

**Universidade de São Paulo  
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Dimensionamento do sistema de Irrigação por Gotejamento Móvel  
(IRGMO): metodologia de cálculo e software**

**Alex Nunes de Almeida**

Dissertação apresentada para obtenção do título de  
Mestre em Ciências. Área de concentração:  
Engenharia de Sistemas Agrícolas

**Piracicaba  
2016**

**Alex Nunes de Almeida**  
**Engenheiro Agrônomo**

**Dimensionamento do sistema de Irrigação por Gotejamento Móvel  
(IRGMO): metodologia de cálculo e software**  
versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:  
Prof. Dr. **RUBENS DUARTE COELHO**

Dissertação apresentada para obtenção do título de  
Mestre em Ciências. Área de concentração:  
Engenharia de Sistemas Agrícolas

**Piracicaba**  
**2016**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - DIBD/ESALQ/USP**

Almeida, Alex Nunes de

Dimensionamento do sistema de Irrigação por Gotejamento Móvel (IRGMO):  
metodologia de cálculo e software / Alex Nunes de Almeida. - - versão revisada  
de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2016.

105 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Irrigação por aspersão 2. Irrigação localizada 3. Eficiência I. Título

CDD 631.7  
A447d

**"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"**

## DEDICATÓRIA

Dedico,

Aos meus avós Francisco (Sr. Caboclo) e D. Maria,

À memória de minha vó Celestina.

Aos meus pais Antonio e Lúcia, por terem me tornando a pessoa que sou hoje.

A minha irmã Mirelle, meu cunhado Lúcio Mário e minha sobrinha Millena, pelo apoio dado durante este período que estive em São Paulo.



## AGRADECIMENTOS

A Deus por ter possibilitado minha vida e pela força de vontade que Ele me proporcionou em todos os momentos de minha vida.

Ao professor Dr. Rubens Duarte Coelho, meu orientador, pela confiança depositada em mim, aos ensinamentos dados tenham sido no âmbito científico ou pessoal.

A CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pela bolsa concedida.

Ao programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas ESALQ/USP, e as pessoas que o fazem, pela oportunidade de realização deste curso de mestrado e também de fazer parte desta equipe.

Aos meus amigos e colegas Pós-graduação: Asdrúbal Farias e Jéfferson Oliveira, que me auxiliaram no desenvolvimento deste trabalho desde seu início, ao também colega de Pós-graduação Fabricio, pelas observações e indicações de melhorias feitas, e aos amigos Timóteo e Ailson, pelos questionamentos feitos a mim durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores e amigos: Patrícia, Fernando, Tarlei e Sérgio, pelos momentos e oportunidade de aprender um pouco com a ajuda de seus conhecimentos.

A todos os amigos de Pós-graduação que fiz no ESA, que de alguma forma possam ter contribuído com a minha formação: acadêmica, profissional e/ou pessoal.

Aos amigos: César, Aline (compadres) e Romero, sem os quais não teria conseguido passar por certos momentos.

Aos amigos que fiz em Piracicaba: Neto, Karina, Lucas, Willians, Marilia e Prof. Pedro Marques, pelas ótimas conversas e companhias.

A minha família, a qual sempre me apoiou em minhas escolhas.

E por fim a todos que, eu ingratamente posso não ter lembrado o nome, que de alguma me ajudaram nesta jornada.

A todos vocês meu sincero, obrigado!



**EPIGRAFE**

"Não procures ser melhor que ninguém,  
Mas sim, ser melhor que si mesmo,  
Buscando em sua vida superar-se,  
E então permita que suas glórias,  
Lhe alcancem!"

Alex Nunes



## SUMÁRIO

RESUMO.....	13
ABSTRACT .....	15
LISTA DE FIGURAS .....	17
LISTA DE TABELAS .....	21
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....	23
LISTA DE SÍMBOLOS.....	25
1 INTRODUÇÃO .....	29
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	31
2.1 Panorama da irrigação no Mundo .....	31
2.2 Panorama da irrigação no Brasil .....	31
2.3 Sistemas de irrigação por pivô central .....	32
2.3.1 Descrição do sistema .....	33
2.3.2 Distribuição espacial de sistemas pivô central no Brasil .....	34
2.3.3 Uniformidade de distribuição de água .....	35
2.4 Sistemas de aplicação de precisão com baixa utilização de energia - <i>Low Energy Precision Application</i> - LEPA .....	36
2.5 Sistemas de irrigação por gotejamento .....	36
2.5.1 Descrição do sistema .....	37
2.5.2 A irrigação por gotejamento no Brasil .....	38
2.5.3 Entupimento e uniformidade de distribuição de água.....	38
2.6 Sistemas de irrigação por gotejamento móvel – IRGMO .....	39
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	41
3.1 Descrição do sistema e definição de variáveis de entrada.....	41
3.2 Cálculos executados e sequencia de rotinas .....	43
3.2.1 Distância até a última saída para mangueira .....	46
3.2.2 Número de linhas .....	46
3.2.3 Ajuste da evapotranspiração .....	47
3.2.3.1 Porcentagem de área sombreada .....	47
3.2.3.2 Porcentagem de área molhada .....	47
3.2.3.3 Evapotranspiração ajustada .....	48
3.2.3.4 Fator $K_L$ .....	48
3.2.4 Área irrigada.....	48

3.2.5 Velocidade do pivô central com relê a 100% .....	50
3.2.6 Vazão do pivô central .....	51
3.2.7 Intensidade média de aplicação .....	51
3.2.8 Intensidade máxima de aplicação .....	51
3.2.9 Alcance efetivo do emissor .....	52
3.2.10 Velocidade crítica e tempo crítico .....	52
3.2.11 Vazão teórica na linha de gotejamento e total do pivô .....	53
3.2.12 Número de emissores teórico .....	54
3.2.13 Número de emissores real por linha e total do sistema .....	54
3.2.14 Vazão real aplicada na linha e vazão real total .....	55
3.2.15 Comprimento da linha de gotejamento e comprimento total necessário .....	56
3.2.16 Comprimento máximo da linha de gotejamento (Cmax) .....	56
3.2.17 Perda de carga máxima na linha de emissores .....	57
3.2.17.1 Escolha do tipo da equação para cálculo de Hf .....	59
3.2.17.2 Hf na linha de emissores – método simples .....	62
3.2.17.3 Hf na linha de emissores – método composto .....	62
3.2.18 Perda de carga no pivô .....	63
3.2.19 Perda de carga na adutora .....	64
3.2.20 Perda de carga localizada no conjunto IRGMO .....	65
3.2.21 Altura monométrica do conjunto IRGMO .....	65
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	67
4.1 Apresentação do IRGMO .....	67
4.2 Módulo 1 .....	68
4.2.1 Grupo 1 – Componentes do Pivô Central .....	69
4.2.2 Grupo 2 – Componentes do Cultura .....	69
4.2.3 Grupo 3 – Componentes do Emissor .....	71
4.2.4 Grupo 4 – Curva de infiltração do solo e propriedades travadas .....	74
4.2.5 Grupo 5 – Componentes para Hm total .....	76
4.2.6 Grupo 6 – Resultados preliminares .....	77
4.2.7 Recursos extras .....	80
4.3 Simulações .....	82
4.3.1 Simulação 1 .....	82
4.3.2 Simulação 2 .....	85
5 CONCLUSÕES .....	89

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	91
REFERÊNCIAS .....	93
BIBLIOGRAFIA CONSULTADA .....	97
APÊNDICES.....	99
ANEXOS .....	103



## RESUMO

### **Dimensionamento do sistema de Irrigação por Gotejamento Móvel (IRGMO): metodologia de cálculo e software**

Com a necessidade de se promover o uso eficiente da água na agricultura, aprimoramentos e novos desenvolvimentos em equipamentos de irrigação são sempre bem-vindos. Um sistema de irrigação por gotejamento móvel (IRGMO), trata-se da união entre a irrigação por pivô central (irrigação por aspersão) e a irrigação por gotejamento (irrigação localizada). O sistema é constituído por tubos de descida que unem a linha principal do pivô central (aço zincado) com as linhas gotejadoras (polietileno). A vazão em cada ponto de derivação do pivô é calculada em função da vazão dos gotejadores e do número de emissores por metro linear de mangueira. A área é irrigada através do movimento circular do equipamento no campo, que arrasta sobre o terreno e sobre o dossel das plantas as linhas gotejadoras. As vantagens deste sistema híbrido de irrigação é poder utilizar gotejadores de vazão elevada (2 - 12 litros/ hora), o que reduz o risco de entupimento do sistema, assim como, requerer somente 1 a 2 % da quantidade equivalente de metros lineares de tubogotejadores da irrigação localizada fixa sobre o terreno. Este trabalho teve como objetivo apresentar uma metodologia de cálculo para o dimensionamento deste novo sistema de irrigação por gotejamento móvel, assim como, desenvolver um *software livre* de dimensionamento deste sistema. O *software* foi desenvolvido em Visual Basic 2015, utilizando a interface do Microsoft Visual Studio Community 2015 (Windows). A linguagem de programação segue a metodologia baseada em um conjunto de 44 equações, as quais por meio parâmetros fornecidos pelo usuário possibilitam o dimensionamento do sistema. O resultado foi um *software* leve, capaz de realizar os cálculos necessários rapidamente, apresentando ao final dimensionamento uma janela com resumo do sistema IRGMO e uma tabela contendo as informações para cada linha de derivação. Os resultados podem ser salvos em um arquivo de texto ou podem ser enviados diretamente ao Microsoft Excel, os parâmetros utilizados pelo usuário podem ser salvos também, dessa forma permitindo que um mesmo dimensionamento possa ser feito várias vezes. Além de apresentar o *software* desenvolvido, este trabalho apresenta também alguns cenários de dimensionamento.

Palavras-chave: Irrigação por aspersão; Irrigação localizada; Eficiência



## ABSTRACT

### **Dimensioning of the mobile drip irrigation system (IRGMO): calculation methodology and software**

With the need to promote the efficient use of water in agriculture, enhancements, and new developments in irrigation equipments are always welcome. A mobile drip irrigation system (IRGMO), is the union of center-pivot irrigation (sprinkler irrigation) and drip irrigation (localized irrigation). The system consists of lowering pipes connecting the main line of the central pivot (galvanized steel) with driplines (polyethylene). The flow at each point deriving from the pivot is calculated in function of the flow rate drippers and a number of transmitters per linear meter of hose. The area is irrigated through the circular motion of the equipment in the field which drags on the ground and on the canopy of plants driplines. The advantages of this hybrid system of irrigation is the use of high flow drippers (2-12 liters/hour), which reduces the risk of clogging the system, as well as it requires only 1 to 2% of the equivalent amount of linear meters of irrigation driptubes fixed on the ground. This work aimed to introduce a calculation methodology for the sizing of this new mobile drip irrigation system, as well as, to develop a free software system sizing. The software was developed in Visual Basic 2015, using the interface of Microsoft Visual Studio Community 2015 (Windows). The programming language follows the methodology based on a set of 44 equations, which through user-supplied parameters allows the sizing system. The result was a lightweight application, able to perform the necessary calculations quickly, showing the end sizing a window with a summary of the IRGMO system and a table containing the information for each line. The results can be saved in a text file or sent directly to Microsoft Excel, the parameters used by the user can be saved as well, and thus allowing that an even sizing can be done several times. In addition to introducing the application development, this paper presents also some sizing scenarios.

Keywords: Sprinkler irrigation; Localized irrigation; Efficiency



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Porcentagem de terras irrigadas no Brasil.....	32
Figura 2	- Visão parcial de um pivô central instalado em Sieler, Estado de Washington (EUA). A – pendural; B – torre; C – tubulação; D – vão; e E – sistema de tesoura. Fonte: J. Brew (2006), imagem sob licença CC BY-AS 2.0 .....	33
Figura 3	- Distribuição espacial dos pivôs centrais instalados no Brasil com destaque nas áreas de maior concentração de equipamentos. A – Macro concentração de pivôs centrais entre os estados Goiás, Minas Gerais e Norte de São Paulo; B – Região do Alto Paranapanema (1787 equipamentos). Adaptado de ANA e EMBRAPA/CNPMS (2014).....	35
Figura 4	- Esquema de um sistema IRGMO. $R_i$ – raio inicial; $R_{med}$ – raio médio do pivô; $R_{max+CB}$ – raio máximo do pivô com balanço; DUT – Distância até a última torre; CB – comprimento do balanço; DSM – Distância entre saídas de mangueira; $CL_i$ – comprimento de tubo gotejador da primeira linha; $CL_f$ – comprimento de tubo gotejador da última linha; LFM – largura da faixa molhada do emissor; $E_{mi}$ – espaçamento entre emissores no tubo gotejador.....	42
Figura 5	- Fluxograma 1: plano de serviço do IRGMO.....	44
Figura 6	- Fluxograma 2: Rotinas.....	44
Figura 7	- Fluxograma 3: processamento de dados base.....	45
Figura 8	- Fluxograma 4: obtenção de dados de vazão e número de emissores do sistema IRGMO.....	45
Figura 9	- Fluxograma 5: cálculo do comprimento da linha e comprimento máximo da mesma (quando restrito).....	45
Figura 10	- Representação gráfica do padrão de intensidade de aplicação entre aspersores convencionais e gotejamento.....	52
Figura 11	- Fluxograma 5: cálculo do $S_o$ . $S_o$ – desnível da linha de gotejamento ( $m\ m^{-1}$ ), positivo quando em aclave, negativo quando em declive e zero quando em nível; $J'$ – variação de carga de pressão ( $m\ m^{-1}$ ) ao	

	longo da linha de gotejamento.....	57
Figura 12 -	Fluxograma 6.1: escolha do cálculo de perda de carga nas linhas de gotejadores.....	58
Figura 13 -	Esquema de um sistema IRGMO quando utilizado a divisão de linhas ( $C_{max} < C_f$ ); $R_{max+CB}$ – raio máximo do pivô com balanço; DUT – Distância até a última torre; CB – comprimento do balanço; DSM – Distância entre saídas de mangueira; LFM – largura da faixa molhada do emissor; $E_{mi}$ – espaçamento entre emissores no tubo gotejador; $CL_{m=1}$ – comprimento da linha sem divisão; $QR_{m=1}$ – vazão real do ponto com uma linha; $CL_{f/2}$ – comprimento de tubo gotejador do último ponto dividido em duas linhas; $QR_f$ – vazão real do ponto com duas linhas.....	63
Figura 14 -	Fluxograma 6.2: cálculo das demais perda de carga do sistema.....	63
Figura 15 -	Tela inicial do IRGMO.....	67
Figura 16 -	"IRGMO - Entrada de Dados", janela que possibilita a inserção de dados para o cálculo do sistema IRGMO, tal como a possibilidade de realizar modificações em dados informados ou de arquivos abertos no <i>software</i> .....	68
Figura 17 -	Grupo 1: Componentes do Pivô Central.....	69
Figura 18 -	Grupo 1: janela "Dados do Pivô", janela que permite a entrada de informações relativas as dimensões das torres do pivô central, também apresenta esquema de exemplo.....	70
Figura 19 -	Grupo 2: Componente de Cultura.....	70
Figura 20 -	Grupo 2: mensagem de ajuda para o "Fator KL", clicando em "Sim" um arquivo de ajuda do IRGMO é exibido no navegador padrão do computador.....	71
Figura 21 -	Grupo 3: Componentes do emissor.....	71
Figura 22 -	Grupo 3: janela "IRGMO - Características do emissor".....	72
Figura 23 -	Grupo 3: Esquema do efeito do desnível no comprimento máximo da linha e alteração de pressão (imagem presente no <i>software</i> ), "Z" corresponde a "So".....	72

Figura 24 - Grupo 3: "Cálculo de Hf na linha de emissores" - escolha da equação para o cálculo, Hazen-Williams não é mostrado por não necessitar de variáveis extras.....	73
Figura 25 - Representação do efeito entre "Intensidade de aplicação x tempo", em relação infiltração do solo e posição do percentmetro (velocidade da última torre do pivô). Inferior a curva de infiltração não há escoamento superficial, enquanto que acima da curva há possibilidade destes problemas ocorrerem (área cinza).....	74
Figura 26 - Grupo 4: Infiltração do solo e Propriedades travadas, apresentando mensagem para uma das " <i>Propriedades travadas</i> ".....	75
Figura 27 - Grupo 5: Componentes para Hm total.....	77
Figura 28 - Grupo 6: Dados preliminares.....	77
Figura 29 - Janela de resultados.....	78
Figura 30 - Esquema dos resultados obtidos no dimensionamento do sistema. Observa-se que CL e QR referem-se aos parâmetros de forma completa, ou seja, não existe divisão caso o Cmax seja atingido.....	80
Figura 31 - Tela inicial: detalhe da barra de menu - opção "Sobre".....	80
Figura 32 - Tela "Sobre", exibe informações adicionais sobre o processo de criação do <i>software</i> .....	81
Figura 33 - Recursos extras, menu "Arquivo" e opções disponíveis (abrir, salvar, voltar e sair).....	81



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Componentes do pivô central.....	42
Tabela 2	– Componentes de cultura .....	42
Tabela 3	– Componentes do emissor .....	43
Tabela 4	– Componentes para altura monométrica total (Hm) e cálculos de perda de carga (Hf) .....	43
Tabela 5	– Comparação das estimativas do coeficiente de correção de atrito ou fator de múltiplas saídas do pivô (FN <sub>p</sub> ) .....	64
Tabela 6	– Definições para a simulação 1 .....	83
Tabela 7	– Características do emissor utilizadas na simulação 1. Destaque em S <sub>o</sub> : A – perfil em aclave (S <sub>o</sub> = 6); B – perfil em nível (S <sub>o</sub> = 0); e C – perfil em declive (S <sub>o</sub> = -6) .....	83
Tabela 8	– Simulação 1. Parâmetros compartilhados entre os três perfis .....	84
Tabela 9	– Simulação 1. Parâmetros não compartilhados entre os três perfis ....	85
Tabela 10	– Definições para a simulação 1 .....	86
Tabela 11	– Parâmetros compartilhados entre os pivôs .....	86
Tabela 12	– Parâmetros não compartilhados entre os pivôs * .....	87



**LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ANA	Agência Nacional de Águas
AQUASTAT	Global database on water use in agriculture (FAO)
FEALQ	Fundação de Estudos Agrários Luiz de Queiroz
IRGMO	Irrigação por Gotejamento Móvel
MDI	Mobile Drip Irrigation
OECD	Organization for Economic Cooperation and Development
PMDI™	Precision Mobile Drip Irrigation



## LISTA DE SÍMBOLOS

$\mu$	Viscosidade dinâmica da água, $\text{kg m}^{-1}\text{s}^{-2}$
A	Área da seção, $\text{m}^2$
$A_1$	Área utilizada no primeiro vão, $\text{m}^2$
$AM_e$	Área molhada pelo emissor, $\text{m}^2$
$A_p$	Altura do pivô, m
ARR	Área irrigada, ha
ASP	Área sombreada pela planta, $\text{m}^2$
ATP	Área total da planta, $\text{m}^2$
$A_x$	Área utilizada pelo vão "x", $\text{m}^2$
b	Constante da equação de Flamant
$C_{ad}$	Comprimento da adutora, m
CB	Comprimento do balanço, m
CL	Comprimento da linha de gotejamento, m
$CL_f$	Comprimento calculado na última linha, m
$C_{ma}$	Coefficiente "C" do material da adutora
$C_{max}$	Comprimento máximo calculado, m
$C_{me}$	Coefficiente "C" do material do tubo do emissor
$C_{mp}$	Coefficiente "C" do material do pivô
$CT_n$	Comprimento total necessário, m
$D_f$	Distância entre o último e o primeiro emissor, m
$D_{fi}$	Distância entre o último emissor do vão e o centro do pivô, m
$D_i$	Distância entre o primeiro emissor e o centro do pivô, m
$D_{iv}$	Distância entre o primeiro emissor do vão e o centro do pivô, m
$D_{ma}$	Diâmetro interno da tubulação da adutora, m
$D_{me}$	Diâmetro interno do tubo gotejador, m
$D_{mp}$	Diâmetro interno da tubulação do pivô, m
DSM	Distância entre saídas de mangueira, m
DUS	Distância até a última saída para mangueira, m
DUT	Distância até a última torre, m
$DZ_{cp}$	Desnível da captação até a base do pivô, m
$DZ_{mp}$	Diferença de nível máximo do centro do pivô ao final da tubulação principal (aço zincado), m

$\varepsilon$	Coeficiente de rugosidade do material, mm
E0	Espaço entre o centro do pivô e 1ª linha de gotejamento, m
EAS	Eficiência do sistema, m
$E_{emi}$	Espaçamento entre emissores, m
$E_{fl}$	Comprimento da última linha de gotejamento, m
ET	Espaço ocupado pela torre, m
ETc	Evapotranspiração de cultura, mm dia <sup>-1</sup>
ETcA	Evapotranspiração ajustada, mm dia <sup>-1</sup>
f	Fator de atrito
$FN_p$	Fator de múltiplas saídas do pivô
g	Aceleração da gravidade, m s <sup>-2</sup>
$H_{fa}$	Perda de carga ao longo da adutora, mca
$H_{fe}$	Perda de carga localizada na linha de emissores, mca
$H_{fe}$	Perda de carga na última linha de gotejamento, mca
$H_{floc}$	Perda de carga localizada, mca
$H_{fp}$	Perda de carga ao longo do pivô, mca
$H_{mt}$	Altura monométrica do conjunto motobomba do IRGMO, mca
$H_{Rg}$	Hf no regulador de pressão, mca
$I_{max}$	Intensidade máxima de aplicação, mm h <sup>-1</sup>
$I_{med}$	Intensidade média do sistema, mm h <sup>-1</sup>
$K_L$	Fator de correção
$L_1$	Distância da 1ª linha a última do primeiro vão, m
$L_2$	Distância da 1ª linha do 2º vão e a última linha do mesmo vão, m
$L_{eq}$	Comprimento equivalente relativo a perda localizada de carga, m
LFM	Largura de faixa molhada pelo emissor, m
$L_x$	Distância da 1ª linha do vão "x" até a última linha do mesmo vão, m
$N_{emt}$	Número de emissores total do sistema, adimensional
$N_{eTe}$	Número de emissores teórico, ajustado para superior inteiro
NL	Número de linhas, adimensional
NLf	Última linha do pivô, adimensional
$NL_i$	Primeira linha do pivô, adimensional
NR	Número de emissores real
P	Pressão no início da linha, mca
PAM	Porcentagem de área molhada, %

PAS	Porcentagem de área sombreada, %
$P_{\max}$	O maior valor entre PAS e PAM, %
$PS_E$	Pressão de serviço do emissor da última linha, mca
Q	Vazão, $m^3 s^{-1}$
$QA_t$	Vazão teórica total aplicada pelo pivô, $m^3 h^{-1}$
$Q_{emi}$	Vazão do emissor, $L h^{-1}$
$Q_{fl}$	Vazão da última linha de gotejamento, $L h^{-1}$
QP	Vazão do pivô central, $m^3 h^{-1}$
QR	Vazão real aplicada na linha, $L h^{-1}$
$QR_t$	Vazão real total aplicada pelo pivô, $m^3 h^{-1}$
$Q_{teo}$	Vazão teórica na linha de gotejamento, $L h^{-1}$
$Q_{var}$	Variação de vazão dos emissores permitida, %
r	Raio do pivô, m
Re	Número de Reynolds, adimensional
$R_i$	Distância entre o centro do pivô e a linha de gotejamento, m
$S_o$	Gradiente de declividade entre o início e final da linha de gotejamento, "+" quando aclone / "-" quando declive, %
T	Temperatura da água, °C
T1	Constante da curva de infiltração do solo
T2	Expoente da curva de infiltração do solo
TC	Tempo crítico, h
TOD	Tempo de operação diário, h
TVC	Tempo de uma volta completa com relê a 100%, h
V	Velocidade, $m s^{-2}$
VC	Velocidade crítica, $m h^{-1}$
VPR	Velocidade do pivô central com relê a 100%, $m h^{-1}$
W	Área de molhamento, $m^2$
We	Alcance efetivo do emissor, m
X	Expoente de fluxo do emissor
$\rho$	Massa específica do fluido, $kg m^{-3}$



## 1 INTRODUÇÃO

Com a necessidade de se produzir mais alimento para a população e em virtude de algumas localidades do globo não apresentarem condições climáticas satisfatórias para a produção agrícola, o uso de irrigação torna-se um meio para assegurar e alcançar maiores produções agrícolas, quando esta é possível.

Com o crescente uso de irrigação, surge a demanda para que novos métodos e dispositivos sejam criados ou aperfeiçoados com o objetivo de se aumentar a eficiência de sistemas de irrigação já utilizados, tendo como resultado um melhor aproveitamento do recurso hídrico disponível.

Nos sistemas de irrigação por aspersão, o pivô central destaca-se por sua versatilidade, fácil manuseio e possibilidade de irrigar grandes áreas com apenas uma tubulação principal, sem necessitar de linhas de derivação. Porém, este sistema quando operado ou dimensionado de forma errônea, pode reduzir sua eficiência e assim desperdiçar recursos hídricos e energéticos.

Em contrapartida ao pivô central, o gotejamento, por sua vez apresenta excelentes níveis de eficiência no uso de água (quando bem dimensionado e operado), uma vez que a água é depositada nas proximidades das raízes da cultura e não sobre o dossel das plantas em área total como na aspersão. Contudo esse sistema quando aplicado a grandes áreas requer uma malha hidráulica, por vezes, complexa e de custo elevado.

Pensando na versatilidade do pivô central e na eficiência de uso da água do gotejamento, a implantação do sistema de *Irrigação por Gotejamento Móvel (IRGMO)*, possibilita o uso acoplado do gotejamento a um pivô central, o qual realiza o movimento e condução das linhas de gotejamento.

O uso do sistema IRGMO pode reduzir entre 96 a 99% a quantidade em metros lineares de mangueiras de gotejamento para uma área equivalente à de um pivô. Ainda propicia ao irrigante a possibilidade de usar ambos os sistemas de irrigação de acordo com a necessidade.

Inicialmente criou-se como proposta uma planilha de cálculo, do Microsoft Excel, que possibilitava o dimensionamento de um sistema IRGMO, no entanto a planilha apresentou-se relativamente complexa pela grande matriz fixa de dados (2000 x 46) e limitada por um número reduzido de parâmetros de entrada (38 parâmetros).

Diante disto, este trabalho tem por objetivo apresentar a metodologia para o dimensionamento de um sistema de irrigação por gotejamento móvel, conjuntamente com o desenvolvimento de um *software* de dimensionamento (software), que possibilite ajustes finos no dimensionamento hidráulico.

Como objetivo específico criar um *software* que realize os cálculos com maior rapidez, apresentando baixo consumo de memória, sem a necessidade do Microsoft Excel (executável) e que aceitasse um número maior de parâmetros (mínimo 32, máximo 45), além de comportar uma matriz variável.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Panorama da irrigação no Mundo**

A FAO (2011) comenta que 40% dos alimentos produzidos no mundo provem de áreas irrigadas. De acordo com Frenken e Gillet (2012) a retirada anual de água para irrigação no mundo (165 países e 2 territórios) foi de cerca de 2,67 milhões km<sup>3</sup>, representando 5,1% dos recursos hídricos renováveis do planeta.

Em escala global a área irrigada é cerca de 307,6 milhões de hectares, sendo que apenas 255,2 milhões de hectares foram realmente irrigados durante 2005, deste valor cerca de 69%, situa-se na Ásia, 17% na América, 8% na Europa, 4% na África e Oceania de 2% (SIEBERT et al., 2013). Guimarães e Landau (2015) comentam que os países com as maiores áreas irrigadas no planeta são: Índia, China, Estados Unidos e Paquistão com 66, 63, 27 e 20 milhões de hectares, respectivamente.

### **2.2 Panorama da irrigação no Brasil**

Em 2006 Brasil apresentava uma área de 4,46 milhões ha equipados para o uso de irrigação (Censo 2006), enquanto estimativas do AQUASTAT (FAO, 2015) expressam uma área em torno de 5,4 milhões ha, para o ano de 2011, como comentam Siebert et al. (2013). Estudos recentes revelam que o Brasil apresenta uma área irrigada de 6 milhões ha (FEALQ, 2014; GUIMARÃES; LANDAU, 2015). Contudo há a possibilidade de ampliação de 75 milhões ha, tornando possível o uso de 81 milhões ha, de acordo com FEALQ (2014).

A Organisation for Economic Co-operation and Development - OECD (2015) comenta que há um enorme potencial para a irrigação no Brasil, sendo que alguns estudos preveem a ampliação da área irrigada para 14 milhões de hectares até 2030.

Na Figura 1 pode-se observar as regiões no Brasil, com maior uso de irrigação de acordo com FAO (2016b), com destaque para as regiões Sul, Sudeste e sul do Centro-Oeste brasileiro.

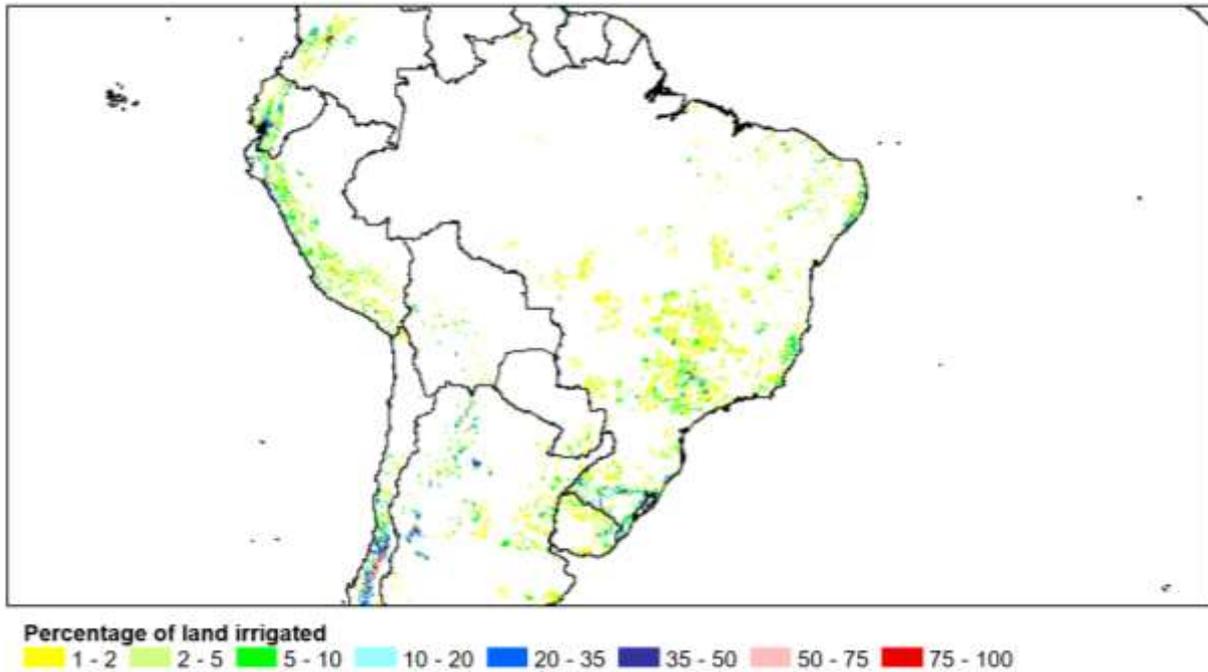


Figura 1 – Porcentagem de terras irrigadas no Brasil  
 Fonte: <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/quickWMS/irrimap.htm>

Segundo a Agência Nacional de Águas - ANA (2007) a irrigação em 2006 no Brasil foi responsável por 46% das vazões de retirada e 69% das vazões de consumo, enquanto que o abastecimento urbano corresponde a 26 e 11%, respectivamente. As vazões de retirada e consumo em 2010 aumentaram em 8 e 3%, para a irrigação e reduziram em 4 e 1%, para o uso urbano, de acordo com a ANA (2013).

De acordo com a ANA (2013), a vazão de retirada total no país para uso na agricultura no ano de 2013 foi de  $1.270 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , dos quais  $836 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  chegaram a ser consumidos, para o ano de 2010.

A OECD (2015) comenta que as bacias hidrográficas dos Rios São Marcos e São Francisco estabeleceram um marco regulatório o qual limita que novas outorgas para sistemas de irrigação pivô central, sejam dadas apenas se estes apresentarem eficiência mínima de 85%.

### 2.3 Sistemas de irrigação por pivô central

Em 1948 o primeiro sistema de irrigação por pivô central foi inventado por Frank Zybach, no estado de Colorado (EUA), um equipamento que apesar de ter passado por muitas modificações ao longo do tempo ainda segue seu conceito

básico, como comentam Bernardo, Soares e Mantovani (2006a) e Martin, Kincaid e Lyle (2007). A partir de sua criação o sistema precisou de 12 anos para iniciar a sua popularização, Bernardo, Soares & Mantovani (2006a) comentam que apenas a partir de 1961 o sistema começou a ser utilizado com maior frequência.

### 2.3.1 Descrição do sistema

Derbala (2003), Bernardo, Soares e Mantovani (2006a) e Martin, Kincaid e Lyle (2007) descrevem um pivô central como uma máquina automotora em movimento contínuo que gira em torno de um ponto central, o qual funciona como ancoragem e também tomada de água, com uma extensão de tubos (vãos) que é suportada por torres em um sistema de tesoura (Figura 2), os vãos podem apresentar larguras de 24 a 76 m e o comprimento em geral de 61 a 800.

Mesmo não sendo usual devido as grandes dimensões o maior pivô central do mundo foi instalado no interior do Tocantins (Brasil) com raio de 1.300 m e vazão de  $506 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ . Aplicando lâminas de 4 mm (<https://irrigazine.wordpress.com>)<sup>i</sup>.

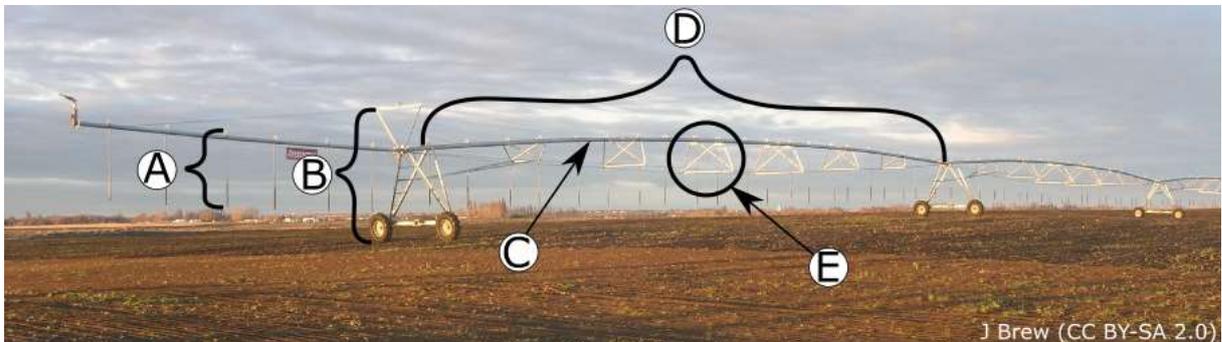


Figura 2 – Visão parcial de um pivô central instalado em Sieler, Estado de Washington (EUA). A – pendural; B – torre; C – tubulação; D – vão; e E – sistema de tesoura. Fonte: J. Brew (2006), imagem sob licença CC BY-AS 2.0

Normalmente o pivô leva entre 12 a 96 h para dar uma volta em torno de si mesmo, isto possibilita que diversos valores de lâminas de irrigação possam ser aplicados, de acordo com a intensidade de precipitação máxima que o solo pode suportar (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2006a; DERBALA, 2003).

Alguns pesquisadores descrevem suas vantagens (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2006a; MARTIN; KINCAID; LYLE, 2007):

<sup>i</sup> Notícia publicada no site Revista Irrigazine em 07 de julho de 2010.

- Operação automatizada
- Boa uniformidade de aplicação, quando bem dimensionado
- Aplicação de fertilizantes e defensivos
- Capacidade de aplicar pequenas lâminas de irrigação
- Economia de mão-de-obra

Da mesma forma alguns cometam suas desvantagens ou problemas que podem ocorrer (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2006a; DERBALA, 2003; MARTIN; KINCAID; LYLE, 2007)

- Susceptibilidade a mudança de padrão de vento
- Lâminas altas e baixas velocidades, podem favorecer o escoamento superficial
- Padrão circular, apenas 80% da área de um quadrado é irrigada

### **2.3.2 Distribuição espacial de sistemas pivô central no Brasil**

Landau et al. (2013) comentam que o Brasil possui cerca de 3.333 estabelecimentos rurais com presença de pivôs centrais, 0,0019% dos 175,2 milhões de estabelecimentos visitados pelo Censo Agropecuário de 2006. A EMBRAPA (2014) em parceria com a ANA, realizaram um levantamento para o ano de 2013 que permitiu a identificação de 17.878 pivôs centrais no país (Figura 3), dos quais aproximadamente 83% encontram-se em quatro Estados: Minas Gerais (5.573 pivôs), São Paulo (3.528 pivôs), Goiás (2.872 pivôs), Bahia (2.792 pivôs), que juntos somam quase um milhão do 1,179 milhão hectares irrigados no Brasil por pivô central.

Na Figura 3, nota-se que as maiores concentrações deste tipo de equipamento estão localizadas entre os estados: Goiás, Minas Gerais e São Paulo (Figura 3.A) e no Estado de São Paulo na Região do Alto Paranapanema (Figura 3.B).

Com base nos dados apresentados por EMBRAPA (2014) e a OECD (2015), 7% dos pivôs centrais presentes no Estado de Goiás estão inativos, o que equivale a cerca 200 equipamentos.

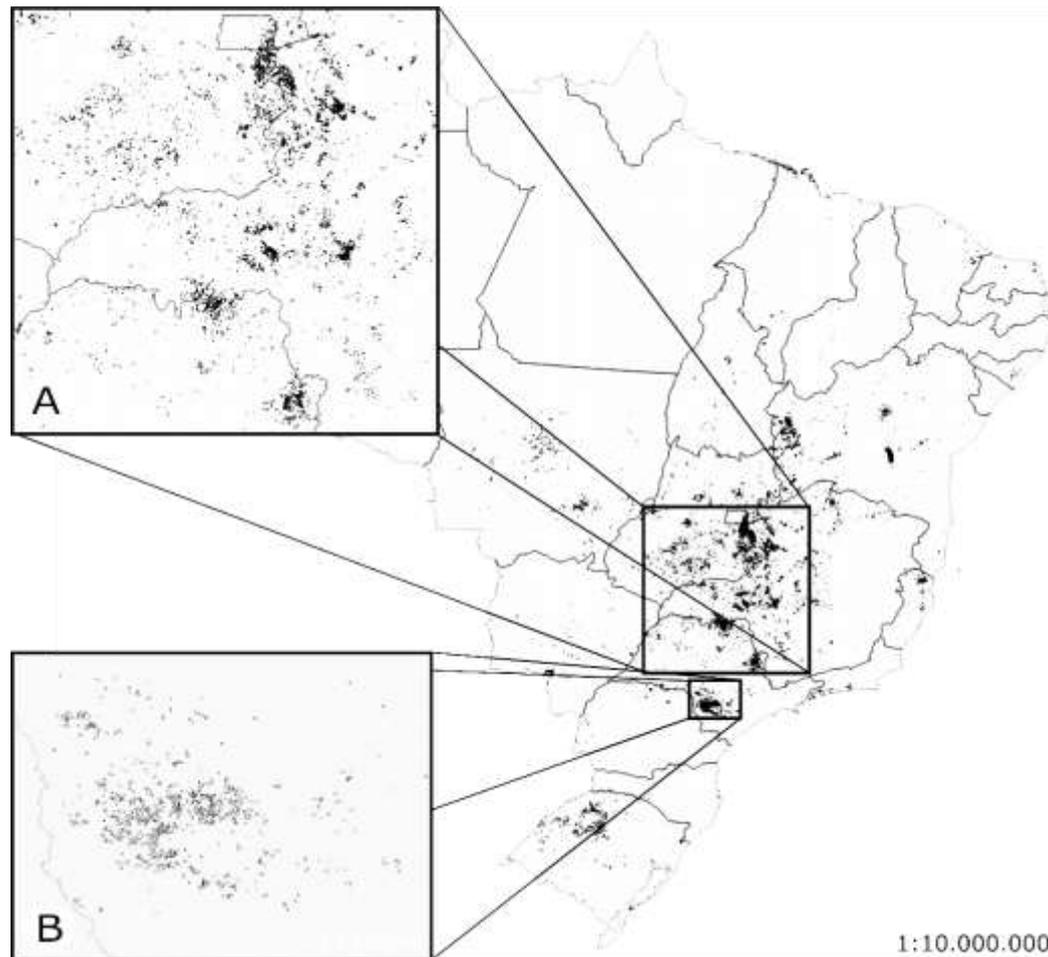


Figura 3 – Distribuição espacial dos pivôs centrais instalados no Brasil com destaque nas áreas de maior concentração de equipamentos. A – Macro concentração de pivôs centrais entre os estados Goiás, Minas Gerais e Norte de São Paulo; B – Região do Alto Paranapanema (1787 equipamentos). Adaptado de ANA e EMBRAPA/CNPMS (2014)

### 2.3.3 Uniformidade de distribuição de água

Wang et al. (2015) comentam que a uniformidade de distribuição de água é um critério de dimensionamento para todos os sistemas de irrigação. Oliveira et al. (2004) comentam que não é possível obter um padrão perfeitamente uniforme de distribuição de água em sistemas por aspersão, devido a fatores relacionados ao dimensionamento do sistema, às condições meteorológicas locais, topografia do terreno e manejo da irrigação.

Sandri e Cortez (2009) apresentaram algumas possíveis causas para o valor médio de coeficiente de uniformidade de distribuição igual a 75% encontrado, que foram: falta de manutenção dos equipamentos, mal dimensionamento do sistema de bombeamento e dos distribuidores de água ao longo da linha lateral, além do próprio sistema de automação.

## **2.4 Sistemas de aplicação de precisão com baixa utilização de energia - *Low Energy Precision Application* – LEPA**

De acordo com Lyle e Bordovsky (1981) este sistema foi concebido para conseguir um controle preciso da aplicação de água e de distribuição uniforme a um custo de energia menor do que a dos sistemas por aspersão da época. Ainda comentam que dificilmente poderia ser interpretado como irrigação por gotejamento devido a alta taxa de fluxo do emissor, assim o conceito foi nomeado de *Low Energy Precision Application* (LEPA). Este sistema pode apresentar eficiência de irrigação superior a 90%, além de reduzir o custo de energia devido os emissores operarem em pressões menores (<http://water.usgs.gov>)<sup>ii</sup>, que podem variar entre 4 a 14 mca (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2006a; LYLE; BORDOVSKY, 1981).

Bernardo, Soares e Mantovani (2006a, p. 463, grifo do autor) dizem que neste sistema pode-se “utilizar emissores tipo *spray* com mangueiras ou “meias”, de maneira que a água seja distribuída diretamente no solo ou próximo ao sistema radicular das plantas”. Devido a menor altura entre o jato e o solo, a área irrigada é menor, por essa razão proporciona-se que haja alta aplicação em um curto intervalo de tempo, fazendo que o LEPA normalmente apresente intensidade de aplicação de água maior do que um pivô central convencional (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2006a; LYLE; BORDOVSKY, 1983).

Em alguns solos é necessário que haja a criação de pequenos sulcos ou “micro bacias”, quando a infiltração do solo não é suficiente ou a declividade possa favorecer o escoamento superficial (LYLE; BORDOVSKY, 1981; LYLE; BORDOVSKY, 1983). Porém terrenos ondulados e com topografia de declividade superior a 2%, são considerados inapropriados para a utilização do sistema LEPA, devido apresentar taxas de aplicação maiores o que pode favorecer o escoamento superficial (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2006a).

## **2.5 Sistemas de irrigação por gotejamento**

Acredita-se que o surgimento da irrigação por gotejamento ocorreu na década 1920, na Alemanha, quando alguns produtores começaram a usar tubos

---

<sup>ii</sup> Informação publicada no site USGS, em 02 de dezembro de 2015.

perfurados para irrigar suas plantas ([www.irrigationdirect.com](http://www.irrigationdirect.com))<sup>iii</sup>. Mas foi em 1959 que a primeira patente de um emissor próprio para gotejamento de irrigação por superfície foi registrada por Simcha Blass e Kibbutz Hatzerim em Israel (<https://www.dripdepot.com/>)<sup>iv</sup>, no emissor ao invés de pequenos orifícios a água era liberada por passagens maiores e mais longas que reduzem a velocidade da água na saída do emissor.

### 2.5.1 Descrição do sistema

Esse sistema compreende a “[...] tubos perfurados com orifícios de diâmetros reduzidos ou por meio de emissores, [onde estes últimos podem apresentar os] mais diferentes tipos, modelos e características” (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2006b, p. 483).

Emissores são utilizados para dissipar pressão e descarregar de forma uniforme vazões relativamente pequenas (0,6 a 22 L h<sup>-1</sup>), a dissipação da energia pode ocorrer por diferentes mecanismos (microtubos, helicoides ou labirintos, sendo o último mais comum), esses mecanismos normalmente apresentam um longo percurso para a saída da água, podendo apresentar escoamento turbulento ou não, com orifícios e câmara de vórtice (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2006b; FRIZZONE et al., 2012a).

Diversos trabalhos (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2006b; ESTEVES et al., 2012; FRIZZONE et al., 2012a; LAPERUTA NETO et al., 2011; VILAS BOAS et al., 2011) indicam algumas vantagens deste sistema:

- Maior eficiência no uso da água
- Melhor uniformidade de distribuição de água
- Pode aumentar a produtividade da cultura irrigada
- Permite a aplicação de insumos de forma localizada, sem molhar o dossel da cultura por exemplo
- Auxilia o controle sanitário
- Economia de mão-de-obra
- Possibilidade de automação

---

<sup>iii</sup> Informação publicada no site Irrigation Direct, acesso em 07 de abril de 2016.

<sup>iv</sup> Informação publicada no site Dripdepot, acesso em 07 de abril de 2016.

- Reduz o consumo de energia

Mas da mesma forma que este sistema tem suas vantagens, ele pode apresentar algumas desvantagens (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2006b; FARIA, 2013; FRIZZONE et al., 2012a; LAPERUTA NETO et al., 2011):

- Manutenção permanente
- Acúmulo de sais próximo as plantas
- Susceptibilidade ao entupimento
- Custo de implantação elevado e mão de obra especializada
- Pode ocasionar má distribuição das raízes, devido ao bulbo molhado

### **2.5.2 A irrigação por gotejamento no Brasil**

Na literatura a área no Brasil equipada com gotejamento está embasada a dados referentes a irrigação localizada, de tal forma não há como quantificar uma ordem real da área utilizada com esse sistema.

A FAO (2015) comenta que em 2010, da área de 5,4 milhões de hectares equipados no Brasil apenas 6% utilizavam métodos de irrigação localizada e de acordo com Paulino et al. (2011) no Brasil uma área de cerca de 327,87 mil hectares é irrigada pela irrigação localizada (gotejamento, microaspersão e outros), da qual 59% da área encontra-se no Sudeste do país e outros 31% no Nordeste, os demais 10% nas regiões restantes.

### **2.5.3 Entupimento e uniformidade de distribuição de água**

Faria (2013) conclui que emissores com vazões entre 1 a 1,7 L h<sup>-1</sup>, são mais susceptíveis ao entupimento por particulados sólidos do que emissores de vazão maior entre 2 a 3,5 L h<sup>-1</sup>. E de acordo com Silva et al. (2012) pressões de serviço a 70 kPa (7,14 mca) podem favorecer o entupimento de emissores devido haver uma menor velocidade interna (escoamento menos turbulento) do que com pressões acima de 140 kPa (14,28 mca).

Cunha et al. (2013) falam que “a uniformidade de aplicação de água está relacionada a fatores hidráulicos e à qualidade dos gotejadores [...]”. No entanto Mélo (2007, p.152) concluiu que “a redução de vazão e uniformidade são se mostram necessariamente relacionados”.

## 2.6 Sistemas de irrigação por gotejamento móvel – IRGMO

Os sistemas de irrigação por gotejamento móvel (IRGMO) do inglês *Mobile Drip Irrigation (MDI)* ou *Precision Mobile Drip Irrigation (PMDI)*, permitem a junção de dois sistemas que como Derbala (2003) comenta a ideia de usar o IRGMO é uma forma de conectar as vantagens da irrigação por gotejamento com as vantagens da pivô central.

Kisekka et al. (2015) citam que as primeiras pesquisas sobre este sistema foram feitas por: Phene et al. (1985) em Fresno no Estado da Califórnia - EUA; Helweq (1989) na Arabia Saudita; Sourcel (2003) na Alemanha; e Olson e Rogers no Noroeste de Kansas - EUA. Não obstante no mesmo período Derbala (2003), concluía sua pesquisa sobre o tema.

Um sistema IRGMO é constituído por uma linha principal (pivô) que possui saídas, as quais são acopladas as linhas de derivação (gotejamento), sendo que as linhas de derivação podem ser de tubos flexíveis ou rígidos e em queda (pendural), a linha de gotejamento é arrastada pela área em função do movimento do pivô central (CRAIG, 2015; DERBALA, 2003). Já a pressão de funcionamento em pivô convencional com aspersores varia de 40,8 a 51 mca, enquanto que o IRGMO observa-se valores entre 17,9 a 22,9 mca (HEZARJARIBI; SOURELL, 2011).

De acordo Hezarjaribi e Sourell (2011) um sistema IRGMO pode reduzir o consumo de água e energia em 20 e 70%, respectivamente, quando comparado com um sistema de pivô central por aspersão.

Craig (2015) e Derbala (2003) mencionam algumas vantagens deste sistema:

- Pivôs tradicionais podem fornecer água a eficiência maior que 90%, no entanto pode ocorrer perda de água por deriva (vento), evaporação, escoamento ou até mesmo as condições de solo, enquanto que o gotejamento desde que bem dimensionado pode alcançar eficiência maior que 95%
- Permite manter a irrigação mesmo em condições de congelamento
- Reduz ou elimina problemas com trilha dos rodados (solo sempre seco onde os rodados passam)
- Economia de energia, comparando gotejamento estacionário com o IRGMO

- Pode utilizar-se de um pivô já implantado

A maior desvantagem deste sistema está na filtragem da água, a qual deve ser muito eficiente, Craig (2015) comenta ser necessário usar filtros de ao menos 80 mesh.

Derbala (2003) comenta que o caminho certo para este é equipamento se dá pela escolha correta do emissor, cálculo preciso da demanda de água e a instalação adequada.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

Parte da metodologia utilizada neste trabalho buscou fundamento nas obras de Derbala (2003), Bernardo, Soares e Mantovani (2006a), Porto (2006) e conteúdo da disciplina LEB5009 – “Irrigação Pressurizada 1: Aspersão”, do PPG em Engenharia de Sistemas Agrícolas, ESALQ/USP, ministrada no período de março de 2015 a junho de 2015 pelo Dr. Prof.<sup>o</sup> Rubens Duarte Coelho.

Antes do desenvolvimento do *software* foi criada uma planilha no Microsoft Excel, a qual apresentou-se bastante “pesada” devido calcular de forma completa uma matriz 46 x 2000 e além disto apresentava uma quantidade de equações possível menor, tal como um número de parâmetros reduzido.

O *software* foi desenvolvido em Visual Basic 2015, utilizando a interface do Microsoft Visual Studio Community 2015 versão 14.0.25123.00 Update 2 © Microsoft Corporation e Microsoft .NET Framework versão 4.6.01038 © Microsoft Corporation. Baseado em ambiente de trabalho Windows®. Sendo seu ambiente de trabalho projetado para rodar em todas as versões de Windows®.

Toda a linguagem de programação segue o preceito apresentado na metodologia desta obra.

#### 3.1 Descrição do sistema e definição de variáveis de entrada

Como já relatado neste trabalho o sistema IRGMO trata-se de um sistema de gotejamento acoplado a um pivô central, um esquema simplificado pode ser observado na Figura 4, a qual possibilita uma visão geral do mesmo.

As variáveis de entrada estão definidas em quatro grupos denominados: componentes do pivô central (Tabela 1); componentes de cultura (Tabela 2); componentes do emissor (Tabela 3); componentes para altura monométrica total (Tabela 4). O conjunto de dados da Tabela 1 referem-se as dimensões e condições de operação do pivô central. E possibilitam que uma série de variáveis seja obtida.

Os componentes de cultura (Tabela 2) estão atrelados principalmente na quantidade de água que será aplicada na área. Podendo o usuário utilizar um valor de “evapotranspiração de tabela” ou calculá-lo a partir dos dados de área da planta.

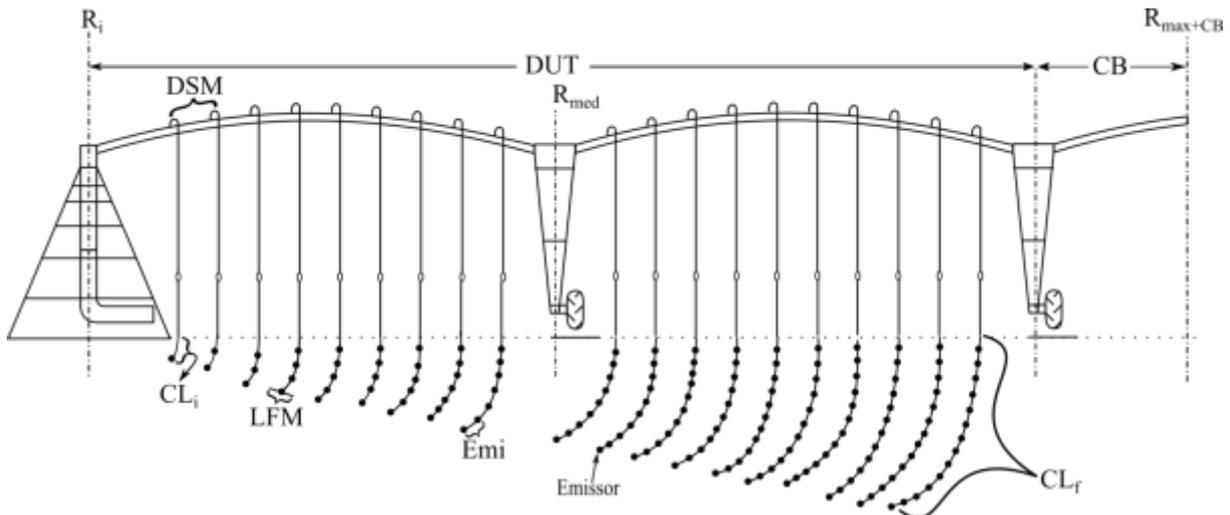


Figura 4 – Esquema de um sistema IRGMO.  $R_i$  – raio inicial;  $R_{med}$  – raio médio do pivô;  $R_{max+CB}$  – raio máximo do pivô com balanço; DUT – Distância até a última torre; CB – comprimento do balanço; DSM – Distância entre saídas de mangueira;  $CL_i$  – comprimento de tubo gotejador da primeira linha;  $CL_f$  – comprimento de tubo gotejador da última linha; LFM – largura da faixa molhada do emissor;  $E_{mi}$  – espaçamento entre emissores no tubo gotejador

Tabela 1 – Componentes do pivô central

Variável, unidade	Sigla
Distância até a última torre *, m	DUT
Comprimento do balanço *, m	CB
Distância entre saídas de mangueira, m	DSM
Largura da faixa molhada pelo emissor, m	LFM
Eficiência do sistema, %	EAS
Tempo de operação diário, h	TOD
Tempo de uma volta completa com relê a 100%, h	TVC
Distância do centro do pivô e o 1º emissor *, m	E0
Distância do centro do pivô e a 1ª torre *, m	CT
Espaço das torres *, m	ET
Distância entre torres *, m	DT

\* Utilizados de acordo com a escolha do usuário.

Tabela 2 – Componentes de cultura

Variável, unidade	Sigla
Evapotranspiração, $mm\ d^{-1}$	EVP
Área total da planta *, $m^2$	ATP
Área sombreada pela planta *, $m^2$	ASP
Área molhada pelo emissor *, $m^2$	$AM_e$

\* Utilizados como fator de correção para a lâmina a ser aplicada.

Na Tabela 3 são apresentados os dados referentes ao emissor, onde pode-se apenas informar dados básicos como, vazão do emissor e espaçamento entre emissores, há informações mais detalhadas que possibilitem o cálculo do comprimento máximo da linha de gotejamento.

Tabela 3 – Componentes do emissor

Variável, unidade	Sigla
Pressão no início da linha, mca	P
Diâmetro do tubo, mm	D <sub>me</sub>
Vazão do emissor, L h <sup>-1</sup>	Q <sub>emi</sub>
Espaçamento entre emissores, m	E <sub>emi</sub>
Expoente de fluxo do emissor *	x
Comprimento equivalente relativo a perda localizada de carga, m	L <sub>eq</sub>
Variação de vazão dos emissores permitida, %	Q <sub>var</sub>
Gradiente de declividade entre o início e final da linha de gotejamento, “+” quando aclave/ “-” quando declive, % **	S <sub>o</sub>
Coeficiente “C” HAZEN WILLIANS do material do tubo do emissor	C <sub>me</sub>

\* Emissor de tipo convencional.

\*\* Causa efeito sobre H<sub>fe</sub>.

Para o cálculo das perdas de carga do sistema, além de alguns dados visualizados nas tabelas anteriores é necessário a informação de outros dados, os quais são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Componentes para altura monométrica total (H<sub>m</sub>) e cálculos de perda de carga (H<sub>f</sub>)

Variável, unidade	Sigla
C HAZEN WILLIANS do material do pivô	C <sub>mp</sub>
Diâmetro interno da tubulação do pivô, m	D <sub>mp</sub>
Fator de múltiplas saídas do pivô do pivô	FN <sub>p</sub>
Pressão de serviço do emissor da última linha, mca	PS <sub>E</sub>
Diferença de nível máximo do centro do pivô ao final da tubulação principal (aço zincado), m *	DZ <sub>mp</sub>
Altura do Pivô, m	A <sub>p</sub>
H <sub>f</sub> no regulador de pressão, mca	H <sub>Rg</sub>
Desnível da captação até a base do pivô, m	DZ <sub>cp</sub>
Comprimento da adutora, m	C <sub>ad</sub>
C HAZEN WILLIANS do material da adutora	C <sub>ma</sub>
Diâmetro da tubulação da adutora, m	D <sub>ma</sub>

\* Causa efeito direto sobre H<sub>floc</sub> e H<sub>mt</sub>.

### 3.2 Cálculos executados e sequencia de rotinas

O uso das variáveis descritas no item anterior, pelo programa, segue uma sequência lógica abordada no fluxograma da Figura 5, sendo que uma série de rotinas e funções são também executadas, de acordo com as opções escolhidas pelo usuário (Figura 6).



Figura 5 – Fluxograma 1: plano de serviço do IRGMO

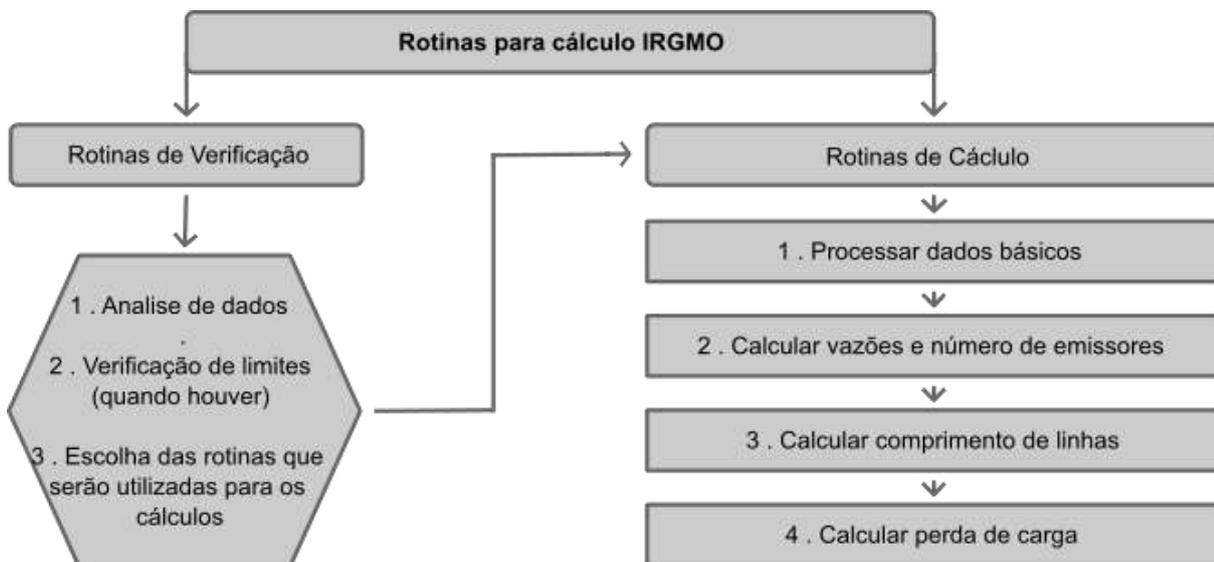


Figura 6 – Fluxograma 2: Rotinas

As rotinas visualizadas no último fluxograma 2 são descritas nos próximos subitens a seguir, demonstrando onde as mesmas são empregadas no *software* e de quais variáveis de entrada elas necessitaram.

As rotinas de verificação não realizam cálculos, mas sim:

1. Validam os dados informados pelo usuário, checando sua consistência e armazena-os na memória;
2. Verificam os limites (quando houverem) aceitáveis para os mesmos, se um dado estiver fora da faixa aceitável, o *software* o redefinirá para seu máximo ou mínimo, de acordo com o dado informado;
3. Definem como as rotinas serão utilizadas.

Após as rotinas de verificação, o *software* inicia a primeira rotina de cálculo a qual trata de alguns dados armazenados na memória e fornece novos dados que serão utilizados posteriormente. A rotina 1 aplica-se aos subitens de 3.2.1 a 3.2.5.

No fluxograma da Figura 7 observa-se a sequência de como os cálculos são realizados.

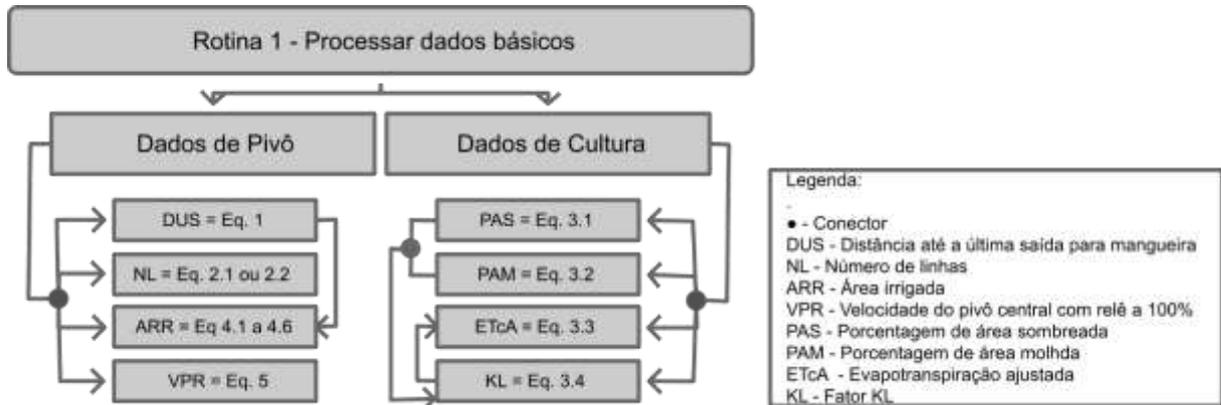


Figura 7 – Fluxograma 3: processamento de dados base

As equações dos itens 3.2.10 (Figura 8) a 3.2.14 (Figura 9) são aplicadas de forma pontual, ou seja, são aplicadas linha por linha, isto se faz necessário devido ao fato da vazão de cada linha está diretamente ligada à distância em relação à parte central do equipamento (base do pivô). Fluxogramas para a 4ª rotina de cálculo podem ser vistos a partir do subitem 3.2.16.

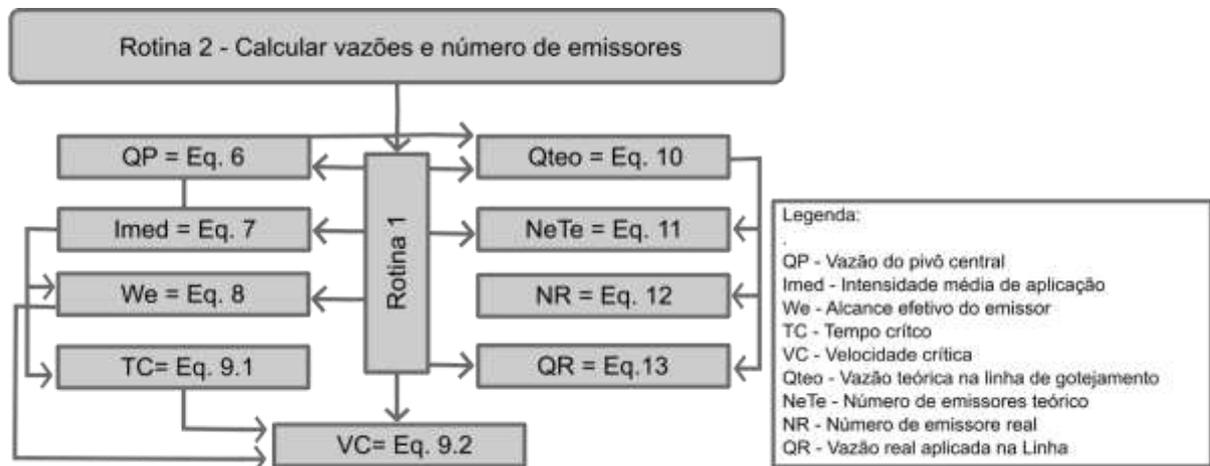


Figura 8 – Fluxograma 4: obtenção de dados de vazão e número de emissores do sistema IRGMO.

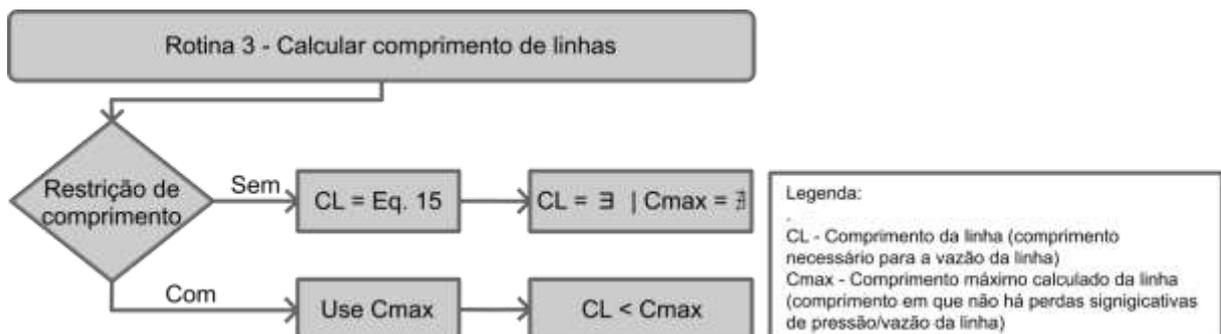


Figura 9 – Fluxograma 5: cálculo do comprimento da linha e comprimento máximo da mesma (quando restrito)

### 3.2.1 Distância até a última saída para mangueira

À distância até a última saída para mangueira é calculada pela soma da distância do centro do pivô até a última torre mais o comprimento do balanço, quando presente.

$$DUS = DUT + CB \quad (1)$$

em que,

DUS - Distância até a última saída para mangueira, m;

DUT - Distância até a última torre, m;

CB - Comprimento do balanço, m.

### 3.2.2 Número de linhas

O número de linhas pode ser calculado por duas formas: “simples” pela razão entre a distância até a última saída para mangueira e a distância entre saídas de mangueira (eq. 2.1) ou “composta” pelo somatório dos comprimentos utilizados com linhas de gotejamento nos vãos (eq. 2.2).

$$NL = \frac{DUS}{DSM} \quad (2.1)$$

em que,

NL - Número de linhas, adimensional;

DUS - Distância até a última saída para mangueira, m;

DSM - Distância entre saídas de mangueira, m.

$$NL = \frac{|E0 - L_1| + |ET - L_2| + |ET - L_x| + CB}{DSM} \quad (2.2)$$

em que,

NL - Número de linhas, adimensional;

E0 - Espaço entre o centro do pivô e primeira linha de gotejamento, m;

L<sub>1</sub> - Distância entre a 1ª linha e a última do primeiro vão, m;

ET - Espaço ocupado pela torre, m (considerar “zero” quando houver possibilidade de gotejamento próximo e/ou na zona dos rodados do pivô);

$L_2$  - Distância entre a 1ª linha do 2º vão e a última linha do mesmo vão, m;  
 $L_x$  - Distância entre a 1ª linha do vão “x” e a última linha do mesmo vão,

m;

CB - Comprimento do balanço, m;

DSM - Distância entre saídas de mangueira, m.

### 3.2.3 Ajuste da evapotranspiração

Para o cálculo da lâmina de irrigação ou evapotranspiração ajustada, o usuário pode realizar o cálculo de ajuste seguindo os subitens 3.2.3.1 a 3.2.3.4 ou apenas informá-lo como dado de entrada na caixa da evapotranspiração (EVP).

Uma vez que sistemas de irrigação localizada apenas uma faixa da área é irrigada

Esta metodologia utilizou como ajuste dois conceitos importantes no dimensionamento desse tipo de sistema, que são a porcentagem de área sombreada (PAS) e a porcentagem de área molhada (PAM) que seguem os parâmetros abordados por Mantovani, Bernardo e Palaretti (2009).

#### 3.2.3.1 Porcentagem de área sombreada

O primeiro conceito expressa a relação entre a área sombreada pela planta e a área total ocupada por esta mesma planta:

$$PAS = \frac{ASP}{ATP} \cdot 100 \quad (3.1)$$

em que,

PAS - Porcentagem de área sombreada, %;

ASP - Área sombreada pela planta, m<sup>2</sup>;

ATP - Área total ocupada pela planta, m<sup>2</sup>.

#### 3.2.3.2 Porcentagem de área molhada

O segundo conceito expressa a porcentagem da área molhada, em relação à área total ocupada pela planta, e depende de características do emissor (vazão, espaçamento e raio irrigado) e da planta (espaçamento e desenvolvimento):

$$PAM = \frac{AM_e}{ATP} \cdot 100 \quad (3.2)$$

em que,

PAM - Porcentagem de área molhada, %.

$AM_e$  - Área molhada pelo emissor, m<sup>2</sup>;

ATP - Área total ocupada pela planta, m<sup>2</sup>.

Ainda segundo Mantovani, Bernardo e Palaretti (2009), com base na PAS e na PAM, fazem-se necessária uma correção que reduz a evapotranspiração da cultura, por redução da evaporação direta do solo da área não molhada. Apesar da complexidade do processo, de forma simplificada, a evapotranspiração ajustada pode ser representada pela equação a seguir:

### 3.2.3.3 Evapotranspiração ajustada

$$ETcA = ETc \cdot K_L \quad (3.3)$$

em que,

ETcA - Evapotranspiração ajustada, mm dia<sup>-1</sup>;

ETc - Evapotranspiração de cultura, mm dia<sup>-1</sup>;

$K_L$  - Fator de correção, adimensional.

### 3.2.3.4 Fator $K_L$

Para definição dos valores de  $K_L$  neste trabalho considerou-se o método proposto por Keller – Bliesner:

$$K_L = (P_{\max}^{0,5}) \cdot 0,1 \quad (3.4)$$

em que,

$K_L$  - Fator de correção, adimensional.

$P_{\max}$  - O maior valor entre PAS e PAM, %.

### 3.2.4 Área irrigada

A área irrigada assim como a DUS pode ser calculada de forma simples com base na distância até a última saída para mangueira, conforme a equação 4.2.

Usando a equação da área de uma circunferência:

$$A = \pi \cdot r^2 \quad (4.1)$$

em que,

- A - Área da seção, m<sup>2</sup>;  
r - Raio do pivô, m.

Substituindo o “r” por DUS e dividindo o lado direito da igualdade por 10000, para encontrar a área em hectares, tem-se a eq. 4.2 que realiza o cálculo “simples”.

$$ARR = \frac{\pi \cdot DUS^2}{10000} \quad (4.2)$$

em que,

- ARR - Área irrigada, ha;  
DUS - Distância até a última saída para mangueira, m.

A forma composta para encontrar a área irrigada leva em consideração à área irrigada por vão do pivô.

Encontrando a área do 1º vão:

$$A_1 = (\pi \cdot (D_f)^2 - \pi \cdot (D_i)^2) \quad (4.3)$$

em que,

- A<sub>1</sub> - Área utilizada no primeiro vão, m<sup>2</sup>;  
D<sub>f</sub> - Raio entre o último e o primeiro emissor, m;  
D<sub>i</sub> - Raio entre o primeiro emissor e o centro do pivô, m.

Encontrando a área dos vãos subsequentes:

$$A_x = (\pi \cdot (D_{fi})^2 - \pi \cdot (D_{iv})^2) \quad (4.4)$$

em que,

- A<sub>x</sub> - Área utilizada pelo vão “x”, m<sup>2</sup>;  
D<sub>fi</sub> - Raio entre o último emissor do vão e o centro do pivô, m;  
D<sub>iv</sub> - Raio entre o primeiro emissor do vão e o centro do pivô, m.

Agora aplicando às equações 4.3 e 4.4 a equação 4.2, tem-se:

$$ARR = \frac{(\pi \cdot (D_f)^2 - \pi \cdot (D_i)^2) + (\pi \cdot (D_{fi})^2 - \pi \cdot (D_{iv})^2) + \dots + AX}{10000} \quad (4.5)$$

em que,

ARR - Área irrigada, ha.

Ao considerar que a área dos rodados das torres será irrigada, "ARR" receberá uma definição simplista, neste caso será descontado apenas a pequena área da região central do pivô. Para este caso a equação corresponderia a:

$$ARR = \frac{(\pi \cdot (D_{fi})^2 - \pi \cdot (D_{iv})^2)}{10000} \quad (4.6)$$

em que,

ARR - Área irrigada, ha;

$D_{fi}$  - Raio entre o último emissor do pivô e o centro do pivô, m;

$D_{iv}$  - Raio entre o primeiro emissor do pivô e o centro do pivô, m.

A lógica do *software* irá analisar os dados de entrada, executando o cálculo e em seguida atribuindo um valor para ARR.

### 3.2.5 Velocidade do pivô central com relê a 100%

De acordo Bernardo; Soares; Mantovani (2006a), a velocidade do pivô central com relê a 100% é calculada com base na distância até a última torre e o tempo de uma volta completa com relê a 100%, conforme equação 5:

$$VPR = \frac{2 \cdot \pi \cdot DUT}{TVC} \quad (5)$$

em que,

VPR - Velocidade do pivô central com relê a 100%, m h<sup>-1</sup>.

DUT - Distância até a última torre, m;

TVC - Tempo de uma volta completa com relê a 100%, h.

### 3.2.6 Vazão do pivô central

A vazão do pivô central é calculada de acordo a equação 6:

$$QP = \frac{[ETcA \cdot TOD] \cdot ARR}{TOD \cdot \frac{EAS}{100}} \quad (6)$$

em que,

QP - Vazão do pivô central,  $m^3 h^{-1}$ .

ETcA - Evapotranspiração ajustada,  $mm dia^{-1}$ ;

ARR - Área irrigada, ha;

TOD - Tempo de operação diário, h;

EAS - Eficiência do sistema, %.

### 3.2.7 Intensidade média de aplicação

A intensidade média de aplicação é dada pela seguinte equação:

$$I_{med} = \frac{Q_{emi}}{E_{emi} \cdot LFM} \quad (7)$$

em que,

$I_{med}$  - Intensidade média de aplicação,  $mm h^{-1}$ .

$Q_{emi}$  - Vazão nominal do emissor,  $L h^{-1}$ ;

$E_{emi}$  - Espaçamento entre emissores, m;

LFM - Largura de faixa molhada, m.

### 3.2.8 Intensidade máxima de aplicação

A intensidade máxima é dada pela seguinte equação:

$$I_{max} = I_{med} \cdot 1,05 \quad (8)$$

em que,

$I_{max}$  - Intensidade máxima do sistema,  $mm h^{-1}$ ;

$I_{med}$  - Intensidade média do sistema,  $mm h^{-1}$ .

Diz-se que  $I_{\max}$  é igual a 1,05 de  $I_{\text{med}}$  devido no gotejamento as intensidades média e máxima serem muito próximas, como mostra a Figura 10, no caso de um aspersor convencional haveria uma distância maior entre o ponto médio e o máximo.

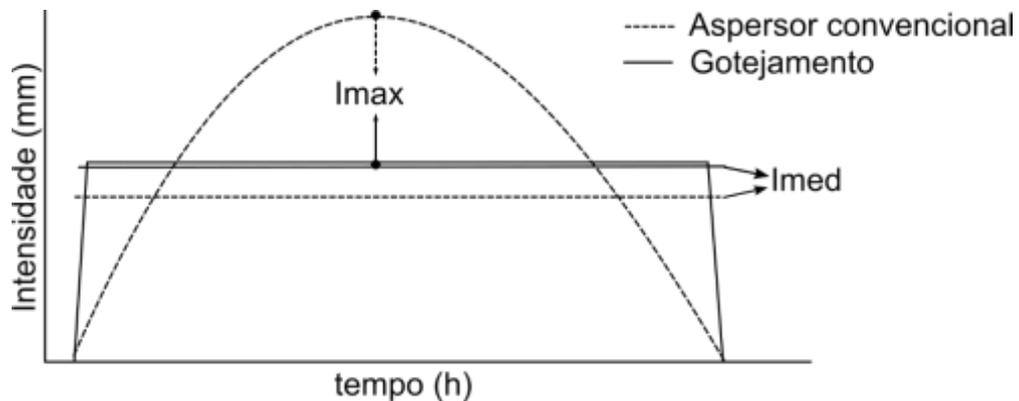


Figura 10 - Representação gráfica do padrão de intensidade de aplicação entre aspersores convencionais e gotejamento

### 3.2.9 Alcance efetivo do emissor

O alcance efetivo é calculado pela seguinte equação:

$$We = \frac{I_{\text{med}}}{I_{\text{max}}} \cdot \text{DSM} \quad (9)$$

em que,

$We$  - Alcance efetivo do emissor,  $\text{mm}^{-1} \text{ m}$ ;

$I_{\text{med}}$  - Intensidade média do sistema,  $\text{mm h}^{-1}$ ;

$I_{\text{max}}$  - Intensidade máxima de aplicação,  $\text{mm h}^{-1}$ ;

$\text{DSM}$  - Distancia de saída entre mangueiras,  $\text{m}$ ;

### 3.2.10 Velocidade crítica e tempo crítico

A velocidade crítica pode ser obtida após calcular o tempo crítico, que para calculá-lo utiliza-se a intensidade máxima de aplicação em função das características do solo (Eq. 10.1), no caso do IRGMO as linhas de gotejamento possuem comportamento semelhante com a disposição dos aspersores de Tipo B apresentada por Bernardo, Soares e Mantovani (2006a), onde nesta disposição a largura de faixa molhada é sempre igual ou pouco variável.

$$TC = \left( \frac{I_{\max}}{T1} \right)^{\frac{1}{T2}} \quad (10.1)$$

em que,

TC - Tempo crítico, min.

$I_{\max}$  - Intensidade máxima do sistema,  $\text{mm h}^{-1}$ .

T1 - Constante da curva de infiltração do solo, adimensional;

T2 - Expoente da curva de infiltração do solo, adimensional.

T1 e T2 são os parâmetros da equação de velocidade de infiltração de Kostiakov ( $VI = k' \cdot t^{n'}$ ),  $k'$  e  $n'$  respectivamente.

Com TC calculado podemos então obter o da velocidade crítica do pivô pela equação 10.2:

$$VC = \left[ \frac{We}{\left( \frac{TC}{60} \right)} \right] \quad (10.2)$$

em que,

VC - Velocidade crítica,  $\text{m h}^{-1}$ .

We - Alcance efetivo do emissor, m;

TC - Tempo crítico, min.

### 3.2.11 Vazão teórica na linha de gotejamento e total do pivô

A vazão teórica na linha de gotejamento é dada pela equação 11.1, adaptada de Mantovani, Bernardo e Palaretti (2009),:

$$Q_{\text{teo}} = \frac{QP \cdot 2 \cdot LFM \cdot R_i}{DUS^2 \cdot 1000} \quad (11.1)$$

em que,

$Q_{\text{teo}}$  - Vazão teórica da linha de gotejamento,  $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$ .

QP - Vazão do pivô central,  $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$ ;

LFM - Largura da faixa molhada pelo emissor, m;

$R_i$  - Distância entre o centro do pivô e a linha de gotejamento, m;

DUS - Distância até a última saída de mangueira, m.

A vazão teórica total será a somatória das vazões de todas as linhas:

$$QA_t = \left( \sum_{NL=NL_i}^{NL_f} Q_{teo} \right) \cdot 1000 \quad (11.2)$$

em que,

$QA_t$  - Vazão teórica total aplicada pelo pivô,  $m^3 h^{-1}$ ;

$NL$  - Número de linhas, adimensional;

$NL_f$  - Última linha do pivô, adimensional;

$NL_i$  - Primeira linha do pivô, adimensional;

$Q_{teo}$  - Vazão teórica da linha de gotejamento,  $L h^{-1}$ .

### 3.2.12 Número de emissores teórico

O número de emissores teórico é calculado pela razão entre a vazão teórica na linha de gotejamento e a vazão do emissor.

$$NeTe = \left\lceil \frac{Q_{teo}}{Q_{emi}} \right\rceil \quad (12)$$

em que,

$NeTe$  - Número de emissores teórico, (ajustado para superior inteiro)<sup>v</sup>;

$Q_{teo}$  - Vazão teórica na linha de gotejamento,  $L h^{-1}$ ;

$Q_{emi}$  - Vazão do emissor,  $L h^{-1}$ .

### 3.2.13 Número de emissores real por linha e total do sistema

Como o número de emissores deve ser um número inteiro, esse valor foi ajustado para cima, ou seja, adotou-se o número inteiro imediatamente superior aquele encontrado, conforme equação 13.1.

$$NR = NeTe \quad (13.1)$$

<sup>v</sup> Na equação a parte entre colchetes especiais “[ ]” indica que o resultado será arredondando para o número superior inteiro maior ou igual ao valor especificado. Algumas linguagens de programação denominam este método como “*Ceiling*”.

em que,

NR - Número de emissores real, adimensional;

NeTe - Número de emissores teórico, adimensional.

A quantidade total de emissores do sistema é dada pela equação:

$$N_{emt} = \sum_{NL=NL_i}^{NL_f} NR \quad (13.2)$$

em que,

$N_{emt}$  - Número de emissores total do sistema, adimensional;

NL - Número de linhas, adimensional;

$NL_f$  - Última linha do pivô, adimensional;

$NL_i$  - Primeira linha do pivô, adimensional;

NR - Número de emissores real, adimensional.

### 3.2.14 Vazão real aplicada na linha e vazão real total

A vazão real aplicada é calculada devido ao reajuste que é feito no número de emissores.

$$QR = Q_{emi} \cdot NR \quad (14.1)$$

em que,

QR - Vazão real aplicada na linha,  $L h^{-1}$ ;

$Q_{emi}$  - Vazão do emissor,  $L h^{-1}$ ;

NR - Número de emissores real, adimensional.

A vazão real total será o somatório das vazões de todas as linhas:

$$QR_t = \left( \sum_{NL=NL_i}^{NL_f} QR \right) \cdot 1000 \quad (14.2)$$

em que,

$QR_t$  - Vazão real total aplicada pelo pivô,  $m^3 h^{-1}$ ;

NL - Número de linhas, adimensional;

- NL<sub>f</sub> - Última linha do pivô, adimensional;
- NL<sub>i</sub> - Primeira linha do pivô, adimensional;
- QR - Vazão real aplicada na linha, L h<sup>-1</sup>.

### 3.2.15 Comprimento da linha de gotejamento e comprimento total necessário

Por fim, o comprimento da linha de gotejamento é calculado pela razão entre o número de emissores e o espaçamento entre emissores, de acordo a equação 15.1.

$$CL = NR \cdot E_{emi} \quad (15.1)$$

em que,

- CL - Comprimento da linha de gotejamento, m;
- NR - Número de emissores real, adimensional;
- E<sub>emi</sub> - Espaçamento entre emissores, m.

A quantidade total de tubo gotejadores é dado pelo somatório dos comprimentos de todas as linhas:

$$CT_n = \sum_{NL=NL_i}^{NL_f} CL \quad (15.2)$$

em que,

- CT<sub>n</sub> - Comprimento total necessário, m;
- NL - Número de linhas, adimensional;
- NL<sub>f</sub> - Última linha do pivô, adimensional;
- NL<sub>i</sub> - Primeira linha do pivô, adimensional;
- CL - Comprimento da linha de gotejamento, m.

### 3.2.16 Comprimento máximo da linha de gotejamento (Cmax)

Frizzone et al. (2012) descrevem “o comprimento máximo de uma linha lateral com diâmetro constante depende do tipo de perfil de pressão, da pressão de entrada e da variação máxima de pressão permitida para projeto”.

Para a estimativa do comprimento máximo da linha de gotejamento o *software* toma como base a metodologia apresentada por Frizzone et al. (2012), utilizando os dois tipos de perfil. A Figura 11 apresenta o fluxograma que o IRGMO segue para encontrar o valor do comprimento máximo com base nos dados fornecidos pelo usuário.

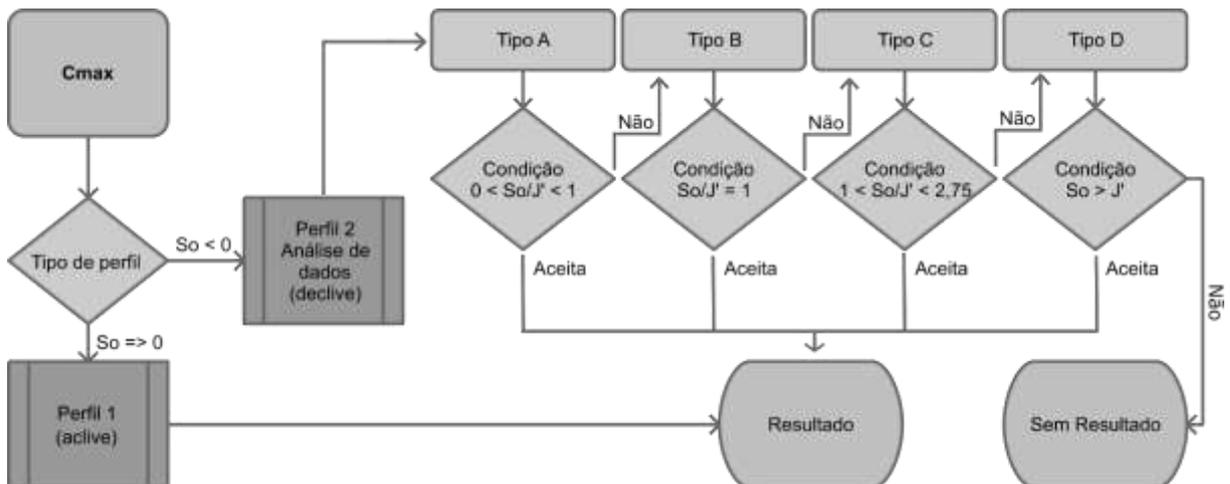


Figura 11 – Fluxograma 5: cálculo do  $S_o$ .  $S_o$  – desnível da linha de gotejamento ( $m\ m^{-1}$ ), positivo quando em aclave, negativo quando em declive e zero quando em nível;  $J'$  – variação de carga de pressão ( $m\ m^{-1}$ ) ao longo da linha de gotejamento

### 3.2.17 Perda de carga máxima na linha de emissores

De acordo com Bernardo, Soares & Mantovani (2006b) existem dois tipos de perda de carga: ao longo da tubulação e localizada. As perdas de carga ao longo de uma tubulação retilínea, em geral, são constantes ao longo do trecho de uma tubulação com diâmetro constante e de mesmo material, desde que o regime de escoamento seja permanente (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2006c; PORTO, 2006).

Estas tubulações estão sujeitas há perdas de carga ( $H_f$ ) que, no caso da linha de emissores, podem causar variações de pressão entre a relação do primeiro e o último emissor, por consequência prejudicando a distribuição de água pelo sistema de irrigação e aumentando a variação de vazão (LAPERUTA NETO et al., 2011; PORTO, 2006).

Mesmo sabendo que em qualquer comprimento de linha haverá um valor de  $H_f$ , deve-se calcular o comprimento máximo da mesma, uma vez que o  $H_f$  irá provocar certa variação de pressão com base em uma variação máxima de vazão permitida, a qual suporta o  $H_f$ .

A perda de carga na linha de emissores é calculada com a equação escolhida pelo usuário no próximo subitem (3.2.17.1) e de acordo com o método de cálculo escolhido pelo *software*, caso o usuário decida utilizar o dado de comprimento máximo o *software* irá executar a verificação da equação 17.0.1 e então utilizar o método apropriado.

$$\begin{aligned} \text{Se } C_{\max} \geq CL_f &\rightarrow \text{Use o método simples} - 3.2.17.2 \\ \text{Se } C_{\max} < CL_f &\rightarrow \text{Use o método composto} - 3.2.17.3 \end{aligned} \quad (17.0.1)$$

em que,

$C_{\max}$  - Comprimento máximo calculado, m;

$CL_f$  - Comprimento calculado na última linha, m.

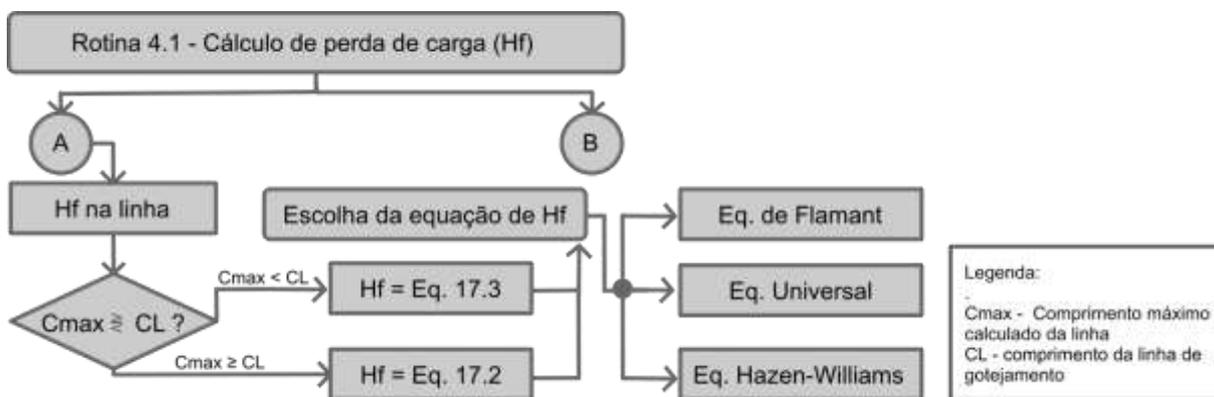


Figura 12 – Fluxograma 6.1: escolha do cálculo de perda de carga nas linhas de gotejadores.

Para calcular o  $H_f$  de uma linha determinada é necessário conhecer a vazão total da mesma e seu comprimento. Assim as equações 17.0.2 e 17.0.3 demonstram como obter estes valores.

$$Q_{fl} = \left[ \frac{1000 \cdot NL \left( \frac{DUS \cdot 2 \cdot LFM}{DUS^2} \right)}{Q_{emi}} \right] Q_{emi} \quad (17.0.2)$$

em que,

$Q_{fl}$  - Vazão da última linha de gotejamento, L h<sup>-1</sup>;

NL - Número de linhas, adimensional;

- DSM - Distância entre saídas de mangueira, m;  
 QP - Vazão do pivô central, m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>;  
 LFM - Largura de faixa molhada pelo emissor, m;  
 DUS - Distância até a última saída para mangueira, m;  
 Q<sub>emi</sub> - Vazão do emissor, L h<sup>-1</sup>.

No segundo cálculo é encontrado o comprimento da última linha:

$$E_{fi} = \left[ \left( \frac{NL \cdot DSM \cdot QP \cdot 2 \cdot LFM}{DUS^2 \cdot 100} \right) \frac{Q_{emi}}{Q_{emi}} \right] E_{emi} \quad (17.0.3)$$

em que,

- E<sub>fi</sub> - Comprimento da última linha de gotejamento, m;  
 NL - Número de linhas, adimensional;  
 DSM - Distância entre saídas de mangueira, m;  
 QP - Vazão do pivô central, m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>;  
 LFM - Largura de faixa molhada pelo emissor, m;  
 DUS - Distância até a última saída para mangueira, m;  
 Q<sub>emi</sub> - Vazão do emissor, L h<sup>-1</sup>;  
 E<sub>emi</sub> - Espaçamento entre emissores, m.

### 3.2.17.1 Escolha do tipo da equação para cálculo de H<sub>f</sub>

O IRGMO disponibiliza três equações para o cálculo do H<sub>f</sub> na linha de emissores, o usuário deve escolher uma equação com base em sua necessidade e/ou disponibilidade de dados, sendo:

#### 1. Equação de Flamant

$$H_{fe} = 6,11 \cdot b \cdot \frac{E_{fi}}{D_{me}^{4,75}} \cdot Q_{fi}^{1,75} \quad (17.1.1)$$

em que,

- H<sub>fe</sub> - Perda de carga localizada na linha de emissores, mca;  
 b - Constante da equação de Flamant, adimensional;  
 E<sub>fi</sub> - Comprimento da última linha de gotejamento, m;

$D_{me}$  - Diâmetro do tubo, m;

$Q_{fi}$  - Vazão da última linha de gotejamento, L h<sup>-1</sup>.

O valor padrão de  $b$  é 0,0001, outros valores para  $b$  são apresentados no Anexo A - Tabela 3.

## 2. Equação Universal

$$H_{fe} = \frac{8 \cdot f \cdot E_{fi} \cdot Q_{fi}^2}{\pi^2 \cdot g \cdot D_{me}^5} \quad (17.1.2)$$

em que,

$H_{fe}$  - Perda de carga na linha de emissores, mca;

$f$  - Fator de atrito;

$E_{fi}$  - Comprimento da última linha de gotejamento, m;

$Q_{fi}$  - Vazão da última linha de gotejamento, L h<sup>-1</sup>;

$g$  - Aceleração da gravidade, m.s<sup>-2</sup>;

$D_{me}$  - Diâmetro do tubo, m.

O valor utilizado para a aceleração da gravidade foi de 9,80665 m.s<sup>-2</sup>.

O fator de atrito utilizado na Equação Universal é calculado pela Equação de Swamee (SWAMEE, 1993), que segundo Porto (2006, p. 46) “é válida para os escoamentos, laminar, turbulento liso, de transição e turbulento rugoso”:

$$f = \left\{ \left( \frac{64}{Re} \right)^8 + 9,5 \cdot \left[ \ln \left( \frac{\varepsilon}{3,7 \cdot D_{me}} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) - \left( \frac{2500}{Re} \right)^6 \right]^{-16} \right\}^{0,125} \quad (17.1.2.1)$$

em que,

$f$  - Fator de atrito, adimensional;

$Re$  - Número de Reynolds, adimensional;

$\varepsilon$  - Coeficiente de rugosidade do material, mm;

$D_{me}$  - Diâmetro do tubo, m.

Valores de  $\varepsilon$  são apresentados no Anexo A - Tabela 1.

Para obtenção do Número de Reynolds, utiliza-se as equações de 17.1.2.2 a

16.1.4:

$$Re = \frac{D_{me} \cdot V \cdot \rho}{\mu} \quad (17.1.2.2)$$

em que,

- Re - Número de Reynolds, adimensional;
- $D_{me}$  - Diâmetro do tubo, m;
- V - Velocidade relativa entre partícula e fluido,  $m \cdot s^{-1}$ ;
- $\rho$  - Massa específica do fluido (por padrão 1000),  $kg \cdot m^{-3}$ ;
- $\mu$  - Viscosidade dinâmica da água,  $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-2}$ .

A velocidade (V) é expressa pela equação:

$$V = \frac{Q}{A} \quad (17.1.2.3)$$

em que,

- V - Velocidade,  $m \cdot s^{-1}$ ;
- Q - Vazão,  $m^3 \cdot s^{-1}$ ;
- A - Área da seção,  $m^2$ .

E a viscosidade dinâmica ( $\mu$ ) é expressa pela equação 17.1.2.4 (LIMA; LUZ, 2001):

$$\mu = 0,002488 - 0,00049567 * \ln((T + 273,15) - 273) \quad (17.1.2.4)$$

em que,

- T - Temperatura da água, °C.

### 3. Hazen-Williams

$$H_{fe} = \left( 10,65 \cdot \frac{Q_{fi}^{-1,75} \cdot E_{fi}}{C_{me}^{-1,75} \cdot D_{me}^{4,87}} \right) \cdot 0,36 \quad (17.1.3)$$

Em que,

- $H_{fe}$  - Perda de carga localizada na linha de emissores, mca;
- $Q_{fi}$  - Vazão da última linha de gotejamento,  $L \cdot h^{-1}$ ;
- $E_{fi}$  - Comprimento da última linha de gotejamento, m;

- $C_{me}$  - Coeficiente “C” do material do tubo do emissor, adimensional;  
 $D_{me}$  - Diâmetro do tubo, m.

### 3.2.17.2 H<sub>f</sub> na linha de emissores – método simples

O método simples executa três cálculos para a obtenção do valor de H<sub>f</sub>, esse método será acionado sempre que o comprimento máximo da linha

3.2.16 Comprimento máximo da linha de gotejamento (C<sub>max</sub>) seja menor ou igual ao comprimento calculado (CL) da última linha. Primeiro é necessário calcular a vazão da última linha, dado pela equação:

$$H_{fe} = \text{Equação escolhida do item 3.2.17.1} \quad (17.2)$$

em que,

- $H_{fe}$  - Perda de carga na última linha de gotejamento, mca.

### 3.2.17.3 H<sub>f</sub> na linha de emissores – método composto

O método composto aplica as mesmas fórmulas do método simples, porém ao invés de aplicá-las apenas na última linha de gotejamento ele executa ambas as fórmulas em todas as linhas.

Isto ocorre porque quando  $C_{max} < CL_f$  o *software* executa um ajuste fazendo a “divisão” dessa linha em subdivisões que se adequem ao  $C_{max}$ , até um máximo de quatro divisões, com isto os comprimentos que serão utilizados na última linha podem ser menores do que um que esteja em linhas medianas, uma vez que haverá uma repetição da linha (Figura 13).

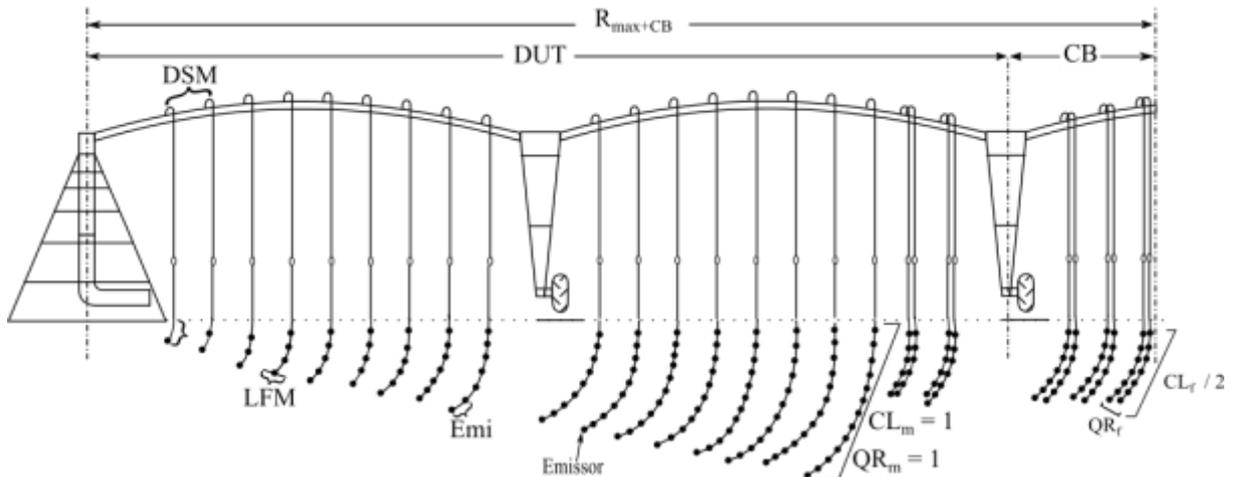


Figura 13 – Esquema de um sistema IRGMO quando utilizado a divisão de linhas ( $C_{max} < C_f$ );  $R_{max+CB}$  – raio máximo do pivô com balanço; DUT – Distância até a última torre; CB – comprimento do balanço; DSM – Distância entre saídas de mangueira; LFM – largura da faixa molhada do emissor; Emi – espaçamento entre emissores no tubo gotejador;  $CL_m=1$  – comprimento da linha sem divisão;  $QR_m=1$  – vazão real do ponto com uma linha;  $CL_f/2$  – comprimento de tubo gotejador do último ponto dividido em duas linhas;  $QR_f$  – vazão real do ponto com duas linhas

$$H_{fe} = \text{Equação escolhida do item 3.2.17.1} \quad (17.3)$$

em que,

$H_{fe}$  - Perda de carga na última linha de gotejamento, mca.

### 3.2.18 Perda de carga no pivô

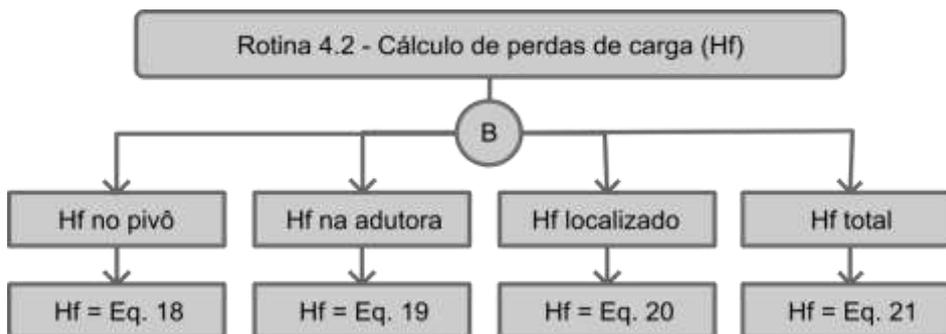


Figura 14 – Fluxograma 6.2: cálculo das demais perda de carga do sistema

$$H_{fp} = \frac{10,65 \cdot QP^{1,852} \cdot DUS \cdot FN_p}{C_{mp}^{1,852} \cdot D_{mp}^{4,87}} \quad (18)$$

em que;

$H_{fp}$  - Perda de carga ao longo do pivô, mca;

QP - Vazão do pivô central,  $m^3 h^{-1}$ ;

DUS - Distância até a última saída para mangueira, m;

$FN_p$  - Fator de múltiplas saídas do pivô, m;

$C_{mp}$  - Coeficiente “C” do material da adutora, adimensional;

$D_{mp}$  - Diâmetro interno da tubulação do pivô, m.

Valores para  $C_{mp}$  são apresentados no Anexo A - Tabela 2.

Valores de  $FN_p$  que podem ser adotados são: 0,548 (GILLEY, 1989; SCALOPPI; ALLEN, 1993), 0,54 ao considerar que a tubulação do pivô possui diâmetro único (Informação verbal)<sup>vi</sup> ou ainda seguindo Anwar (1999, [Tabela 5]), o  $FN_p$  valor pode assumir diferentes constantes de acordo com o número de saídas que houverem no pivô e a fórmula de fricção utilizada.

Tabela 5 – Comparação das estimativas do coeficiente de correção de atrito ou fator de múltiplas saídas do pivô ( $FN_p$ )

Formula de fricção	m *	Revisão **	N *** = 8	N = 20	N = 73	N = 200
Darcy-Weisbach	2,000	0,533	0,596	0,558	0,540	0,536
Scobey	1,900	0,543	0,606	0,568	0,550	0,546
Hazen-Williams	1,852	0,548	0,611	0,573	0,555	0,550

\* “m” é o expoente de velocidade de atrito usado na fórmula.

\*\* Para Chu e Moe (1972) apud Anwar (1999).

\*\*\* “N” é o número de saídas ao longo do pivô central.

### 3.2.19 Perda de carga na adutora

A perda de carga na adutora é calculada pela equação de Hazen-Williams adaptada a necessidade do sistema IRGMO:

$$H_{fa} = 10,65 \cdot \frac{QP^{1,852} \cdot C_{ad}}{C_{ma}^{1,852} \cdot D_{ma}^{4,87}} \quad (19)$$

em que;

$H_{fa}$  - Perda de carga ao longo da adutora, mca;

QP - Vazão do pivô central,  $m^3 h^{-1}$ ;

$C_{ad}$  - Comprimento da adutora, m;

$C_{ma}$  - Coeficiente “C” do material da adutora, adimensional;

$D_{ma}$  - Diâmetro interno da adutora, m.

<sup>vi</sup> Informação fornecida pelo Dr. Prof.º Rubens Duarte Coelho em aula da disciplina LEB5009 – “Irrigação Pressurizada 1: Aspersão”, do PPG em Engenharia de Sistemas Agrícolas, ESALQ/USP, ministrada no período de março de 2015 a junho de 2015.

Valores para  $C_{ma}$  podem ser encontrados na Tabela 2 em Anexo A.

### 3.2.20 Perda de carga localizada no conjunto IRGMO

As perdas de carga localizada são causadas por acessórios presentes no sistema de irrigação que são necessários para sua operação, como comenta Porto (2006), ainda com suas palavras a presença destes acessórios pode favorecer a alteração de módulo ou direção da velocidade média, que por consequência altera a pressão de forma local.

Considera-se como perda de carga localizada 5% (informação verbal<sup>vii</sup>) do somatório descrito na equação 20. Esse adicional de 5% refere-se a perda de carga localizada de conexões e outras partes do sistema (acessórios).

$$H_{f_{loc}} = (H_{fe} + H_{fp} + H_{fa} + PS_E + DZ_{mp} + H_{Rg} + DZ_{cp}) \cdot 0,05 \quad (20)$$

em que,

$H_{f_{loc}}$  - Perda de carga localizada, mca;

$H_{fe}$  - Perda de carga na última linha de gotejamento, mca;

$H_{fp}$  - Perda de carga ao longo do pivô, mca;

$H_{fa}$  - Perda de carga ao longo da adutora, mca;

$PS_E$  - Pressão de serviço do emissor da última linha, mca;

$DZ_{mp}$  - Diferença de nível máximo do centro do pivô até a última linha, m;

$H_{Rg}$  - Hf no regulador de pressão, mca;

$DZ_{cp}$  - Desnível da captação até a base do pivô, m.

### 3.2.21 Altura monométrica do conjunto IRGMO

Para este cálculo toma-se como referência toda a perda de carga sobre o conjunto mais o adicional de 5% referente ao  $H_{f_{loc}}$ .

$$H_{mt} = H_{f_{loc}} + H_{fe} + H_{fp} + H_{fa} + PS_E + DZ_{mp} + H_{Rg} + DZ_{cp} \quad (21)$$

<sup>vii</sup> Informação fornecida pelo Dr. Prof.º Rubens Duarte Coelho em aula da disciplina LEB5009 – “Irrigação Pressurizada 1: Aspersão”, do PPG em Engenharia de Sistemas Agrícolas, ESALQ/USP, ministrada no período de março de 2015 a junho de 2015

em que,

- $H_{mt}$  - Altura monométrica do conjunto motobomba do IRGMO, mca
- $H_{f_{loc}}$  - Perda de carga localizada;
- $H_{fe}$  - Perda de carga na última linha de gotejamento, mca;
- $H_{fp}$  - Perda de carga ao longo do pivô, mca;
- $H_{fa}$  - Perda de carga ao longo da adutora, mca;
- $PS_E$  - Pressão de serviço do emissor da última linha, mca;
- $DZ_{mp}$  - Diferença de nível máximo do centro do pivô ao final da tubulação principal (aço zincado), m;
- $H_{Rg}$  -  $H_f$  no regulador de pressão, mca;
- $DZ_{cp}$  - Desnível da captação até a base do pivô, m.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

No intuito de facilitar o entendimento deste trabalho os resultados e discussão estão divididos em três partes: a primeira apresenta o *software* desenvolvido, a segunda as características funcionais do Módulo 1, enquanto a terceira mostra simulações realizadas no IRGMO.

### 4.1 Apresentação do IRGMO

A Figura 15 mostra a janela inicial do *software*, o botão “*Módulo 1: Calcular IRGMO*” abre a janela (Figura 16) que possibilita o dimensionamento de um sistema de irrigação por gotejamento móvel. Já a opção relativa ao botão “*Módulo 2: Análise Econômica*”, encontra-se indisponível, este recurso estará disponível em próximas versões do *software*. A barra de menu e opções disponíveis são descritas no subitem 4.2.7.



Figura 15 – Tela inicial do IRGMO

## 4.2 Módulo 1

A janela que se vê ao selecionar a opção Módulo 1, permite ao usuário, sob função do menu “*Arquivo*”, abrir arquivos salvos no disco rígido, salvar alterações ou novos arquivos (com extensão \*.igm), voltar para a janela inicial do IRGMO ou sair para a área de trabalho. Em relação a interface gráfica da janela é possível identificar seis grupos de componentes distintos:

- 1 – Componentes do Pivô Central, possui uma sub janela e texto de ajuda;
- 2 – Componentes de Cultura, possui texto de ajuda;
- 3 – Componentes do Emissor, possui duas sub janelas;
- 4 – Curva de infiltração do solo e Propriedades travadas;
- 5 – Componentes para Hm total, e;
- 6 – Resultados preliminares, estes aparecem após o clique no botão “*Mostrar dados preliminares*”, caso o preenchimento dos dados necessários estejam completos.

Figura 16 – “IRGMO - Entrada de Dados”, janela que possibilita a inserção de dados para o cálculo do sistema IRGMO, tal como a possibilidade de realizar modificações em dados informados ou de arquivos abertos no *software*

#### 4.2.1 Grupo 1 – Componentes do Pivô Central

Este grupo (Figura 17) representa variáveis que serão utilizadas em muitos cálculos do sistema IRGMO, podendo o usuário utilizar a área total de círculo (usando apenas DUT e CB), ou informar detalhes mais específicos do pivô conforme apresenta Figura 18. O uso dessas informações aumenta a precisão dos resultados, uma vez que ao invés de executar os cálculos para um círculo inteiro, o *software* estará executando cálculos para as áreas circulares que realmente serão utilizadas. Por exemplo o TOD não pode ser superior a 24 h, assim como a EAS não pode ser superior a 100 ou inferior a 0, quando um valor está fora do limite, além de uma mensagem de aviso, ele é ajustado para o máximo ou mínimo aceitável mais próximo do informado.

Componentes do Pivô Central

Distância até a última torre (m)

Comprimento do balanço (m)

Distância entre saídas de mangueira (m)

Largura da faixa molhada (m)

Tempo de operação diário (h)

Tempo de uma volta completa rele a 100% (h)

Eficiência do sistema (Ea - %)

Informar de acordo com as torres

Figura 17 – Grupo 1: Componentes do Pivô Central

A janela (Figura 18) será exibida sempre que o usuário marcar a opção “*Informar de acordo com as torres*”, no grupo 1. Nesta janela há duas variáveis que podem ou não ser informadas, que são o Espaço das torres (ET) e o Comprimento do Balanço (CB), ambos quando não informados serão considerados igual a zero.

#### 4.2.2 Grupo 2 – Componentes do Cultura

Das variáveis contidas no grupo 2, a única variável de entrada obrigatória para o cálculo é a evapotranspiração da cultura (EVP), ao usar apenas ela, o *software* estará omitindo o fator  $K_L$  (Figura 19), o qual serve como um coeficiente de redução para irrigação localizada para a evapotranspiração da cultura em função da área sombreada pela planta ou molhada pelo emissor em relação a área total da

planta, este “coeficiente de correção” foi bem discutido por Mantovani, Zinato e Simão (2003). O botão de interrogação, fornece ao usuário mais detalhes sobre o recurso, exibindo uma mensagem de ajuda (Figura 20) e a opção de abrir o arquivo de ajuda do IRGMO.

Dados do Pivô ×

Nº de Torres do Pivô:  Torres com distâncias equivalentes:  Sim

Distância do centro do pivô e o 1º emissor (m) [E0]:

Distância do centro do pivô e a 1ª torre (m) [CT]:

Espaço das torres (m) [ET]:

Comprimento do Balanço (m) [CB]:

Distância entre torres (m) [DT]

Torres 1-2	<input type="text"/>	Torres 2-3	<input type="text"/>	Torres 3-4	<input type="text"/>
Torres 4-5	<input type="text"/>	Torres 5-6	<input type="text"/>	Torres 6-7	<input type="text"/>
Torres 22-23	<input type="text"/>	Torres 23-24	<input type="text"/>	Torres 24-25	<input type="text"/>
Torres 25-26	<input type="text"/>	Torres 26-27	<input type="text"/>	Torres 27-28	<input type="text"/>

Centro do Pivô      Torre 1      Torre 2

← CT      ← E-0      ← ET      ← CB →

Cancelar      OK

Figura 18 – Grupo 1: janela "Dados do Pivô", janela que permite a entrada de informações relativas as dimensões das torres do pivô central, também apresenta esquema de exemplo

Componente de Cultura

Evapotranspiração (mm/d)  ?

Área total da planta (m<sup>2</sup>)

Área sombreada pela planta (m<sup>2</sup>)

Área molhada pelo emissor (m<sup>2</sup>)

Omitir Fator KL

Figura 19 – Grupo 2: Componente de Cultura

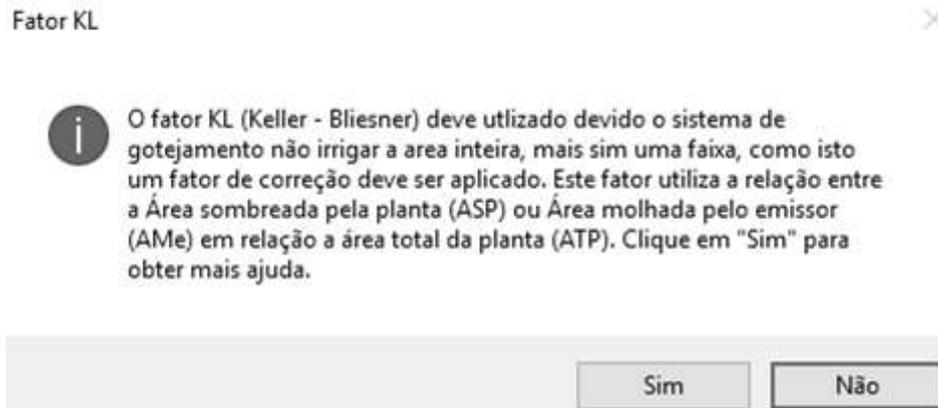


Figura 20 – Grupo 2: mensagem de ajuda para o "Fator KL", clicando em "Sim" um arquivo de ajuda do IRGMO é exibido no navegador padrão do computador

### 4.2.3 Grupo 3 – Componentes do Emissor

O terceiro grupo (Figura 21) trata das variáveis relativas ao emissor gotejador utilizado, tal como a escolha de alguns cálculos que serão executados ao longo do dimensionamento. A opção "Número de Emissores" encontra-se desativada, em função que é necessário um aumento em toda a lógica do *software*, para que ele possa escolher entre mais de um emissor, por isto o IRGMO utiliza apenas um emissor [considerar como tubo gotejador]. A opção "Usar Comp Máx" é relativa ao comprimento máximo da linha gotejadora permitido no sistema e este valor remete-se ao valor apresentado na caixa "Comprimento máximo", que pode ser calculado, via clique no botão "emissor 1" ou informado diretamente pelo usuário.

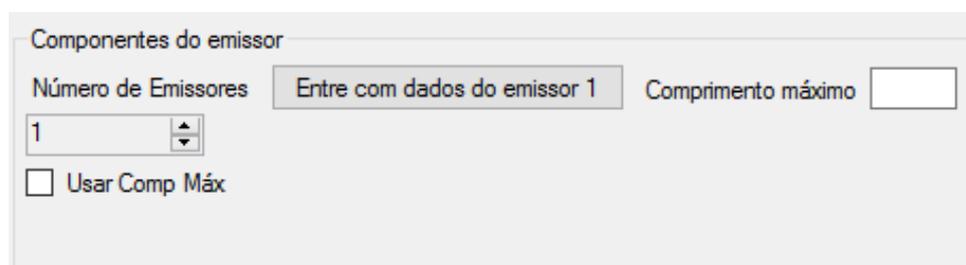


Figura 21 – Grupo 3: Componentes do emissor

A Figura 22 mostra a janela para entrada de dados específicos do emissor sendo todos eles obrigatórios para os cálculos, independente de usar ou não o  $C_{max}$ , ao acionar o botão "Mostrar esquema" será exibida uma imagem (Figura 23) contendo uma breve explicação sobre o efeito do desnível em relação ao comprimento máximo da linha (quando este for utilizado) e o efeito sobre a pressão. O botão "Hf na Linha" exhibe uma janela (Figura 24) onde pode-se escolher a fórmula

para cálculo de perda de carga na linha de emissores. Com todos os dados preenchidos basta acionar o botão “Calcular Cmax” para que o *software* busque por iteração o comprimento máximo da linha.

Figura 22 – Grupo 3: janela "IRGMO - Características do emissor"

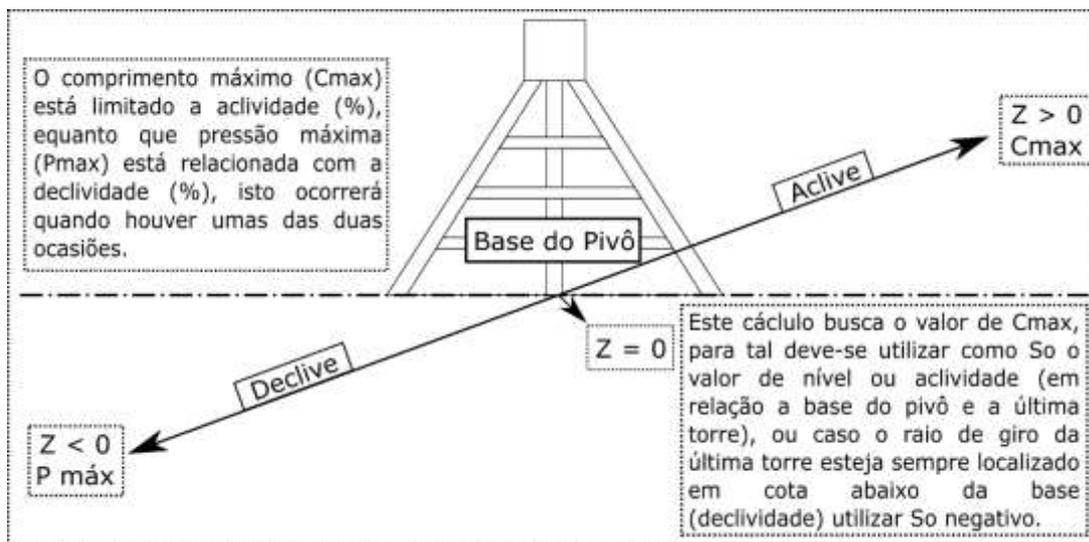


Figura 23 – Grupo 3: Esquema do efeito do desnível no comprimento máximo da linha e alteração de pressão (imagem presente no *software*), “Z” corresponde a “So”.

Cálculo de Hf na linha de emissores

Escolha uma fórmula:

Flamant

Equação Universal

Hazen-Williams

Flamant - Informar valor da constante "b"

Plástico | b=0,000135

Informado

Equação Universal - Informar valor da constante "ε" e temperatura da água

Plástico, PVC e vidro (Materiais extra lisos) | ε=0,0001 mm

Informado

Informe a temperatura da água °C

OK Cancelar

Figura 24 – Grupo 3: "Cálculo de Hf na linha de emissores" - escolha da equação para o cálculo, Hazen-Williams não é mostrado por não necessitar de variáveis extras

Como visto na figura anterior existem três equações distintas de calcular a perda de carga:

1 – “Flamant” necessita da constante “b” (Anexo A - Tabela 3) que por padrão assume  $b=0,000135$ . Esta fórmula é o cálculo padrão para o cálculo de perda de carga pelo IRGMO.

2 – Equação Universal, a opção mais indicada devido sua precisão, reúne um conjunto de fórmulas o qual é necessário que o usuário informe ao menos a temperatura da água (°C) que será utilizada na irrigação e também se considerar necessário informar outra constante de rugosidade ( $\epsilon$ ), que por padrão é 0,0001 mm, para mais valores de “ $\epsilon$ ” consultar Anexo A - Tabela 1.

3 – Hazen-Williams, embora presente, esta fórmula deve ter seu uso evitado, uma vez que ela é direcionada a diâmetros maiores que 50 mm, caso seja feita a opção por esta equação utilizar  $c = 130$  para polietileno de modo a compensar o cálculo desta perda de carga.

#### 4.2.4 Grupo 4 – Curva de infiltração do solo e propriedades travadas

Antes de comentar sobre o Grupo 4, deve-se salientar sobre a capacidade de infiltração do solo e lâmina de irrigação que está sendo aplicada pelo sistema de irrigação. Observando a Figura 25 nota-se que quando o pivô opera a 100% (percentímetro na posição de 100%) ele utiliza um menor tempo de aplicação, para o caso da Figura 25, em 100% a aplicação fica abaixo da curva de infiltração do solo, o que significa que não haverá problemas de escoamento superficial por exemplo. Enquanto que se estivesse operando a 33% (tempo de operação maior), a mesma intensidade de aplicação seria aplicada, porém, por um tempo maior e dessa forma poderia haver o escoamento superficial. Nota-se que ao trabalhar com percentímetro a 66% seria possível irrigação, mas estar-se-ia operando em margens críticas para problemas com escoamento superficial. De tal forma a posição crítica do percentímetro estará limitada a capacidade de infiltração máxima do solo com relação a intensidade que está sendo aplicada.

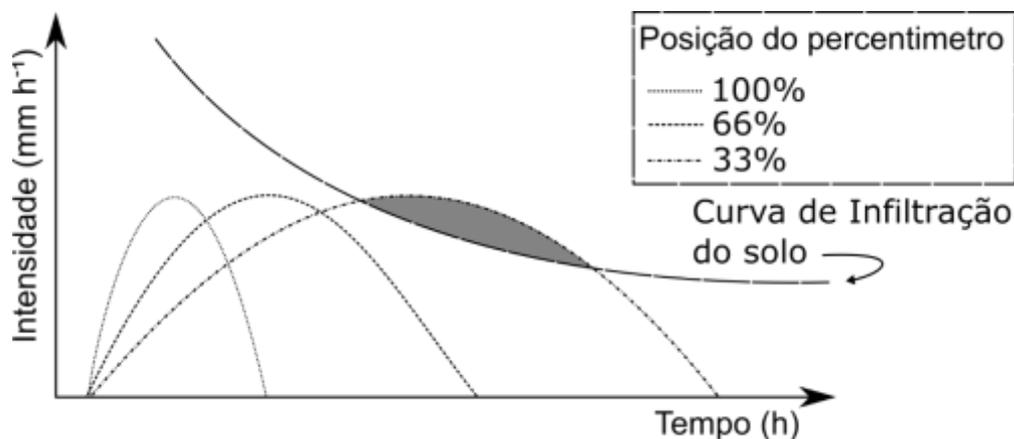


Figura 25 – Representação do efeito entre “Intensidade de aplicação x tempo”, em relação infiltração do solo e posição do percentímetro (velocidade da última torre do pivô). Inferior a curva de infiltração não há escoamento superficial, enquanto que acima da curva há possibilidade destes problemas ocorrerem (área cinza)

Outro ponto de interesse ao comentar sobre as relações acima descritas é que as intensidades de aplicação (média e máxima) estão diretamente relacionadas com o tempo de operação diário (TOD), quanto maior ele for, menores serão as intensidades, da mesma forma que um TOD menor irá apresentar maiores taxas de aplicação.

Das variáveis do grupo 4, as informações da curva de infiltração do solo (Figura 26) servem para verificar se a infiltração máxima do solo é compatível com a

taxa da aplicação na extremidade do equipamento. A velocidade máxima do pivô é dependente da velocidade máxima da última torre, por outro lado a velocidade crítica refere-se à velocidade mínima em que não haverá problemas com infiltração, ou seja, verifica se a intensidade de aplicação pode ser superior a infiltração do solo e informa a posição do percentímetro no pivô (grupo 6).

As propriedades travadas, são dados relativos às características do equipamento já presente no sistema pivô central e que não poderiam ser substituídos, o principal seria a motobomba (ou parte do conjunto motobomba), neste caso quando umas destas ou ambas propriedades forem selecionadas o *software* irá verificar se o dado calculado é superior ao limite fornecido pelo usuário, em caso afirmativo apresentará uma mensagem informando o quão superior é o dado calculado (ver Figura 26 para exemplo) e indicando o que pode ser feito.

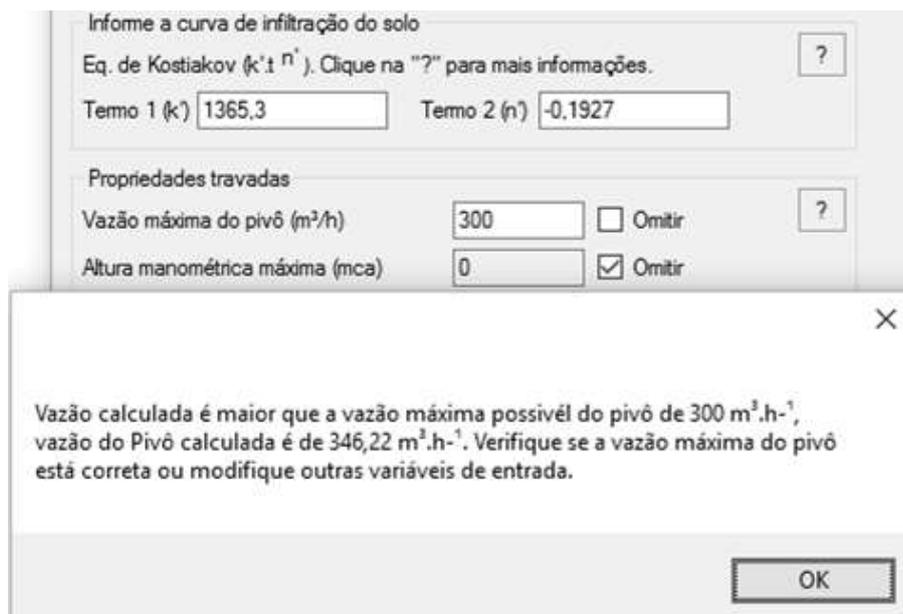


Figura 26 – Grupo 4: Infiltração do solo e Propriedades travadas, apresentando mensagem para uma das “Propriedades travadas”

A “vazão máxima do pivô” está limitada a três variáveis; área total irrigada (ARR), a eficiência do sistema (EAS) e tempo de operação diário (TOD), onde a primeira variável é pouco provável que se possa altera-la, uma vez que ela possui característica física, já as duas últimas podem ser alteradas de acordo com o funcionamento do sistema (TOD) e qualidade do equipamento e/ou condições de operação (EAS), sendo que a EAS quanto melhor menor será a vazão, enquanto que um TOD menor irá requerer maior vazão para suprir a necessidade irrigação projetada.

Em relação a limitação da “*Altura manométrica máxima*”, basicamente todas as variáveis de entrada podem exercer alguma função sobre a mesma, de forma que mínimas modificações em alguns dados, podem alterar este parâmetro de modo significativo.

#### 4.2.5 Grupo 5 – Componentes para Hm total

No grupo 5 os dados de Hm total (Figura 27) são utilizados para obter-se os dados de perda de carga ( $H_f$ ) de quatro pontos distintos no pivô, ambos os valores são mostrados após o preenchimento de todos os campos e com um clique sobre o botão “*Mostrar dados de Hm*”:

1 –  $H_f$  do pivô ( $H_{fp}$ ), a este emprega-se o C do material (Coeficiente de Hazen-Williams), o diâmetro da tabulação e um fator de múltiplas saídas do pivô ( $FN_p$ ). É exibida uma mensagem ao lado das três primeiras caixas, informando o valor calculado.

2 –  $H_f$  da adutora ( $H_{fa}$ ), a este emprega-se o C do material (Coeficiente de Hazen-Williams), o diâmetro da tabulação e sua extensão.

3 –  $H_f$  localizado ( $H_{f_{loc}}$ , item 3.2.20), este refere-se a 5% do somatório de  $H_{fe} + H_{fp} + H_{fa} + PS_E + DZ_{mp} + H_{Rg} + DZ_{cp}$ . O  $H_{f_{loc}}$  equivale a perda de carga gerada em tubos e/ou acessórios que fazem parte da constituição do pivô, utiliza-se  $H_{f_{loc}}$  devido ser difícil de quantificar o valor exato de  $H_f$  de cada parte constituinte do sistema, basicamente serve como um fator de segurança para o dimensionamento.

4 – Hm total ou altura monométrica total, é a soma dos três últimos pontos mais o  $H_{fe}$ , este dado se utiliza no intuito de saber se a bomba possui vazão e Hm compatível com a necessidade do sistema IRGMO.

Componentes para Hm total

C do material

Diâmetro da tubulação (m)

FN pivô

Pressão de serviço do emissor da última linha (mca)

Diferença de nível máximo do centro até a última saída (m)

Altura do pivô (m)

Hf no regulador de pressão (mca)

Desnível da captação até a base do pivô (m)

Comprimento da adutora (m)

C do material da adutora

Diâmetro da tubulação da adutora (m)

Hf na linha de emissores Hf localizada

Hf da adutora **Hm Total**

Figura 27 – Grupo 5: Componentes para Hm total

#### 4.2.6 Grupo 6 – Resultados preliminares

O grupo 6 (Figura 28) apresenta um resumo prévio do dimensionamento do sistema, informando dimensão, número de linhas, Lâmina a ser aplicada (ETcA), a área que será irrigada, a velocidade do pivô com o rele a 100% (VPR), a vazão teórica, intensidades média e máxima de aplicação, o diâmetro de cobertura do emissor ( $W_e$ ), velocidade crítica e a posição do percentímetro com relação a VPR.

Distância do centro do pivô até o último ponto = 600 m

Número de linhas = 600 linhas

PAS = Não utilizado

PAM = Não utilizado

Fator de correção KL Keller e Bliesner = Não utilizado

Lâmina a ser aplicada = 6 mm dia<sup>-1</sup>

Área irrigada = 113,1 hectares

Velocidade do pivô com o rele a 100% = 172,79 m h<sup>-1</sup>

Vazão do Pivô = 346,22 m<sup>3</sup>h<sup>-1</sup>

Intensidade Média de Aplicação = 20 mm h<sup>-1</sup>

Intensidade Máxima de Aplicação = 21 mm h<sup>-1</sup>

Diâmetro de cobertura do emissor = 0,95 m

Velocidade Crítica = O pivô pode operar em qualquer velocidade

Figura 28 – Grupo 6: Dados preliminares

Para iniciar os cálculos, basta que o usuário efetue clique sobre o botão “Aceitar e Calcular Pivô”, em seguida IRGMO executará as rotinas de verificação, os dados estando corretos irá verificar quais e como os cálculos serão executados, e logo em seguida começará a realizar os cálculos.

Os resultados do dimensionamento são mostrados em uma nova janela (Figura 29), a qual possui um breve resumo dos cálculos executados e exibe os resultados em forma de tabela. Devido a criação da tabela ser através de um número de cálculos limitados pelas escolhas do usuário o computador pode levar um certo tempo para realizar todos os cálculos, que no geral o IRGMO leva entre 10 segundos a 15 minutos para realizar um único dimensionamento, isto de acordo com a capacidade de processamento do computador.

O pivô possui 600 linhas, com 1 saídas em cada linha, espaçadas a 1 m. Sua vazão teórica total é de 346,79 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> utilizando o emissor de 4 L h<sup>-1</sup>, a vazão real total aplicada será 348 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> (um aumento de 1,2 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>). este aumento deve-se ao fato do aplicativo calcular a vazão de cada ponto de forma a sempre suprir a necessidade de irrigação para cada ponto do pivô, a qual é de 6,00 mm/dia. Também será necessário a aquisição de 17339,8 m de mangueira de gotejadores, devido o espaçamento entre emissores ser de 0,2 m, este valor representa 1,5% em

Nº	Q Teórico (L/h)	NE Teórico	NE Real	Comprimento	Q Real (L/h)	Calculado
1	1,92	0,48	1	0	4	1 linha de 0,0 m
2	3,85	0,96	1	0,2	4	1 linha de 0,2 m
3	5,77	1,44	2	0,2	8	1 linha de 0,2 m
4	7,69	1,92	2	0,4	8	1 linha de 0,4 m
5	9,62	2,4	3	0,4	12	1 linha de 0,4 m
595	1144,44	286,11	287	57,2	1148	2 linhas de 28,6 m
596	1146,36	286,59	287	57,4	1148	2 linhas de 28,7 m
597	1148,28	287,07	288	57,4	1152	2 linhas de 28,7 m
598	1150,21	287,55	288	57,6	1152	2 linhas de 28,8 m
599	1152,13	288,03	289	57,6	1156	2 linhas de 28,8 m
600	1154,05	288,51	289	57,8	1156	2 linhas de 28,9 m
*						

Figura 29 – Janela de resultados

A Tabela de resultados pode apresentar 6 ou 7 colunas, 6 quando o Cmax não for alcançado, 7 quando CL for maior que Cmax. A coluna “Nº” refere-se ao NL em relação ao DSM informado, a coluna “Q Teórico (L/h)” refere-se ao Qteo da linha, já a coluna “NE Real” é o inteiro superior da coluna “NE Teórico” e refere-se ao número de emissores total enquanto a coluna “Comprimento” estabelece a relação entre o espaçamento de emissores e CT<sub>n</sub>, a coluna “Q Real (L/h)” é o resultado da multiplicação dos valores das duas colunas a sua esquerda. A 7ª coluna (“Calculado”) quando presente, é divisão das linhas em uma ou mais na linha em que CL > Cmax, como observado no canto inferior direito da Figura 29.

O trecho abaixo refere-se ao resumo de saída do pivô calculado na Figura 29, lê-se que no resumo há “600 linhas”, correspondentes à quantidade total de pontos e não a quantidade que será instalada, que para este caso seria 824 (Cmax foi utilizado), ao final da tabela última coluna observa-se que as linhas estão divididas por 2.

O trecho a seguir é o resumo de um dimensionamento:

O pivô possui 600 linhas, com 1 saídas em cada linha, espaçadas a 1 m. Sua vazão teórica total é de  $346,79 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  utilizando o emissor de  $4 \text{ L h}^{-1}$ , a vazão real total aplicada será  $348 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  (um aumento de  $1,2 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ ), este aumento deve-se ao fato do IRGMO calcular a vazão de cada ponto de forma a sempre suprir a necessidade de irrigação para cada ponto do pivô, a qual é de  $6,00 \text{ mm dia}^{-1}$ . Também será necessário a aquisição de 17.339,8 m de mangueira de gotejadores, devido ao espaçamento entre emissores ser de 0,2 m, este valor representa 1,5% em metros lineares para um sistema de gotejamento estacionário convencional de mesma área.

Como visto na imagem anterior a janela de resultados possui uma barra de menus com quatro itens, descritos a seguir:

1. “*Arquivo*” – possibilita voltar a tela de entrada de dados ou sair do *software*;
2. “*Exportar e Salvar*” – possibilita enviar os dados gerados diretamente para o Microsoft Excel e/ou salvar os dados como um arquivo de texto separado por ponto e vírgula (“;”);
3. “*Fazer Análise | Exportar*” – permite realizar a análise econômica (desabilitado) e/ou salvar os dados necessários para a análise.
4. “*Mostrar Esquema*” – abre a janela “*Esquema*” (Figura 30) a qual exibe um conjunto básico de informações sobre o dimensionamento do sistema.





Figura 32 – Tela "Sobre", exibe informações adicionais sobre o processo de criação do *software*.

Duas funcionalidades extras do *software* são a capacidade de abrir e salvar arquivos de entrada de dados, estes arquivos são denominados pelo sistema operacional como “Arquivo de definição IRGMO” recebendo a extensão \*.igm. Estes recursos possibilitam ao usuário a continuação de dimensionamentos anteriores, tal como a verificação de dados e/ou a criação de um novo arquivo. O usuário pode a qualquer momento salvar seus dados clicando no menu “Arquivo > Salvar”, como mostra a Figura 33. Dá mesma forma que na tela inicial o usuário pode, também, abrir um arquivo salvo anteriormente e continuar o seu trabalho.

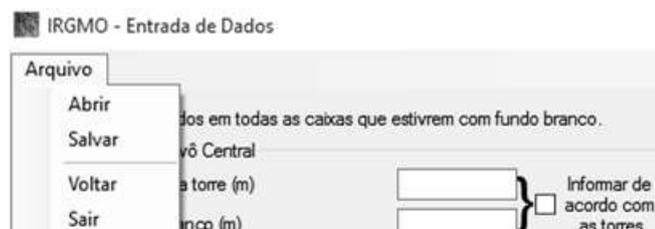


Figura 33 – Recursos extras, menu "Arquivo" e opções disponíveis (abrir, salvar, voltar e sair)

### 4.3 Simulações

Os principais parâmetros buscados pelo *software* são: vazão real total ( $QR_t$ ), comprimento total necessário de tubo gotejadores ( $CT_n$ ) e altura monométrica total ( $H_{mt}$ ). Esses parâmetros podem ser considerados como “críticos”, uma vez que eles estão diretamente ligados ao custo de implantação e funcionamento do sistema. O parâmetro  $CT_n$  em relação ao custo de aquisição de tubo gotejadores e a  $H_{mt}$  da necessidade elétrica, tal como do sistema de bombeamento necessário, quão maior for  $H_{mt}$  maior será o custo de bombeamento.

Foram feitos dois tipos de simulações, a primeira com pivôs operando de forma idêntica, mudando apenas o perfil topográfico (desnível), a segunda simulação foi semelhante a primeira, porém ao invés do perfil topográfico, nesta optou-se por usar um pivô com número de linhas diferentes, mas de mesmas características operacionais.

#### 4.3.1 Simulação 1

Para esta simulação  $H_{mt}$  é o parâmetro estudado de acordo com sua relação com  $DZ_{mp}$  (tem efeito sobre  $H_{floc}$  e  $H_{mt}$ ) e  $S_o$  (tem efeito sobre  $H_{fe}$ ), que são os parâmetros variáveis para as definições utilizadas em três pivôs (A, B e C).

As definições dos pivôs podem ser visualizadas nas Tabelas 6 e 7 enquanto que os resultados podem ser observados na Tabela 8 e 9.

Destaca-se que foi utilizada a equação de Flamant para o cálculo da perda de carga na linha de emissores e que o  $C_{max}$  foi também utilizado. Embora o valor do  $DZ_{mp}$  (caso 1) tenha sido 32 m, perfis A e C, isto não quer dizer que este parâmetro equivalha aos 6% do desnível informado ( $S_o = 6\% \times 600 \text{ m} = 32 \text{ m}$ ), isto ocorrerá apenas quando o desnível do terreno for uniforme, terrenos que ondulados podem apresentar um  $DZ_{mp}$  menor, igual ou maior do que o valor obtido a partir de  $S_o$ . Para demonstrar o efeito do  $DZ_{mp}$  a Tabela 9 apresenta os resultados de  $H_{fe}$ ,  $H_{floc}$  e  $H_m$  obtidos usando três valores para  $S_o$  e  $DZ_{mp}$ , ambos diferentes, ( $DZ_{mp}$  caso 1) e três valores para  $S_o$  diferentes, sendo  $DZ_{mp}$  um único valor ( $DZ_{mp}$  caso 2).

Tabela 6 – Definições para a simulação 1

Parâmetro	Valor
DUT, m	550
CB, m	50
DSM e LFM, m	1
TOD e TVC, h	20
EAS, %	98
EVP (mm d <sup>-1</sup> ), FK omitido	6
T1 e T2 *	1365,3 e -0,1927
Propriedades travadas	Não usadas
C do material, pivô, adutora	130 e 150
Diâmetro da tubulação, pivô, adutora, m	0,16827 e 0,25
FN <sub>p</sub>	0,548
PS <sub>E</sub> , mca	12
Altura do pivô, m	3
Hf <sub>Rg</sub> , mca	0,7
C <sub>ad</sub> , m	800
DZ <sub>cp</sub> , m	10
DZ <sub>mp</sub> caso 1, m **	32 (A), 0 (B) e -32(C)
DZ <sub>mp</sub> caso 2, m ***	0 (A), 0 (B) e 0 (C)

\* Com base no Neossolo 1 P1 descrito por Stürmer et al. (2009).

\*\* "-32" indica que há um desnível (declive) de 32 m.

\*\*\* Três simulações utilizando uma situação de nível.

Tabela 7 – Características do emissor utilizadas na simulação 1. Destaque em S<sub>o</sub>: A – perfil em aclave (S<sub>o</sub> = 6); B – perfil em nível (S<sub>o</sub> = 0); e C – perfil em declive (S<sub>o</sub> = -6)

Parâmetro	Pivô A	Pivô B	Pivô C
P, mca	12	12	12
E <sub>emi</sub> , m	0,2	0,2	0,2
D <sub>me</sub> , mm	16	16	16
Q <sub>emi</sub> , L h <sup>-1</sup>	4	4	4
X	0,54	0,54	0,54
L <sub>eq</sub> , m	0,15	0,15	0,15
<b>S<sub>o</sub>, %</b>	<b>6</b>	<b>0</b>	<b>-6</b>
Q <sub>var</sub> , %	10	10	10
C <sub>me</sub>	110	110	110
H <sub>var</sub> , % *	17,73	17,73	8,68
C <sub>max</sub> , m *	24	36	39

\* Valores calculados.

Tabela 8 – Simulação 1. Parâmetros compartilhados entre os três perfis

Parâmetro	Resultado
DUT, m e NL, adimensional	600
PAS, PAM e KL	Não usados
Lâmina aplicada, mm d <sup>-1</sup>	6
ARR, ha	113,1
QR <sub>t</sub> , m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup>	346,22
l <sub>med</sub> , mm h <sup>-1</sup>	20
l <sub>max</sub> , mm h <sup>-1</sup>	21
We, m	0,20
VPR, m h <sup>-1</sup>	172,79
VC, m h <sup>-1</sup>	Qualquer velocidade *
H <sub>fa</sub> , mca	8,89
H <sub>fp</sub> , mca	32,75
QR <sub>t</sub> , m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup>	348
CT <sub>n</sub> , m	17.339,8
Metros lineares equivalentes para ARR, %	1,5

\* Neste caso o pivô pode operar em qualquer velocidade.

Uma vez que CT<sub>n</sub> e QR<sub>t</sub> são dependentes da vazão e espaçamento dos emissores, estes parâmetros foram os mesmos em ambos os pivôs. C<sub>max</sub> e H<sub>fe</sub> não possuem relação com DZ<sub>mp</sub>, por isso não apresentariam diferenças. No entanto percebe-se que o aclave de 6% nas linhas de derivação no pivô A exercem maior variação de pressão na linha gotejadora de maneira a tal a resultar um comprimento máximo calculado de apenas 24 m, enquanto que em B e C, poder-se-ia usar 36 e 39 m respectivamente. Para os casos dos pivôs A e C, existem duas explicações:

1. No pivô A o início da linha está em cota inferior ao final da linha de gotejamento, com isto o equipamento necessita de mais pressão para enviar à água até o último emissor, resultando também no aumento da variação de pressão.
2. No pivô C o início da linha situa-se em cota acima do final da linha do último emissor, neste caso há menor variação de pressão, o que reduz a perda de carga e favorece um maior comprimento da linha de gotejamento.

Antes de comentar os dados da Tabela 9 deve-se saber que o caso 1, refere-se a uma topografia onde há uma inclinação uniforme, que para os Pivôs A e C a última linha estará localizada em cota abaixo ou acima da base do pivô, enquanto que no caso 2 existe a presença de ondulação no terreno, que em algum ponto pode causar algum impacto no C<sub>max</sub> (S<sub>o</sub> ≠ DZ<sub>mp</sub>), mas que o início e final da última linha encontram-se na mesma cota. No pivô B considera-se topografia plana, ou seja, S<sub>o</sub> e DZ<sub>mp</sub> são iguais a zero.

Tabela 9 – Simulação 1. Parâmetros não compartilhados entre os três perfis

Parâmetro	Pivô A	Pivô B	Pivô C
DZ <sub>mp</sub> caso 1, m	32	0	-32
C <sub>max</sub> , m	24	36	39
H <sub>fe</sub> , mca	1,11	3,39	4,22
H <sub>filoc</sub> , mca	5,02	3,54	1,98
H <sub>mt</sub> , m	105,47	74,27	41,54
DZ <sub>mp</sub> caso 2, m	0	0	0
C <sub>max</sub> , m	R	R	R
H <sub>fe</sub> , mca	R	R	R
H <sub>filoc</sub> , mca	3,42	R	3,58
H <sub>mt</sub> , m	71,87	R	75,15

R, valor se repete em ambos os casos de DZ<sub>mp</sub>.

Para ambos os pivôs o valor H<sub>mt</sub> com DZ<sub>mp</sub> do caso 1 foi: 105,47 (A), 74,27 (B) e 51,54 mca (C), enquanto com DZ<sub>mp</sub> do caso 2 estes valores são: 71,87 (A), 74,27 (B) e 75,15 mca (C). No caso 1 isso demonstra o quão forte é a influência de DZ<sub>mp</sub> na altura monométrica total. Porém quando o DZ<sub>mp</sub> está em nível (caso 2), a diferença entre ambos perfis é mínima, mesmo com S<sub>o</sub> de ± 6%, ou seja, o S<sub>o</sub> apresenta menor influência que o DZ<sub>mp</sub>.

Ao fim valores menores da H<sub>mt</sub> serão, normalmente, observados em topografia plana e/ou condições de declive (DZ<sub>mp</sub> ≤ 0), enquanto que condições de aclave poderão apresentar um aumento no H<sub>mt</sub> (DZ<sub>mp</sub> > 0), verifica-se que H<sub>mt</sub> e DZ<sub>mp</sub> possuem uma relação estreita. A influência do S<sub>o</sub> sobre H<sub>mt</sub> é mínima, isto ocorre devido S<sub>o</sub> apresentar uma relação estreita com H<sub>fe</sub>, o qual faz parte da composição da H<sub>mt</sub>.

#### 4.3.2 Simulação 2

Nesta seção será observado o efeito da área total irrigada (ARR), sobre H<sub>mt</sub>, CT<sub>n</sub> e QR<sub>t</sub>.

A simulação utiliza o recurso “*informar de acordo com as torres*” (Figura 18), para tal utilizou-se 2 pivôs que receberão os nomes: D e E. Os parâmetros que diferem entre pivôs são distância entre o centro do pivô e o primeiro emissor (E0) e espaço entre torres (ET). As condições aplicadas a cada pivô são descritas a seguir:

1. Pivô D – área completa, (Eq. 4.2);
2. Pivô E – E0 = 5 m e ET = 1 m, (Eq. 4.5).

Os dados de definição dos pivôs são encontrados na Tabela 10 e os parâmetros utilizados para o emissor são os mesmos do Pivô B (). Foi utilizado o  $C_{max}$  e o  $H_{fe}$  foi calculado usando Flamant.

Tabela 10 – Definições para a simulação 1

Parâmetro	Valor
DUT, m *	570
CB, m *	30
DSM e LFM, m	1
TOD e TVC, h	20
EAS, %	98
EVP, mm d <sup>-1</sup> , FK omitido	6
T1 e T2 **	1365,3 e -0,1927
Propriedades travadas	Não usadas
C do material, pivô, adutora	130 e 150
Diâmetro da tubulação, pivô, adutora, m	0,16827 e 0,25
FN <sub>p</sub>	0,548
PS <sub>E</sub> , mca	12
Altura do pivô, m	3
H <sub>Rg</sub> , mca	0,7
C <sub>ad</sub> , m	800
DZ <sub>cp</sub> , m	10
DZ <sub>mp</sub> , m	0

\* Pivô com 15 vãos de 38 m + balanço de 30 m.

\*\* Com base no Neossolo 1 P1 descrito por Stürmer et al., (2009).

Tabela 11 – Parâmetros compartilhados entre os pivôs

Parâmetro	Valor
PAS, PAM e KL	-
Lâmina aplicada, mm d <sup>-1</sup>	6
l <sub>med</sub> , mm h <sup>-1</sup>	20
l <sub>max</sub> , mm h <sup>-1</sup>	21
QP, m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup>	346,22
We, m	0,79
VPR, m h <sup>-1</sup>	172,79
VC, m h <sup>-1</sup>	Qualquer velocidade
H <sub>fe</sub> , mca	3,39
Metros lineares equivalentes para ARR, %	1,5

Com o espaçamento de 1 m e para a mesma área de 113 ha, seria necessário um sistema de gotejamento estacionário um total de 1.131 km de tubos, enquanto que o sistema IRGMO apresentou a necessidade de apenas 17,34 km de tubos (Pivô D), uma equivalência de 1,5%, valor este que corrobora com Hezarjaribi e Sourell (2011) os quais falam que os sistemas de irrigação por gotejamento móvel necessitam menos que 2% de tubos para uma área convencional.

Tabela 12 – Parâmetros não compartilhados entre os pivôs \*

<b>Parâmetro</b>	<b>Pivô D</b>	<b>Pivô E</b>
NL, adimensional	600	580
ARR, ha	113,1	110,22
H <sub>fa</sub> , mca	8,89	8,13
H <sub>fp</sub> , mca	32,95	29,95
H <sub>filoc</sub> , mca	3,55	3,36
H <sub>mt</sub> , m	74,53	70,53
QA <sub>t</sub> , m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup>	346,79	337,97
QR <sub>t</sub> , m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup>	348	339,14
CT <sub>n</sub> , m	17.339,8	16.899

\* O anexo A contém o resumo e tabela com parte da simulação para o pivô E.

Uma vez utilizados os parâmetros E0 e ET irão reduzir a QR<sub>t</sub>, devido o número de linhas ser menor, com isto quanto menor a vazão menos impacto será percebido em H<sub>fa</sub>, H<sub>fp</sub>, H<sub>filoc</sub> e H<sub>mt</sub>, ainda que o pivô tenha as mesmas dimensões gerais, como foi observado na Tabela 12. Nota-se que a simples retirada de 1 linha a cada vão e mais cinco centrais (considerando: E0 = 5, DSM = 1 e ET = 1), fazendo um contraste entre o pivô E e o pivô D, causou a redução de 8,86 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> na QR<sub>t</sub>, onde CT<sub>n</sub> que está atrelado a vazão reduziu em 440,8 m a quantidade necessária de tubos gotejadores, o parâmetro H<sub>mt</sub> apresentou uma redução de 4 mca.



## 5 CONCLUSÕES

Com base na metodologia e no *software* desenvolvidos e apresentados neste trabalho para o dimensionamento da irrigação por gotejamento móvel, obteve-se as seguintes conclusões:

a) A metodologia apresentada foi capaz de equacionar o dimensionamento de um sistema de irrigação por gotejamento móvel através do *software* desenvolvido (IRGMO) e o mesmo apresentou-se capaz de realizar os cálculos rapidamente e com baixo consumo de memória

b) O uso da irrigação por gotejamento móvel utiliza no máximo 2% de metros lineares requeridos para uma área de gotejamento convencional;

c) As simulações demonstraram certas condições de topografia podem resultar em variação considerável da altura monométrica total, da vazão do sistema e do comprimento total de tubo gotejadores;

d) O uso de emissores autocompensados é desaconselhável na irrigação por gotejamento móvel em função de trabalharem com pressão no início da linha de até 40 mca, bem acima da pressão de 7 mca tradicionalmente utilizada por emissores de pivô tipo spray fixo.



## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Recomenda-se que a metodologia seja testada a nível de campo, de tal modo a confirmar a viabilidade técnica do sistema dimensionado.

O *software* desenvolvido assim como qualquer outra ferramenta que possa dar suporte em alguma atividade pode e deve receber novos recursos. De tal forma espera-se que versões futuras do IRGMO, umas ou mais das características a seguir possam estar presentes:

a) Desenvolvimento do Módulo 2: análise econômica;

b) Adição de novos parâmetros que por ventura possam ser utilizados em dimensionamentos, como o diâmetro da tabulação de cada torre do pivô, tal como o coeficiente da “C” da equação de Hazen-Williams.

c) Opção de usar mais de um tipo de emissor no mesmo dimensionamento;



## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Disponibilidade e demandas de recursos hídricos no Brasil**. Brasília, 2007. 126 p.

\_\_\_\_\_. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil**: 2013. Brasília, 2013. 432 p.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS; EMBRAPA, CENTRO NACIONAL DE PESQUISA DE MILHO E SORGO. **Pivôs centrais de irrigação**. Disponível em: <<http://metadados.ana.gov.br/geonetwork/>>. Acesso em: 22 mar. 2016.

ANWAR, A.A. Friction correction factors for center-pivots. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 125, n. 5, p. 280–286, Oct. 1999.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. Irrigação por aspersão. In: \_\_\_\_\_. **Manual de irrigação**. 8. ed. Viçosa: Ed. UFV, 2006a. cap. 8, p. 361–482.

\_\_\_\_\_. Irrigação localizada (gotejamento e microaspersão). In: \_\_\_\_\_. **Manual de irrigação**. Viçosa: Ed. UFV, 2006b. cap. 9, p. 483–548.

\_\_\_\_\_. Condução da água para irrigação. In: \_\_\_\_\_. **Manual de irrigação**. Viçosa: Ed. UFV, 2006c. cap. 5, p. 145–239.

CRAIG, J. **PMDI: Precision Mobile Drip Irrigation**. Disponível em: <<http://www.depts.ttu.edu/tawc/documents/2015FD/PMDI.pdf>>. Acesso em: 21 abr. 2016.

CUNHA, F.N.; OLIVEIRA, R.C. de; SILVA, N.F. da; MOURA, L.M.F.; TEIXEIRA, M.B.; GOMES FILHO, R.R. Variabilidade temporal da uniformidade de distribuição em sistema de gotejamento. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 7, n. 4, p. 248–257, ago. 2013.

DERBALA, A.A.A. **Development and evaluation of mobile drip irrigation with centre pivot irrigation machines**. Brunsvique; Braunschweig: Bundesforschungsanst für Landwirtschaft, 2003. 161 p.

EMBRAPA. **Mapeamento da agricultura irrigada do Brasil por pivôs centrais**. 2013. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/agua-na-agricultura/mapas-sobre-irrigacao>>. Acesso em: 22 mar. 2016.

ESTEVES, B.S.; SILVA, D.G. da; PAES, H.M.F.; SOUSA, E.F. **Irrigação por gotejamento**. Niterói: Programa Rio Rural, 2012. 18 p. (Manual Técnico, 32).

FAO. **Climate change, water and food security**. Rome, 2011. 200 p. (FAO. Water Report, 36).

\_\_\_\_\_. **AQUASTAT website - Brazil (revision date 09/2015)**. Disponível em: <[http://www.fao.org/nr/water/aquastat/countries\\_regions/BRA/index.stm](http://www.fao.org/nr/water/aquastat/countries_regions/BRA/index.stm)>. Acesso em: 04 fev. 2016.

\_\_\_\_\_. **AQUASTAT website - Global Map of Irrigation Areas (GMIA):** interactive map. Disponível em: <<http://www.fao.org/nr/water/aquastat/quickWMS/irrimap.htm>>. Acesso em: 25 mar. 2016.

FARIA, L.A. **Proposta de norma técnica de ensaio para tubogotejadores de irrigação:** resistência ao entupimento por particulados sólidos em suspensão. 2013. 129 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.

FRENKEN, K.; GILLET, V. **Irrigation water requirement and water withdrawal by country.** Rome: FAO, 2012. 262 p. (FAO AQUASTAT Reports). Disponível em: <<http://www.fao.org/3/a-bc824e.pdf>>. Acesso em: 13 fev. 2016.

FRIZZONE, J.A.; FREITAS, P.S.L. de; REZENDE, R.; FARIA, M.A. **Microirrigação:** gotejamento e microaspersão. Maringá: Eduem, 2012a. 356 p.

\_\_\_\_\_. Dimensionamento hidráulico de sistemas de microirrigação. In: \_\_\_\_\_. **Microirrigação:** gotejamento e microaspersão. Maringá: Eduem, 2012b. cap. 7, p. 279-332.

FUNDAÇÃO DE ESTUDOS AGRÁRIOS LUIZ DE QUEIROZ. **Análise territorial para o desenvolvimento da agricultura irrigada no Brasil.** Piracicaba:, 2014. 215 p. (Projeto de Cooperação Técnica IICA/BRA/08/002). Disponível em: <<http://www.iicabr.iica.org.br/wp-content/uploads/2016/02/FEALQ-An%C3%A1lise-Territorial-Agricultura-Irigada.pdf>>. Acesso em: 15 fev. 2016.

GILLEY, J.R. Discussion of "friction correction factor for center-pivot irrigation systems". **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 115, n. 4, p. 769–770, ago. 1989.

GUIMARÃES, D.P.; LANDAU, E.C. Monitoramento da agricultura irrigada em tempo real. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 17., João Pessoa, 2015. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2015. p. 3519-3525.

HEZARJARIBI, A.; SOURELL, H. Development and evaluation of mobile drip irrigation In: INTERNATIONAL CONGRESS ON IRRIGATION AND DRAINAGE, 21.; INTERNATIONAL MICRO-IRRIGATION CONGRESS, 8., 2011, Tehran. **Proceedings...** Disponível em: <[http://irncid.org/GetFileArticles.aspx?FilePrm=6726\\_25386.pdf](http://irncid.org/GetFileArticles.aspx?FilePrm=6726_25386.pdf)>. Acesso em: 28 mar. 2016.

KISEKKA, I.; NGUYEN, G.; AGUILAR, J.P.; HOGERS, D.H. **Comparing mobile drip irrigation to low elevation spray application.** Disponível em: <[http://www.kwo.org/Projects/Governors Conference 2015/PowerPoints/Comparing\\_MDI\\_and\\_LESA\\_Governors\\_water\\_conference\\_revised-12-13-2015.pdf](http://www.kwo.org/Projects/Governors%20Conference%202015/PowerPoints/Comparing_MDI_and_LESA_Governors_water_conference_revised-12-13-2015.pdf)>. Acesso em: 21 abr. 2016.

LANDAU, E.C.; MOURA, L.; GUIMARÃES, D.P.; HIRSCH, A.; PIMENTA, F.M. **Concentração geográfica de pivôs centrais no Brasil.** Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2013. 37 p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 69).

LAPERUTA NETO, J.; CRUZ, R.L.; LAPERUTA FILHO, J.; PLETSCHE, T.A. Perda de carga em mangueiras gotejadoras novas e usadas. **Irriga**, Botucatu, v. 16, n. 3, p. 329, dez. 2011.

LIMA, R.M.F.; LUZ, J.A.M. da. Análise granulométrica por técnicas que se baseiam na sedimentação gravitacional: Lei de Stokes. **Rem: Revista Escola de Minas, Ouro Preto**, v. 54, n. 2, p. 155–159, jun. 2001.

LYLE, W.M.; BORDOVSKY, J.P. Low Energy Precision Application (LEPA) irrigation system. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 24, n. 5, p. 1241-1245, 1981.

\_\_\_\_\_. LEPA: irrigation system evaluation. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 26, n. 3, p. 776-781, 1983.

MANTOVANI, E.C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L.F. **Irrigação: princípios e métodos**. 3. ed. Viçosa: Ed. UFV, 2009. 355 p.

MANTOVANI, E.C.; ZINATO, C.E.; SIMÃO, F.R. Manejo de irrigação e fertirrigação na cultura da goiabeira. In: ROZANE, D.E.; NATALE, F.A.A. (Ed.). **Cultura da goiabeira: tecnologia e mercado**. Visconde do Rio Branco: Suprema Gráfica e Editora, 2003.

MARTIN, D.L.; KINCAID, D.C.; LYLE, W.M. Design and operation of sprinkler systems. In: AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS. **Design and operation of farm irrigation systems**. 2<sup>nd</sup> ed. St. Joseph, 2007. chap. 16, p. 557–631.

MÉLO, R.F. de. **Dinâmica e controle do entupimento de gotejadores em função de precipitados químicos e fitoplâncton**. 2007. 189 p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

OLIVEIRA, A.S. de; PEREIRA, F.A.C.; PAZ, V.P.S.; SANTOS, C.A. Avaliação do desempenho de sistemas pivô central na região Oeste da Bahia. **Irriga**, Botucatu, v. 9, n. 2, p. 126–135, 2004.

ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. **Governança dos recursos hídricos no Brasil**. Paris: OECD Publ., 2015. 306 p.

PAULINO, J.; FOLEGATTI, M.V.; ZOLIN, C.A.; ROMÁN, R.M.S.; JOSÉ, J.V. Situação da agricultura irrigada no Brasil de acordo com o censo agropecuário 2006. **Irriga**, Botucatu, v. 16, n. 2, p. 163, ago. 2011.

PORTO, R.M. **Hidráulica básica**. 4. ed. São Carlos: USP, EESC, 2006. 540 p.

SANDRI, D.; CORTEZ, D.A. Parâmetros de desempenho de dezesseis equipamentos de irrigação por pivô central. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 33, n. 1, p. 271–278, fev. 2009.

SCALOPPI, E.J.; ALLEN, R.G. Hydraulics of center-pivot laterals. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 119, n. 3, p. 554–567, May 1993.

SIEBERT, S.; HENRICH, V.; FRENKEN, K.; BURKE, J. **Update of the digital global map of irrigation areas to version 5**: project report. Boon: Institute of Crop Science and Resource Conservation Rheinische; Friedrich-Wilhelms-Universität, 2013. 167 p. (Documentation).

SILVA, K.B.; BATISTA, R.O.; SILVA, S.K.; DIAS, N.S.; COSTA, M.S. Efeito de distintas pressões de serviço na determinação da vazão em sistemas de irrigação por gotejamento operando com efluente do processamento da castanha de caju. **Agropecuária Científica no Semiárido**, Patos, v. 8, n. 4, p. 89–96, maio 2012.

STÜRMER, S.L.K.; DALMOLIN, R.S.D.; AZEVEDO, A.C. de; PEDRON, F.A.; MENEZES, F.P. Relação da granulometria do solo e morfologia do saprolito com a infiltração de água em Neossolos Regolíticos do rebordo do Planalto do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 7, p. 2057–2064, out. 2009.

SWAMEE, P.K. Design of a submarine oil pipeline. **Journal of Transportation Engineering**, New York, v. 119, n. 1, p. 159–170, Jan. 1993.

VILAS BOAS, R.C.; PEREIRA, G.M.; REIS, R.P.; LIMA JUNIOR, J.A. de; CONSONI, R. Viabilidade econômica do uso do sistema de irrigação por gotejamento na cultura da cebola. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 4, p. 781–788, ago. 2011.

WANG, J.; ZHU, D.; ZHANG, L.; AMES, D.P. Economic analysis approach for identifying optimal microirrigation uniformity. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 141, n. 8, p. 04015002-1-042015002-11, Aug. 2015.

## BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

ALVES, D.R.B.; FRIZZONE, J.A.; DOURADO NETO, D. Repartição da lâmina de irrigação, aplicada via pivô central, na cultura do milho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 5, n. 1, p. 67–70, abr. 2001. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1415-43662001000100012&lng=en&nrm=iso&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662001000100012&lng=en&nrm=iso&tlng=pt)>. Acesso em: 09 mar. 2016.

AZEVEDO NETTO, J.M. de; FERANANDEZ, M.F. y; ARAUJO, R. de; ITO, A.E. **Manual de hidráulica**. 8. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1998. 669 p.

BRASIL. Ministério da Integração Nacional. **A irrigação no Brasil: situação e diretrizes**. Brasília: IICA, 2008. 132 p.

CARVALHO, A.; FONSECA, E.H.; OLIVEIRA, E.D.E. Influência do custo da energia elétrica e do material da tubulação na velocidade econômica de bombeamentos. **Irriga**, Botucatu, v. 20, n. 1, p. 13–20, 2015.

COELHO, R.D.; MIRANDA, J.H. de; DUARTE, S.N. Water infiltration in the soil: part I: cylinder infiltrometer versus sprinkler infiltrometer. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 4, n. 2, p. 137–141, 2000. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1415-43662000000200001&lng=en&nrm=iso&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662000000200001&lng=en&nrm=iso&tlng=pt)>. Acesso em: 16 abr. 2016.

GOMES, A.W.A.; FRIZZONE, J.A.; RETTORE NETO, O.; MIRANDA, J.H. de. Perda de carga localizada em gotejadores integrados em tubos de polietileno. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 30, n. 3, p. 435–446, jun. 2010. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-69162010000300008&lng=en&nrm=iso&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-69162010000300008&lng=en&nrm=iso&tlng=pt)>. Acesso em: 10 mar. 2016.

GOMES, H.P. **Sistemas de irrigação: eficiência energética**. João Pessoa: Ed. UFPB, 2013. 281 p.

HINES, S.; NEIBLING, H. **Center pivot irrigation for corn: water management and system design considerations**. Disponível em: <[http://alfalfa.ucdavis.edu/+symposium/proceedings/2013/13WAS-13\\_Hines\\_CenterPivot.pdf](http://alfalfa.ucdavis.edu/+symposium/proceedings/2013/13WAS-13_Hines_CenterPivot.pdf)>. Acesso em: 08 jul. 2016.

HOWES, D.J.; ELLENSON, S.; HOFFMANN, L.; GAUDI, F. Center pivot sprinkler distribution uniformity impacts on the spatial variability of evapotranspiration. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 141, n. 8, p. 04014085-1-04014085-10, Aug. 2015.

JUANA, L.; RODRIGUEZ-SINOBAS, L.; LOSADA, A. Determining minor head losses in drip irrigation laterals. I: Methodology. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 128, n. 6, p. 376–384, Dec. 2002.

\_\_\_\_\_. Determining minor head losses in drip irrigation laterals. II: Experimental study and validation. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 128, n. 6, p. 385–396, Dec. 2002.

KELLER, J.; BLIENSER, R. D. **Sprinkle and trickle irrigation**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1990. 652 p.

ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. Water resource withdrawals, irrigated area, and irrigation water application rates. In: \_\_\_\_\_. **OECD Compendium of agri-environmental indicators**. Paris: OECD Publ., 2013. p. 105–116.

\_\_\_\_\_. **Climate change, water and agriculture: towards resilient systems**; OECD studies on water. Paris: OECD Publ., 2014. 102 p.

\_\_\_\_\_. The worrisome trends in groundwater irrigation expansion. In: \_\_\_\_\_. **Drying wells, rising stakes: towards sustainable agricultural groundwater use**. Paris: OECD Publ. 2015. p. 11–43.

OECD; FAO. **OECD-FAO agricultural outlook 2015-2024**. Paris: FAO, 2015. 145 p.

SIEBERT, S.; BURKE, J.; FAURES, J. M.; FRENKEN, K.; HOOGEVEEN, J.; DÖLL, P.; PORTMANN, F. T. Groundwater use for irrigation: a global inventory. **Hydrology and Earth System Sciences**, Gottingen, v. 14, n. 10, p. 1863–1880, Oct. 2010.

SILVA, R.M. da. **Coefficiente de descarga em emissores de pivô central**. 2011. 75 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11143/tde-20062011-094721/>>. Acesso em: 07 maio 2016.

SILVA, R. M. da; COELHO, R.D.; FARIA, L.A.; MASCHIO, R. Nozzle discharge coefficient for center-pivot system. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 35, n. 3, p. 419–429, 2015..

SWAMEE, P.K. Sluice-gate discharge equations. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 118, n. 1, p. 56–60, Jan. 1992.

SWAMEE, P.K.; JAIN, A.K. Explicit equations for pipe-flow problems. **Journal of Hydraulics Division**, New York, v. 102, n. HY5, p. 657–664, 1976.

VAN DER KOOIJ, S.; ZWARTEVEEN, M.; BOESVELD, H.; KUPER, M. The efficiency of drip irrigation unpacked. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 123, p. 103–110, May 2013.

YILDIRIM, G. Computer-based analysis of hydraulic design variables for uniformly sloping microirrigation system laterals. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 141, n. 7, p. 04014079-1-04014079-17, July 2015.

## APÊNDICES



## Apêndice A

Os resultados de saída para o Pivô E podem ser vistos no Resumo 1 e Tabela 1:

Resumo 1: *O pivô possui 580 linhas, com 1 saídas em cada linha, espaçadas a 1 m. Sua vazão teórica total é de 337,97 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> utilizando o emissor de 4 L h<sup>-1</sup>, a vazão real total aplicada será 339,14 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> (um aumento de 1,17 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>), este aumento deve-se ao fato do IRGMO calcular a vazão de cada ponto de forma a sempre suprir a necessidade de irrigação para cada ponto do pivô, a qual é de 6,00 mm/dia. Também será necessário a aquisição de 16899 m de mangueira de gotejadores, devido ao espaçamento entre emissores ser de 0,2 m, este valor representa 1,5% em metros lineares para um sistema de gotejamento estacionário convencional de mesma área.*

Tabela 1 – Resultados do Pivô E

Nº	Qteo (L h <sup>-1</sup> )	NE Teórico	NE Real	Comprimento	Q Real (L h <sup>-1</sup> )	Comp. Calculado
5	9,62	2,4	3	0,4	12	1 linha de 0,4 m
6	11,54	2,89	3	0,6	12	1 linha de 0,6 m
7	13,46	3,37	4	0,6	16	1 linha de 0,6 m
8	15,39	3,85	4	0,8	16	1 linha de 0,8 m
9	17,31	4,33	5	0,8	20	1 linha de 0,8 m
10	19,23	4,81	5	1,0	20	1 linha de 1,0 m
11	21,16	5,29	6	1,0	24	1 linha de 1,0 m
12	23,08	5,77	6	1,2	24	1 linha de 1,2 m
-----						
372	715,51	178,88	179	35,8	716	1 linha de 35,8 m
373	717,44	179,36	180	35,8	720	1 linha de 35,8 m
374	719,36	179,84	180	36,0	720	1 linha de 36,0 m
375	721,28	180,32	182	36,0	724	1 linha de 36,0 m
376	723,21	180,80	181	36,2	724	2 linhas de 18,1 m
377	725,13	181,28	182	36,2	728	2 linhas de 18,1 m
378	727,05	181,76	182	36,4	728	2 linhas de 18,2 m
379	728,98	182,24	183	36,4	732	2 linhas de 18,2 m
-----						
593	1140,59	285,15	286	57,0	1144	2 linhas de 28,5 m
594	1142,51	285,63	286	57,2	1144	2 linhas de 28,6 m
595	1144,44	286,11	287	57,2	1148	2 linhas de 28,6 m
596	1146,36	286,59	287	57,4	1148	2 linhas de 28,7 m
597	1148,28	287,07	288	57,4	1152	2 linhas de 28,7 m
598	1150,21	287,55	288	57,6	1152	2 linhas de 28,8 m
599	1152,13	288,03	289	57,6	1156	2 linhas de 28,8 m
600	1154,05	288,51	289	57,8	1156	2 linhas de 28,9 m



**ANEXOS**



## Anexo A

Tabelas extraídas de:

AZEVEDO NETTO, J.M. de; FERANANDEZ, M.F. y; ARAUJO, R. de; ITO, A.E.  
**Manual de hidráulica**. 8. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1998.

Tabela 1 - Rugosidade absoluta dos tubos ( $\epsilon$ ) em mm

<b>Material</b>	<b>Tubos novos</b>	<b>Tubos velhos</b>
Aço galvanizado	0,015 a 0,02	0,46
Aço rebitado	0,1 a 0,3	0,6
Aço revestido	0,04	0,5 a 0,12
Aço soldado	0,004 a 0,006	0,24
Chumbo	Lisos	Lisos
Cimento-amianto	0,0025	-
Cobre ou latão	Lisos	Lisos
Concreto bem-acabado	0,03 a 0,1	-
Concreto ordinário	0,1 a 0,2	-
Ferro forjado	0,004 a 0,006	0,24
Ferro fundido	0,025 a 0,05	0,3 a 0,5
Ferro fundido com revestimento interno asfáltico	0,012	0,21
Manilhas cerâmicas	0,06	0,3
Plástico	0,001	0,001

\* Para tubos lisos, o valor de  $\epsilon$  é 0,001 ou menos.

Tabela 2 - Valor do coeficiente C sugerido para a fórmula de Hazen-Williams

<b>Tubos</b>	<b>Novos</b>	<b>Usados +/- 10 anos</b>	<b>Usados +/- 20 anos</b>
Aço corrugado (chapa ondulada)	60	-	-
Aço galvanizado roscado	125	100	-
Aço rebitado, novos	110	90	80
Aço soldado comum (revestimento betuminoso)	125	110	90
Aço soldado com revestimento epóxico	140	130	115
Chumbo	130	120	120
Cimento-amianto	140	130	120
Cobre	140	135	130
Concreto, bom acabamento	130	-	-
Concreto, acabamento comum	130	120	110
Ferro fundido, revestimento epóxico	140	130	120
Ferro fundido, revestimento de argamassa	130	120	105
Grés cerâmico, vidrado (manilhas)	110	110	110
Latão	130	130	130
Tijolos, condutos bem executados	100	95	90
Plástico (PVC)	140	135	130

Tabela 3 - Valor do coeficiente "b" sugerido para Flamant

<b>Material</b>	<b>Coeficiente "b"</b>
Ferro ou aço, usado	0,00023
Ferro ou aço, novo	0,000185
Chumbo	0,000140
Cobre	0,000130
Plástico (PVC, etc.)	0,000120