poucas.

B₂₊ - 65 a 80+ cm; vermelho (2,5YR 4/6, úmido) e vermelho amarelado (5YR 5/8, seco); franco-argilo-arenoso; blocos subangulares, muito pequenos e pequenos, moderada; muitos poros muito pequenos; duro, friável, plástico e pegajoso; raízes finas raras.

EXAMINADORES: Francisco Ernesto Sobrinho e José Francismar de Medeiros

Apêndice 2. Descrição pedológica dos solos estudados do Argissolo Vermelho-Amarelo

PERFIL 02 – Data: 18/11/2002

CLASSIFICAÇÃO: ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico latossólico

LOCALIZAÇÃO: Estado do Rio Grande do Norte, município de Mossoró, Fazenda São João, a 2 km do lado direito da Rodovia estadual RN 015, km 4.

SITUAÇÃO E DECLIVE: Perfil descrito em uma trincheira, sob condições de área em pousio, na parte média da encosta em área com declive suave ondulado.

ALTITUDE: 50 m aproximadamente.

FORMAÇÃO GEOLÓGICA LITOLOGIA: Área de contato entre Cretáceo e Terciário - Sedimentos

MATERIAL ORIGINÁRIO: Calcário misturado com sedimentos arenosos.

PEDREGOSIDADE E ROCHOSIDADE: Ausentes.

RELEVO: LOCAL – suave ondulado. REGIONAL – plano a suave ondulado.

EROSÃO: laminar ligeira.

DRENAGEM: bem a moderadamente drenado.

VEGETAÇÃO REGIONAL: caatinga hiperxerófila arbustiva densa.

USO ATUAL: pousio após cultivo de melão

A_{p1} - 0 a 25 cm; bruno (7,5YR 4/4, úmido), vermelho amarelado (5YR 5/8, seco); franco-arenosa; blocos subangulares, pequenos e médios, fraca; muitos poros pequenos; ligeiramente duro, friável, ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso; transição clara e plana; raízes muito fina comuns e finas poucas.

A_{p2} - 25 a 42 cm; vermelho-amarelo (5YR 4/6, úmido), vermelho amarelado (5YR 5/8, seco); franco-arenosa; blocos subangulares, muito pequenos e pequenos, fraca; muitos poros pequenos; ligeiramente duro, friável, ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso; transição clara e plana; raízes muito fina comuns e finas poucas.

B₁ - 42 a 53 cm; vermelho-amarelo (5YR 4/6, úmido e seco); argilo-arenosa; blocos subangulares e laminar, pequena e média, moderada; muitos poros pequenos e muitos muito pequenos; duro, friável, plástico e pegajoso; transição difusa e plana; raízes muito fina raras e finas raras.

B₂ - 53 a 80+ cm; vermelho-amarelo (5YR 4/6, úmido e seco); argila; mosqueados poucos avermelhados; blocos subangulares, pequena e média, moderada; muitos poros pequenos e muitos muito pequenos; duro, friável, plástico e pegajoso; raízes finas raras.

EXAMINADORES: Francisco Ernesto Sobrinho e José Francismar de Medeiros

Apêndice 3. Descrição pedológica dos solos estudados do Cambissolo Háplico

PERFIL 03 - Data: 11/03/2003

CLASSIFICAÇÃO: CAMBISSOLO HÁPLICO

LOCALIZAÇÃO: Estado do Rio Grande do Norte, município de Baraúna, Fazenda Vitória Agrícola, comunidade Boa Água, a 10 km ao sul do km 30 da RN 015.

SITUAÇÃO E DECLIVE: Perfil descrito em uma trincheira, sob condições de área em pousio, em declive plano.

ALTITUDE: 95 m aproximadamente.

FORMAÇÃO GEOLÓGICA LITOLOGIA: Cretáceo – Calcário Jandaíra

MATERIAL ORIGINÁRIO: Calcário.

PEDREGOSIDADE E ROCHOSIDADE: Raros afloramentos na área.

RELEVO: LOCAL - plano. REGIONAL – plano.

EROSÃO: laminar ligeira a moderada.

DRENAGEM: bem drenado.

VEGETAÇÃO REGIONAL: caatinga hiperxerófila arbustiva densa, constituída de pau-branco, marmeleiro e outras

USO ATUAL: pousio após cultivo de melão

A_p - 0 a 25 cm; bruno amarelo escuro (10YR 3/4, úmido); franco-argilosa; fraca a moderada pequena a média granular e moderada pequena blocos sub-angulares; muitos poros pequenos e comuns médio; duro, friável, muito plástico e pegajoso; transição clara e plana; raízes finas comuns.

B₁ – 25 a 45 cm; vermelho amarelado (5YR 4/6, úmido); franco-argilosa; fraca e moderada pequena blocos subangulares; muitos poros pequenos e poucos médios; duro, friável, muito plástico e muito pegajoso; transição gradual e plana; raízes finas poucas.

B₂ - 45 a 68 cm; vermelho amarelado (5YR 4/8, úmido); argila; fraca pequena blocos angulares e subangulares; muitos poros pequenos e comum médios, ligeiramente duro, friável, muito plástico e muito pegajoso; transição gradual e plana; raízes finas raras.

B₃ - 68 a 90 cm; vermelho amarelo (5YR 4/6, úmido); franco-argilosa com cascalho; maciça com tendência a muito fraca pequena blocos subangulares; poros comuns pequenos e médios; duro, muito friável, muito plástico e muito pegajoso; raízes finas raras.

EXAMINADORES: Francisco Ernesto Sobrinho e José Francismar de Medeiros

Apêndice 4. Descrição pedológica dos solos estudados do Latossolo Vermelho

PERFIL 04 - Data: 11/03/2003

CLASSIFICAÇÃO: LATOSSOLO VERMELHO Eutrófico argissólico

LOCALIZAÇÃO: Estado do Rio Grande do Norte, município de Mossoró, Fazenda Santa Júlia, a 8 km a oeste do km 25 da BR 304, distando 20 km da sede do município, latitude de 5° 02' 0,02'' S e longitude 37° 22' 33,6'' W

SITUAÇÃO E DECLIVE: Perfil descrito em uma trincheira, sob condições de área em pousio, em declive plano.

ALTITUDE: 60 m aproximadamente.

FORMAÇÃO GEOLÓGICA LITOLOGIA: Terciário (Grupo Barreiras)

MATERIAL ORIGINÁRIO: Sedimentos do Grupo Barreiras.

PEDREGOSIDADE E ROCHOSIDADE: Ausentes.

RELEVO: LOCAL - plano. REGIONAL – plano a suave ondulado.

EROSÃO: ausente.

DRENAGEM: bem drenado.

VEGETAÇÃO REGIONAL: caatinga hiperxerófila arbustiva densa, constituída de pau-branco, marmeleiro, catanduva, e outras

USO ATUAL: pousio após cultivo de melão

A_p - 0 a 46 cm; vermelho escuro (10R 3/6, úmido), vermelho (10R 4/6, seco); franco-arenosa; maciça que se desfaz em pequena e muito pequena blocos sub-angulares e grãos simples; muitos poros muito pequenos e pequenos; macio, muito friável, ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso; transição clara e plana; raízes muito fina comuns e finas poucas.

B₁ - 46 a 75 cm; vermelho escuro (10R 3/6, úmido) e vermelho (10R 4/8, seco; franco-argilosa; maciça que se desfaz em fraca muito pequena e pequena blocos sub-angulares e fraca muito pequena granular; muitos poros muito pequenos comuns; ligeiramente duro, muito friável, ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso; transição difusa e plana; raízes muito fina pouca e finas raras.

B₂₊ - 75 a 98+ cm; vermelho (10R 4/6, úmido) e vermelho (2,5YR 4/8, seco); argila; maciça que se desfaz em fraca muito pequena e pequena blocos sub-angulares e fraca e muito pequena granular; muitos poros muito pequenos comuns; macio a ligeiramente duro, muito friável, ligeiramente plástico a plástico e ligeiramente pegajoso; raízes muito fina raras e finas raras.

EXAMINADORES: Francisco Ernesto Sobrinho e José Francismar de Medeiros

Apêndice 5. Descrição pedológica dos solos estudados do Neossolo Quartzarênico

PERFIL 05 - Data: 12/12/2002

CLASSIFICAÇÃO: NEOSSOLO QUARTZARÊNICO

LOCALIZAÇÃO: Estado do Rio Grande do Norte, município de Mossoró, Campus da ESAM, a 4 km a leste do km 47 da BR 110.

SITUAÇÃO E DECLIVE: Perfil descrito em uma trincheira, sob condições de área em pousio, em declive plano.

ALTITUDE: 40 m aproximadamente.

FORMAÇÃO GEOLÓGICA LITOLOGIA: Terciário (Grupo Barreiras)

MATERIAL ORIGINÁRIO: Sedimentos areno-quartzosos.

PEDREGOSIDADE E ROCHOSIDADE: Ausentes.

RELEVO: LOCAL - plano. REGIONAL – plano a suave ondulado.

EROSÃO: laminar moderada.

DRENAGEM: bem moderadamente drenado.

VEGETAÇÃO REGIONAL: caatinga hiperxerófila arbustiva densa

USO ATUAL: pousio após cultivo de sorgo

A_p - 0 a 24 cm; bruno acinzentado (10YR 5/2, úmido), bruno claro acinzentado (10YR 6/3, seco); areia; fraca pequena a média granular; muitos poros muito pequenos e pequenos; macio, muito friável, não plástico e não pegajoso; transição clara e plana; raízes muito fina comuns e finas poucas.

C₁ - 24 a 47 cm; bruno amarelado claro (10YR 6/4, úmido); areia franca; maciça muito pouco coerente; muitos poros muito pequenos e pequenos; macio, muito friável, não plástico e não pegajoso; transição gradual e plana; raízes finas poucas.

C₂ - 47 a 72+ cm; amarelo brunado (10YR 6/6, úmido); areia franca; maciça muito pouco coerente; muitos poros muito pequenos e pequenos; macio, muito friável, não plástico e não pegajoso; raízes finas raras.

EXAMINADORES: Francisco Ernesto Sobrinho e José Francismar de Medeiros

Apêndice 6. Descrição pedológica dos solos estudados do Neossolo Flúvico

PERFIL 06 - Data: 11/01/2003

CLASSIFICAÇÃO: NEOSSOLO FLÚVICO Eutrófico

LOCALIZAÇÃO: Estado do Rio Grande do Norte, município de Ipanguaçu, Fazenda São João, distando 2 km da sede do município.

SITUAÇÃO E DECLIVE: Perfil descrito em uma trincheira, sob condições de área cultivada, em declive plano.

ALTITUDE: 30 m aproximadamente.

FORMAÇÃO GEOLÓGICA LITOLOGIA: Holoceno - Sedimentos

MATERIAL ORIGINÁRIO: Sedimentos aluviais argilo-siltosos e argilo-arenosos não consolidados do rio Piranhas.

PEDREGOSIDADE E ROCHOSIDADE: Ausentes.

RELEVO: LOCAL - plano. REGIONAL – plano com ligeiros desníveis locais.

EROSÃO: ausente e laminar ligeira localmente

DRENAGEM: bem a moderadamente drenado.

VEGETAÇÃO REGIONAL: carnaubeiras e culturas diversas

USO ATUAL: cultivo de manga

A_p - 0 a 40 cm; bruno escuro (10YR 3/3, úmido); franco-argilosa; maciça; muitos poros pequenos; extremante duro, firme, plástico e muito pegajoso; transição clara e plana; raízes finas e médias poucas.

IIC - 40 a 60+ cm; Bruno amarelo escuro (10YR 4/4, úmido); franco-arenosa; maciça; muitos poros pequenos e poucos médios; duro, muito friável, ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso; raízes finas poucas.

EXAMINADORES: Francisco Ernesto Sobrinho e José Francismar de Medeiros

Apêndice 7. Análise de variância para diâmetro máximo (D_{max}), diâmetro superficial (D_s) e profundidade máxima (Z_{max}) do bulbo molhado, em relação a tempo (t), a vazão (q) e a interação entre vazão e tempo ($q \times t$): Luvisso Crômico

Variáveis	Fontes de Variação	Graus de liberdade	Soma de Quadrado	Quadrado Médio	F	Significância
D_{max} (mm)	Total	47	1628645			
	Total de redução	23	1619658	70419,90	188,05	0,0000
	Bloco	2	7053,125	3526,562	6,99	0,0040
	t	3	637059,9	212353,3	421,05	0,0000
	Erro A	6	3026,042	504,3403		
	q	3	866251,6	288750,5	771,07	0,0000
	q x t	9	106267,2	11807,47	31,53	0,0000
	Erro B	24	8987,500	374,4792		
	Número de dados		48			
	Média Geral			507,19		
Coefficiente de Variação			3,8154			
D_s (mm)	Total	47	660900,0			
	Total de redução	23	648116,7	28178,99	52,90	0,0000
	Bloco	2	3228,125	1614,062	3,79	0,0371
	t	3	214341,7	71447,22	167,77	0,0000
	Erro A	6	2555,208	425,8681		
	q	3	416387,5	138795,8	260,58	0,0000
	q x t	9	11604,17	1289,352	2,42	0,0405
	Erro B	24	12783,33	532,6389		
	Número de dados		48			
	Média Geral			435,00		
Coefficiente de Variação			5,3055			
Z_{max} (mm)	Total	47	1023245,			
	Total de redução	23	1004174,	43659,76	54,94	0,0000
	Bloco	2	5196,875	2598,438	0,45	*****
	t	3	483447,4	161149,1	27,92	0,0000
	Erro A	6	34632,29	5772,049		
	q	3	439209,9	146403,3	184,24	0,0000
	q x t	9	41688,02	4632,002	5,83	0,0003
	Erro B	24	19070,83	794,6181		
	Número de dados		48			
	Média Geral			367,81		
Coefficiente de Variação			7,6640			

Apêndice 8. Análise de variância para diâmetro máximo (D_{\max}), diâmetro superficial (D_s) e profundidade máxima (Z_{\max}) do bulbo molhado, em relação a tempo (t), a vazão (q) e a interação entre vazão e tempo ($q \times t$): Argissolo Vermelho-Amarelo

Variáveis	Fontes de Variação	Graus de liberdade	Soma de Quadrado	Quadrado Médio	F	Significância
D_{\max} (mm)	Total	47	2377050,			
	Total de redução	23	2317017,	100739,9	40,27	0,0000
	Bloco	2	7184,375	3592,188	3,51	0,0462
	t	3	1053904,	351301,4	342,79	0,0000
	Erro A	6	6148,958	1024,826		
	q	3	1070300,	356766,7	142,63	0,0000
	q x t	9	179479,2	19942,13	7,97	0,0000
	Erro B	24	60033,33	2501,389		
	Número de dados		48			
	Média Geral		545,00			
Coefficiente de Variação		9,1769				
D_s (mm)	Total	47	555774,5			
	Total de redução	23	542937,0	23605,96	44,13	0,0000
	Bloco	2	7032,292	3516,146	3,59	0,0433
	t	3	202330,7	67443,58	68,82	0,0000
	Erro A	6	5880,208	980,0347		
	q	3	322734,9	107578,3	201,12	0,0000
	q x t	9	4958,854	550,9838	1,03	0,4454
	Erro B	24	12837,50	534,8958		
	Número de dados		48			
	Média Geral		419,90			
Coefficiente de Variação		5,5080				
Z_{\max} (mm)	Total	47	1583267,			
	Total de redução	23	1561117,	67874,64	73,54	0,0000
	Bloco	2	8016,667	4008,333	2,18	0,1349
	t	3	677216,7	225738,9	122,76	0,0000
	Erro A	6	11033,33	1838,889		
	q	3	764683,3	254894,4	276,18	0,0000
	q x t	9	100166,7	11129,63	12,06	0,0000
	Erro B	24	22150,00	922,9167		
	Número de dados		48			
	Média Geral		411,67			
Coefficiente de Variação		7,3796				

Apêndice 9. Análise de variância para diâmetro máximo (D_{\max}), diâmetro superficial (D_s) e profundidade máxima (Z_{\max}) do bulbo molhado, em relação a tempo (t), a vazão (q) e a interação entre vazão e tempo ($q \times t$): Cambissolo Háplico

Variáveis	Fontes de Variação	Graus de liberdade	Soma de Quadrado	Quadrado Médio	F	Significância
D_{\max} (mm)	Total	47	1702758,			
	Total de redução	23	1685670,	73290,01	102,94	0,0000
	Bloco	2	6378,125	3189,062	7,91	0,0023
	t	3	740793,2	246931,1	612,81	0,0000
	Erro A	6	2417,708	402,9514		
	q	3	891614,1	297204,7	417,43	0,0000
	q x t	9	44467,19	4940,799	6,94	0,0001
	Erro B	24	17087,50	711,9792		
	Número de dados		48			
	Média Geral			521,56		
	Coefficiente de Variação		5,1160			
D_s (mm)	Total	47	1064242,			
	Total de redução	23	1040021,	45218,30	44,81	0,0000
	Bloco	2	6319,792	3159,896	4,03	0,0311
	t	3	476962,5	158987,5	202,56	0,0000
	Erro A	6	4709,375	784,8958		
	q	3	530712,5	176904,2	175,29	0,0000
	q x t	9	21316,67	2368,519	2,35	0,0461
	Erro B	24	24220,83	1009,201		
	Número de dados		48			
	Média Geral			472,08		
	Coefficiente de Variação		6,7293			
Z_{\max} (mm)	Total	47	1226324,			
	Total de redução	23	1204745,	52380,23	58,26	0,0000
	Bloco	2	4294,792	2147,396	0,99	*****
	t	3	519859,9	173286,6	79,82	0,0000
	Erro A	6	13026,04	2171,007		
	q	3	610534,9	203511,6	226,34	0,0000
	q x t	9	57029,69	6336,632	7,05	0,0001
	Erro B	24	21579,17	899,1319		
	Número de dados		48			
	Média Geral			350,10		
	Coefficiente de Variação		8,5647			

Apêndice 10. Análise de variância para diâmetro máximo (D_{max}), diâmetro superficial (D_s) e profundidade máxima (Z_{max}) do bulbo molhado, em relação a tempo (t), a vazão (q) e a interação entre vazão e tempo ($q \times t$): Latossolo Vermelho

Variáveis	Fontes de Variação	Graus de liberdade	Soma de Quadrado	Quadrado Médio	F	Significância
D_{max} (mm)	Total	47	2047220,			
	Total de redução	23	2000495,	86978,06	44,68	0,0000
	Bloco	2	18996,87	9498,438	6,40	0,0059
	t	3	868955,7	289651,9	195,02	0,0000
	Erro A	6	8911,458	1485,243		
	q	3	1023131,	341043,6	175,17	0,0000
	q x t	9	80500,52	8944,502	4,59	0,0013
	Erro B	24	46725,00	1946,875		
	Número de dados		48			
	Média Geral		509,69			
Coefficiente de Variação		8,6570				
D_s (mm)	Total	47	394337,0			
	Total de redução	23	362941,1	15780,05	12,06	0,0000
	Bloco	2	1863,542	931,7708	0,65	*****
	t	3	132572,4	44190,80	30,80	0,0000
	Erro A	6	8607,292	1434,549		
	q	3	211847,4	70615,80	53,98	0,0000
	q x t	9	8050,521	894,5023	0,68	*****
	Erro B	24	31395,83	1308,160		
	Número de dados		48			
	Média Geral		366,98			
Coefficiente de Variação		9,8557				
Z_{max} (mm)	Total	47	1494131,			
	Total de redução	23	1461127,	63527,26	46,20	0,0000
	Bloco	2	17784,37	8892,188	8,11	0,0020
	t	3	585156,2	195052,1	177,91	0,0000
	Erro A	6	6578,125	1096,354		
	q	3	732660,4	244220,1	177,59	0,0000
	q x t	9	118947,9	13216,44	9,61	0,0000
	Erro B	24	33004,17	1375,174		
	Número de dados		48			
	Média Geral		385,62			
Coefficiente de Variação		9,6164				

Apêndice 11. Análise de variância para diâmetro máximo (D_{max}), diâmetro superficial (D_s) e profundidade máxima (Z_{max}) do bulbo molhado, em relação a tempo (t), a vazão (q) e a interação entre vazão e tempo ($q \times t$): Neossolo Quartzarênico

Variáveis	Fontes de Variação	Graus de liberdade	Soma de Quadrado	Quadrado Médio	F	Significância
D_{max} (mm)	Total	47	1782437,			
	Total de redução	23	1752270,	76185,67	60,61	0,0000
	Bloco	2	10104,17	5052,083	2,47	0,1059
	t	3	746534,9	248845,0	121,59	0,0000
	Erro A	6	12279,17	2046,528		
	q	3	890193,2	296731,1	236,07	0,0000
	q x t	9	93158,85	10350,98	8,24	0,0000
	Erro B	24	30166,67	1256,944		
	Número de dados		48			
	Média Geral		528,65			
Coefficiente de Variação		6,7065				
D_s (mm)	Total	47	520375,0			
	Total de redução	23	488625,0	21244,57	16,06	0,0000
	Bloco	2	13737,50	6868,750	2,57	0,0978
	t	3	181825,0	60608,33	22,64	0,0000
	Erro A	6	16062,50	2677,083		
	q	3	258904,2	86301,39	65,24	0,0000
	q x t	9	18095,83	2010,648	1,52	0,1974
	Erro B	24	31750,00	1322,917		
	Número de dados		48			
	Média Geral		416,25			
Coefficiente de Variação		8,7380				
Z_{max} (mm)	Total	47	1579773,			
	Total de redução	23	1553947,	67562,92	62,79	0,0000
	Bloco	2	17121,29	8560,646	3,97	0,0325
	t	3	688601,7	229533,9	106,35	0,0000
	Erro A	6	12949,71	2158,285		
	q	3	737330,1	245776,7	228,40	0,0000
	q x t	9	97944,35	10882,71	10,11	0,0000
	Erro B	24	25826,33	1076,097		
	Número de dados		48			
	Média Geral		389,40			
Coefficiente de Variação		8,4243				

Apêndice 12. Análise de variância para diâmetro máximo (D_{max}), diâmetro superficial (D_s) e profundidade máxima (Z_{max}) do bulbo molhado, em relação a tempo (t), a vazão (q) e a interação entre vazão e tempo ($q \times t$): Neossolo Flúvico

Variáveis	Fontes de Variação	Graus de liberdade	Soma de Quadrado	Quadrado Médio	F	Significância
D_{max} (mm)	Total	47	2227631,			
	Total de redução	23	2127392,	92495,30	22,15	0,0000
	Bloco	2	11029,17	5514,583	0,93	*****
	t	3	841261,5	280420,5	47,46	0,0000
	Erro A	6	35448,00	5908,000		
	q	3	1108346,	369448,7	88,46	0,0000
	q x t	9	131307,0	14589,67	3,49	0,0068
	Erro B	24	100238,8	4176,618		
	Número de dados		48			
	Média Geral		500,83			
Coefficiente de Variação		12,904				
D_s (mm)	Total	47	2237779,			
	Total de redução	23	2119886,	92168,94	18,76	0,0000
	Bloco	2	12559,54	6279,771	0,82	*****
	t	3	789742,7	263247,6	34,57	0,0000
	Erro A	6	45690,46	7615,076		
	q	3	1150413,	383470,9	78,06	0,0000
	q x t	9	121480,2	13497,80	2,75	0,0232
	Erro B	24	117893,3	4912,222		
	Número de dados		48			
	Média Geral		485,35			
Coefficiente de Variação		14,440				
Z_{max} (mm)	Total	47	160147,9			
	Total de redução	23	154747,9	6728,170	29,90	0,0000
	Bloco	2	269,7917	134,8958	0,31	*****
	t	3	111972,9	37324,31	85,14	0,0000
	Erro A	6	2630,208	438,3681		
	q	3	33256,25	11085,42	49,27	0,0000
	q x t	9	6618,750	735,4167	3,27	0,0098
	Erro B	24	5400,000	225,0000		
	Número de dados		48			
	Média Geral		181,04			
Coefficiente de Variação		8,2854				

Apêndice 13. Umidade do solo (% base peso) no interior do bulbo molhado logo após a aplicação de água: Luvissole Crômico

Tempo (h)	Vazão (L h ⁻¹)			
	2,0		4,0	
	Prof.	Umidade	Prof.	Umidade
4,0	0-10	14,73	0-15	13,97
	10-20	13,13	15-30	12,42
	20-35	12,73	30-45	12,53
	Média	13,53	Média	12,97
7,0	0-20	13,88		
	20-40	12,72		
	40-62	12,49		
	Média	13,03		

Apêndice 14. Umidade do solo (% base peso) no interior do bulbo molhado logo após a aplicação de água: Argissolo Vermelho-Amarelo

Tempo (h)	Vazão (L h ⁻¹)							
	1,0		2,0		4,0		8,0	
	Prof.	Umidade	Prof.	Umidade	Prof.	Umidade	Prof.	Umidade
4,0	0-10	12,85	0-13	12,67	0-15	10,64	0-20	14,96
	10-20	11,97	13-26	11,69	15-30	13,79	20-40	15,18
	20-30	6,59	26-39	12,26	30-45	15,51	40-60	15,76
	Média	10,47	Média	12,20	Média	13,31	Média	15,30
7,0	0-14	15,72	0-17	11,75	0-20	13,03	0-30	10,59
	14-28	9,71	17-34	11,34	20-40	11,78	30-60	13,29
	28-42	8,03	34-51	15,60	40-60	13,40	60-90	19,07
	Média	11,15	Média	12,89	Média	12,74	Média	14,32

Apêndice 15. Umidade do solo (% base peso) no interior do bulbo molhado logo após a aplicação de água: Cambissolo Háplico

Tempo (h)	Vazão (L h ⁻¹)							
	1,0		2,0		4,0		8,0	
	Prof.	Umidade	Prof.	Umidade	Prof.	Umidade	Prof.	Umidade
2,0	0-5	19,39	0-7	21,88	0-11	25,17	0-15	26,78
	5-10	18,75	7-14	20,24	11-21	23,45	15-30	24,92
	10-15	16,55	14-22	18,93	21-33	20,69	30-45	19,46
	Média	18,23	Média	20,35	Média	23,10	Média	23,72
4,0	0-7	23,34	0-12	22,22	0-15	22,88	0-22	21,43
	7-14	22,00	12-24	20,56	15-30	20,95	22-44	18,61
	14-20	16,61	24-35	19,50	30-45	19,41	44-66	16,40
	Média	20,65	Média	20,76	Média	21,08	Média	18,81
7,0	0-10	29,09	0-14	24,81	0-21	24,37	0-22	24,71
	10-20	20,48	14-28	27,14	21-42	22,57	22-44	20,21
	20-29	17,96	28-42	24,09	42-63	20,47	44-64	23,96
	Média	22,51	Média	25,34	Média	22,47	Média	22,96

Apêndice 16. Umidade do solo (% base peso) no interior do bulbo molhado logo após a aplicação de água: Latossolo Vermelho

Tempo (h)	Vazão (L h ⁻¹)							
	1,0		2,0		4,0		8,0	
	Prof.	Umidade	Prof.	Umidade	Prof.	Umidade	Prof.	Umidade
4,0	0-9	12,31	0-12	13,68	0-13	15,34	0-20	8,88
	9-18	11,00	12-25	14,36	13-25	16,01	20-40	15,08
	18-26	11,37	25-37	10,79	25-38	15,78	40-59	16,32
	Média	11,56	Média	12,94	Média	15,71	Média	13,42
7,0			0-15	12,95			0-30	15,44
			15-30	12,13			30-60	17,22
			30-46	7,96			60-90	13,53
			Média	11,01			Média	15,40

Apêndice 17. Umidade do solo (% base peso) no interior do bulbo molhado logo após a aplicação de água: Neossolo Quartzarênico

Tempo (h)	Vazão (L h ⁻¹)							
	1,0		2,0		4,0		8,0	
	Prof.	Umidade	Prof.	Umidade	Prof.	Umidade	Prof.	Umidade
4,0	0-8	12,09	0-11	12,75	0-17	9,96	0-20	12,02
	8-16	7,57	11-22	9,80	17-33	9,12	20-40	9,87
	16-25	7,71	22-35	7,32	33-50	8,47	40-60	9,88
	Média	9,13	Média	9,96	Média	9,19	Média	10,59
7,0	0-8	11,15	0-15	11,59	0-19	13,30	0-18	13,86
	08-16	9,74	15-30	8,57	19-38	8,68	18-36	8,59
	16-24	5,96	30-44	7,07	38-57	8,63	36-54	9,31
					57-77	9,69	54-73	9,92
	Média	8,95	Média	9,07	Média	10,08	Média	10,42

Apêndice 18. Umidade do solo (% base peso) no interior do bulbo molhado logo após a aplicação de água: Neossolo Flúvico

Tempo (h)	Vazão (L h ⁻¹)							
	1,0		2,0		4,0		8,0	
	Prof.	Umidade	Prof.	Umidade	Prof.	Umidade	Prof.	Umidade
7,0	0-6	35,59	0-8	35,09	0-10	34,22	0-10	35,81
	6-12	31,70	8-16	30,33	10-20	31,37	10-20	33,19
	12-18	26,19	16-24	20,78	20-28	23,90	20-30	29,88
	Média	31,16	Média	28,73	Média	29,83	Média	32,96