ANÁLISIS DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL EN EL CULTIVO DE ROSA

YULLAYMA ROSA ESMERAL VARGAS
820021

Trabajo de grado presentado para optar al título de Magister en Ingeniería Agrícola

DIRIGIDO POR:

CARLOS ALBERTO GONZALEZ MURILLO

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIRIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL Y AGRÍCOLA
Bogotá, 2011

Nota de aceptación:

_____

_____

_____

_____

Firma del presidente del jurado

_____

Firma del jurado

_____

Firma del jurado

Bogotá D.C., enero de 2011**.**

Dedicado a:
A Dios por los dones recibidos,
A mis padres por todo su empeño y,
Apoyo para que yo estudiase,
A mi esposo por tenerme tanta paciencia,
A mi hijo por su colaboración y su tiempo,
A mis hermanos y sobrinos por ser tan maravillosos,
Y a la vida por darme esta oportunidad.

AGRADECIMIENTOS

La Autora expresa sus más sinceros agradecimientos al profesor Carlos Alberto González M., por haberme acompañado y asesorado como director de esta tesis.

Al Ingeniero Victor Flórez R., director del proyecto de Producción más limpia de rosa y clavel con dos técnicas de cultivo sin suelo en la Sabana de Bogotá por permitirme desarrollar este experimento dentro de las instalaciones del invernadero. Al Ingeniero Diego Nieto C., coordinador del proyecto de Producción más limpia por todo su apoyo técnico en el manejo del cultivo experimental y a cada uno de los integrantes de este proyecto que contribuyeron a la ejecución del experimento.

Al Sr. José P. Esmeral L. mi padre y el Ingeniero Ivan Arcinegas por colaborar en el montaje de las diferentes fases del proyecto. Al Ingeniero José A. Esmeral V y Hugo Hernan Varela V., por colaborar en la toma diaria de datos experimentales de evapotranspiración, producción y calidad. Al Ingeniero Hugo De Castro H. por su colaboración en la toma de datos de crecimiento.

Al Ingeniero Guillermo Corredor por su asesoría en el análisis estadístico de los datos y a todas aquellas personas que de una u otra forma colaboraron en la realización de este trabajo.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN **13**
1 ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN **15**
2 OBJETIVOS **17**
2.1 OBJETIVO GENERAL 17
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 17
3 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA **18**
3.1 CULTIVO DE ROSA 18
3.2 SUSTRATOS 21
3.3 EVAPOTRANSPIRACIÓN 24
3.4 MÉTODOS PARA ESTIMAR LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO DE REFERENCIA EN INVERNADEROS 30
3.5 COEFICIENTE DE CULTIVO (Kc) 36
3.6 INDICES ESTADISTICOS UTILIZADOS PARA DETERMINAR LA BONDAD DE AJUSTE DE MODELOS EVAPOTRANSPIRACIÓN 38
3.7 EVALUACIÓN DE LOS SISTEMAS DE RIEGO POR GOTEO 39
4 MATERIALES Y METODOS **42**
4.1 INFRAESTRUCTURA 42
4.2 DISEÑO EXPERIMENTAL 45
4.3 DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO 52
4.4 TOMA DE DATOS 56
4.5 ANALISIS DE DATOS DEL BALANCE HÍDRICO 57
4.6 MODELO DE EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL PARA LAS CONDICIONES DE LA SABANA DE BOGOTÁ 58
4.7 INFORMACIÓN UTILIZADA PARA DETERMINAR EL EFECTO DE LA SALINIDAD EN LA EVAPOTRANSPIRACIÓN 59
4.8 LABORES CULTURALES 61
5 RESULTADOS **62**
5.1 EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL POR ESTADIO FENOLÓGICO 62
5.2 EFECTO DEL SUSTRATO EN EL RIEGO APLICADO, DRENAJE EVACUADO Y EVAPOTRANSPIRACIÓN PRODUCIDA 63
5.3 EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL USANDO DIFERENTES MODELOS EXISTENTES 63
5.4 COEFICIENTE DE CULTIVO PARA LOS PERÍODOS FENOLÓGICOS ESTUDIADOS 65
5.5 MODELO DE EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL 66
5.6 EFECTO DE LA SALINIDAD PRODUCTO DE LA RECIRCULACIÓN EN LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO 68
6 CONCLUSIONES **71**
1.2 UNIFORMIDAD DE TODOS LOS GOTEROS DEL SISTEMA DE RIEGO DE LA UNIDAD EXPERIMENTAL 82
1.3 RESULTADOS DE LA DISTRIBUCIÓN DE UNIFORMIDAD DIARIA EN LOS GOTEROS DE LOS RECIPIENTES RECOLECTORES DE AGUA DE RIEGO 84
1.4 RESULTADOS DEL AFORAMIENTO DE TODOS LOS GOTEROS 89
BIBLIOGRAFIA
ANEXOS

LISTA DE TABLAS

TABLA 3.1. DESCRIPCIÓN BOTÁNICA DE LA ROSA. 18
TABLA 3.2. ESTADIOS FENOLÓGICOS PARA ROSA CV. CHARLOTTE EN DÍAS DESPUÉS DEL CORTE, EN FUNCIÓN DE LA LONGITUD DEL TALLO Y DEL DIÁMETRO DEL BOTÓN FLORAL. 18
TABLA 3.3. CARACTERÍSTICAS DE LA ROSA CV. CHARLOTTE. 19
TABLA 3.4. VALORES PROMEDIOS DE DENSIDAD APARENTE Y POROSIDAD TOTAL DE LOS SUSTRATOS 100CAQ, 65CAQ Y 35CAQ EMPLEADOS EN EL CULTIVO DE ROSA. 23
TABLA 3.5. DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA DE LOS SUSTRATOS 100CAQ, 65CAQ Y 35CAQ EMPLEADOS EN EL CULTIVO DE ROSA. 24
TABLA 3.6. VALORES MEDIOS DE AGUA TOTAL DISPONIBLE (ATD), EL AGUA FÁCILMENTE DISPONIBLE (AFD), EL AGUA EL RESERVA (AR), EL AGUA DIFÍCILMENTE DISPONIBLE (ADD) Y LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA SATURADA (CHS) ENCONTRADOS EN LOS SUSTRATOS 100CAQ, 65CAQ Y 35CAQ EMPLEADOS EN EL CULTIVO DE ROSA. 24
TABLA 3.7. FACTORES DE CONVERSIÓN PARA EXPRESAR EVAPOTRANSPIRACIÓN 30
TABLA 3.8. PARÁMETROS REQUERIDOS POR LAS ECUACIONES DE EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL. 33
TABLA 3.9. VALORES DE COEFICIENTE DE CULTIVO (PROMEDIO TEMPORAL) PARA CULTIVOS NO ESTRESADO Y BIEN MANEJADOS EN CLILMAS SUB-HÚMEDOS ($HR_{MIN} \approx 45\%$ Y $u_2 \approx 2$ M/S). 37
TABLA 3.10. VALORES DE ÍNDICES ESTADÍSTICOS MÁS UTILIZADOS EN ESTUDIOS DE EVAPOTRANSPIRACIÓN Y MEJOR MÉTODO DE AJUSTE DE EVAPTORANSPIRACIÓN. 38
TABLA 3.11. INTERPRETACIÓN DE LA CLASIFICACIÓN ESTÁNDAR DEL COEFICIENTE DE VARIACIÓN DE FABRICACIÓN (υ) SEGÚN SOLOMON (1979). 40
TABLA 3.12. CALIFICACIÓN DE LA INSTALACIÓN SEGÚN EL COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD (CU). 41
TABLA 3.13.CLASIFICACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE UNIFORMIDAD DEL SISTEMA DE RIEGO. 41
TABLA 4.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS EXPERIMENTOS PREVIOS. 52
TABLA 4.2. VARIABLES MEDIDAS DURANTE EL EXPERIMENTO DE EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL DE LAS PLANTAS DE ROSA CV. CHARLOTTE SEMBRADAS EN SUSTRATO CON 100%, 35% Y 65% DE CASCARILLA DE ARROZ QUEMADA . 57
TABLA 4.3. SUSTRATOS Y PORCENTAJES DE RECIRCULACIÓN PARA EL CULTIVO DE ROSA VARIEDAD "CHARLOTTE" EN EL PROYECTO DE PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA DE ROSA (ROSA SP.) Y CLAVEL (DIANTHUS CARYOPHYLLUS L.) CON DOS TÉCNICAS DE CULTIVO SIN SUELO EN LA SABANA DE BOGOTÁ. 60
TABLA 5.1. COMPARACIÓN ENTRE MEDIAS CON PRUEBA TUKEY DE LAS VARIABLES RIEGO, DRENAJE Y EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL EN CADA ESTADIO FENOLÓGICO EN LAS PLANTAS DE ROSA CV. CHARLOTTE SEMBRADAS EN SUSTRATO CON 100%, 35% Y 65% DE CASCARILLA DE ARROZ QUEMADA. 62
TABLA 5.2. VALORES PROMEDIOS Y COMPARACIÓN ENTRE MEDIAS CON PRUEBA TUKEY DE LA VARIABLE RIEGO, DRENAJE Y ETC EN LAS PLANTAS DE ROSA CV. CHARLOTTE SEMBRADAS EN SUSTRATO CON 100%, 35% Y 65% DE CASCARILLA DE ARROZ QUEMADA, EXPRESADO EN MM DE ALTURA DE AGUA. 63
TABLA 5.3. PROMEDIO MENSUAL DE LOS PARÁMETROS METEOROLÓGICOS REGISTRADOS POR LA ESTACIÓN HOBO DENTRO DEL INVERNADERO. 64
TABLA 5.4. REGISTROS PROMEDIOS DE LA ESTACIÓN MÁS CERCANA AL INVERNADERO. 64
TABLA 5.5. VALORES PROMEDIOS DE EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL (ETO) PARA EL PERIODO DE EXPERIMENTACIÓN. 65
TABLA 5.6. COEFICIENTE DE CULTIVO PARA LOS DISTINTOS ESTADIOS FENOLÓGICOS DE LA ROSA MEDIANTE DIFERENTES ECUACIONES. 66
TABLA 5.7. RESUMEN DEL ÍNDICE DE LA RAÍZ DEL ERROR CUADRÁTICO MEDIO (RECM) DE LAS DIFERENTES ECUACIONES DE ETO. 66
TABLA 5.8. PARÁMETROS DE LAS ECUACIONES DE RADIACIÓN SOLAR INCIDENTE PLATEADAS PARA LAS CONDICIONES AMBIENTALES BAJO INVERNADERO EN LA SABANA DE BOGOTÁ PARA EL CULTIVO DE ROSA CV. CHARLOTTE SEMBRADOS EN SUSTRATO CON 100%, 35% Y 65% DE CASCARILLA DE ARROZ QUEMADA CULTIVADO EN INVERNADERO. 67
TABLA 5.9. PARÁMETROS DE LAS ECUACIONES DE EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL PLATEADAS PARA LAS CONDICIONES AMBIENTALES BAJO INVERNADERO EN LA SABANA DE BOGOTÁ PARA EL CULTIVO DE ROSA CV. CHARLOTTE SEMBRADOS EN SUSTRATO CON 100%, 35% Y 65% DE CASCARILLA DE ARROZ QUEMADA CULTIVADO EN INVERNADERO. 68

TABLA 5.10. VALORES PROMEDIOS, DESVIACIÓN ESTÁNDAR Y COMPARACIÓN ENTRE MEDIAS CON PRUEBA TUKEY DE LAS VARIABLES RIEGO, DRENAJE, EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL Y CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA PARA ROSA SP. VARIEDAD "CHARLOTTE" EN EL ENSAYO CON RECIRCULACIÓN. 69
TABLA 5.11. COEFICIENTESDE CORRELACIÓN ENTRE CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA, ETC, RIEGO Y DRENAJE PARA ROSA SP. VARIEDAD "CHARLOTTE" EN EL ENSAYO CON RECIRCULACIÓN. 70
TABLA 12. RESULTADOS DE LA DISTRIBUCIÓN DE UNIFORMIDAD DE LA LÍNEA DE RIEGO 85
TABLA 13. RESULTADOS DE LA DISTRIBUCIÓN DE UNIFORMIDAD DE LA LÍNEA DE RIEGO 2. 86
TABLA 14. DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL DE LOS RESULTADOS DE LA CLASIFICACIÓN DEL COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD Y DISTRIBUCIÓN DE UNIFORMIDAD DIARIA 89
TABLA 15. VOLUMEN DE AGUA DE LOS GOTEROS DURANTE EL ENSAYO DE AFORO DE TODO EL SISTEMA DE RIEGO DE LA UNIDAD EXPERIMENTAL. 90
TABLA 16. CAUDAL DE DESCARGA DE CADA EMISOR DEL SISTEMA DE RIEGO POR GOTEO. 91
TABLA 17. VALORES DE CAUDAL DE DESCARGA DEL CUARTO MENOR DEL TOTAL DE CADA REPETICIÓN 92

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 3.1. ROSA CV. CHARLOTTE DEL CULTIVO EXPERIMENTAL. (A) COLOR DE PÉTALOS; (B) COLOR DEL FOLLAJE; (C) CULTIVO EN PICO DE PRODUCCIÓN..... 19
FIGURA 3.2. COMPORTAMIENTO PROMEDIO EN DIFERENTES HORAS DEL DÍA DE LA TEMPERATURA DEL AIRE Y DE LA TEMPERATURA DE VARIOS SUSTRATOS Y DEL SUELO EN CLAVEL ESTANDAR CV. NELSON. 21
FIGURA 3.3. COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA PROMEDIO DIARIA DIURNA DEL SUELO, LOS SUSTRATOS, EL SUELO Y EL AIRE PARA EL CULTIVO DE ROSA CV. CHARLOTTEENTRE FEBRERO Y SEPTIEMBRE DE 2005. 22
FIGURA 3.4. PROCESO DE EVAPOTRANSPIRACIÓN. 24
FIGURA 3.5. ESQUEMA DEL FLUJO DE AGUA EN LA PLANTA. 25
FIGURA 3.6. ESQUEMATIZACIÓN DE UN ESTOMA DURANTE EL PROCESO DE TRANSPIRACIÓN. 26
FIGURA 3.7. ESQUEMA DEL EFECTO DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO SOBRE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN EN CONDICIONES ATMOSFÉRICAS DE SECAS Y CALIENTE COMPARADAS CON CONDICIONES HÚMEDAS Y TÍBIAS. 28
FIGURA 3.8. DEFINICIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE ACUERDO CON LA METODOLOGÍA FAO-56 (ALLEN ET AL, 2006)..... 32
FIGURA 3.9. EVAPOTRANSPIRACIÓN MEDIDA CON LISIMETRO Y ESTIMADA POR VARIOS MÉTODOS EN INVERNADERO. A), B), C), D) Y E) PROMEDIO DE SEMANAL DURANTE LOS AÑOS 1993-1999. F) COMPARACIÓN CON MÉTODOS PENMAN-MONTEITH (1977) Y STANGHELLINI (1987). 33
FIGURA 3.10. CURVA DEL COEFICIENTE DE CULTIVO. 36
FIGURA 3.11. A) RELACIÓN ENTRE TRANSPIRACIÓN MEDIDA Y ESTIMADA EN UN CULTIVO DE GUISANTES. B) COMPARACIÓN ENTRE EVAPOTRANSPIRACIÓN MEDIDA Y LA EVAPOTRANSPIRACIÓN ESTIMADA POR LA ECUACIÓN DE PENMAN-MONTEITH PARA UN CULTIVO DE MELOCOTÓN. C) Y D) COMPARACIÓN ENTRE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA ESTIMADA POR LA ECUACIÓN DE PENMAN-MONTEITH Y LA EVAPOTRANSPIRACIÓN MEDIDA CON LISIMETROS. (E) TRANSPIRACIÓN PROMEDIO HORARIO PARA DIFERENTES MODELOS DE ET EN CONDICIONES DE INVERNADERO. 39
FIGURA 4.1. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA DEL MUNICIPIO MOSQUERA (CUNDINAMARCA) 42
FIGURA 4.2. INVERNADERO DEL PROYECTO PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA DE ROSA (ROSA SP.) Y CLAVEL (DIANTHUS CARYOPHYLLUS L.) CON DOS TÉCNICAS DE CULTIVO SIN SUELO EN LA SABANA DE BOGOTÁ. (A) VISTA GENERAL; (B) ROSA CULTIVADA EN SUELO; (C) ROSA CULTIVADA EN SUSTRATOS; (D) CLAVEL CULTIVADO EN SUELO; (E) CLAVEL CULTIVADO EN SUSTRATOS..... 43
FIGURA 4.3. UBICACIÓN DEL EXPERIMENTO DE ETC EN ROSA DENTRO DEL INVERNADERO Y DISTRIBUCIÓN DE LOS TRATAMIENTOS DEL PROYECTO *PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA DE ROSA (ROSA SP.) Y CLAVEL (DIANTHUS CARYOPHYLLUS L.) CON DOS TÉCNICAS DE CULTIVO SIN SUELO EN LA SABANA DE BOGOTÁ.* 44
FIGURA 4.4. EQUIPOS DE MEDICIÓN DE CLIMA. (A) UBICACIÓN DE ESTACIÓN METEOROLÓGICA Y TANQUE DE EVAPORACIÓN TIPO HIMAT FONDO NEGRO; (B) ESTACIÓN METEOROLÓGICA MARCA HOBO, SE MUESTRA SENSOR DE TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA. 45
FIGURA 4.5. DISPOSICIÓN DEL DISEÑO EXPERIMENTAL. 46
FIGURA 4.6. MONTAJE DE LA CAMA EXPERIMENTAL PARA EL ENSAYO 1. (A) CONSTRUCCIÓN DE CAMA EXPERIMENTAL DE 30 M DE LONGITUD; (B), (C), (D) DISPOSICIÓN AL AZAR DE LOS TRATAMIENTOS; (E) CONSTRUCCIÓN DE EMBUDOS PARA CANALIZAR DRENAJE; (F) UBICACIÓN DE RECIPIENTES DE DRENAJE EN CAMA EXPERIMENTAL. 47
FIGURA 4.7. MONTAJE DEL SISTEMA DE RIEGO PARA EL ENSAYO 1. (A) CASETA DE RIEGO DEL INVERNADERO; (B) BOMBA Y VÁLVULAS DE RIEGO PARA EL CULTIVO DE ROSA EN EL INVERNADERO; (C) DERIVACIÓN DEL RIEGO PARA EL ENSAYO; (D) MONTAJE DE LÍNEAS DE DISTRIBUCIÓN DE RIEGO EN CE E INSTALACIÓN DE GOTEROS; (E) GOTERO Y SALIDAS; (F) DISTRIBUCIÓN DE LAS SALIDAS DE LOS GOTEROS. 48
FIGURA 4.8. TOMA DE DATOS DIARIOS PARA EL ENSAYO 1. (A) PESO DE RR; (B) PESO DE RD; (C) PESO DE CR. 49
FIGURA 4.9. ENSAYO 2. (A) CAMAS QUE HICIERON PARTE DEL EXPERIMENTO 2; (B) DISPOSICIÓN DE ELEMENTOS CONSTITUTIVOS DE LA CAMA EXPERIMENTAL. 50
FIGURA 4.10. SISTEMA DE RIEGO PARA EL ENSAYO 2. (A) ACERO DE REFUERZO PARA CIMENTACIÓN Y PLACA DE SOPORTE PARA ELEMENTOS DE RIEGO; (B) VACIADO DE PLACA; (C) ACABADO DE PLACA E INSTALACIÓN DE REJA PARA PROTEGER SISTEMA DE RIEGO; (D) TANQUE DE ALMACENAMIENTO PARA AGUA DE RIEGO; (E) ELEMENTOS DEL SISTEMA DE RIEGO; (F) RIEGO PARA CR Y RR. 51

FIGURA 4.11. SISTEMA DE EVACUACIÓN DE AGUA. (A) CANAL DE RECOLECCIÓN PARA CAMAS EFECTO BORDE; (B) CONTENDEDOR DE ROSA, EMBUDO Y RECIPIENTE PARA DRENAJE; (C) TANQUE DE RECOLECCIÓN DE AGUA; (D) CANAL DE DRENAJE PERIMETRAL. 51
FIGURA 4.12. TOMA DE DATOS DIARIOS PARA EL ENSAYO 2. (A) PESO DE RD; (B) FORMATO PARA REGISTRO DIARIO DE DATOS; (C) SENSOR DE HUMEDAD; (D) MEDICIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD CON BASE EN VOLUMEN EN LOS CR..... 52
FIGURA 4.13. CONTENEDOR DE PLANTAS DE ROSA..... 53
FIGURA 4.14. (A) SELECCIÓN DE PLANTAS PARA CONFORMAR LA UNIDAD EXPERIMENTAL; (B) EJEMPLO DE ROTURADO DE CONTENEDORES; (C) UBICACIÓN DE PLANTAS DESPUÉS DE SORTEO..... 54
FIGURA 4.15. CABEZAL DE RIEGO. (A) MOTOBOMBA CON HIDROFLOW; (B) VÁLVULA SOLENOIDE CON CONTROLADOR;..... 55
FIGURA 4.16. SISTEMA DE RIEGO. (A) LÍNEAS DE RIEGO; (B) GOTEROS..... 55
FIGURA 4.17. SOLUCIÓN DE AGUA PARA RIEGO DIARIO. (A) TANQUE DE ALMACENAMIENTO CON AGUA FERTILIZADA; (B) DOSIFICACIÓN DE FERTILIZANTES; (C) FERTILIZANTES LÍQUIDOS Y ÁCIDO FOSFÓRICO 56
FIGURA 4.22. PROYECTO DE PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA DE ROSA (ROSA SP.) CON DOS TÉCNICAS DE CULTIVO SIN SUELO EN LA SABANA DE BOGOTÁ. (A) CAMAS DE ROSA Y RECIPIENTES RECOLECTORES DE DRENAJE DE LAS CAMAS; (B) TANQUES RECOLECTORES DE DRENAJE VIENE DE LOS RECIPIENTES MOSTRADOS EN (A); (C) TANQUES DONDE SE RECOMPONE LA FORMULA DE RIEGO CON AGUA DE LIXIVIADOS PROCEDENTES DE TANQUES MOSTRADOS EN (B)..... 60
FIGURA 4.18. LABORES CULTURALES. (A) PINCH – ACTIVAR CRECIMIENTO; (B Y C) DESPUÉS DE PINCH DE DESBOTONAMIENTO; (D, E Y F) DESPEJE DEL CULTIVO..... 61
FIGURA 19. ENSAYO DE DISTRIBUCIÓN DE UNIFORMIDAD DE GOTEROS CON FRECUENCIA DIARIA DE TOMA DE DATOS. A)TOMA DE DATOS DE VOLUMEN DE LOS GOTEROS; B) UBICACIÓN DE LÍNEAS DE RIEGO 82
FIGURA 20. PRUEBA DE AFORO PARA DETERMINACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE UNIFORMIDAD. 82
FIGURA 21. COMPORTAMIENTO DIARIO DE LOS VOLÚMENES DE RIEGO DE LOS GOTEROS EN LOS RR DURANTE EL DESARROLLO DEL EXPERIMENTO DE ETC EN ROSA – LÍNEA 1..... 87
FIGURA 22. COMPORTAMIENTO DIARIO DE LOS VOLÚMENES DE RIEGO DE LOS GOTEROS EN LOS RR DURANTE EL DESARROLLO DEL EXPERIMENTO DE ETC EN ROSA – LÍNEA 2..... 87
FIGURA 23. COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD DE RIEGO – LÍNEA 1. 88
FIGURA 24. COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD DE RIEGO – LÍNEA 2. 88
FIGURA 25. VOLUMEN DE RIEGO DE TODOS LOS GOTEROS. 91

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A: ANEXO J: UNIFORMIDAD DE RIEGO
ANEXO B: COEFICIENTES DE CULTIVOS POR DIFERENTES ECUACIONES DE ETo

LISTA DE SIMBOLOS PRINCIPALES Y ACRÓNIMOS

C_p Calor específico del aire, MJ/kg/ºC. $C_p = 0.001013$, Donatelli et al (2006).

CAQ Cascarilla de arroz quemada

CU Coeficiente de uniformidad de Christiansen, adimensional

DVP Déficit de presión de vapor, kPa

D Drenaje, mm/día

ddp Días déspues de la poda

e_a Presión de vapor real, kPa. La presión real del aire se determina en función de la temperatura del punto de rocío ($T_{rocío}$), $e_a = e^o(T_{rocío}) = 0{,}6108 \exp\left[\frac{17{,}27\, T_{rocío}}{T_{rocío} + 237{,}3}\right]$

e_s Presión de vapor de saturación, kPa. $e^o(T) = 0{,}6108 * \exp\left[\frac{17{,}27 * T}{T + 237{,}3}\right]$. Se calcula e°(T) para condiciones de temperatura máxima (Tmax) y temperatura mínima (Tmin), para luego determinar $e_s = \frac{e^o(T\,max) + e^o(T\,min)}{2}$

ECM Error cuadrático medio

Epan Evaporación del tanque clase A, mm

ET Evapotranspiración, mm/día

ETo Evapotranspiración del cultivo de referencia o evapotranspiración potencial, mm/día

ETc Evapotranspiración real, mm/día

FC Fibra de coco

G Flujo de calor del suelo, MJ/m^2/día. Para periodos diarios es cero, (Allen et al, 2006; Donatelli et al, 2006).

H Calor sencible

HR_{med} Humedad relativa media, %

HR_{mim} Humedad relativa mínima, %

I Índice de calor anual. $I = \sum_{j=1}^{12} i_j$, donde i es el índice de calor mensual $i_j = \left(\frac{T_{med}}{5}\right)^{1.514}$, $a = 675 * 10^{-9}\, I^3 - 771 * 10^{-7}\, I^2 + 1792 * 10^{-5}\, I + 0.49239$

IAF Índice de área folera, m^2/ m^2

k_c Coeficiente de cultivo

k_{cin} Coeficiente de cultivo, fase inicial

k_{cint} Coeficiente de cultivo, fase intermedia

k_{cfin} Coeficiente de cultivo, fase final

Kt Factor de conversión de tiempo, es igual a 86400 s/día

Kp Coeficiente del tanque de evapotranspiración

Kw Factor de conversión de W/m2 a mm/día, es igual a 0.035271

L Lámina de agua aplicada, mm/día

M Tamaño de la muestra

n Duración real de la insolación, h

N Duración máxima posile de la duración de la insolación, h

n/N Duración relativa de la insolación

O_i Valor observado

$\overline{Oi}$ Promedio de los valores observados desde i=1, 2, 3, … , M

p Porcentaje de horas máximas de sol

P_i Valor predicho

$\overline{P}i$ Promedio de los valores predichos desde i=1, 2, 3, … , M

$\bar{q}$ Caudal promedio de descarga, expresado en l/h

$\bar{q}_{(1/4)}$ Promedio del cuarto menor de los caudales de descarga, expresado en l/h

r_a	Resistencia aerodinámica, s/m. $r_a = \frac{665}{1+0.54*U_2}$, Donatelli et al 2006
r_s	Resistencia superficial, s/m. $r_s = \frac{r_l}{IAF_{activo}}$; r_l: resistencia estomática total de una hoja bien iluminada (s/m), tiene un valor de 100s/m para una sola hoja en condiciones bien drenadas; IAF: índice activo de área foliar m^2(área de la hoja)/m^2(área del suelo), sólo el 50% del área superior de la planta contribuye activamente a la transferencia superficial de calor y vapor de agua, para pasto IAF=24h (h:altura del pasto). Para un cultivo de altura 0,12m, la resistencia superficial es 70s/m, (Allen et al, 2006)
r_R	Resistencia de radiación, s/m. $r_R = \frac{\rho\, C_p}{4\,\sigma\,(T+273.15)^3}$
R	Lámina de agua aplicada, mm/día. La precipitación sería otra de las componentes de entrada, en el caso que el cultivo sea descubierto
R_a	Radiación extraterrestre, MJ/m^2/día
R_n	Radiación solar neta, MJ/m^2/día. $R_n = R_{ns} - R_{nl}$, $R_{ns} = 0.77 * R_s$, $R_s = \left[0.25 + 0.50 * \frac{n}{N}\right] R_a$, $R_{nl} = \sigma\left[\frac{(T_{max,K})^4 + (T_{min,K})^4}{2}\right]\left(0.34 - 0.14\sqrt{e_a}\right)\left(1.35\frac{R_s}{R_{so}} - 0.35\right)$, $R_{so} = (0.75 + 2 * 10^{-5} * Z) * R_a$
R_{ns}	Radiación solar de onda corta, MJ/m^2/día
R_{nl}	Radiación solar de onda larga, MJ/m^2/día
R_{so}	Radiación solar de un día despejado, MJ/m^2/día
R_s/ R_{so}	Radiación relativa de onda corta, valores ≤ 1.0
R_s	Radiación solar medida o calculada, MJ/m^2/día
RECM	Raíz del error cuadrático medio
S	Desviación estandar
T	Temperatura del aire, ºC
$T_{max,K}$	Tmax(°C) + 273.16
$T_{min,K}$:	Tmin(°C) + 273.16
T_{med}	Temperatura media del aire, ºC
Tmax	Temperatura máxima del aire, expresada en [ºC].
Tmin	Temperatura mínima del aire, expresada en [ºC].
u_2	Velocidad del viento a 2 m de altura
UD	Coeficiente de uniformidad de distribución, adimensional
Z	Elevación de la estación sobre el nivel del mar, m
α'	Coeficiente de Priestley-Taylor, $\alpha = 1 + (PTc - 1)VPD \approx 1.26$
γ	Constante psicrométrica, kPa/ºC. $\gamma = \frac{C_{p\ Presion\ atmosferica}}{0.622*\lambda} = 0.665 * 10^{-3}$
Δ	Pendiente de la curva de presión de vapor de saturación, kPa/ºC. $\Delta = \frac{4098\left[0{,}6108e^{\left(\frac{17.27*T}{T+273.3}\right)}\right]}{(T+237.3)^2}$
$\Delta\theta$	Variación en el contenido de humedad del sustrato, mm/día
λ	Calor latente de vaporizacion, MJ/kg. $\lambda = 2.501 - 0.002361 * T$
λET	Flujo de calor latente
ρ_a	Densidad media del aire a presión constante, kg/m^3. $\rho = \frac{100000}{287\ (T+273.16)}$, Donatelli et al 2006.
σ	constante de Stefan-Boltzmann $4.903 * 10^{-9}$ MJ/K^4/m^2/día
$\alpha,\beta,\eta,\vartheta$	Parámetros de la ecuación de ETo planteadas
τ,ω,φ,μ	Parámetros de la ecuación de radiación solar planteadas

INTRODUCCIÓN

El sector floricultor ocupa un lugar privilegiado en la economía colombiana. Es el primer renglón de las exportaciones agrícolas no tradicionales y la rosa es uno de los cultivos de flores de corte más importantes. En la Sabana de Bogotá se encuentra aproximadamente el 85% del total del área cultivada por flores en nuestro país. El nivel de producción de flores se caracteriza por presentar altos consumos de agua, para el caso de la Sabana de Bogotá se utilizan 19.3 millones de m^3/año de agua para las labores de riego. Esta actividad tiene un gran impacto sobre el ambiente y los costos de producción del cultivo, en especial, cuando las labores de riego se realizan de manera convencional, aplicando dosis de riego uniformes durante todo su ciclo productivo, sin tener en cuenta las características del cultivo, su estadio fenológico y condiciones ambientales. En términos generales, en un cultivo tradicional de flores las necesidades hídricas no son determinadas, lo cual se debe en cierta medida a la cultura extendida de prácticas de riego existentes y a la escasa investigación sobre el comportamiento del cultivo y los factores ambientales que aumentan o disminuyen el consumo de agua en determinadas etapas del ciclo fenológico.

El objetivo general de este trabajo fue medir y modelar la evapotranspiración real en rosa con técnicas de cultivo sin suelo bajo invernadero con las condiciones de la Sabana de Bogotá. El experimento se realizó en un invernadero de rosa localizado en las instalaciones del Servicio Nacional de Aprendizaje – SENA, en el municipio de Mosquera (Cundinamarca), dentro del marco de desarrollo del proyecto *Producción más limpia de rosa (Rosa sp.) y clavel (Dianthus caryophyllus L.) con dos técnicas de cultivo sin suelo en la Sabana de Bogotá*, liderado por la Universidad Nacional de Colombia. Se utilizó un cultivo de rosa variedad Charlotte injertadas sobre el patrón "Natal briar". El cultivo estaba establecido en sustratos de mezcla de sustratos de cascarilla de arroz quemada (CAQ) y fibra de coco (FC) contenido en recipientes plásticos de 8 litros, los cuales fueron empleados como lisímetros. El experimento utilizó un sistema de riego por goteo propio para el ensayo. Se tomaron mediciones diarias de los componentes del balance hídrico y mediciones semanales de parámetros de crecimiento. Para el ensayo se planteó y desarrolló un diseño experimental completamente aleatorizado compuesto por tres tratamientos y 9 réplicas por tratamiento. Los tratamientos fueron los sustratos compuestos por las siguientes mezclas: 1) 100CAQ (100% cascarilla de arroz quemada), 65CAQ (65% cascarilla de arroz quemada más 35% fibra de coco) y 35CAQ (35% cascarilla de arroz quemada más 65% fibra de coco).

Este documento contiene en el primer capítulo una descripción general de los antecedentes y justificación que motivaron la realización de este proyecto. En el segundo capítulo se presentan los objetivos de este trabajo. El tercer capítulo contiene una revisión bibliográfica de los aspectos más destacados de la evapotranspiración y los métodos más comunes que permiten su determinación. El cuarto capítulo hace referencia al proceso metodológico utilizado para desarrollar este proyecto; se presenta una descripción amplia del diseño experimental empleado y las técnicas usadas para obtener las variables necesarias que permitieron determinar la evapotranspiración en el cultivo de rosa mediante un balance hídrico. El quinto capítulo se presentan los resultados que arrojaron el balance hídrico

diario, la discusión sobre las variables climáticas obtenidas de la estación micrometeorológica ubicada al interior del invernadero y su relación con datos de clima de la estación más cercana, la obtención de la evapotranspiración mediante diferentes ecuaciones empíricas, la estimación del coeficiente de cultivo y la determinación el efecto de los sustratos y la recirculación sobre el proceso de evapotranspiración. El último capítulo presenta las conclusiones y recomendaciones producto de los resultados de este experimento.

1 ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

El sector floricultor colombiano cuenta con 6953 hectáreas cultivadas bajo invernadero (Minagricultura, 2007), que contribuyen a la generación de 94300 empleos directos (89% operarios) y 80200 empleos indirectos (Asocolflores, 2004). El 85% del área cultivada de flores se localiza en la Sabana de Bogotá, el 12% en Rionegro y el 3% en otras regiones como Valle, Eje Cafetero y Cauca; el 29% de la producción total de país se concentra en rosa, 26% en clavel y miniclavel, el 2% en crisantemo y el 43% otras especies que incluyen bouquets (Asocolflores, 2004). En la Sabana de Bogotá se utilizan aproximadamente 19.3 millones de m^3/año (52800 m^3/día) de agua en las labores de riego[1].

Las prácticas de riego se realizan de acuerdo con la experiencia del agricultor, con base en la aplicación uniforme de riego durante todo el ciclo vegetativo, sin considerar las exigencias del cultivo y las condiciones climáticas predominantes en un momento determinado. En general la forma como se aplica para clavel y rosa está en función de la lámina de lavado que se desea aplicar. Al finalizar el periodo productivo del cultivo, se han aplicado riegos en exceso que contribuyen al aumento de la escorrentía superficial y subterránea, así como el arrastre de sustancias contaminantes disueltas que pueden afectar acuíferos cercanos y fuentes de agua superficial; por tanto se produce un uso ineficiente del recurso hídrico y un gran impacto ambiental. Para minimizar este impacto se ha considerado la reutilización del agua de lixiviado en el propio invernadero, tal es el caso del proyecto *Producción más limpia de rosa (Rosa sp.) y clavel (Dianthus caryophyllus L.) con dos técnicas de cultivo sin suelo en la Sabana de Bogotá*, pero es necesario conocer cual es el efecto de las concentraciones de sales en el proceso de evapotranspiración, ya que bajo alta salinidad la evapotranspiración se reduce (Ulloa et al, 2006).

Los estudios sobre requerimientos de agua en invernadero son escasos y los existente se han realizado sobre cultivos hortícolas (Orgaz et al, 2005) y bajo condiciones frías al norte y centro de Europa (Montero et al, 2001). A nivel internacional existen pocas investigaciones que relacionan el comportamientos de los cultivos y el microclima de los invernaderos (Fernández et al, 2010). En la Sabana de Bogotá (Colombia), se destacan los trabajos: consumo de agua para el cultivo de rosa realizado por Rodríguez (1998) y la respuesta del cultivo de rosa a diferentes láminas riego realizado por Bastidas y Santana (2000).

[1] Valor obtenido por la experiencia del proyecto *Producción más limpia de rosa (Rosa sp.) y clavel (Dianthus caryophyllus L.) con dos técnicas de cultivo sin suelo en la Sabana de Bogotá*, y de experiencias con diferentes fincas en la Sabana de Bogotá.

Debido a los pocos estudios sobre requerimientos hídricos en la rosa a nivel local y como consecuencia de los altos consumos de agua empleados en flores en la Sabana de Bogotá, se realizó este proyecto que permitió estimar la evapotranspiración real del cultivo, determinar el coeficiente de cultivo para los diferentes estadios fenológicos, establecer el efecto del uso de diferentes mezclas de sustratos sobre la evapotranspiración y el uso de recirculación sobre los consumos de agua de las plantas. Además, con este trabajo se logró llenar el vacío que sobre el particular existía en nuestro medio.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

- ✓ Medir y modelar la evapotranspiración real en rosa con técnicas de cultivo sin suelo bajo invernadero con las condiciones de la Sabana de Bogotá, a fin de mejorar el uso y manejo de agua.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Determinar la evapotranspiración real en el cultivo de rosa
- ✓ Modelar la evapotranspiración potencial usando diferentes modelos existentes
- ✓ Establecer el coeficiente de cultivo para los períodos fenológicos estudiados
- ✓ Determinar el efecto del tipo de sustrato sobre la evapotranspiración
- ✓ Determinar el efecto de la salinidad producto de la recirculación en la evapotranspiración del cultivo

3 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

3.1 CULTIVO DE ROSA

La rosa es una planta arbustiva, de porte abierto, ramas leñosas y espinosas, (Rodríguez, 1998). Generalmente, sus tallos son de color verde y a veces teñido de marrón rojizo con espinas más o menos desarrolladas según la variedad, pueden ser arqueados, encorvadas, aladas, afiladas o cilíndricos. Sus hojas están compuestas de tres a 15 foliolos que presentan hojas ovaladas, redondeadas, elípticas o lanceoladas, (Minagricultura e ICA, 1974). La descripción botánica de la rosa de acuerdo con Minagricultura e ICA (1974) se presenta en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Descripción botánica de la rosa.

Clase	:	Dicotiledónea
Orden	:	Rosales
Familia	:	Rosáceas
Género	:	Rosas

Fuente: Minagricultura e ICA, 1974.

Se caracteriza por ser una planta perenne que forma tallos florales de manera continua (Chaparro et al, 2006; Rodríguez y Flórez, 2006). El ciclo de un tallo floral es aproximadamente de 10 a 11 semanas, la mitad de este periodo es vegetativo y la otra mitad reproductivo. Durante este ciclo, la planta presenta diferentes estadios de desarrollo, los cuales van desde una yema axilar que brota siendo la base estructural de la planta y de la producción de flores, hasta un tallo listo para cosechar[2], (Rodríguez y Flórez, 2006). En la Tabla 3.2 se muestra la duración de cada estadio fenológico y la relación de estos con la longitud del tallo y diámetro del botón de la flor.

Tabla 3.2. Estadios fenológicos para rosa cv. Charlotte en días después del corte, en función de la longitud del tallo y del diámetro del botón floral.

Estadios fenológicos	Días después de corte	Longitud tallo (mm)	Diámetro botón (mm)
Primordio	42	444	0,03
Arroz	51	626	2,05
Arroz 2	53	657	3,44
Arveja	57	711	7,32
Garbanzo	61	753	11,99
Chorote	64	778	15,46
Rayar color	69	810	20,44
Corte	76	840	25,19

Fuente: Cáceres y Nieto, 2003.

El periodo vegetativo se subdivide en inducción del brote y desarrollo del tallo floral, caracterizándose por un color rojizo en la mayoría de los casos. El periodo reproductivo se

[2] Las yemas ubicadas en las hojas superiores de un tallo con frecuencia parecen ser más generativas, mientras que las yemas inferiores son vegetativas, (Rodríguez y Flórez, 2006).

inicia con la inducción del Primordio floral, que coincide con una variación del color del tallo y hojas de rojo a verde, continuando con los estadios fenológicos 'Arroz', 'Arroz 2', 'Arveja', 'Garbanzo', 'rayar color (muestra color) y 'corte' (cosecha). El estadio 'Rayar Color' indica el momento en que se separan ligeramente los sépalos por efecto del crecimiento del botón dejando ver el color de los pétalos y el 'corte', el momento en que la flor llega a un punto de apertura comercial, más no fisiológica, (Rodríguez y Flórez, 2006).

Debido a su facilidad para generar hibridaciones, se cuenta con una gran cantidad de variedad, (Rodríguez, 1998). Se encuentran categorías de flores de acuerdo con el color de los pétalos tal como rojas, rosadas, naranjas, fucsia, champa, blancas-cremas, bicolores, amarillas, salmón y verdes. Entre la categoría de rojas están las siguientes variedades: 'Black Magic', 'Cardinal', Charlotte, 'Rouge Baiser', 'Red Unique', 'Freedom', 'Gabriella' y 'Visa', (http://www.lasflores.com).

La rosa cv. Charlotte es de color rojoterciopelo o rojo oscuro brillante, especial para ser cultivada bajo invernadero. Es una variedad con un ciclo de desarrollo de aproximadamente 72 días. Presenta tallos gruesos y largos, con 10 hojas verdaderas. Los pétalos de la flor son entre rojos y violetas y la dimensión de la flor al momento del corte es de 52 mm x 29 mm, (Rodríguez y Flórez, 2006). La empresa de flores colombiana Flores Sagaro S.A. en su página de internet http://www.lasflores.com indica unas características específicas de la cv. 'Charlote', las cuales se muestran en la Tabla 3.3. En la Figura 3.1 se muestra esta variedad, que fue empleada como cultivo experimental en este trabajo.

Tabla 3.3. Características de la rosa cv. Charlotte.

Variedad	Color pétalos	Color follaje	Diámetro de botón (mm)	Número de pétalos	Largo de tallo (mm)	Días florero
Charlotte	Rojo oscuro	Verde oscuro	45	22	400-900	12-15

Fuente: http://www.lasflores.com. Consultado: 10 de diciembre de 2010.

Figura 3.1. Rosa cv. Charlotte del cultivo experimental. (a) Color de pétalos; (b) Color del follaje; (c) cultivo en pico de producción.

(a) (b) (c)

3.1.1 Características fisiológicas

El rosal es un cultivo que exige temperaturas del aire altas, en especial para el nacimiento y desarrollo de los brotes. Las temperaturas del aire óptimas se encuentran entre 21 y 24ºC durante el día y de 15 a 16ºC durante la noche, no es aconsejable superar los 30ºC ni bajar de -1ºC porque pueden ocurrir alteraciones fisiológicas, (Rodríguez, 1998). Newman (1997) recomienda temperaturas estándares para rosa durante el día entre 20-26ºC y para la noche entre 15 y 17ºC; además menciona que las temperaturas altas generarán mayor demanda de agua para mantener un buen crecimiento de la planta.

La temperatura del suelo es importante. Cuando la planta se expone a temperaturas de 17.5ºC se producen aumentos en la longitud del tallo y disminución en el crecimiento radicular. La planta a temperaturas de 22.5ºC tiende a presentar la mitad del diámetro de la raíz que las que han crecido a 13.5ºC, (Rodríguez, 1998).

Las plantas de rosa requieren valores de humedad relativa altas para su adecuado crecimiento. Para estimular el crecimiento de durante el período de brotación de yemas y crecimiento de los brotes se recomienda una humedad relativa entre 80 y 90%. Valores de este parámetro inferiores al 60% pueden ocasionar daños fisiológicos que se reflejan en deformaciones de los botones, hojas poco desarrolladas y caída de hojas temprana. Pero valores muy altos de humedad relativa pueden producir enfermedades como la Botrytis, (Rodríguez, 1998). Entre más alto sea el déficit de presión de vapor (DPV) la planta consume más agua, (Newman, 1997)

La iluminación incide en el desarrollo de la planta y en la producción. A mayor iluminación se aumenta el follaje, se mejora la calidad, el color y el tamaño, (Rodríguez, 1998).

El anhídrido carbónico (CO_2) es un nutriente fundamental para la planta, concentraciones altas (superiores a 500 ppm) aumentan la producción porque aumenta su actividad fotosintética. Se recomiendan aportaciones de anhídrido carbónico alrededor de las 800 ppm para producir un incremento en la producción, el número de petálos, la longitud del tallo y el tamaño de la flor

La rosa requiere suelos bien drenados y aireados. Tolera suelos ácidos, aunque el pH debe mantenerse en torno a 6 y 7.5 según la variedad. No tolera niveles altos de calcio porque desarrolla la clorosis y se recomienda no superar el 0.15% de sales solubles. La tolerancia máxima a sales es de 3 dS/m. Las necesidades nutricionales se inclinan hacia elementos como el nitrógeno y el potasio principalmente, y en menor concentración al fósforo, (Lorenzo et al, 2006; Rodríguez, 1998)

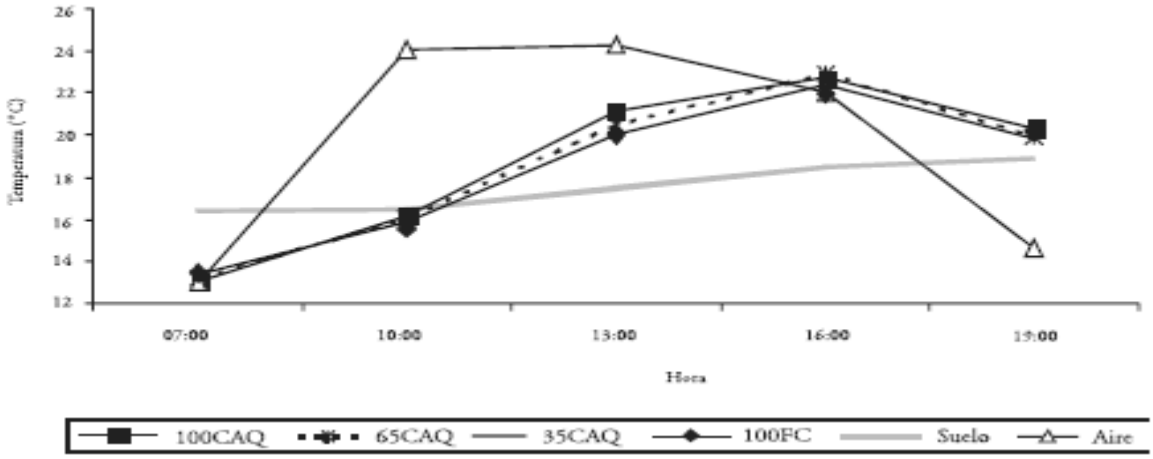
3.2 SUSTRATOS

Los sustratos y las mezclas de sustratos se están utilizando ampliamente en los cultivos bajo invernadero. Su implementación en cultivos de flores en Colombia se ha venido intensificando desde comienzos de 1990.

Los sustratos más utilizados en los cultivos de flores en la Sabana de Bogotá son la cascarilla de arroz quemada (CAQ), escoria de carbón, cascarilla de arroz cruda y turba. Además, se utilizan mezclas de cascarilla de arroz quemada con otros sustratos, escoria de carbón, coco peat (materia orgánica residual del coco) y en menor proporción compost y cascarilla de arroz esterilizada (reutilizada), (Quintero, 2009).

La temperatura del aire influye en la temperatura del suelo y del sustrato. Durante el día las temperaturas del suelo presentan pequeñas variaciones en comparación con las variaciones presentadas en la temperatura del aire en un invernadero. Pero las temperaturas de los sustratos son más susceptibles a las temperaturas ambientes presentando una tendencia de crecimiento muy cercana, tal como se observa en la Figura 3.2, (Nieto y Flórez, 2006).

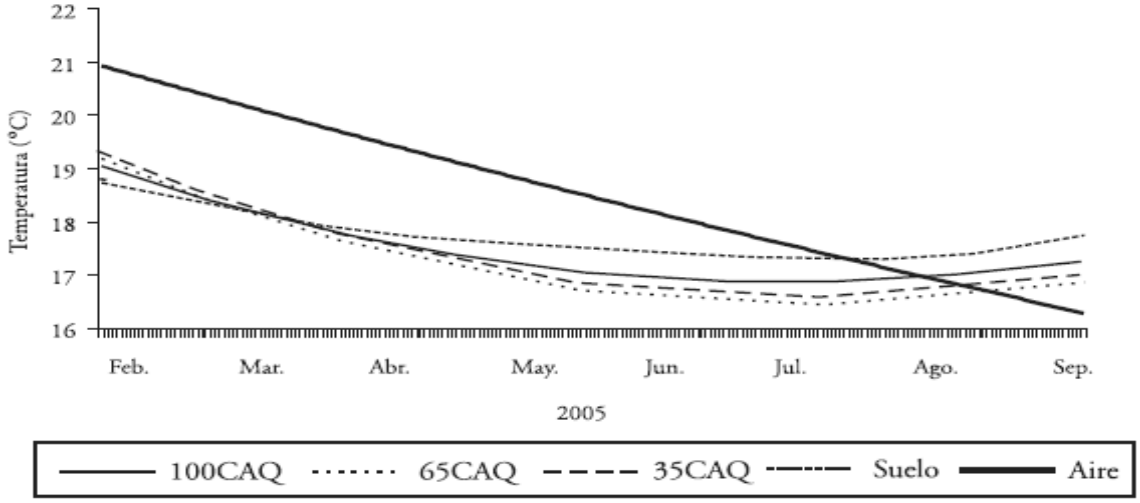
Figura 3.2. Comportamiento promedio en diferentes horas del día de la temperatura del aire y de la temperatura de varios sustratos y del suelo en clavel estandar cv. Nelson.



Fuente: Nieto y Flórez, 2006.

Nieto y Flórez (2006) compararon la temperatura promedio diurna del aire, del suelo y los sustratos de rosa y clavel. Encontraron en rosa que la temperatura del sustrato fue superior a la temperatura promedio del suelo, lo cual no ocurrió en clavel. En la Figura 3.3 se muestra el comportamiento de la temperatura promedio diaria diurna del suelo, los sustratos y el aire para el cultivo de rosa cv. Charlotte para sustratos de cascarilla de arroz quemada y fibra de coco.

Figura 3.3. Comportamiento de la temperatura promedio diaria diurna del suelo, los sustratos, el suelo y el aire para el cultivo de rosa cv. Charlotteentre febrero y septiembre de 2005.



Fuente: Nieto y Flórez, 2006.

3.2.1 Cascarilla de arroz quemada (CAQ). Se obtiene de la descomposición y quema parcial de la cascarilla del arroz blanco. La CAQ es un sustrato orgánico de baja tasa de descomposición por su alto contenido de sílice, es liviano (densidad aparente entre 0.090 y 0.22 g de materia seca por m3), tiene porosidad, capacidad de retención de humedad, agua fácilmente disponibles y conductividad hidráulica elevadas, su pH es neutro, mientras que su conductividad eléctrica y su capacidad de intercambio catiónico son bajas. Es un material rico en potasio (3000 y 3500 ppm) y fósforo (80 y 120 ppm) y pobre en nitrógeno (menos de 100 ppm), (Quintero, 2009).

3.2.2 Fibra de coco (FC). Es un subproducto de la industria del coco (*Cocos nucifera* L.), es un material orgánico de lenta descomposición que resulta como subproducto de las plantaciones de coco de los países situados en los trópicos como Sri Lanka, India, Filipinas, Costa de marfil o Méjico. En Colombia en el año 2000 se presentó un producción de coco alrededor de 101.000 toneladas, con un rendimiento de 7.200 kg/ha siendo los principales productores los departamentos de Córdoba (29.8%), Nariño (28.7%) y Cauca (15.9%), (Quintero, 2009).

Se caracteriza por presentar alta capacidad de retención de humedad, pH que varía entre 4,0 y 7,0, conductividad eléctrica varía entre 1,0 y 6,0 dS/m, contenido de materia orgánica de 85-90%, capacidad de intercambio catiónico entre 20 y 30 me/L, porosidad total superior al 80%, conductividad hidráulica es elevada, su densidad varía entre 50 y 100 kg de materia seca por m^3, (Quintero, 2009).

3.2.3 Características de los sustratos de CAQ, FC y mezclas. Quintero (2009) en su trabajo de propiedad hidro-físicas de cuatro sustratos usados en cultivos de flores de corte en la Sabana de Bogotá concluye que el sustrato cascarilla de arroz es un material con una alta densidad aparente, una porosidad total media; el sustrato fibra de coco es un material con baja densidad aparente y alta porosidad total; y que las mezclas de 65CAQ y 35CAQ tienen características intermedias. Además, el sustrato que presenta mayor cantidad de partículas finas es la cascarilla de arroz quemada, lo que le confiere una mayor capacidad de retención de humedad entre los rangos de 1 a 10 Kpa; la fibra de coco es el sustrato que contiene mayor cantidad de partículas gruesas, lo que influye en la forma de la curva de liberación de agua, que es diferente de las mezclas y de la cascarilla de arroz quemada.

En la Tabla 3.4 se presentan los valores de densidad aparente y porosidad total para los sustratos 100CAQ, 65CAQ y 35CAQ para un cultivo de rosa cv. Charlotte encontrados por Quintero (2009). La densidad aparente fue menor en la fibra de coco y aumento a medida que se incorporaba cascarilla quemada en los sustratos, desde 0.16 para 35CAQ a 0.26 g/ml para 100CAQ, lo que muestra que la cascarilla de arroz quemada es un sustrato más denso que las otras mezclas con fibra de coco. La porosidad total fue mayor para la fibra de coco y fue disminuyendo a medida que se adicionaba cascarilla de arroz quemada, el sustrato más poroso fue la mezcla 35 CAQ con un valor de 79 % y el menos poroso fue el sustrato 100CAQ con un 66%.

Tabla 3.4. Valores promedios de densidad aparente y porosidad total de los sustratos 100CAQ, 65CAQ y 35CAQ empleados en el cultivo de rosa.

Sustrato	Densidad aparente (g/ml)	Porosidad total (%)
100CAQ	0.26	66.0
65CAQ	0.18	77.5
35CAQ	0.16	79.0

Fuente: Quintero, 2009.

En la Tabla 3.5 se presentan los valores en porcentaje de la distribución granulométrica para los sustratos 100CAQ, 65CAQ y 35CAQ para un cultivo de rosa cv. Charlotte encontrados por Quintero (2009). El contenido de partículas gruesas fue mayor en el sustrato 35CAQ y fue disminuyendo a medida que se adicionaba cascarilla de arroz quemada, estas medidas variaron entre 3.3% para 100CAQ y 9.4 % para 35CAQ. El contenido de partículas medias fue mayor en el sustrato 35CAQ y fue disminuyendo a medida que aumentaba la concentración de cascarilla de arroz quemada, estas medidas variaron entre 38% para 100CAQ y 49% para 35CAQ. El contenido de partículas finas fue mayor en el sustrato 100CAQ y fue disminuyendo a medida que se incorporaba fibra de coco, estas medidas variaron entre 41% para 35CAQ y 58 % para 100CAQ. Los mayores contenidos de ATD, AFD y AR se presentaron en el sustrato cascarilla de arroz quemada y fueron disminuyendo a medida que se adicionaba fibra de coco. Caso contrario ocurrió en los contenidos de ADD y CHS.

Tabla 3.5. Distribución granulométrica de los sustratos 100CAQ, 65CAQ y 35CAQ empleados en el cultivo de rosa.

Sustrato	Partículas Gruesas > 2,5 mm	Partículas Medias 2,5 – 0,63 mm	Partículas Finas < 0,63 mm
100CAQ	3.33	38.3	57.9
65CAQ	7.12	46.8	44.9
35CAQ	9.36	48.7	40.9

Fuente: Quintero, 2009.

La Tabla 3.6 presenta los valores medios de agua total disponible (ATD), el agua fácilmente disponible (AFD), el agua el reserva (AR), el agua difícilmente disponible (ADD) y la conductividad hidráulica saturada (CHS) para un cultivo de rosa cv. Charlotte encontrados por Quintero (2009) en el cultivo de rosa, para los sustratos de 100 CAQ, 65CAQ y 35CAQ en el cultivo de rosa.

Tabla 3.6. Valores medios de agua total disponible (ATD), el agua fácilmente disponible (AFD), el agua el reserva (AR), el agua difícilmente disponible (ADD) y la conductividad hidráulica saturada (CHS) encontrados en los sustratos 100CAQ, 65CAQ y 35CAQ empleados en el cultivo de rosa.

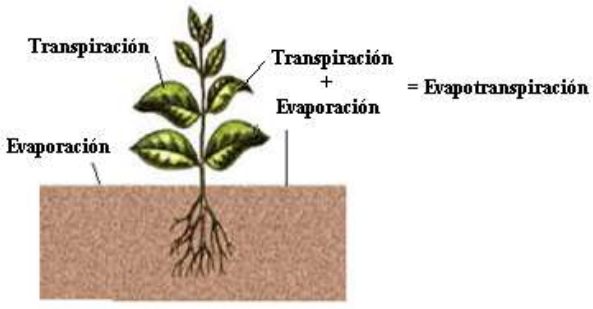
Sustrato	ATD	AFD	AR	ADD	CHS
		% volumen			$m*d^{-1}$
100CAQ	20.62	14. 4	6.0	2.3	60.9
65CAQ	16.80	11. 4	6,6	3.5	75.9
35CAQ	17.32	10. 8	5,6	3.9	64.2

Fuente: Quintero, 2009.

3.3 EVAPOTRANSPIRACIÓN

La evapotranspiración (ET) es la pérdida de agua que ocurre en una superficie como consecuencia de la combinación de los procesos de evaporación de una superficie evaporante (lagos, ríos, mares, suelo y vegetación mojada) y la transpiración de la planta, tal como se muestra en la Figura 3.4, (Allen et al, 2006). La ET es un componente del balance de agua, (Droogers, 2000) y un parámetro importante en la definición de las necesidades hídricas de los cultivos y por consiguiente en la programación de riego de los cultivos.

Figura 3.4. Proceso de evapotranspiración.



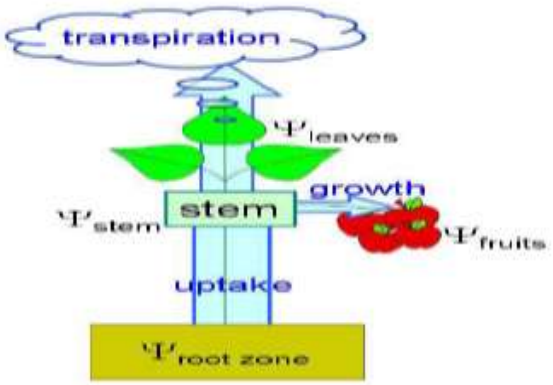
Fuente: Allen et al, 2006.

Se emplea el término ET debido a la dificultad de diferenciar entre los procesos de evaporación y transpiración, los cuales se producen de manera simultánea. El agua que se pierde por transpiración entra a la planta a través de la raíz, pasa al follaje y luego a la atmósfera por medio de la apertura de los estomas, tal como se muestra en la Figura 3.5. Entre tanto, la pérdida de agua a través de la evaporación se presenta por el paso directo del agua disponible en el suelo a la atmósfera, (Brown, 2000).

Salisbury y Ross (1992), referencian el estudio realizado por Hanks (1980) cuyo objetivo fue medir el agua requerida por un cultivo de remolacha a cielo abierto. Encontró que para madurar el cultivo fue necesario aplicar 620 mm de agua procedente de lluvia, donde el 25% se evaporó directamente del suelo y el 75% se transpiró a través de la planta. El autor añade que sólo el 1% del agua que llega a la planta es utilizada para formar la biomasa del cultivo. De aquí que se hable indistintamente en uso consuntivo (el cual incluye el 1% señalado con anterioridad) y evapotranspiración.

En condiciones bajo invernadero, la evaporación es baja como consecuencia del la alta proporción de suelo cubierto por el cultivo, por lo general se desprecia y se habla sólo de transpiración en vez de ET.

Figura 3.5. Esquema del flujo de agua en la planta.



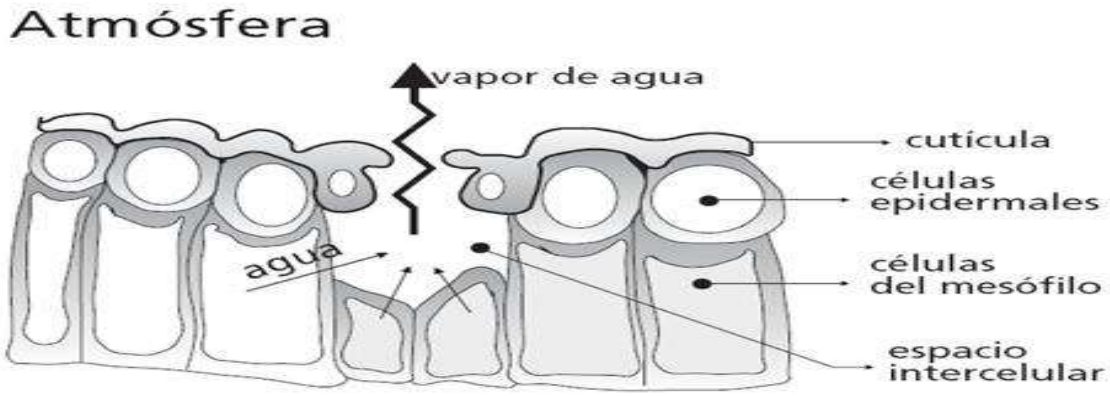
Fuente: Bontsema et al 2007.

3.3.1 Evaporación. Es el proceso mediante el cual el agua en forma líquida se convierte en vapor de agua y luego se remueve de la superficie evaporante. Para el cambio de estado se requiere energía que proviene en gran medida por la radiación solar y en menor grado por la temperatura del aire. La remoción se presenta como resultado de la diferencia de presión de vapor de agua predominante entre la superficie evaporante y la atmósfera en determinado lugar. Cuando la superficie evaporante es un espejo de agua (lago, laguna, mar, etc) en este proceso sólo intervienen parámetros climatológicos tales como la radiación solar, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y la velocidad del viento; pero, cuando se trata de la superficie del suelo, a los parámetros anteriormente mencionados se le suman otro tipo de parámetros como el porcentaje de suelo cubierto por una vegetación dada y la cantidad de agua disponible en la superficie evaporante. (Allen et al, 2006).

La velocidad tasa de evaporación depende del grado de saturación de la atmósfera circundante, por tanto, a medida que el aire se satura esta disminuye hasta el punto de no tener la capacidad de retirar el agua de la superficie evaporante, requiriendo un cambio en las condiciones de humedad de la atmósfera que se genera con una restitución del aire saturado. La velocidad de evaporación también puede llegar a ser nula debido a la limitada disponibilidad de agua en el suelo, tal caso es el que se presenta en zonas con prolongados intervalos de sequía y riegos poco frecuentes, (Allen et al, 2006).

3.3.2 Transpiración. Es el proceso mediante el cual el agua líquida que se encuentra contenida en el espacio intercelular de los estomas se convierte en vapor de agua y pasa a la atmósfera a través de la apertura de estos, (ver Figura 3.6). El agua tomada por la planta a través de las raíces en su mayor parte es transpirada y sólo un bajo porcentaje es empleado en la actividad fisiológica de la misma, (Allen et al, 2006).

Figura 3.6. Esquematización de un estoma durante el proceso de transpiración.



Fuente: Allen et al, 2006.

La transpiración es un proceso vital para las plantas, necesario para enfriar las hojas y transportar agua y nutrientes. Consiste en la emisión de vapor de agua hacia el aire circundante a través de los estomas. Depende de la presión de vapor en la cavidad ubicada

por detrás de los estomas y del aire circundante dentro del invernadero. Aquí, el aire se encuentra saturado con vapor de agua y el aire de la atmósfera circundante se encuentra más seco que este por tanto, el vapor difundirá por el gradiente de concentración. A medida que los estomas se encuentre más abiertos, la difusión será más rápida y la resistencia será menor. La velocidad de transpiración (la velocidad de transporte de vapor de agua) cambia con la diferencia entre la humedad de la hoja y del ambiente. La apertura de los estomas se ve influenciada por la luz, el gradiente de presión de vapor, el dióxido de carbono (CO_2), la temperatura foliar y disponibilidad de agua. La luz es el factor más importante en el control de los estomas, cuando la luminosidad es alta los estomas estarán abiertos. En caso de que el valor del gradiente de presión de vapor es alto o existe déficit de agua, los estomas se cierran para proteger la planta contra la deshidratación, (Estación Experimental de Aalsmeer, 2003).

La pérdida de agua por transpiración se ve influenciada por la capacidad del suelo para conducir agua hacia las raíces, la salinidad del suelo, la calidad del agua de riego, el tipo de cultivo, estado vegetativo, prácticas de manejo y por los factores que afectan el proceso de evaporación, (Allen et al, 2006). Además, interviene en este proceso la radiación solar. A medida que aumenta la radiación solar, las plantas se calientan, se incrementa el gradiente de presión de vapor entre las hojas y el aire circundante y la resistencia total disminuye y por ende aumenta la transpiración, (Estación Experimental de Aalsmeer, 2003).

Salisbury y Ross (1992), explican claramente la razón por la que se pierden altas cantidades de agua durante el proceso de transpiración. Menciona que esto se debe a que las estructuras vegetales están compuestas por átomos de carbono, el cual entra a la planta a través del dióxido de carbono (CO_2) que es obtenido de la atmosfera mediante la apertura de los estomas, elemento por donde se pierde agua hacia la atmosfera, presentando una extensa descripción de la relación fotosíntesis Vs. Transpiración y la manera como intervienen los factores ambientales en el comportamiento de la planta desde el punto de vista fisiológico.

De acuerdo con el texto de autoría de la Estación Experimental de Aalsmeer (2003), los siguientes factores afectan la transpiración del cultivo de rosa:

- ✓ Los pesticidas: Ciertos pesticidas reducen la transpiración y en consecuencia las necesidades hídricas has en un 30-40% durante algunos días.
- ✓ El agobio del vástago primario reduce la transpiración durante más de una semana, el primer día hasta un 50%. Después la reducción deja de ser aparente.
- ✓ Cuando el cultivo entra al pico de producción, la transpiración se reduce hasta en un 70%.

Además de los factores de clima, la transpiración se ve afectada por el tamaño de la planta y labores culturales como poda, agobio, defoliación y cosecha, porque influyen en su grado de intercepción de luz, (Estación Experimental de Aalsmeer, 2003).

3.3.3 Factores que intervienen en la evapotranspiración. Los factores que intervienen están relacionados con las condiciones climatológicas (radiación solar, flujo de calor, viento, humedad relativa y temperatura) y la relación del sistema suelo-planta. Los factores de clima proporcionan la energía necesaria para vaporizar el agua y extraer el vapor desde una superficie evaporante (suelo o vegetación), (Allen et al, 2006; Baille, 1996; Brown, 2000).

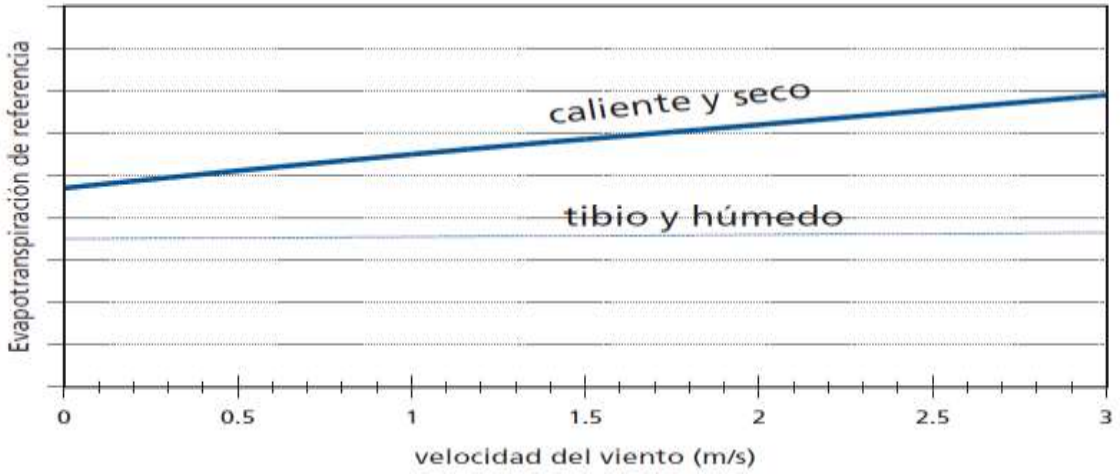
La radiación solar define la cantidad de energía disponible para evaporar el agua, pero hay que tener en cuenta que no toda la energía disponible se utiliza para evaporar; parte de esta energía se emplea para calentar la atmósfera y el suelo, (Allen et al, 2006). Fernández et al (2010), referencian el estudio realizado por De Villele (1974) bajo condiciones de invernadero, en el cual se encontraron estrechas relaciones entre la ET observada y radiación solar medida dentro del invernadero. Los autores mencionados encontraron una reducción del 56% de la radiación solar que ingresa al invernadero en comparación con la radiación solar externa, (Fernández, 2006).

La temperatura juega un papel importante porque el calor sensible del aire circundante transfiere energía al cultivo haciendo que a temperaturas altas la ET se incremente y temperaturas bajas la ET disminuya, (Allen et al, 2006).

La humedad del aire contribuye en el proceso de ET. En condiciones de alta humedad la ET es baja, ya que la diferencia de presión del aire circundante y la superficie evapotranspirante disminuye.

El viento influye en la remoción de agua de la superficie evaporante, porque renueva constantemente el aire circundante a la planta. Si no existiera esta sustitución, la velocidad de transpiración disminuye hasta lograr condiciones de equilibrio en el aire circundante. La Figura 3.7 muestra la relación entre la velocidad del viento con la ET.

Figura 3.7. Esquema del efecto de la velocidad del viento sobre la evapotranspiración en condiciones atmosféricas de secas y caliente comparadas con condiciones húmedas y tíbias.



Fuente: Allen et al, 2006.

El estudio realizado por Jolliet y Baileya (1992) acerca de los efectos del clima sobre la transpiración en un cultivo de tomate bajo invernadero concluyó que la tasa de la transpiración en un invernadero se incrementa linealmente con la radiación solar, el déficit de presión de vapor y velocidad del viento; además, encontró que el factor temperatura del aire y concentración de CO_2 no influyen significativamente. Se obtuvo que para un cultivo joven de tomate un incremento de radiación solar de 1 MJ/m^2/día produce una transpiración de 0.09 mm/día, un incremento en el déficit de presión de vapor de 0.1 kPa (deshumificación de 4% de humedad relativa a 20°C) incrementa la transpiración en 0.013 mm/día y un movimiento del aire de 1 m/s^{-1} incrementa la transpiración a 0.13 mm/día. En un cultivo maduro la radiación solar tiene un efecto ligeramente superior que en un cultivo joven un incremento de 1 MJ/m^2/día incrementa la transpiración en 0.14 mm/día y el déficit de presión de vapor es mayor.

En el sistema suelo-planta, se destacan las condiciones de humedad del suelo y estado fenológico de la planta. Según Brown (2000), la humedad del suelo es el parámetro más importante que interviene en la ET. El tipo de planta está relacionado con la variedad o especie del cultivo y el estado de la planta se relaciona con el tamaño y actividad de crecimiento de la misma. La cantidad de ET producida en un cultivo depende en gran medida de la cobertura del suelo y el área de la hoja expuesta al proceso de transpiración.

3.3.4 Conceptos de evapotranspiración. Existen dos conceptos muy comunes utilizados en la ET: evapotranspiración potencial (ETp) y la evapotranspiración de referencia (ETo).

Evapotranspiración potencial, ETp
Este concepto fue introducido a finales de 1940 y comienzos de 1950 por Penman, quien lo definió como "la cantidad de agua transportada en un tiempo dado de un cultivo verde corto, en un suelo completamente sombreado, de altura uniforme y adecuado estado de agua en el perfil del suelo", (Irmak y Haman, 2003). Debido a la ambigüedad de la definición del cultivo, en especial, en climas cálidos y a la cantidad de cultivos agrícolas y hortícolas que cumplían la condición de cultivo verde y corto se desarrollo el concepto de ETo, (Jensen et al, 1990; Irmak y Haman, 2003).

Evapotranspiración de referencia,ETo
Este concepto fue introducido a finales de 1970 y comienzos de 1980 por ingenieros e investigadores de riego, como consecuencia del vacío teórico del concepto de ETp, (Irmak y Haman, 2003). Allen et al (2006) definen la ETo como la ET de "un cultivo hipotético de pasto, con una altura asumida de 0,12 m, con una resistencia superficial fija de 70 s m-1 y un albedo de 0,23. La superficie de referencia es muy similar a una superficie extensa de pasto verde, bien regada, de altura uniforme, creciendo activamente y dando sombra totalmente al suelo. La resistencia superficial fija de 70 s m-1 implica un suelo moderadamente seco que recibe riego con una frecuencia semanal aproximadamente", (Allen et al, 2006).

Históricamente se han utilizado dos cultivos de referencia: pastos y alfalfa, (Wright et al, 2000; Irmak y Haman, 2003), los cuales han sido bien estudiados de acuerdo a sus características aerodinámicas y superficiales, (Allen et al, 2006).

3.3.5 Unidades de evapotranspiración. Las pérdidas por evapotranspiración se expresan en milímetros (mm) por unidad de tiempo (hora, día, 10 días, mes o año) y definen la cantidad de agua perdida en una superficie cultivada en unidades de altura de agua, (Allen et al, 2006; Brown, 2000). También, esta pérdida de agua se puede expresar en términos de calor latente de vaporización (energía recibida por unidad de área), que es la energía requerida para vaporizar el agua. En la Tabla 3.7 se muestran los factores de conversión más utilizados para expresar la ET en diferentes unidades.

Tabla 3.7. Factores de conversión para expresar evapotranspiración

Unidades	Altura de agua	Volumen por unidad de área		Energía por unidad de área*
	mm	m^3/(ha día)	l/(s día)	MJ/(m^2 día)
1 mm/día	1	10	0.116	2.45
1 m^3/(ha día)	0.1	1	0.012	0.245
1 l/(s día)	8.640	86.40	1	21.17
1 MJ/(m^2 día)	0.4082	4.082	0.047	1
1 W/m^2	0.035271			0.086402

*Para agua con una densidad de 1000 kg/m3 a 20ºC.
Fuente: Allen et al, 2006.

3.4 MÉTODOS PARA ESTIMAR LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO DE REFERENCIA EN INVERNADEROS

Desde finales de la década de los años 40' del siglo pasado se han desarrollado numerosos métodos que permiten estimar la evapotranspiración en cultivos. Estos van desde métodos sencillos que determinan la ET de manera directa con la utilización de lisímetros o balances de aguas en el suelo, a métodos indirectos o micrometeorológicos que consisten principalmente en ecuaciones empíricas con base en variables climáticas[3]. De estas últimas las más sencillas son las basadas en la medida de la temperatura, destacándose los modelos de Thornthwaite (1948) y Blaney y Cliddle (1950). Existen otras ecuaciones, igualmente empíricas, que dependen de la radiación solar como el método de Priestly-Taylor y Jensen-Haise, otros combinan la temperatura y la radiación solar. Más rigurosas resultan aquellas fórmulas basadas en la combinación del balance energético y el transporte convectivo del vapor de agua tal como la ecuación de Penman-Monteith, (Anton et al 2003; Stefano y Ferro, 1997).

Muchas investigaciones de evapotranspiración a campo abierto se han realizado con el fin de comparar distintos métodos de evapotranspiración con la ET medida con lisímetros, tal como los estudios realizados por: Sepaskhah y Ilampour, 1995; Chang et al, 1997; Trambouze et al, 1998; Bonachela et al, 1999; Boulard y Wang, 2000; Tyagi et al, 2000;

[3] En este texto se habla indistintamente de las ecuaciones empíricas o modelos para estimar la ET.

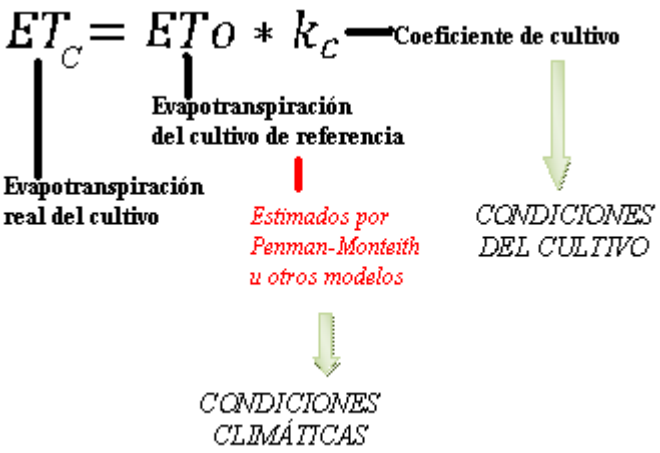
García et al, 2003; Karam et al, 2003; Villalobos et al, 2003; Yunusa et al, 2004; Benli et al 2005; Vu et al, 2005; Adekalu y Fapohunda, 2006; Alexandris et al, 2006; Fuchs et al, 2006; Loos et al, 2007; Lopez-Urrea, 2006; Karam et al, 2007; Schilling y Kiniry, 2007; Stangellini (1987); Villa-Nova et al, 2007; Casanova et al, 2009; y Wen-jin et al, 2010; entre otros.

Pero son pocas las investigaciones desarrolladas en condiciones de invernaderos, se destacan las realizadas a cultivos hortícolas (Orgaz et al, 2005), pepino (Blanco y Folegatti, 2003), lechuga (Casanova et al, 2009; Pollet et al, 2000), pimienta (Gázquez et al, 2008), tomate (Wang y Deltour, 1999; Anton et al 2003; Baptista et al, 2004), calacín (Rouphael y Colla, 2004) y cultivos perennes de pasto (Quaglietta y Zerbi, 1986) citado por Fernández et al (2010). Sobre cultivos de rosa se tiene referencia de los estudios realizados por Baille et al (1994), Katsoulas et al (2001), Baas et al 2006, Kittas et al 2004, Suay et al (2003), Tipis (2006) y Wen-jin et al, 2010. Jacobobs et al (2006) realizó un estudio sobre el consumo y frecuencia de riego en rosa. Cavelier (1999), indica que la evpaotranspiración en la rosa puede variar entre 1.5 y 3.0 mm/día.

Para estimar los requerimientos de agua en los cultivos bajo invernadero se han desarrollado modelos simples basados en el método de Penman-Montieht (1977), (Fernández et al, 2010; Montero et al, 2001). Estos métodos han sido desarrollados por Stanghellini 1987, Jolliet y Bailey 1992, Baille et al 1994, Boulard y Wang 2000, Montero et al 2001, Moller et al 2004, Medrano et al 2008 y la mayor dificultad encontrada para su implementación es la poca información existen sobre la resistencia aerodinámica de los cultivos, (Fernández et al, 2010). Jacobs et al (2005), realizó un estudio sobre el consumo y frecuencia de riego en rosa.

La metodología estándar propuesta en el documento Evapotranspiración del Cultivo (Allen et al, 2006), que tiene como fin determinar los requerimientos de agua en los cultivos usa el producto de la evapotranspiración del cultivo de referencia (ETo) obtenidos mediante la estimación del modelo Penman-Monteith. El valor del coeficiente de cultivo (kc) depende del tipo y estado del cultivo, tipo de suelo y de las condiciones ambientales. La Figura 3.8 expresa la relación que se utiliza para determinar la evapotranspiración real del cultivo ETc. Esta metodología es válida para la estimación de la ET en invernaderos, (Baille, 1996). La Comisión Internacional de Riego y Drenaje (ICID) y la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación (FAO) recomiendan el uso de la ecuación Penman-Monteith para calcular la evapotranspiración de referencia (ETr) con datos climáticos y evaluar la confiabilidad de otros métodos que predicen la ETr, (Stefano y Ferro, 1997; Kashyap y Panda, 2001). Esta ecuación ha sido recomendada por Allen et al (2006) y Lopez-Urrea (2006), aunque otras ecuaciones también han dado buenos resultados como FAO-Radiación (Casanova et al, 2009). El uso de esta ecuación presenta el inconveniente que requiere los datos de clima de radiación solar incidente, temperatura del aire, presión real de vapor de agua, presión de saturación de vapor de agua, velocidad del viento y número de horas reales de sol, las cuales en algunos casos no están disponibles (Kashyap y Panda, 2001).

Figura 3.8. Definición de la evapotranspiración de acuerdo con la metodología FAO-56 (Allen et al, 2006).

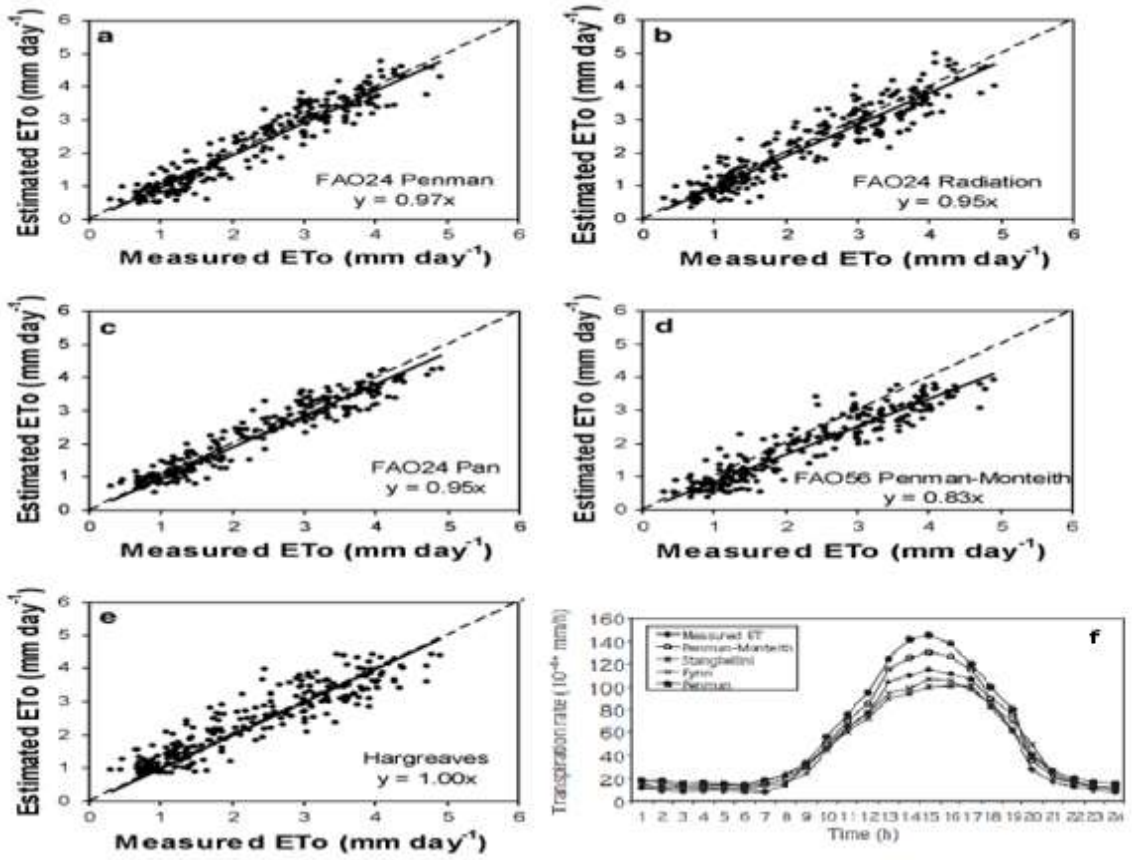


Un estudio llevado a cabo por el Centre Commun de Recherche of the Euopean Economic Community (1992) y referenciado por Stefano y Ferro (1997), compara los valores de ET obtenidos utilizando la ecuación de Penman-Monteith (1977) con nueve métodos micrometeorológicos y se obtuvo que la formula de Hargreaves-Samani (1987) fue la que presentó datos más cercanos a la ecuación PM para las condiciones europeas. Casanova et al (2009), comparó la evapotranspiración del cultivo de lechuga bajo condiciones invernadero obtenida por los métodos de tanque de evaporación Clase A, atmómetros de Piche, tanque de evaporación, la ecuación de Penman-Monteith (1977) y la ecuación FAO-Radiación con la evapotranspiración determinada directamente a partir de las mediciones de balance hídrico con lisímetro y encontraron que el método que más se ajusta a los valores obtenidos con el lisímetro fue el tanque de evaporación.

El método de radiación y Hargreaves-Samani (1987) son los métodos recomendados para determinar la ET en invernadero por su sencillez, (Fernández et al, 2010). La formula de Blaney-Criddle se sigue utilizando pero la incertidumbre inherente a este tipo de fórmula es alta, (Baille, 1996). Pero el método Penman-Monteith es el que mejores resultados presenta (ver ítem 3.6).

La Figura 3.9 muestra la comparación de diferentes métodos de ET con los valores obtenidos con lisímetros en condiciones de invernadero para un cultivo de pastos perenes.

Figura 3.9. Evapotranspiración medida con lisimetro y estimada por varios métodos en invernadero. a), b), c), d) y e) Promedio de semanal durante los años 1993-1999. f) Comparación con métodos Penman-Monteith (1977) y Stanghellini (1987).



Fuente: Fernández, 2009. (a-e)
Kirnak et al 2002. (f)

A continuación se describen las ecuaciones de ETo que se emplearon en este trabajo. Estas se basan principalmente en parámetros de clima tales como temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, número de horas de sol y radiación solar (ver Tabla 3.8), los cuales se encuentran disponible en el invernadero experimental.

Tabla 3.8. Parámetros requeridos por las ecuaciones de evapotranspiración potencial.

Parámetros	PM	St	PT	An	HS	BM	JH	Ma	Th	Tu	Ev
Temperatura	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	
Humedad relativa	o					o					
Velocidad del viento	o										
Horas de sol	o									o	
Radiación solar	o	o	o	o	o		o	o			
Evaporación											o
Índice de área folear		o		o							

PM: Penman-Monteith (1977), St: Stanghellini (1987), PT: Priestley-Taylor (1972), An: Anton (2003), HS: Hargreaves-Samani (1985), BM: Blaney-Morin (1950), JH: Jensen-Haise (1963), Ma: Makkink (1957), Th: Thornthwaite (1948), Tu: Turc (1961), Ev: Tanque de evaporación.

3.4.1 Ecuación de Penman-Monteith (1977). Esta ecuación combina el balance de energía con el método de transferencia de masas. La ecuación se define en términos de datos de clima (horas de sol, temperatura, humedad y velocidad del viento), resistencia aerodinámica y resistencia superficial. Se expresa de la siguiente manera:

$$ETo = \frac{1}{\lambda} * \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a c_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma\left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)}$$

3.4.2 Ecuación de Stanghellini (1987). Se basa en la ecuación de Penman-Monteith (1977). Se desarrollo para condiciones de invernaderos con velocidades del viento inferiores a 1.0 m/s, en un cultivo de tomate bien desarrollado, (Donatelli et al, 2006). Esta ecuación se expresa de la siguiente manera:

$$ETo = 2 * IAF * \frac{1}{\lambda} * \frac{\Delta\,(R_n - G) + K_T \frac{DVP * \rho * C_p}{r_R}}{\Delta + \gamma\left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)}$$

El IAF se determinó mediante el despeje de la siguiente ecuación:

$$R_n = 0.86 * (1 - e^{-0.7 * IAF})$$

Fuente: Bontsema et al, 2007a.

3.4.3 Ecuación Priestley-Taylor (1972). Se utiliza para estimar ETo diaria basada en términos aerodinámicos como la humedad relativa y el viento, (Donatelli et al, 2006):

$$ETo = \frac{1}{\lambda} * \Delta * \frac{R_n - G}{\Delta + \gamma} * \alpha' * K_w$$

3.4.4 Ecuación Anton (2003). Esta ecuación es una modificación de la ecuación de Penman-Monteith que depende de la radiación solar que atraviesa el invernadero, el índice de área folear (LAI) y el déficit de presión de vapor (VPD), la cual fue propuesta por Anton et al (2003).

$$ET_o = 0.5(1 - e^{-0.64 * IAF}) * Rs * K_w + 8.6 * IAF * DPV * K_w$$

3.4.5 Ecuación Hargreaves-Samani (1985). Esta ecuación se describe en términos de la radiación solar y la temperatura media del aire, se expresa de la siguiente manera:

$$ETo = 0.0135 * R_s(T_{med} + 17.8)$$

La radiación solar neta se define en esta ecuación como $R_s = K_{rs} * R_a * (T_{máx} - T_{mín})^{0.5}$, donde Krs: 0.16 ºC-1 para zonas interiores y 0.1 ºC-1 para zonas costeras.

3.4.6 Ecuación Blaney-Morin (1950). Se define en términos de la temperatura media del aire, el porcentaje de horas máximas de sol y la humedad relativa:

$$ETo = \frac{Tmed * p}{100}(114 - HRmed)$$

3.4.7 Ecuación Jensen-Haise (1963). Esta ecuación está en términos de la temperatura media y la radiación solar. Se expresa de la siguiente manera:

$$ET_o = (0.014\, T_{med} - 0.37) * R_s$$

3.4.8 Ecuación Makkink (1957). Es una ecuación que se define en términos de la constante psicrométrica, la radiación solar y la pendiente de la curva de presión de vapor de saturación que está en función de la temperatura. Se expresa de la siguiente manera:

$$ET_o = 0.61 \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma}\right) R_s - 0.12$$

3.4.9 Ecuación Turc (1961). Se basa en la radiación solar y la temperatura media del aire. Se expresa de la siguiente manera:

$$ET_o = 0.4 * (R_s + 50) * \left(\frac{T_{med}}{T_{med} + 15}\right)$$

3.4.10 Ecuación de Thornthwaite (1948). Esta basada en la determinación de la ETo en función de la temperatura media y el índice de calor que depende de la temperatura. Se utiliza para determinar la ETo mensual en mm. Thornthwaite encontró que la ETo presenta una relación directa con la temperatura media y se vé afectada por un cociente exponencial que depende del índice de de calor anual. La expresión es la siguiente:

$$ET_o = 16 \left(10\, \frac{T_{med}}{I}\right)^a$$

Para obtener valores de ETo promedio en mm/día se divide el resultado entre el número de días del mes.

3.4.11 Ecuación de Balance Hídrico. Este balance se describe en función de las entradas, salidas y almacenamiento de agua. Se expresa de la siguiente manera:

$$Diferencias\ en\ el\ contenido\ de\ humedad = Entradas - Salidas$$

$$\Delta\theta_i = R_i - ET_i + D_i$$

$$\Rightarrow ETo_i = R_i - D_i \pm \Delta\theta_i$$

3.4.12 Ecuación del Tanque de Evaporación:

$$ET_p = k_c k_p E_{pan}$$

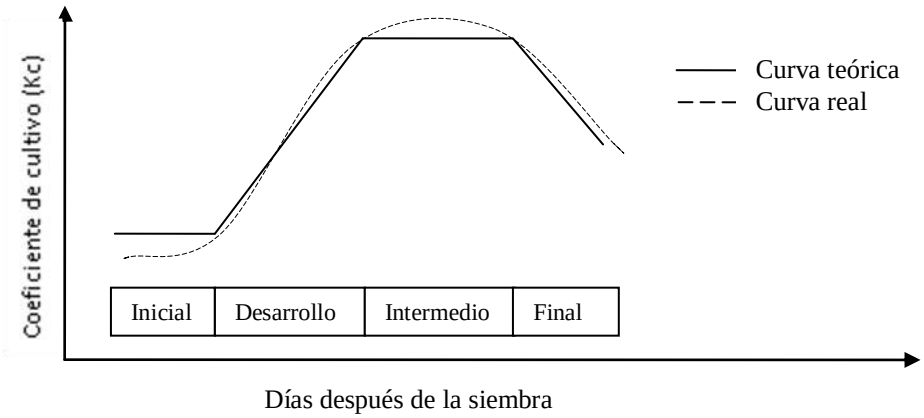
Debido a los numerosos datos que requiere la ecuación Penman-Monteith, su uso en invernaderos es complejo. Es más frecuente obtener el valor de ET mediante el método de tanque de evaporación Tipo A, (Casanova, 2009).

3.5 COEFICIENTE DE CULTIVO (kc)

Es un coeficiente que tiene en cuenta las características del cultivo y los efectos promedios de la evaporación en el suelo (Allen et al, 2006) y se describe las variaciones de la cantidad de agua que las plantas extraen del suelo a medida que se van desarrollando, desde la siembra hasta la recolección[4].

El kc está relacionado con las fases de crecimiento del cultivo y se define a través de la curva de kc, ver Figura 3.10. La curva describe cuatro fases: inicial, desarrollo del cultivo, mediados de temporada o intermedia y final de temporada. La fase inicial va desde la siembra hasta que el cultivo alcanza un 10% de la cobertura del suelo. La fase de desarrollo, empieza cuando termina la etapa anterior y va hasta el crecimiento activo de la planta. La fase intermedia, va desde la floración hasta que el cultivo alcanza el 70-80% de cobertura máxima de cada cultivo. La fase final, va desde la madurez hasta la cosecha.

Figura 3.10. Curva del coeficiente de cultivo.



[4] http://www.elriego.com/informa_te/riego_agricola/fundamentos_riego/programacion_riegos/necesidades_agua.htm. Consultado 18/06/2010.

El kc se define como la relación entre la ET real (ETc) y la ETr.

$$k_c = \frac{ETc}{ETr}$$

Rodríguez (1998), recomienda utilizar en plantas de rosa un coeficiente de cultivo de 0.94 en la programación de riego para la optimización de la producción y la generación de una lámina mínima de drenaje. Los resultados de su estudio arrojaron coeficientes de cultivo de 0.751, 0.804, 0.931 y 1.247. Estos coeficientes no se encuentran definidos en términos de los diferentes estadios fenológicos de la planta.

Obando y Santana (2000), concluye que el menor comportamiento de las variables vegetativas (número de hojas, área foliar, peso seco, número de basales y medias piernas nuevas) y de calidad se presentó para coeficientes de cultivo entre 0.81 y 1.0.

Como las plantas de rosa pertenecen a la familia de las Rosáceas, este cultivo se puede comparar con cultivos de este mismo tipo como la manzana, pera, durazno, moras y fresa[5]. La Tabla 3.9 presenta los valores de coeficiente de cultivo para las fases de desarrollo vegetativo inicial, intermedio y final para diferentes cultivos pertenecientes a la familia de las Rosáceas.

Tabla 3.9. Valores de coeficiente de cultivo (promedio temporal) para cultivos no estresado y bien manejados en clilmas sub-húmedos (HRmin ≈ 45% y u_2 ≈ 2 m/s).

Cultivo	k_{cin}	k_{cint}	k_{cfin}
Duraznos o melocotón			
-Sin cobertura del suelo, con fuertes heladas	0.45	0.95	0.70
-Sin cobertura del suelo, sin heladas	0.55	0.95	0.75
-Cobertura activa del suelo, con fuertes heladas	0.50	1.20	0.95
-Cobertura activa del suelo, sin heladas	0.80	1.20	0.85
Manzanas, peras			
-Sin cobertura del suelo, con fuertes heladas	0.45	0.90	0.65
-Sin cobertura del suelo, sin heladas	0.60	0.90	0.65
-Cobertura activa del suelo, con fuertes heladas	0.50	1.15	0.90
-Cobertura activa del suelo, sin heladas	0.80	1.15	0.85
Fresa	0.40	0.85	0.75
Moras	0.30	1.05	0.5

Fuente: Allen et al, 2006.

[5] La rosa y la mora son arbustos, la fresa es herbácea con los otros cultivos son árboles.

3.6 INDICES ESTADISTICOS UTILIZADOS PARA DETERMINAR LA BONDAD DE AJUSTE DE MODELOS EVAPOTRANSPIRACIÓN

Los índices estadísticos constituyen una herramienta objetiva que proporcionan cuantitativamente un valor que permite comparar diferentes modelos, ello con el fin de establecer el modelo que mejor represente a los valores observados.

Los índices más utilizados son el error cuadrático medio (ECM) y la raíz del error cuadrático medio (RECM).

Estos índices se expresan de la siguiente manera:

$$ECM = \frac{\sum_{i=i}^{M} |P_i - O_i|}{M}$$

$$RECM = \sqrt{\frac{\sum_{i=i}^{M} (P_i - O_i)^2}{M}}$$

Muchas investigaciones relacionadas con la evapotranspiración han utilizado estos índices para establecer el mejor ajuste de modelos de evapotranspiración potencial con datos observados. Entre estos estudios se destacan los realizados por Sepaskhah y Ilampour 1995, Fennessey y Vogel 1996, Jacovides y Kontoyiannis 1995, Bormann et al 1997, Stefano y Ferro 1997, Tyagi et al 2000, Boulard y Wang 2000, Medeiros et al 2000, Kashyap y Panda 2001, Kirnak et al 2002, Li et al 2003, Yunusa et al 2004, Blanco y Folegati 2004, Benli et al 2005, Miranda et al 2005, Vu et al 2005, Katerji y Rana 2006, Lopez-Urrea 2006, Cai et al 2007, Sepaskhah et al 2006 y Wen-jin et al 2010.

En la Tabla 3.10 se presentan los valores de los índices estadísticos de determinación y correlación más altos obtenidos por diferentes métodos de evapotranspiración.

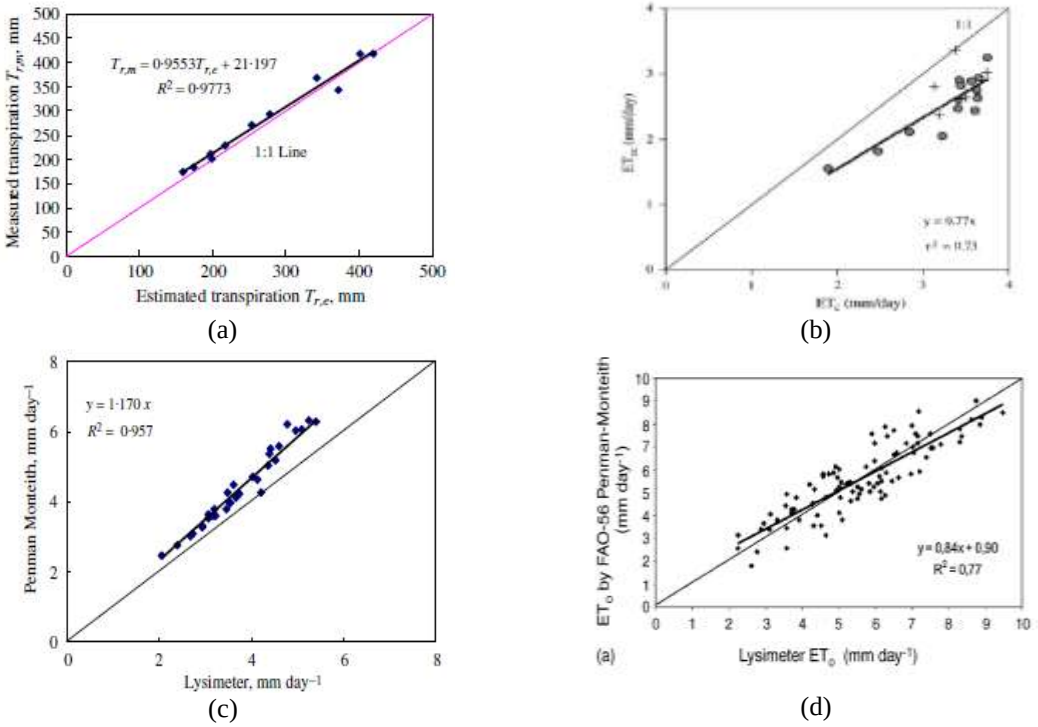
Tabla 3.10. Valores de índices estadísticos más utilizados en estudios de evapotranspiración y mejor método de ajuste de evaptoranspiración.

Referencia	Método	Coeficiente de determinación (R^2)	Coeficiente de correlación (R)
Jacovides y Kontoyiannis, 1995	Aerodinámico	0,991	
Boulard y Wang, 2000	Penman-Monteith (1977)	0,99	
Tyagi et al, 2000	Blaney-Criddle (1950)	0,98	
Sepaskhah et al, 2006	Penman-Monteith (1977)	0,98	
Villa-Nova et al, 2007	Penman-Monteith (1977)	0,97	
Tyagi et al, 2000	Penman-Monteith (1977)	0,94	
Lopez-Urrea, 2006	Penman-Monteith (1977)	0,77	
Paco et al, 2006	Penman-Monteith (1977)	0,73	
Kirnak et al, 2002*	Penman-Monteith (1977)	0,70	
Kashyap y Panda, 2001	Penman-Monteith (1977)	0,71	
Kirnak et al, 2002*	Stanghellini (1987)	0,645	
Loos et al, 2007	Penman-Monteith (1977)		0,745

*Estudio realizado en invernadero.

La Figura 3.11 muestra diferentes resultados de investigación que utilizan el coeficiente de determinación.

Figura 3.11. a) Relación entre transpiración medida y estimada en un cultivo de guisantes. b) Comparación entre evapotranspiración medida y la evapotranspiración estimada por la ecuación de Penman-Monteith para un cultivo de melocotón. c) y d) Comparación entre la evapotranspiración de referencia estimada por la ecuación de Penman-Monteith y la evapotranspiración medida con lisimetros. (e) Transpiración promedio horario para diferentes modelos de ET en condiciones de invernadero.



Fuente: Sepaskhah et al, 2006. (a); Paco et al, 2006. (b); Villa-Nova et al, 2007. (c); Loos et al, 2007. (d).

3.7 EVALUACIÓN DE LOS SISTEMAS DE RIEGO POR GOTEO

La evaluación de los sistemas de riego por goteo teniendo en cuenta diferentes aspectos. Inicialmente se presentan algunas definiciones.

3.7.1 Coeficiente de variación de fabricación (υ). Es un índice estadístico que permite establecer la variación en la descarga de emisores de un mismo tipo y fabricante para la misma presión de operación. El coeficiente de variación (υ) relaciona la desviación estándar (σ) de las 50 menores muestras (todas a la misma presión de trabajo) con el promedio de la descarga ($\bar{q}$), (Merkley et al, 2004). Se expresa así:

$$\upsilon = \frac{\partial}{\bar{q}}$$

Donde:

υ: Coeficiente de variación de fabricación, adimensional

σ: Desviación estándar de las 50 menores muestras, todas a la misma presión de trabajo, expresada en l/s

$\bar{q}$: Promedio de descarga, expresada en l/s

La Tabla 3.11 muestra en la clasificación del coeficiente de variación de fabricación de acuerdo con Solomon (1979):

Tabla 3.11. Interpretación de la clasificación estándar del coeficiente de variación de fabricación (υ) según Solomon (1979).

Clasificación	Valor del coeficiente de variación (υ)
Excelente	<0.05
Promedio	0.05-0.07
Marginal	0.07-0.11
Pobre	0.11-0.15
Inaceptable	>0.15

Merkley et al, 2004

La determinación del coeficiente de variación es importante en el diseño y evaluación de los sistemas de riego por goteo porque la descarga de los emisores puede afectar la lámina de riego de los cultivos y podrían ser menores o mayores a las establecidas en el diseño original.

3.7.2 Medida de uniformidad. La cuantificación de la uniformidad del riego puede expresarse en términos de la uniformidad de distribución y el coeficiente de uniformidad de Christiansen (1942).

- ✓ *Coeficiente de uniformidad de distribución (UD)*: Expresa la homogeneidad de la lámina infiltrada en el campo mediante la relación porcentual entre el promedio del cuarto inferior de la lámina infiltrada y el promedio de lámina infiltrada, (Chinchilla et al, 2008):

$$DU = \frac{Promedio\ lámina\ infiltrada_{\left(\frac{1}{4}inferior\right)}}{Promedio\ de\ lámina\ infiltrada} * 100\%$$

A continuación se presenta una clasificación del coeficiente de distribución de uniformidad:

Tabla 3.12. Calificación de la instalación según el coeficiente de uniformidad (CU).

Coeficiente Distribución de uniformidad (%)	Calificación
>94	Excelente
86-94	Buena
80-86	Aceptable
70-80	Pobre
<70	Inaceptable

Fuente: Martín, 2004.

- ✓ *Coeficiente de Uniformidad de Christiansen (CU)*: Es una relación porcentual que tiende a comparar los valores individuales de caudales de descarga con el promedio de los valores obtenidos en campo. Se expresa de la siguiente manera:

$$UD = \frac{\overline{q}_{\left(\frac{1}{4}\right)}}{\overline{q}} * 100\%$$

El coeficiente de uniformidad en términos de la desviación estándar se expresa así:

$$\boldsymbol{CU = 100 * \left(1.0 - \frac{s}{M}\sqrt{\frac{2}{\pi}}\right)}$$

- ✓ Para coeficientes de uniformidad superiores al 70%, los datos tienden a una distribución normal.
- ✓ CU = 100% para S=0.

Los coeficientes que miden la uniformidad de riego pueden relacionarse a través de las siguientes ecuaciones:

$$\boldsymbol{CU \approx 100 - 0.63 * (100 - UD)}$$
$$\boldsymbol{UD \approx 100 - 1.59 * (100 - CU)}$$

Chincilla et al (2008), presentan una clasificación de la distribución de uniformidad del sistema integrado del coeficiente de variación de fabricación y el coeficiente de distribución tal como se muestra en la Tabla 3.13.

Tabla 3.13.Clasificación de la distribución de uniformidad del sistema de riego.

Coeficiente de variación de fabricación	Coeficiente de uniformidad de distribución (%)	Clasificación de Distribución de Uniformidad
<0.05	>90	Excelente
0.05-0.08	85-90	Buena
0.05-0.08	80-85	Regular
>0.08	<80	Mala

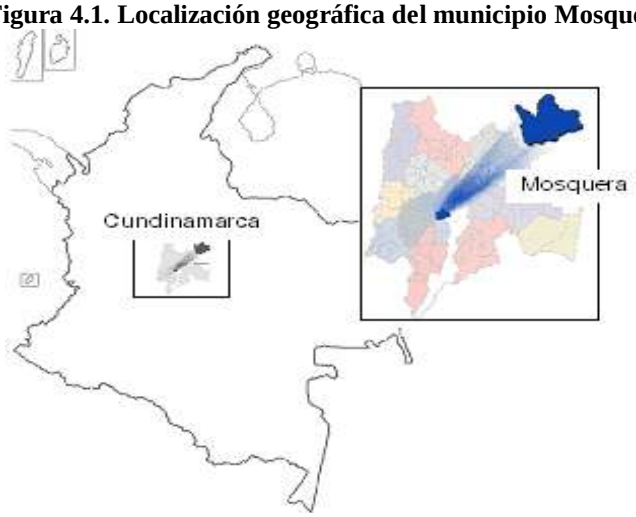
Fuente: Chichilla et al (2008).

4 MATERIALES Y METODOS

Este experimento se llevó a cabo en un invernadero de rosa localizado en las instalaciones del Servicio Nacional de Aprendizaje – SENA, en el municipio de Mosquera (Cundinamarca). El invernadero hace parte del proyecto *Producción más limpia de rosa (Rosa sp.) y clavel (Dianthus caryophyllus L.) con dos técnicas de cultivo sin suelo en la Sabana de Bogotá*, liderado por la Universidad Nacional de Colombia.

El municipio de Mosquera está ubicado al sur de la Sabana de Bogotá a 2,516 m.s.n.m. Se caracteriza por presentar una temperatura promedio de 13.1 ºC con mínimos de 6.5ºC y máximos de 19.2 ºC, una humedad relativa media de 80.75 %, un brillo solar diario medio de 4.6 h, velocidad del viento de 1,7 m/s y una precipitación anual media de 671 mm[6]. En la Figura 4.1, se muestra la ubicación del municipio con respecto al territorio colombiano.

Figura 4.1. Localización geográfica del municipio Mosquera (Cundinamarca)



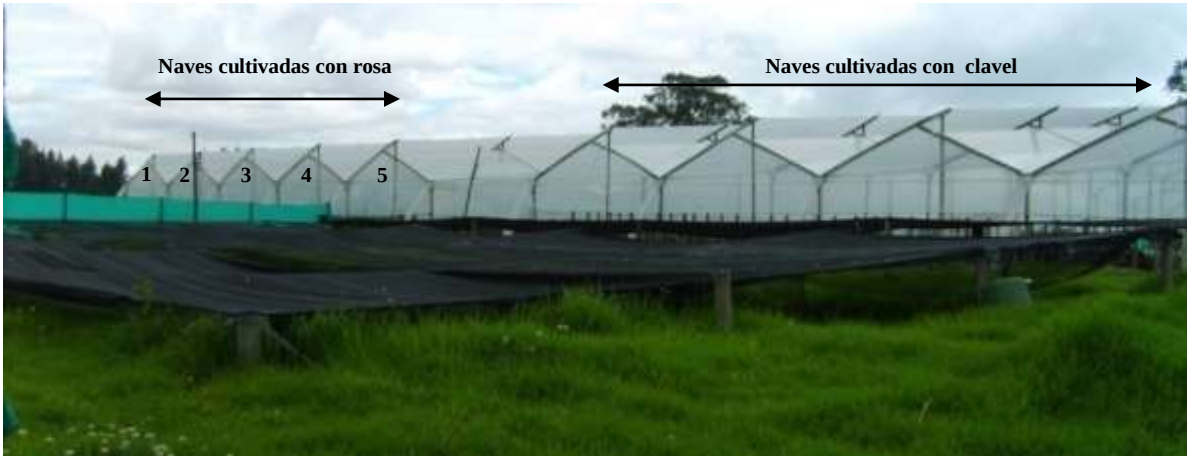
Fuente: http://mosquera-cundinamarca.gov.co/nuestromunicipio.
Consultado: 12 de mayo de 2010.

4.1 INFRAESTRUCTURA

El experimento se realizó en un invernadero tipo tradicional en madera, con "carevacas" metálicas y cimentación en concreto tensionado con alambre y guaya. Este invernadero cuenta con nueve naves, cubiertas con filme plástico (Agroclear NXF), las cuales tienen un sistema de ventilación cenital y cortinas laterales manuales que permiten la ventilación pasiva del invernadero; cinco naves se encuentran cultivadas con rosa y las otras cuatro sembradas con clavel. La Figura 4.2 muestra una vista general del invernadero y la Figura 4.3 presenta la ubicación del experimento dentro de las naves de rosa.

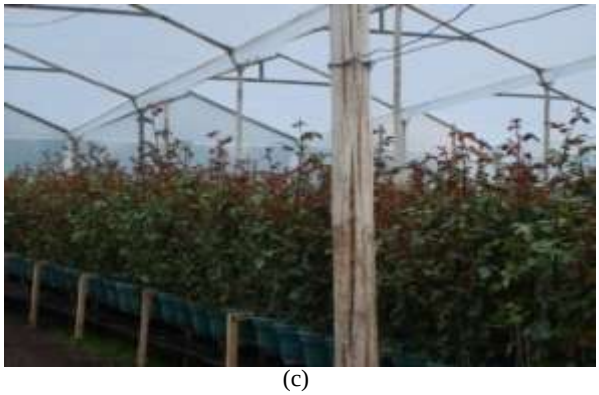
[6] Datos climatológicos tomados de la estación de Tibaitatá, Sabana de Bogotá disponibles en www.ideam.gov.co. Consultado 12 de mayo de 2010.

Figura 4.2. Invernadero del proyecto Producción más limpia de rosa (Rosa sp.) y clavel (Dianthus caryophyllus L.) con dos técnicas de cultivo sin suelo en la Sabana de Bogotá. (a) vista general; (b) rosa cultivada en suelo; (c) rosa cultivada en sustratos; (d) clavel cultivado en suelo; (e) clavel cultivado en sustratos.



(a)

(b)

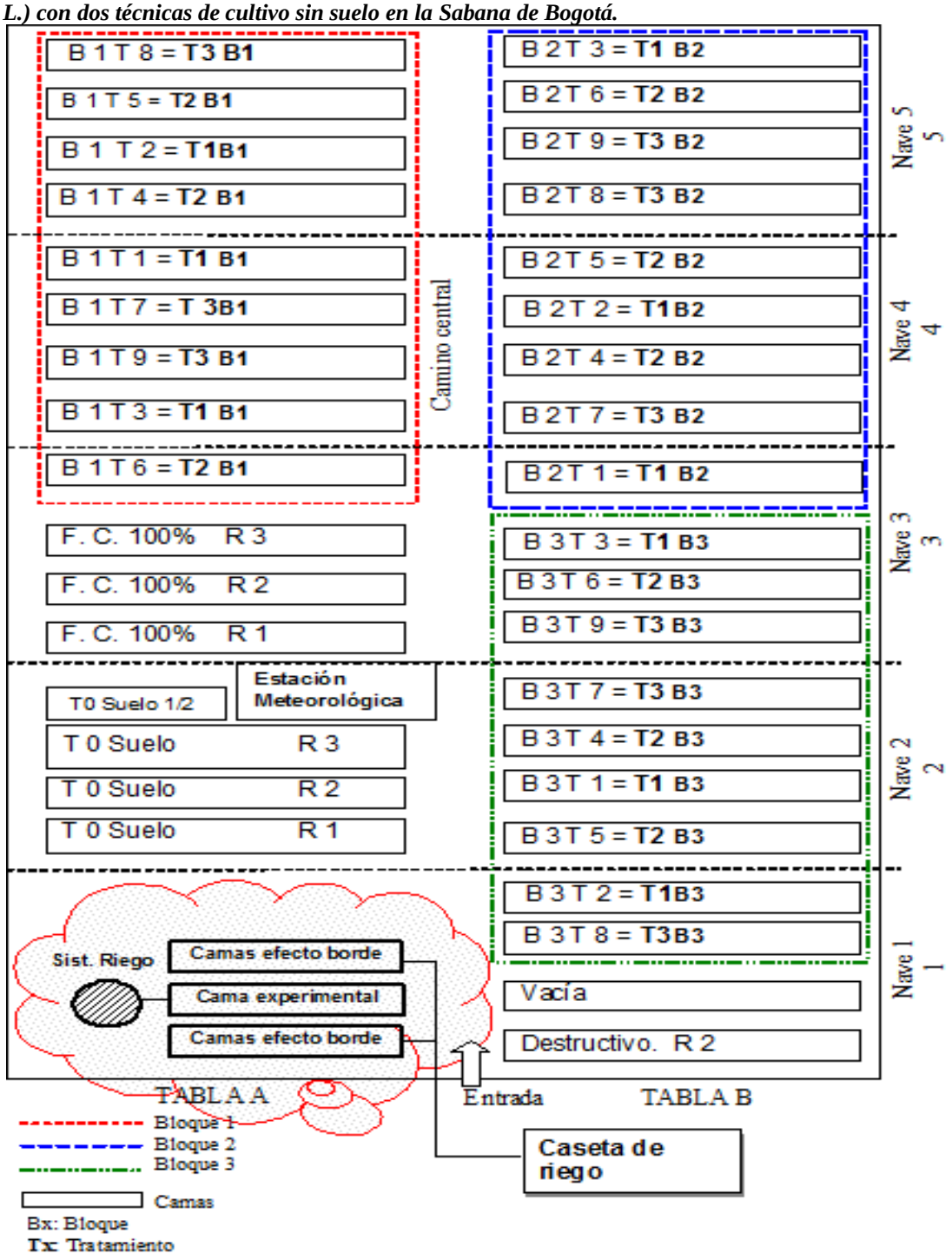


(c)

(d)

(e)

Figura 4.3. Ubicación del experimento de ETc en rosa dentro del invernadero y distribución de los tratamientos del proyecto *Producción más limpia de rosa (Rosa sp.) y clavel (Dianthus caryophyllus L.) con dos técnicas de cultivo sin suelo en la Sabana de Bogotá.*



Fuente: Flórez et al, 2006.

El invernadero cuenta con una estación meteorológica marca HOBO y un tanque de evaporación tipo HIMAT fondo negro, los cuales se encuentran localizada dentro de la nave 2 de rosa. La estación contaba con sensores que permitieron el registro de variables meteorológicas como radicación solar, radiación fotosintéticamente activa, temperatura del aire, temperatura de punto de rocío y humedad relativa. La Figura 4.4 muestra los equipos que para este fin están instalados en el invernadero.

Figura 4.4. Equipos de medición de clima. (a) Ubicación de estación meteorológica y tanque de evaporación tipo HIMAT fondo negro; (b) Estación meteorológica marca HOBO, se muestra sensor de temperatura y humedad relativa.

(a)

(b)

Se obtuvo información de clima fuera del invernadero, de una estación ubicada en el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA) sede Tibaitatá localizada a aproximadamente a 250 m del invernadero para el mismo periodo de experimentación.

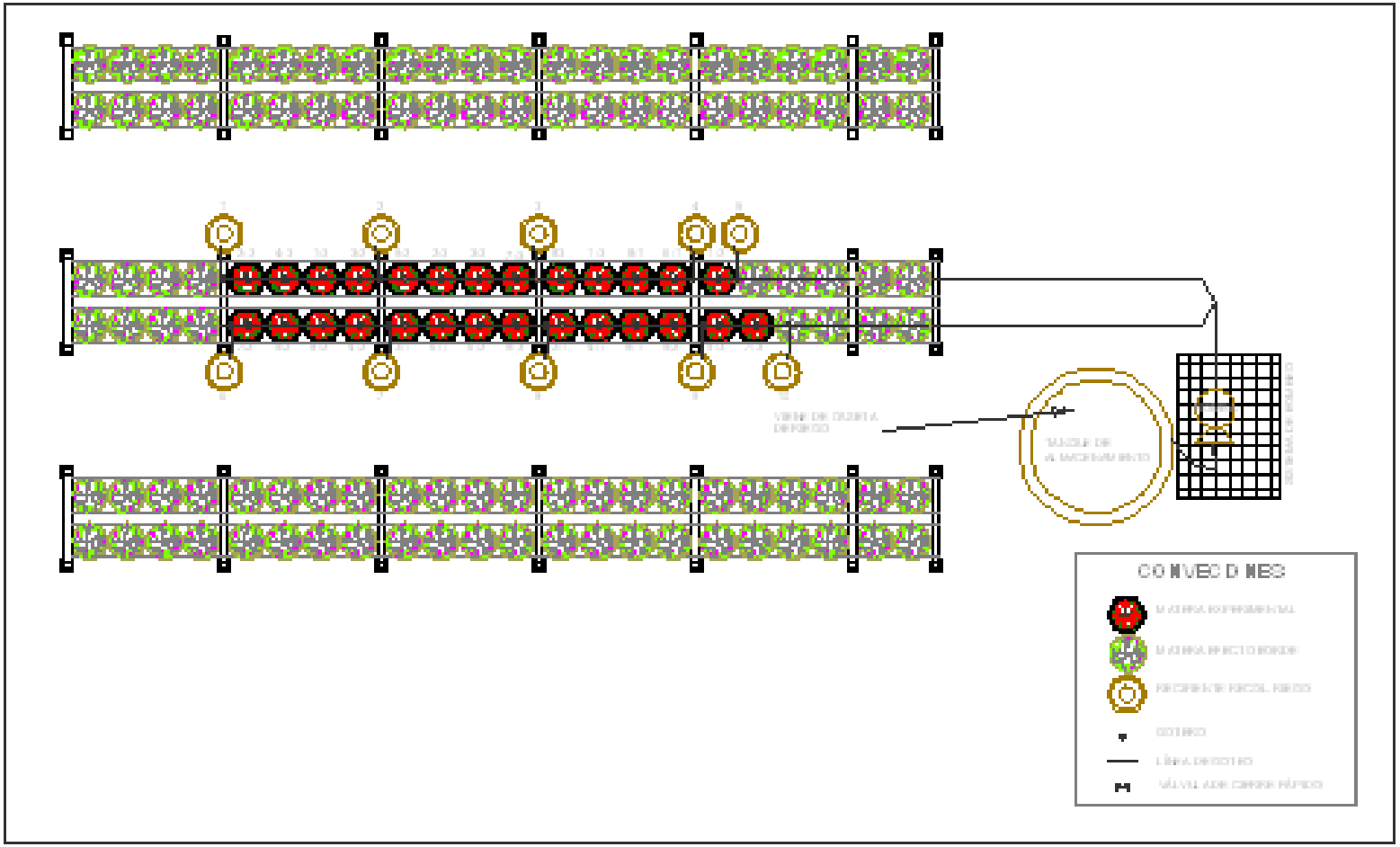
4.2 DISEÑO EXPERIMENTAL

El experimento consistió en determinar la ETc diaria en rosa (*Rosa sp*.) mediante el método de balance hídrico y establecer el efecto de los diferentes tipos de sustrato sobre la ETc.

Para ello, se utilizó un diseño experimental completamente aleatorizado compuesto por tres tratamientos y nueve réplicas/tratamiento. Los tratamientos fueron 100CAQ (100% cascarilla de arroz quemada), 65CAQ (65% cascarilla de arroz quemada más 35% fibra de coco) y 35CAQ (35% cascarilla de arroz quemada más 65% fibra de coco). Los sustratos estaban contenidos en materas o contenedores de rosa (CR), los cuales se utilizaron como lisímetros.

La figura 4.5 muestra el detalle del experimento. Se observa el arreglo al azar de los tratamientos en la cama experimental (CE), la ubicación del sistema de riego propio del experimento y las líneas de riego, entre otros aspectos.

Figura 4.5. Disposición del diseño experimental.



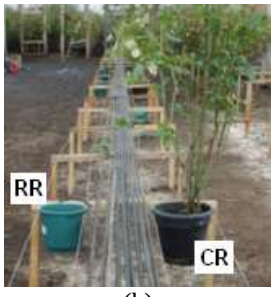
Para llegar a este diseño experimental se realizaron dos ensayos previos. Estos ensayos tuvieron algunos problemas y producto de la experiencia in situ, se mejoró el diseño experimental final de esta investigación. La variable respuesta de los experimentos mencionados fue la ETc diaria en rosa. Se utilizaron los mismos tratamientos pero con diferente tamaño de unidad experimental (UE). En el primer ensayo se contó con una UE de 81 CR[7] y en el segundo ensayo se emplearon 27 CR[8]. A continuación se describen las características de cada ensayo:

- ✓ Ensayo 1: se construyó una CE de 30 m de longitud con dos hileras, en una hilera se colocaron los CR y en la otra los recipientes empleados para recoger el agua de riego diario (RR), estos se ubicaron enfrente de los CR. Los recipientes se instalaron sobre guayas de 1/8" a 50 cm del suelo. Debajo de cada CR se colocó un recipiente recolector de agua de drenaje (RD) y un embudo elaborado en bolsa plástica y aro de alambre que se apoyada sobre una guaya. El embudo tuvo como finalidad canalizar el agua drenada por cada CR hacia los RD. La Figura 4.6 muestra fotografías del proceso de montaje descrito en este párrafo.

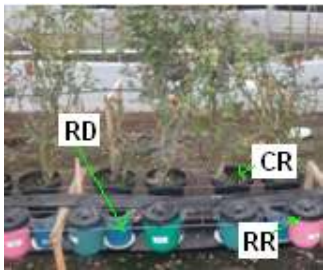
  Este ensayo utilizó un sistema de riego por goteo, que se abastecía del agua proveniente del invernadero. Se instalaron 81 goteros. Estos elementos contaban con un accesorio tipo cruceta con cuatro salidas en microtubos, se asumió que la descarga de agua por salida era la misma y por tanto fue válido considerar que dos salidas se utilizaran para proveer de riego el CR y dos para el RR, de esta forma la cantidad de agua que llegaba al CR era la misma que se almacenaba en el RR. La Figura 4.7 muestra fotografías correspondientes al montaje del sistema de riego en la CE.

Figura 4.6. Montaje de la cama experimental para el ensayo 1. (a) Construcción de cama experimental de 30 m de longitud; (b), (c), (d) disposición al azar de los tratamientos; (e) construcción de embudos para canalizar drenaje; (f) ubicación de recipientes de drenaje en cama experimental.

(a)



(b)



(c)

[7] Se escogieron 3 contenedores por cada cama del proyecto *Producción más limpia de rosa (Rosa sp.) y clavel (Dianthus caryophyllus L.) con dos técnicas de cultivo sin suelo en la Sabana de Bogotá.*
[8] Se seleccionó un contenedor de cada réplica del primer ensayo.

Figura 4-6. (continuación)

(d)

(e)

(f)

Figura 4.7. Montaje del sistema de riego para el ensayo 1. (a) Caseta de riego del invernadero; (b) bomba y válvulas de riego para el cultivo de rosa en el invernadero; (c) derivación del riego para el ensayo; (d) montaje de líneas de distribución de riego en CE e instalación de goteros; (e) gotero y salidas; (f) distribución de las salidas de los goteros.

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

(d)

Durante el desarrollo de este ensayo se tomaron datos para determinar la cantidad de agua regada y drenada y el cambio en el contenido de humedad en los CR. Para esto, se pesaron diariamente los RR, RD y CR. La Figura 4.8 muestra el proceso de pesaje diario de los recipientes.

Figura 4.8. Toma de datos diarios para el ensayo 1. (a) Peso de RR; (b) peso de RD; (c) peso de CR.

(a)

(b)

(c)

En este ensayo se presentaron los siguientes inconvenientes:

1. El riego del experimento dependía del sistema de riego del invernadero y por ende no aseguraba la dosis de riego necesaria para producir drenaje diario en cada CR.

2. En campo se comprobó que la descarga de agua por cada salida en los goteros no fuera la misma y por ende no fue valido considerar que la cantidad de agua regada en cada CR era igual al agua de riego almacenada en los RR. Esto se detectó porque en algunas ocasiones antes de realizar las medidas se apreciaban los sustratos secos y los RR llenos.

3. Como se tenían que manipular diariamente las plantas de rosa para pesarlas, una vez se alzaban los tallos tenían que desenredarse y se perdía follaje. Ello afectaba el peso de la planta y por tanto el balance hídrico. Adicionalmente, debido a este maltrato las plantas se estresaron, no crecieron y parecía un cultivo muy diferente al resto del invernadero.

4. Los embudos plásticos no funcionaban adecuadamente, quedaban restos de agua acumulados en estos.

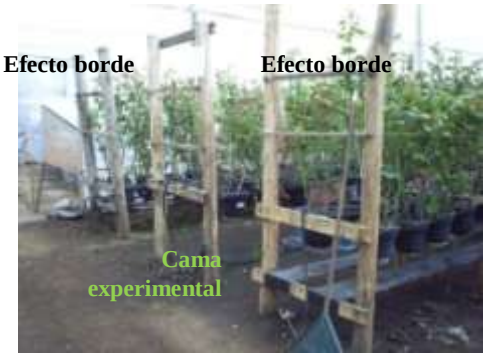
5. El arreglo del diseño experimental no aseguraba la densidad de siembra de cultivo característico de un cultivo productivo de rosa bajo invernadero. Existía un efecto borde que no se considero y que por tanto en este ensayo los valores fueron mayores que los del resultado final.

6. El registro de los datos y procesamiento de la información diaria fue muy laborioso porque se generaban 243 datos/día (81 datos de riego, 81 datos de drenaje y 81 datos de peso de CR).

- ✓ Ensayo 2: Se construyó una CE de 4.8 m de longitud con dos hileras compuestas por 44 CR, de los cuales 27 hacían parte de la UE y los restante se emplearon para evitar el efecto borde. Los recipientes iban colocados sobre guayas de 1/8” a 80 cm del suelo. Se

instalaron dos camas laterales para evitar el efecto borde. La Figura 4.3 muestra la disposición de este experimento y la Figura 4.9 ilustra el ensayo en campo.

Figura 4.9. Ensayo 2. (a) Camas que hicieron parte del experimento 2; (b) Disposición de elementos constitutivos de la cama experimental.



(a)

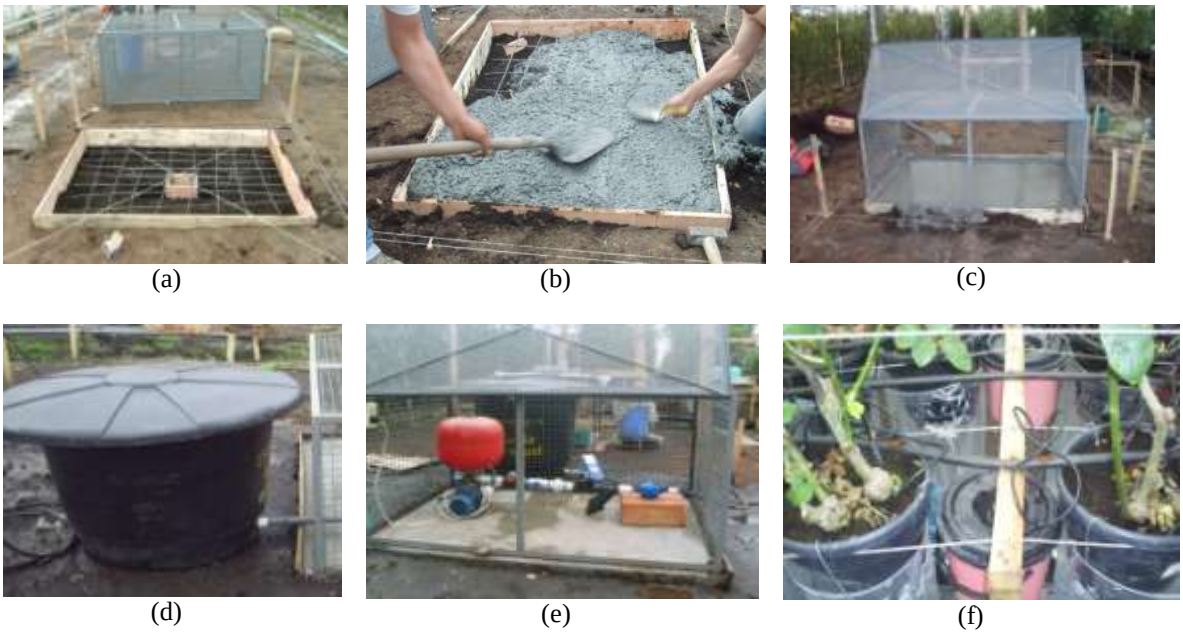
(b)

Se instaló un sistema de riego independiente que sólo suministraba agua a las plantas de rosa de la UE, con dos líneas de distribución y un gotero con cuatro salidas para cada CR de la CE. Para determinar la cantidad de agua suministrada a estos contenedores se ubicaron intercaladamente 5 RR en cada hilera con el fin de determinar la uniformidad del riego a lo largo del ensayo y establecer un riego promedio diario para cada contenedor. La Figura 4.10 muestra la construcción de la placa de soporte para los elementos del sistema de riego y los equipos del sistema de riego. Las camas que contribuían a evitar el efecto borde se abastecían del riego del invernadero.

Para la recolección del agua de drenaje se dispuso de dos tipos de sistema de recolección, uno para las camas que evitan el efecto borde y otro para la CE. Para el primer caso se instaló un canal en plástico negro y el tutoraje en madera. Para el segundo caso se colocaron los recipientes de igual forma que en el ensayo 1, sólo se modificó el soporte de los embudos. Las guayas se sustituyeron por ganchos de alambre que sujetaban los embudos de la parte superior de los contenedores. Los plásticos de los embudos se extendieron desde la mitad inferior de los contenedores hasta la mitad superior de los RD. Las Figura 4.11(a-b) muestran aspectos generales del montaje de los recipientes empleados para recoger el agua de drenaje diario.

Todo el agua almacenada en los RR y RD, después de pesada se vertía a un tanque de lixiviados que descargaba a unos canales de drenaje perimetrales al invernadero, tal como se observa en las Figura 4.11(c-d).

Figura 4.10. Sistema de riego para el ensayo 2. (a) Acero de refuerzo para cimentación y placa de soporte para elementos de riego; (b) vaciado de placa; (c) acabado de placa e instalación de reja para proteger sistema de riego; (d) tanque de almacenamiento para agua de riego; (e) elementos del sistema de riego; (f) riego para CR y RR.



(a) (b) (c)

(d) (e) (f)

Figura 4.11. Sistema de evacuación de agua. (a) canal de recolección para camas efecto borde; (b) contendedor de rosa, embudo y recipiente para drenaje; (c) tanque de recolección de agua; (d) canal de drenaje perimetral.

(a) (b) (c) (d)

Durante este ensayo se tomaron datos para determinar la cantidad de agua regada y drenada y para medir el cambio en el contenido de humedad en los CR. Para medir las dos primeras variables se tomaron pesos diarios de los RR y RD y para la última variable se utilizó un sensor de humedad para medir el contenido de humedad con base en volumen. La Figura 4.12 muestra el proceso de toma de datos diarios.

Figura 4.12. Toma de datos diarios para el ensayo 2. (a) Peso de RD; (b) formato para registro diario de datos; (c) sensor de humedad; (d) medición del contenido de humedad con base en volumen en los CR.

(a)

(b)

(c)

(d)

El sistema de riego independiente mejoró el drenaje diario en cada RD, pero aún seguían existiendo recipientes en donde no había drenaje, se calibró la programación del riego diario para generar un drenaje como mínimo del 10% del agua regada. Los perfeccionamientos de los ensayos permitieron realizar el montaje del último y final ensayo que se describirá en el numeral 4.3. En la Tabla 4.1 se muestran los tratamientos, número de réplicas y variables medidas en cada experimento previo.

Tabla 4.1. Características generales de los experimentos previos

	Trata-miento	No. Réplicas/ tratamiento	Elementos del montaje	Variables medidas	Frecuencia de medida	Balance de agua
Ensayo No.1	100CAQ 65CAQ 35CAQ	27	• Contenedores de rosa (CR) • Recolectores de agua de riego (RR) • Recolectores de agua de drenaje (RD)	• Peso de cada contenedor • Peso recipientes recolectores de agua de riego • Peso recipientes recolectores de agua de drenaje	Diaria	ETc = Riego – Drenaje ± cambio en el almacenamiento
Ensayo No. 2	100CAQ 65CAQ 35CAQ	9	• Contenedores de rosa (CR) • Recolectores de agua de riego (RR) • Recolectores de agua de drenaje (RD)	• Contenido de humedad del sustrato de cada contenedor • Peso recipientes recolectores de agua de riego • Peso recipientes recolectores de agua de drenaje	Diaria	ETc = Riego – Drenaje ± cambio en el almacenamiento

4.3 DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO

Se utilizaron tres camas de rosa (*Rosa sp.*) con dos filas cada una. Cada cama está conformada por 44 CR y cada contenedor cuenta con dos plantas. Las camas están elevadas en madera de 4.60 m de longitud y 0,80 m de altura, apoyadas en un par de alambres de guaya de 1/8" que sostienen 22 contenedores por hilera. La información se recogió sobre la cama central y las camas laterales fueron instaladas para evitar el efecto borde en el experimento. En la figura 4.5 se muestra la disposición general del experimento.

Las plantas empleadas en el ensayo provenían del proyecto de *Producción más limpia de rosa (Rosa sp.) y clavel (Dianthus caryophyllus L.) con dos técnicas de cultivo sin suelo en la Sabana de Bogotá*[9]. La rosa es cv. 'Charlotte' injertada sobre el patrón "Natal briar", sembradas bajo invernadero entre septiembre y noviembre de 2004 y su primera cosecha se produjo en mayo de 2005. Las plantas se encontraban sembradas en sustratos dentro de contenedores plásticos, de color negro, con capacidad de 8 litros, diámetro superior interno de 17 cm y altura de 23 cm, con seis orificios de 1.5 cm de diámetro para drenaje. Cada CR cuenta con dos plantas, tal como se observa en la Figura 4.13.

Figura 4.13. Contenedor de plantas de rosa.

Los contenedores que conformaron la UE se seleccionaron al azar y fueron dispuestos en la CE aleatoriamente. En la selección se tuvo en cuenta que cada CR contara con dos plantas, cada planta constituidas por dos basales gruesos, de buen color y abundante follaje. Una vez retirado de su sitio original, los CR eran colocados a un lado de la cama experimental (CE), donde se codificaban[10] para ser ubicados al azar dentro de la misma. Para esto, se realizó un sorteo de la siguiente manera: en una bolsa plástica se introdujeron 27 papeles marcados con código de cada CR; en una hoja de papel blanco se dibujaron 27 círculos distribuidos en dos hileras, cada círculo correspondió a una posición de los CR dentro de la CE; se retiraron uno a uno los papeles y se localizaban en los círculos según el mismo orden. En la Figura 4.14 se presentan fotos correspondientes a la selección y ubicación de la UE.

[9] En el proyecto *Producción más limpia de rosa (Rosa sp.) y clavel (Dianthus caryophyllus L.) con dos técnicas de cultivo sin suelo en la Sabana de Bogotá* se utilizó un diseño experimental de parcelas divididas, con 11 tratamientos en bloques completos al azar con arreglo de tratamientos en parcelas divididas y tres repeticiones, la parcela principal es el porcentaje de recirculación y la subparcela el sustrato; con un testigo absoluto, que es el suelo, (Flórez et al, 2006). Como en el ensayo en estudio no se tuvo en cuenta la recirculación, ni el sustrato de 100% Fibra de Coco y el suelo, el ensayo se redujo a 3 tratamientos (100CAQ, 65CAQ/35FC, 35CAQ/65F) y tres réplicas por tratamiento.

[10] El código asignado a cada CR estaba conformado por tres términos: el primero se relacionaba con el tratamiento; el segundo se refería al bloque de donde provenían; y el tercero correspondió al número de réplica.

Figura 4.14. (a) Selección de plantas para conformar la unidad experimental; (b) Ejemplo de roturado de contenedores; (c) Ubicación de plantas después de sorteo.

(a)

T3-2-3
Tratamiento 3
Bloque 2
Réplica 3

(b)

(c)

Los sustratos escogidos fueron los que el proyecto de *Producción más limpia de rosa (Rosa sp.) y clavel (Dianthus caryophyllus L.) con dos técnicas de cultivo sin suelo en la Sabana de Bogotá* ha venido trabajando desde hace 7 años. Los sustratos son:

- ✓ Cascarilla de arroz quemada 100% (100CAQ)
- ✓ Una mezcla de 65% de cascarilla de arroz quemada mas 35% de fibra de coco (65CAQ).
- ✓ Una mezcla de 35% de cascarilla de arroz quemada mas 65% fibra de coco (35CAQ).

El experimento utilizó un sistema de riego por goteo específico para el ensayo. Este consistió en un pequeño cabezal de riego que constó de una motobomba de ½ HP con hidroflow, una válvula solenoide con controlador de riego, un filtro de anillo y un contador volumétrico; la Figura 4.15 muestra el cabezal descrito. En la CE se instalaron dos líneas de distribución, una por cada fila. Se utilizó un gotero autocompensado por contenedor con caudal de descarga de 4 l/h, ver Figura 4.16. Este pequeño sistema de riego proveía diariamente agua fertilizada a la CE mediante pulsos de riego programados cada hora entre las 8:00 y 16:00 horas, con una presión de funcionamiento de 30 libras/pulg^2. La duración de los pulsos era de 2.0 a 2.5 minutos. En promedio la aplicación de agua fue de 750 ml/planta.

Figura 4.15. Cabezal de riego. (a) Motobomba con hidroflow; (b) válvula solenoide con controlador; (c) Filtro de malla; (d) contador volumétrico; (e) vista general del cabezal de riego.

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

Figura 4.16. Sistema de riego. (a) Líneas de riego; (b) goteros

(a)

(b)

La fertilización se efectuó mediante el sistema de riego, con la fórmula utilizada en el proyecto de *Producción más limpia de rosa (Rosa sp.) y clavel (Dianthus caryophyllus L.) con dos técnicas de cultivo sin suelo en la Sabana de Bogotá*, empleando fertilizante líquido concentrado (Agrofeed, producido por la empresa Brenntag Colombia S.A.). El pH y la conductividad eléctrica de la solución final de riego se mantuvieron en 5,8±0,2 y

1,6±0,3 respectivamente, parámetros monitoreados diariamente. Para disminuir el pH se utilizó ácido fosfórico. En la Figura 4.17 se presentan las diferentes soluciones empleadas en la preparación del agua para riego.

Figura 4.17. Solución de agua para riego diario. (a) Tanque de almacenamiento con agua fertilizada; (b) dosificación de fertilizantes; (c) fertilizantes líquidos y ácido fosfórico

(a)

(b)

(c)

La disposición de RR y RD fue la misma que la empleada en el ensayo 2.

4.4 TOMA DE DATOS

A continuación se describe el procedimiento llevado a cabo para obtener los datos de balance hídrico, variables climatológicas y datos de crecimiento.

4.4.1 Datos para balance hídrico. Antes de iniciar la toma de datos de los parámetros empleados para realizar el balance hídrico, se saturaron los contenedores de la UE y se dejaron drenar hasta obtener en el sustrato la condición de capacidad de campo; además, el día 1 de septiembre de 2009 se realizó una poda para activar el crecimiento de producción de cada planta. Se inició la toma de datos el día 2 de septiembre de 2009 y tuvo una duración de 74 días. El ensayo consistió en tomar medidas diarias de las variables de balance hídrico descritas en la tabla 4.1. A continuación se describe el procedimiento seguido diariamente para medir riego, drenaje y contenido de humedad en la UE:

- ✓ Antes de iniciar el periodo de experimentación se determinó el coeficiente de uniformidad de riego, ver anexo A.

- ✓ Se realizaron lecturas diarias del medidor volumétrico.

- ✓ Se pesaron diariamente los RR y RD.

- ✓ Se tomaron tres lecturas de contenido de humedad con base en volumen en cada CR, utilizando el sensor de humedad *"Theta Probe type ML2x Delta-T Devices"*. Previo al

ensayo se realizó la calibración del sensor de humedad y se establecieron las ecuaciones que permitieron determinar el peso de agua presente en el sustrato.

Tabla 4.2. Variables medidas durante el experimento de evapotranspiración real de las plantas de rosa cv. Charlotte sembradas en sustrato con 100%, 35% y 65% de cascarilla de arroz quemada .

	Descripción de la variable	Frecuencia de medición
Balance hídrico	▪ Riego ▪ Drenaje ▪ Contenido de humedad del sustrato ▪	Diaria, a las 7:00
Variables climatológicas	▪ Radiación solar ▪ Radiación fotosintéticamente activa ▪ Temperatura del aire ▪ Temperatura de punto de rocio ▪ Humedad relativa del aire	Diaria, cada 30 minutos
Datos de crecimiento	▪ Diámetro del tallo floral (medio) ▪ Longitud del tallo floral ▪ Diámetro del pedúnculo ▪ Número de yemas ▪ Número de hojas falsas ▪ Número de hojas verdaderas	Semanalmente

4.4.2 Datos climatológicos. Se tomaron datos de clima tales como radiación solar, radiación fotosintéticamente activa, temperatura del aire, temperatura de punto de rocío, humedad relativa y evaporación. También se tomaron datos fisiológicos relacionados con el crecimiento de tallos, producción y calidad de flores. La Tabla 4.2 muestra las variables medidas en el experimento.

4.5 ANALISIS DE DATOS DEL BALANCE HÍDRICO

La información obtenida a diario en campo se organizó en hojas de cálculo en Microsoft Excel 2007 de acuerdo con los tratamientos y réplicas.

Se determinó la ETc diaria a partir de la ecuación de balance hídrico:

$$ET_i = R_i - D_i \pm \Delta\theta_i$$

Nota: El valor de $\Delta\theta_i$ se asumió igual a cero, porque se consideró que el sustrato siempre se mantuvo a capacidad de contenedor debido a que el porcentaje de drenaje en la mayor parte del experimento supero el 30% del agua de riego.

Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) mediante el paquete estadístico "Statistical Analysis System" (SAS-9.0), con el fin de determinar el efecto de los tratamientos en las

variables de riego, drenaje y evapotranspiración a nivel general (con todos los datos desde el día 1 hasta el día 75 ddp) y por estadios fenológicos.

4.6 MODELO DE EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL PARA LAS CONDICIONES DE LA SABANA DE BOGOTÁ

Para la obtención de una ecuación que describiera el proceso de ET de rosa cv "Charlote" cultivada en invernadero en sustratos de 100CAQ, 65CAQ y 35CAQ bajo las condiciones ambientales de la Sabana de Bogotá se siguió el siguiente procedimiento:

- ✓ Se determinó la ETo mediante las siguientes ecuaciones: Thornthwaite (1948), Turc (1954), Makkink (1957), Jensen-Haise (1963), Priestley-Taylor (1972), Penman-Monteith (1977), Hargreaves-Samani (1985) y Stanghellini (1987).

  Este valor se calculó para el periodo de experimentación de 75 días utilizando los valores de las variables climatológicas registradas entre el 2 de septiembre y 15 de noviembre de 2009.

- ✓ Se determinó el coeficiente de cultivo (kc) a nivel diario para cada estadio fenológico del cultivo definido como relación entre la ETc (experimento) y la ETo calculada:

$$kc = \frac{ETc}{ETo}$$

  No se utilizaron todos los valores de ETc medidos para poder comprobar los resultados mediante la estimación del RECM.

- ✓ Con los valores de ETc reservados, se calculó el ETo y se determinó la RECM para cada ecuación de ETo y se determinó la ecuación de ETo que mejor se ajustó a los valores medidos.

  Seleccionado la ecuación de ETo que más se ajustó a las condiciones del experimento, se plantearon diferentes ecuaciones. Como el mejor modelo de ETo fue la Hargreaves-Samani (1985), las ecuaciones plateadas fueron:

$$ETo' = \alpha * R_s * (T_{med} + \beta)\ ,\ ETo' = \alpha * Rs * \left[\frac{T_{max} - T_{min}}{\eta} + \beta\right]^{\vartheta},$$
$$ETo' = \alpha * R_s * T_{med}\ ,\ ETo' = T_{med} * p * HR,\ ETo' = (\alpha - HR) * T_{med},$$
$$ETo' = (\alpha - HR) * T_{med} * \beta$$

  También se plantearon ecuaciones de radiación solar incidente se definieron de la siguiente forma:

$$R_s = \tau * R_a * (T_{max} + T_{min}),\ R_s = \tau * R_a * (T_{max} - T_{min}),$$

$R_s = \tau * R_a * \left[\frac{T_{max}+T_{min}}{\varphi}\right]^{\mu}$, $R_s = \tau * R_a * \left[\frac{T_{max}-T_{min}}{\varphi}\right]^{\mu}$,
$R_s = (\tau + \omega) * R_a * \left[\frac{T_{max}+T_{min}}{\varphi}\right]^{\mu}$, $R_s = (\tau + \omega) * R_a * \left[\frac{T_{max}-T_{min}}{\varphi}\right]^{\mu}$,
$R_s = (\tau + \omega) * R_a$

Se determinaron los parámetros de las ecuaciones planteadas por medio de la regresión no lineal utilizando la herramienta NLIN contenida en el paquete estadístico SAS-9.0.

Se determinó para cada ecuación planteada el RECM y se seleccionó la ecuación con menor RECM.

- ✓ Se calcularon nuevos valores de ETo en función de la ETc con el modelo desarrollado:

$$ETo = \frac{ETc}{kc}$$

- ✓ Se comprobó la ecuación obtenida con los valores de ETc del proyecto de *Producción más limpia de rosa (Rosa sp.) y clavel (Dianthus caryophyllus L.) con dos técnicas de cultivo sin suelo en la Sabana de Bogotá*.

4.7 INFORMACIÓN UTILIZADA PARA DETERMINAR EL EFECTO DE LA SALINIDAD EN LA EVAPOTRANSPIRACIÓN

Como en la UE no existe información sobre la recirculación, que es la que afectaría la salinidad y por ende la ET, se tomó la información provista por el proyecto de *Producción más limpia de rosa (Rosa sp.) y clavel (Dianthus caryophyllus L.) con dos técnicas de cultivo sin suelo en la Sabana de Bogotá*, la cual se encuentra ubicada en el mismo lugar de la UE del ensayo de ET. Esta UE es más grande y tienen un mayor número de tratamientos. Los contenedores son los mismos y se siguió las mismas actividades, labores culturales y aplicación de fertilizantes que la UE del proyecto de evapotranspiración. La información utilizada correspondió a datos diarios de riego, drenaje, pH y conductividad eléctrica del agua de riego y drenaje entre el 2 de septiembre y 15 de noviembre de 2005, es decir el mismo periodo que se trabajo en la UE de evapotranspiración.

El diseño experimental del proyecto antes mencionado consistió de 11 tratamientos en bloques completos al azar con arreglo de tratamientos en parcelas divididas y tres repeticiones, la parcela principal es el porcentaje de recirculación y la subparcela el tipo de sustratos; con un testigo absoluto, que es suelo. En la Figura 4.3 se muestra la disposición general del proyecto. Sólo se tuvieron en cuenta nueve tratamientos correspondientes a diferentes porcentajes de recirculación con los sustratos 100CAQ, 65CAQ y 35CAQ. En la Tabla 4.3 se describen los tratamientos utilizados en el análisis y los porcentajes de recirculación en cada uno.

Tabla 4.3. Sustratos y porcentajes de recirculación para el cultivo de rosa variedad "charlotte" en el proyecto de Producción más limpia de rosa (Rosa sp.) y clavel (Dianthus caryophyllus L.) con dos técnicas de cultivo sin suelo en la Sabana de Bogotá.

Tratamiento	Sustrato	% recirculación
T1	100 CAQ	0
T2	100 CAQ	50
T3	100 CAQ	100
T4	65 CAQ	0
T5	65 CAQ	50
T6	65 CAQ	100
T7	35 CAQ	0
T8	35 CAQ	50
T9	35 CAQ	100
T10	100FC	No aplica
T11	Suelo	No aplica

El sistema de cultivo de rosa en sustrato estaba dispuesto en 27 camas elevadas de 15 m de largo y 0.80 m de ancho con sus respectivos soportes en madera y guaya para un densidad de cultivo de 7 plantas/m^2 y en forma de doble surco, el canal de recolección de lixiviados en plástico negro y el tutoraje en madera. Los datos de riego, pH y CE diarios se registraban automáticamente y los datos de drenaje diario se recolectaban manualmente mediante la medición in-situ del volumen de agua depositado en recipientes ubicados al final del canal de recolección de lixiviados. La Figura 4.18 muestra los recipientes recolectores de drenaje por cama, los tanques de recolección de lixiviados provenientes de cada cama y los recipientes donde se ajusta la formula de riego con agua de recirculación.

Figura 4.18. Proyecto de Producción más limpia de rosa (Rosa sp.) con dos técnicas de cultivo sin suelo en la Sabana de Bogotá. (a) Camas de rosa y recipientes recolectores de drenaje de las camas; (b) Tanques recolectores de drenaje viene de los recipientes mostrados en (a); (c) Tanques donde se recompone la formula de riego con agua de lixiviados procedentes de tanques mostrados en (b).

(a) (b) (c)

4.8 LABORES CULTURALES

Durante el desarrollo del experimento se realizaron las siguientes labores culturales:

- ✓ Pinch para activar producción: se realizó un corte del tallo en forma de bisel a un centímetro de altura por encima de la hoja escogida, (Flórez et al, 2006).

- ✓ Despeje de tallos delgados y de tallos ciegos: consistió en eliminar los tallos delgados y los tallos ciegos ubicados a una altura de 0.40 m y en sectores de la cama con exceso de follaje. Esta actividad se realizó para evitar los problemas de mildeo, (Flórez et al, 2006).

- ✓ Desbotone: consistió en retirar los botones florales laterales ubicados en la zona superior de cada tallo próximos al botón principal, (Flórez et al, 2006).

- ✓ Desbrote: consistión en eliminar los brotes que crecieron e yemas apicales estimuladas en tallos descabezados accidentalmente, (Flórez et al, 2006).

- ✓ Deshierba: se erradicó manualmente las plantas diferentes al cultivo.

En la Figura 4.19 se muestra un registro fotográfico de las distintas labores culturales desarrolladas en el cultivo experimental.

Figura 4.19. Labores culturales. (a) Pinch – activar crecimiento; (b y c) después de pinch de desbotonamiento; (d, e y f) despeje del cultivo.

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

(f)

5 RESULTADOS

, como era de esperar,

5.1 EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL POR ESTADIO FENOLÓGICO

La Tabla 5.1 presenta la comparación entre medias con prueba Tukey del riego, drenaje y evapotranspiración real por tratamiento para cada estado fenológico de las plantas de rosa cv. Charlotte sembradas en sustratos con 100CAQ, 65CAQ y 35CAQ. En la variable riego no se presentaron diferencias significativas, lo cual era de esperar porque la unidad experimental fue regada por los mismos laterales de riego y por tanto la aplicación diaria de agua fue muy homogénea entre los tratamientos. En cuanto al drenaje se presentaron diferencias significativas en los estadios fenológicos Primordio, Arroz y Chorote entre el sustrato 100CAQ y las otras mezclas de sustratos y los estadios fenológicos Rallar Color y Corte entre el sustrato 100CAQ y 35CAQ. Para la variable ETc se observa que existen diferencias significativas entre los sustratos utilizados, en especial se muestra una diferencia marcada entre el tratamiento 100CAQ y 35CAQ a medida que aumentan los estadios fenológicos Chorote, Rayar color y Corte. Por tanto, para tener un uso más eficiente del agua y menores valores de ETc es mejor utilizar sustratos con mezcla de mayor contenido de fibra de coco.

Tabla 5.1. Comparación entre medias con prueba Tukey de las variables riego, drenaje y evapotranspiración real en cada estadio fenológico en las plantas de rosa cv. Charlotte sembradas en sustrato con 100%, 35% y 65% de cascarilla de arroz quemada.

Riego	**Primordio**	**Arroz**	**Arroz 2**	**Arveja**	**Garbanzo**	**Chorote**	**Rayar color**	**Corte**
ddp	42	51	53	57	61	64	69	76
100CAQ	9.2513 (a)	9.2271 (a)	11.0653 (a)	10.7928 (a)	12.1706 (a)	11.0611 (a)	10.905 (a)	10.5795 (a)
65CAQ	9.1925 (a)	9.1871 (a)	11.0439 (a)	10.7485 (a)	11.9304 (a)	10.9805 (a)	10.8343 (a)	10.5405 (a)
35CAQ	9.223 (a)	9.1930 (a)	11.0672 (a)	10.7759 (a)	12.0377 (a)	11.0158 (a)	10.8679 (a)	10.5488 (a)
Drenaje	**Primordio**	**Arroz**	**Arroz 2**	**Arveja**	**Garbanzo**	**Chorote**	**Rayar color**	**Corte**
ddp	42	51	53	57	61	64	69	76
100CAQ	5.2502 (b)	3.795 (b)	4.8206 (b)	2.6869 (a)	5.9621 (a)	6.4902 (b)	5.8658 (a)	5.5445 (b)
65CAQ	6.2267 (a)	4.8346 (a)	5.9527 (a)	3.8955 (a)	6.9692 (a)	7.2893 (a)	6.7519 (ab)	6.5214 (ab)
35CAQ	6.1507 (a)	4.6441 (a)	5.6911 (ab)	3.7177 (a)	6.9152 (a)	7.2477 (a)	7.3795 (a)	7.3441 (a)
ETc	**Primordio**	**Arroz**	**Arroz 2**	**Arveja**	**Garbanzo**	**Chorote**	**Rayar color**	**Corte**
ddp	42	51	53	57	61	64	69	76
100CAQ	4.0011 (a)	5.4322 (a)	6.2447 (a)	8.1058 (a)	6.2085 (a)	4.5708 (a)	5.039 (a)	5.0349 (a)
65CAQ	3.1311 (b)	4.4197 (b)	5.0912 (a)	7.0694 (b)	4.9611 (a)	3.6912 (b)	4.0824 (ab)	4.0191 (b)
35CAQ	3.3851 (b)	4.5489 (b)	5.3761 (a)	7.0582 (ab)	5.1226 (a)	3.768 (ab)	3.4884 (b)	3.2680 (c)

*Promedios seguidos por la misma letra no presenta diferencias significativas, por la prueba Tukey ($p<0,05$).

De acuerdo con la tabla 5.1 la ETc para el tratamiento 100CAQ varió entre 4.0 y 8.1 mm.día^{-1} con un promedio 4.6 mm día^{-1}. Para el caso del tratamiento 65CAQ varió entre 3.1 y 7.1 mm. día^{-1} con un valor promedio de 3.7 mm.día^{-1}. Para el tratamiento 35CAQ

estuvo entre 3.4 y 7.0 mm. día^{-1}. En todos los tratamientos el valor más bajo se obtuvo en el estadio Primordio y el valor más alto en el estadio Arveja.

5.2 EFECTO DEL SUSTRATO EN EL RIEGO APLICADO, DRENAJE EVACUADO Y EVAPOTRANSPIRACIÓN PRODUCIDA

La Tabla 5.2 muestra la comparación entre medias con prueba Tukey del riego, drenaje y ETc a las plantas de la UE. Se observa que no existen diferencias significativas en la cantidad agua de riego aplicada por tratamiento. En cuanto al drenaje y ETc se presentaron diferencias significativas entre el sustrato 100CAQ con los demás sustratos. En promedio el riego diario aplicado fue de 9.79 [mm/día] para el tratamiento 100CAQ, de 9.72 [mm/día] para el sustrato 65CAQ y 9.75 [mm] para el sustrato 35 CAQ. Se drenó en promedio 5.15 [mm/día] para el sustrato 100CAQ, de 6.14 [mm/día] para el sustrato 65CAQ y de 6.16 [mm/día] para el sustrato 35CAQ. Se presentó un consumo promedio de 4.63 [mm/día] para el sustrato 100CAQ, de 3.70 [mm/día] para el sustrato 65CAQ y de 3.80 [mm/día] para el sustrato 35CAQ.

Tabla 5.2. Valores promedios y comparación entre medias con prueba Tukey de la variable riego, drenaje y ETc en las plantas de rosa cv. Charlotte sembradas en sustrato con 100%, 35% y 65% de cascarilla de arroz quemada, expresado en mm de altura de agua.

Tratamiento	Riego	Drenaje	Etc
100CAQ	9.7894 (a)	5.1539 (b)	4.6354 (a)
65CAQ	9.7241 (a)	6.1427 (a)	3.7014 (b)
35CAQ	9.7544 (a)	6.1589 (a)	3.7976 (b)

*Promedios seguidos por la misma letra no presenta diferencias significativas, por la prueba Tukey ($p<0,05$).

5.3 EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL USANDO DIFERENTES MODELOS EXISTENTES

En este numeral se presenta primero los resultados del análisis de la información meteorológica correspondiente a los registros de diferentes variables climáticas obtenidas de la estación ubicada dentro y fuera del invernadero, la cual fue empleada para la determinación de la evapotranspiración potencial. Luego, se continúa con la presentación de los resultados de la evapotranspiración potencial obtenidos mediante la aplicación de las ecuaciones Thornthwaite (1948), Turc (1954), Makkink (1957), Jensen-Haise (1963), Priestley-Taylor (1972), Penman-Monteith (1977), Hargreaves-Samani (1985) y Stanghellini (1987).

5.3.1 Análisis de información meteorológica. La Tabla 5.3 muestran los valores promedio, máximo y mínimo mensual durante el día (7a.m–6p.m) de los parámetros registrados por la estación HOBO ubicada dentro del invernadero ocurrida entre los meses de septiembre y noviembre de 2009. Durante la realización del ensayo se presentó una temperatura promedio día 20.13°C, con un máximo de 23.26°C y un mínimo de 16.62°C. La humedad relativa promedio mensual día fue 76.72% y varío entre 50.67 y 100%. La radiación solar promedio mensual día de 6.64 mm y osciló entre 11.17 y 3.61 mm.

Tabla 5.3. Promedio mensual de los parámetros meteorológicos registrados por la estación HOBO dentro del invernadero.

Parámetro*	Unidad	Promedio	Máxima	Mínima
Temperatura promedio día	℃	20.13	23.26	16.62
Punto rocio promedio día	℃	15.85	20.44	11.30
Humedad relativa promedio día	%	76.72	100	50.67
Radiación solar promedio día	mm	6.64	11.17	3.61
Radiación fotosintéticamente activa promedio día	mm	6.09	10.19	3.08

*Promedio obtenido con los registros desde las 7 a.m hasta las 6 p.m todos los días.

En la Tabla 5.4 se muestran los valores promedio, promedio máximo y promedio mínimo de los parámetros registrados a nivel mensual entre septiembre y noviembre 2009 por la estación más cercana al invernadero. Estos datos son el resultado del promedio entre las 7 a.m y las 6 p.m todos los días. Durante la realización del ensayo se presentó una temperatura promedio de 13.70°C, con un máximo de 15.90°C y un mínimo de 11.55°C. El brillo solar efectivo promedio fue 5.11 [h], con valor mínimo de 0.40 [h] y máximo de 14.30 [h]. La evaporación promedio mensual fue 0.07 [l] y varío entre 0.01 y 0.14 [l]. La humedad relativa promedio mensual fue 79.18% y varío entre 66.67 y 94%. La velocidad del viento en promedio fue 6.10 [km/día] y varió entre 3.71 y 11.71 [km/día].

Tabla 5.4. Registros promedios de la estación más cercana al invernadero.

Parámetro*	Unidad	Promedio	Máxima	Mínima
Termómetro Seco	℃	13.70	15.90	11.55
Termómetro Húmedo	℃	11.55	13.05	9.20
Tem. Extremas max	℃	20.85	23.60	17.20
Tem. Extremas min	℃	6.74	11.40	1.00
Tensión de Vapor	mb	12.38	13.93	9.70
Brillo solar efectivo	h	5.11	14.30	0.40
Humedad relativa media	%	79.18	94.00	66.67
Punto de Rocío	°c	10.07	11.87	6.53
Velocidad del viento	km/h	6.10	11.71	3.71

*Promedio obtenido con los registros desde las 7 a.m hasta las 6 p.m todos los días.

5.3.2 Estimación de la evapotranspiración potencial (ETo). La tabla 5.5 muestra los valores promedios de ETo obtenidos para el periodo de experimentación. Se observa que los resultados generados por las ecuaciones Thornthwaite (1948), Priestley-Taylor (1972), Penman-Monteith (1977) y Stanghellini (1987) son inferiores a la unidad y no son muy confiables. En cambio, los valores obtenidos por las otras ecuaciones se acercan más a la ETc calculada para de rosa si se asume un coeficiente de cultivo entre 0.81 y 1.0 tal como lo recomiendan Obando y Santana (2000).

Tabla 5.5. Valores promedios de evapotranspiración potencial (ETo) para el periodo de experimentación.

Ecuaciones	ETo ($mm.día^{-1}$)
Thornthwaite (1948)	0,845
Turc (1954)	3,392
Makkink (1957)	4,131
Jensen-Haise (1963)	3,613
Priestly-Taylor (1972)	0,390
Penman-Monteith (1977)	0,310
Hargreaves- Samani (1985)	4,630
Stanghellini (1987)	0,483

Los valores obtenidos por Stanghellini (1987) se le atribuyen a la manera como se determinó el índice de área folear. Para Thornthwaite (1948) es una expresión para determinar ETo a nivel mensual. En el anexo b se presentan todos los valores obtenidos para el periodo de experimentación.

5.4 COEFICIENTE DE CULTIVO PARA LOS PERÍODOS FENOLÓGICOS ESTUDIADOS

De acuerdo con los valores de ETo indicados en el numeral 5.3.2 se obtuvieron los coeficientes de cultivo (kc) para los estadios fenológicos evaluados. Se tuvieron en cuenta sólo las ecuaciones de Turc (1954), Makkink (1957), Jensen-Haise (1963) y Hargreaves-Samani (1985).

La tabla 5.9 muestra los resultados de kc, la ecuación de Turc arrojó valores entre 1.10 y 1.70, Makkink entre 0.88 y 1.80, Jensen-Haise entre 1.03 y 1.74 y Hargreaves-Samani entre 0.79-1.50. Este último método encontró valores muy cercanos a los indicados en los trabajos de Rodríguez (1998) y Obando y Santana (2000).

Tabla 5.6. Coeficiente de cultivo para los distintos estadios fenológicos de la rosa mediante diferentes ecuaciones.

Estadio Fenológico	Turc (1954)	Makkink (1957)	Jensen-Haise (1963)	Hargreaves-Samani (1985)
Primordio	1,10	0,88	1,03	0,79
Arroz	1,30	1,35	1,47	1,06
Arroz 2	1,60	1,63	1,70	1,42
Arveja	1,71	1,80	1,74	1,50
Garbanzo	1,74	1,60	1,62	1,26
Chorote	1,64	1,57	1,67	0,99
Rayar color	1,54	1,28	1,31	0,95
Corte	1,54	1,28	1,31	0,95

De acuerdo con el RECM mostrado en la tabla 5.6 se observa que la ecuación que más se ajusta a los valores obtenidos por el balance hídrico es la ecuación Hargreaves-Samani (1987).

Tabla 5.7. Resumen del índice de la raíz del error cuadrático medio (RECM) de las diferentes ecuaciones de ETo.

Ecuaciones	ETo (mm/día)	RECM
Hargreaves-Samani (1985)	4.2246	0.185924143
Turc (1954)	4.2799	0.192601304
Makkink (1957)	4.4269	0.212561359
Jensen-Haise (1963)	4.4668	0.218673982

5.5 MODELO DE EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL

La Tabla 5.8 presenta las ecuaciones planteadas para obtener la radiación solar incidente para las condiciones ambientales bajo invernadero en la sabana de Bogotá para el cultivo de rosa cv. Charlotte sembradas en sustrato con 100CAQ, 65CAQ y 35CAQ cultivada en invernadero. Se seleccionó la ecuación 2 para la determinación de la radiación solar incidente por tener el menor RECM. Esta ecuación se define en términos de radiación solar extraterrestre y la diferencia de temperaturas durante todo el día. Se observa que el parámetro φ es igual a 1 para todas las ecuaciones.

Tabla 5.8. Parámetros de las ecuaciones de radiación solar incidente plateadas para las condiciones ambientales bajo invernadero en la Sabana de Bogotá para el cultivo de rosa cv. Charlotte sembrados en sustrato con 100%, 35% y 65% de cascarilla de arroz quemada cultivado en invernadero.

No.	Ecuación	Parámetro				ECM
		τ	ω	φ	μ	
1	$R_s = \tau * R_a * (T_{max} + T_{min})$	0.01280				0.47777
2	$R_s = \tau * R_a * (T_{max} - T_{min})$	0.02640				**0.42602**
3	$R_s = \tau * R_a * \left[\frac{T_{max} + T_{min}}{\varphi}\right]^{\mu}$	0.00126		1.00	1.6518	0.48821
4	$R_s = \tau * R_a * \left[\frac{T_{max} - T_{min}}{\varphi}\right]^{\mu}$	0.03100		1.00	0.9540	0.46798
5	$R_s = \left(\tau + \omega \frac{n}{N}\right) * R_a * \left[\frac{T_{max} + T_{min}}{\varphi}\right]^{\mu}$	0.00092	0.00108	1.00	1.6246	1.34979
6	$R_s = \left(\tau + \omega \frac{n}{N}\right) * R_a * \left[\frac{T_{max} - T_{min}}{\varphi}\right]^{\mu}$	0.07340	0.03870	1.00	0.5614	1.57824
7	$R_s = (\tau + \omega) * R_a$	0.29000	0.33940			0.42713

*Rs y Ra se expresan en [MJ/m^2/día].
**Tmax y Tmin se expresan en [ºC].

La tabla 5.8 presenta las ecuaciones planteadas para obtener evapotranspiración potencial para las condiciones ambientales bajo invernadero en la Sabana de Bogotá para el cultivo de rosa cv. Charlotte sembradas en sustrato con 100CAQ, 65CAQ y 35CAQ cultivada en invernadero. Se seleccionó la ecuación 3.b para la por tener el menor RECM, y por ser la que más se ajusta a los valores medidos. Esta ecuación se define en términos de radiación solar extraterrestre y la diferencia de temperaturas durante todo el día. Se observa que el parámetro φ es igual a 1 para todas las ecuaciones.

Tabla 5.9. Parámetros de las ecuaciones de evapotranspiración potencial plateadas para las condiciones ambientales bajo invernadero en la Sabana de Bogotá para el cultivo de rosa cv. Charlotte sembrados en sustrato con 100%, 35% y 65% de cascarilla de arroz quemada cultivado en invernadero.

No.	Ecuación	Temperatura	Parámetro α	Parámetro β	Parámetro η	Parámetro ϑ	ECM
1	$ETo' = \alpha * R_s * (T_{med} + \beta)$	1.a. Tmed: Temp. prom 24h 1.b. Tmed=(Tmax-Tmin)/2	0.0575 0.0916	11.7698 8.5682			1.9317 0.8652
2	$ETo' = \alpha * Rs * \left[\frac{T_{max} - T_{min}}{\eta} + \beta\right]^{\vartheta}$		$8.5*10^{-5}$	10	70	4.0449	
3	$ETo' = \alpha * R_s * T_{med}$	3.a. Tmed: Temp. prom 24h 3.b. Tmed=(Tmax-Tmin)/2	0.0312 0.0983				1.6473 **0.5361**
4	$ETo' = T_{med} * p * HR$	Tmed: Temp. prom 24h	0.2716				
5	$ETo' = (\alpha - HR) * T_{med}$	5.a.Tmed: Temp. prom 24h 5.b. Tmed=(Tmax-Tmin)/2	0.9420 1.4558				1.6980 0.5975
6	$ETo' = (\alpha - HR) * T_{med} * \beta$	6.a. Tmed: Temp. prom 24h 6.b. Tmed=(Tmax-Tmin)/2	0.2481 27.2705	-2.0536 0.0179			0.94018 1.04100

*ETo se expresa en [mm/día], **Rs se expresa en [MJ/m^2/día], ***Tmax, Tmin y Tmed se expresan en [ºC],
****p: porcentaje de horas de sol del día. *****HR se expresa en tanto por ciento.

El modelo de evapotranspiración potencial llamado **Ecuación de Hargreaves-Esmeral** desarrollado para las condiciones ambientales bajo invernadero en la Sabana de Bogotá para el cultivo de rosa cv. Charlotte sembrados en sustrato con 100CAQ, 65CAQ y 35CAQ es la siguiente:

ECUACIÓN HARGREAVES-ESMERAL

$$ETo = 0.0983 * R_s * T_{med}$$

$$R_s = 0.0265 * R_a * (T_{max} - T_{min})$$

5.6 EFECTO DE LA SALINIDAD PRODUCTO DE LA RECIRCULACIÓN EN LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO

La tabla 5.10 muestra el ANOVA, los valores medios separados de acuerdo con la prueba Tukey y la desviación estándar del riego, drenaje, evapotranspiración real y conductividad eléctrica analizados en el ensayo con recirculación. Se encontraron diferencias significativas para todas las variables analizadas, tanto en el sustrato empleado como en los porcentajes de recirculación. Dado que el experimento en donde se obtuvieron estos datos es diferente al que se venía trabajando, aunque localizado en las mismas naves del invernadero, se presenta el siguiente análisis:

- ✓ En cuanto a la variable riego, existen diferencias significativas entre la cantidad de agua aplicada en los tratamientos de los sustratos 100CAQ, 65CAQ y 35CAQ sin

recirculación con los demás tratamientos. El riego fue mayor en los tratamientos sin recirculación.

- ✓ Los resultados obtenidos con la variable drenaje muestran que existen diferencias significativas entre los tratamientos de los sustratos 35CAQ-50% de recirculación y 35CAQ-100% de recirculación con los otros tratamientos. Se obtuvo la mayor cantidad de lixiviados en el tratamiento 35CAQ-100% de recirculación.

- ✓ La variable ETc muestra que existen diferencias significativas entre los tratamientos 100CAQ, 65CAQ y 35CAQ sin recirculación con los demás tratamientos. El valor más alto de ETc se obtuvo en el tratamiento 100CAQ-0% de recirculación, lo cual concuerda con la ETc obtenida en el ensayo sin recirculación. Se presentan diferencias significativas en la ETc entre las mezclas de 100CAQ y 35CAQ sin recirculación. Los mayores valores de ETc se obtuvieron en los tratamientos que no utilizaron recirculación y los menores valores se presentaron en los sustratos 35CAQ y 35CAQ con 100% de recirculación, lo cual podría ser explicado por la mayor concentración de sales que se aprecia en los valores de CE.

- ✓ En los resultados de la variable conductividad eléctrica (CE) se aprecia que no existen diferencias significativas entre los tratamientos de los sustratos 100CAQ, 65CAQ y 35CAQ sin recirculación. Se presentaron diferencias significativas en el valor de CE entre la recirculación del 50 y 100% para todos los tratamientos con la recirculación del 0%. Esta situación en era lo esperado por el diseño experimental. Sin embargo, no evidenció una diferencia marcada del sustrato con la ET, con excepción de 35CAQ con 100% de recirculación.

Tabla 5.10. Valores promedios, desviación estándar y comparación entre medias con prueba Tukey de las variables riego, drenaje, evapotranspiración real y conductividad eléctrica para rosa sp. Variedad "Charlotte" en el ensayo con recirculación.

Sustrato	Recirculación	Riego	Drenaje	Etc	CE
100CAQ	0%	0.413a* (0.037)**	0.099bc (0.036)	0.314a (0.045)	2.287a (0.358)
100CAQ	50%	0.368b (0.056)	0.096bc (0.038)	0.273cd (0.049)	2.998b (0.633)
100CAQ	100%	0.368b (0.056)	0.098bc (0.042)	0.270cd (0.050)	3.534c (0.724)
65CAQ	0%	0.413a (0.037)	0.107ab (0.037)	0.305ab (0.046)	2.377a (0.386)
65CAQ	50%	0.368b (0.056)	0.100bc (0.043)	0.268cd (0.051)	3.005c (0.510)
65CAQ	100%	0.368b (0.056)	0.103abc (0.044)	0.265cd (0.052)	3.425c (0.673)
35CAQ	0%	0.413a (0.037)	0.101bc (0.035)	0.312b (0.043)	2.241a (0.361)
35CAQ	50%	0.368b (0.056)	0.090c (0.042)	0.278bc (0.057)	3.229c (0.603)
35CAQ	100%	0.368b (0.056)	0.116a (0.045)	0.251d (0.049)	3.011c (0.379)

*Promedios seguidos por la misma letra no presenta diferencias significativas, por la prueba Tukey ($p<0,05$).
**Desviación estándar

La Tabla 5.11 muestra la matriz de correlación entre las variables CE, ETc, riego y drenaje analizados en el ensayo con recirculación. Se encontró que existe una correlación entre la variable ETc y CE negativa pero con un valor bajo de correlación.

Tabla 5.11. Coeficientesde correlación entre conductividad eléctrica, ETc, riego y drenaje para rosa sp. Variedad "Charlotte" en el ensayo con recirculación.

Variable	CE	Etc	Riego	Drenaje
CE	1,000	-0,185	-0,079	0,138
Etc	-0,185	1,000	0,899	0,133
Riego	-0,079	0,899	1,000	0,543
Drenaje	0,138	0,133	0,543	1,000

Estos resultados muestran que probablemente debido a la forma como se realizó el riego, manteniendo saturado el sustrato, incide en que el potencial osmótico no se vuelva tan determinante en la toma de agua por la planta.

6 CONCLUSIONES

- ✓ La evapotranspiración real del cultivo de rosa cv. Charlotte cultivada en invernadero bajo las condiciones ambientales de la sabana de Bogotá en promedio es de 4.64 mm/día para el sustrato 100 CAQ, de 3.70 mm/día para el sustrato 65CAQ y de 3.80 mm/día para el sustrato 35CAQ.

- ✓ El mayor consumo de agua en las plantas de rosa cv. Charlotte se presentó durante el estadio fenológico Arveja.

- ✓ Existe un efecto significativo entre la evapotranspiración real y el tipo de sustrato empleado. Las plantas sembradas en el sustrato 65 CAQ presentaron el menor consumo de agua durante el periodo de experimentación. Por tanto, se recomienda emplear este tipo de sustrato para disminuir los requerimientos de agua en un cultivo productivo.

- ✓ La ecuación Hargreaves-Samani (1985) representa mejor la evapotranspiración potencial en un invernadero bajo condiciones ambientales de la sabana de Bogotá.

- ✓ La ecuación Hargreaves-Esmeral (2010) desarrollada con base en la ecuación Hargreaves-Samani (1985) que está en función de la radiación solar y la temperatura del aire, representa aproximadamente la ETo para la rosa en la sabana de Bogotá.

- ✓ Los coeficientes de cultivo para las plantas de rosa cv. Charlotte encontrados de acuerdo con la ecuación Hargreaves-Esmeral (2010) varían entre 0.79 y 1.50. El valor más bajo se encontró para el estadio fenológico Primordio y el valor más alto para el estadio fenológico Arveja. Estos valores son muy cercanos a los obtenidos empleando la ecuación Hargreaves-Samani (1985).

- ✓ En cuanto al efecto del sustrato en la salinidad en la evapotranspiración, existe un efecto significativo. El valor más alto de ETc se obtuvo en el tratamiento 100CAQ-0% de recirculación, lo cual concuerda con la ETc obtenida en el ensayo sin recirculación. Se presentan diferencias significativas en la ETc entre las mezclas de 100CAQ y 35CAQ sin recirculación. Los mayores valores de ETc se obtuvieron en los tratamientos que no utilizó recirculación y los menores valores se presentaron en los sustratos 35CAQ con 100% de recirculación. Estos resultados se le atribuyen al efecto osmótico.

BIBLIOGRAFIA

Adekalu, K; Fapohunda, H. 2006. A Numerical Model to predict Crop Yield from Soil Water Deficit. Biosystems Engineering 94(3): 359–372.

Alexandris, S; Kerkides, P; Liakatas, A. 2006. Daily reference evapotranspiration estimates by the ‘‘Copais’’ approach. Agricultural Water Management 82: 371–386.

Allen, R; Pereira, L; Raes, D; Smith, M. 2006. Evapotranspiración del cultivo. Estudio Riego y Drenaje, FAO-56. Organización de las Naciones Unidas Para la Agricultura y Alimentación. Roma.

Anton, A; Montero, J; Muñoz, P. Necesidades de agua del cultivo de tomate en invernadero-comparación con el cultivo al aire libre. Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentaria – IRTA, Centre de Cabrils. Barcelona.

Asocolflores. 2004. Informe anual 2004. En: http://www.asocolflores.org. Consultada 02/08/07.

Baas, R; Van-Rijssel, E. 2006. Transpiration of glasshouse rose crops: evaluation of regression models. Acta Hort. (ISHS) 718:547-556.

Baille, M; Baille, A; Delmon, D. 1994. Microclimate and transpiration of greenhouse rose crops. Agricultural and Forest Meteorology, Volume 71, Issues 1-2, 83-97.

Baille, 1996. Principle and methods for predicting crop water requirement in greenhouse environments. Cahiers options méditerranéennes, vol 3.

Baptista, F.; Bailey, B; Meneses, J. 2005. Measuring and modelling transpiration versus evapotranspiration of a tomato crop grown on soil in a mediterranean greenhouse. Acta Hort. (ISHS) 691:313-320.

Bastidas, E; Santana, C. 2000. Respuesta del cultivo de rosa (Rosa adorata Var. Madame Delbard) a diferentes láminas de riego, bajo invernadero en la Sabana de Bogotá. Tesis. Universidad Nacional de Colombia.

Benli, B; Kodal, S; Ilbeyi, A; Ustun, H. 2005. Determination of evapotranspiration and basal crop coefficient of alfalfa with a weighing lysimeter. Agricultural Water Management 81: 358–370.

Blanco, F; Folegatti, M. 2003. Evapotranspiration and crop coefficient of cucumber in greenhouse. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Vol.7 No.2. Campina Grande.

Blanco, F; Folegatti, M. 2004. Evaluation of evaporation-measuring equipments for estimating evapotranspiration within a greenhouse. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.8, n.2/3: 184-188.

Bonachela, S; Orgaz, F; Villalobos, F; Fereres, E. 1999. Measurement and simulation of evaporation from soil in olive orchards. Irrig Sci 18: 205–211.

Bontsema, J; Hemming, J; Stanghellini, C; De Visser, P; Van Henten, E; Budding, J; Rieswijk, T; Nieboer, S. 2007a. On-line monitoring van transpiratie en fotosyntheseactiviteit. Wageningen UR Glastuinbouw. Note 451. Wageningen.

Bontsema, J; Hemming, J; Stanghellini, C; De Visser, P; Van Henten, E; Budding, J; Rieswijk, T; Nieboer, S. 2007. On-line estimation of the transpiration in greenhouse horticulture. Proceedings Agricontrol 2007. 2nd IFAC International Conference on Modeling and Design of Control Systems in Agriculture, 03-05 September 2007, Osijek Croatia, pp. 29-34.

Bormann, H; Diekkriiger, B; Richter, O. 1997. Effects of data availability on estimation of evapotranspiration. Phys. Chem. Earth, Vol. 21, No. 3: 171-175.

Boulard, T; Wang, S. 2000.Greenhouse crop transpiration simulation from external climate conditions. Agricultural and Forest Meteorology 100 : 25–34.

Brown, P. 2000. Basics of evaporation and evapotranspiration. Turf irrigation management series: I. The University of Arizona – Collegue of Agriculture. Arizona.

Cáceres, L; Nieto, D. 2003. Efecto del ácido giberélico (GA3) sobre el desarrollo del botón floral en tres variedades de rosa (Rosa sp.). Tesis. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.

Cai, J; Liu, Y; Lei, T; Pereira, L. Estimating reference evapotranspiration with the FAOPenman–Monteith equation using daily weather forecast messages. Agricultural and Forest Meteorology 145: 22–35.

Casanova, M; Messing, I; Joel, A; Cañete, A. 2009. Métodos de estimación de la evapotranspiración de un cultivo de lechuga en condiciones de invernadero, zona central de chile. Chilean J. Agric. Res. [online]. 2009, vol.69, n.1, pp. 60-70.

Chang, M; Nuruddin, A; Crowley, C. 1997. Evapotranspiration of herbaceous mimosa (Mimosa strigillosa), a new drought-resistant species in the southeastern United States. Resources, Conservation and Recycling 21: 175–184.

Chaparro, L; Farías, A; Chaves, B; Miranda, D; Florez, V. Anáslisis de crecimiento en rosa variedad Charlotte en los sistemas de cultivo en sustrato y en suelo. En: Avances sobre

Fertirriego en la floricultura colombiana. Florez *et al* Eds. ISBN: 958-701-722-6. UNIBIBLOS. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, COL. pp 77-90.

Chinchilla, K; Hernández, Y; González, C. 2008. Identificación de los principales problemas asociados al riego por goteo en los cultivos de flores en la sabana de Bogotá. Articulo presentado en el X Congreso Latinoamericano y del Caribe de Ingeniería Agrícola Clia. Nicaragua.

Cavalier, A. 1999. Consideraciones fisiológicas de la poda del rosal. En: Mantenimiento de plantas de rosa. Chía-Colombia, pp: 49-53.

Donatelli, M; Bellocchi, G; Carlini, L. 2006. Sharing knowledge via software components: Models on reference evapotranspiration. Europ. J. Agronomy 24: 186–192.

Droogers, P. 2000. Estimating actual evapotranspiration using a detailed agro-hydrological model. Journal of Hydrology 229: 50–58.

Estación Experimental de Aalsmeer - Traduccion Hortitecnia Ltda. 2003. Cultivo moderno de la rosa bajo invernadero. Ediciones Hortitecnia Ltda. Bogotá-Colombia, pp. 103-140.

Farías, A; Chaparro, L; Campos, A; Chaves, B; Flórez, V. 2006. Curvas de crecimiento de rosa en sistemas de cultivo sin suelo en la Sabana de Bogotá. En: Avances sobre Fertirriego en la floricultura colombiana. Florez *et al* Eds. ISBN: 958-701-722-6. UNIBIBLOS. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, COL. pp 91-108.

Fennessey, N; Vogel, R. 1996. Regional models of potential evaporation and reference evapotranspiration for the northeast USA. Journal of Hydrology 184: 337-354.

Fernández, M; Bonachela, S; Orgaz, F; Thompson, R; López, J; Granados M; Gallardo, M. Fereres, E. 2010. Measurement and estimation of plastic greenhouse reference evapotranspiration in a Mediterranean climate. Irrig Sci. DOI 10.1007/s00271-010-0210-z.

Ferrer, F. Salvador, P. 1986. La producción de rosas en cultivo protegido. Editores San José de la Rinconada, Sevilla. España, pp. 180-205.

Flórez, V; Miranda, D; Chaves, B; Chaparro, L; Cárdenas, C; Farías, L. 2006. Parámetros considerados en el análisis de crecimiento en rosa y clavel en los sistemas de cultivo en suelo y en sustrato. En: Avances sobre Fertirriego en la floricultura colombiana. Florez *et al* Eds. ISBN: 958-701-722-6. UNIBIBLOS. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, COL. pp 43-52.

Fuchs, M; Dayan, D; Presnov, E. 2006. Evaporative cooling of a ventilated greenhouse rose crop. Agricultural and Forest Meteorology 138: 203–215.

García, M; Raes, D; Jacobsen, S. 2003. Evapotranspiration analysis and irrigation requirements of quinoa (Chenopodium quinoa) in the Bolivian highlands. Agricultural Water Management 60: 119–134.

Hunt R. (1990). Basic growth analysis: plant growth analysis for beginners. London.

Irmak, S; Haman, D. 2003. Evapotranspiration: Potential or Reference?. University of Florida. http://edis.ifas.ufl.edu/pdffiles/AE/AE25600.pdf. Consultado 04/03/2010.

Jacovides, C; Kontoyiannis, K. 1995. Statistical procedures for the evaluation of evapotranspiration computing models. Agricultural Water Management 27: 365-371.

Jacobs, M; Pariani, S; Mascarini, L. 2005. Consumo de agua y frecuencia de riego de un cultivo de rosas bajo invernadero en un sistema hidropónico. VII Jornadas Nacionales de Floricultura Trevelin. Chubut. 19-21 octubre de 2005.

Jensen, M; Burman, R; Allen, R. 1990. Evapotranspiration an irrigation water requirements. Manuals and reports on engineering practice No. 70. American Society of Civil Engineers – ASCE. New York.

Jolliet, O; Bailey, BJ. 1992. The effect of climate on tomato transpiration in greenhouses: measurements and models comparison. Agric For Meteorol 58:43–62.

Karam, F; Breidy, J; Stephan, C; Rouphael, J. 2003. Evapotranspiration, yield and water use efficiency of drip irrigated corn in the Bekaa Valley of Lebanon. Agricultural Water Management 63: 125–137.

Karam, F; Lahoud, R; Masaad, R; Kabalan, R; Chalita, C; Rouphael, Y. 2007. Evapotranspiration, seed yield and water use efficiency of drip irrigated sunflower under full and deficit irrigation conditions. Agricultural water management 90: 213-223.

Kashyap, P; Panda, R. 2001. Evaluation of evapotranspiration estimation methods and development of crop-coefficientes for potato crop in a sub-humid región. Agricultural Water Management 50: 9-25.

Katerji, N; Rana, G. 2006.Modelling evapotranspiration of six irrigated crops under Mediterranean climate conditions. Agricultural and Forest Meteorology 138: 142–155.

Katsoulas, N; Baille, A; Kittas, C. 2001. Effect of misting on transpiration and conductances of a greenhouse rose canopy. Agricultural and Forest Meteorology 106: 233–247.

Kirnak, H; Hansen, R; Keener, h; Short, T. 2002. An evaluation of physically based and empirically determined evapotranspiration models for nursery plants. Turk J Agric For 26: 355-362.

Kittas, C; Dimokas, G; Lykas, C; Katsoulas, N. 2005. Effect of two irrigation frequencies on rose flower production and quality. Acta Hort. (ISHS) 691:333-340.

Luján, J. 1992. Eficiencia de riego. Ministerio de Obras Públicas y Transportes. Centro de estudio y Experimentación de Obras Públicas – CEDEX. Madrid.

Li, Y; Cui, J; Zhang, T; Zhao, H. 2003. Measurement of evapotranspiration of irrigated spring wheat and maize in a semi-arid región of north China. Agricultural Water Management 61: 1–12.

Loos, C; Gayler, S; Priesack, E. 2007. Assessment of water balance simulations for large-scale weighing lysimeters. Journal of Hydrology 335: 259– 270.

Lopez-Urrea, R; Martín, F; Fabeiro, C; Moratalla, A. 2006. Testing evapotranspiration equations using lysimeter observations in a semiarid climate. Agricultural water management 85: 15-26.

Martín, I. 2004. Evaluación y propuesta de mejoramiento del sistema de riego por goteo de Flores de Funza S.A C.I. Universidad Nacional de Colombia. Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola. Bogotá

Medeiros, G; Arruda, F; Sakai, E; Fujiwara, M. 2001. The influence of crop canopy on evapotranspiration and crop coefficient of beans (Phaseolus vulgaris L.). Agricultural Water Management 49: 211-224.

Medrano, E. Alonso, F; Sanchez-Guerrero, M; Lorenzo, P. 2008. Programación del riego en cultivo de tomate en sustrato mediante la modelización de la transpiración y el desarrollo foliar. XXVI Congreso Nacional de Riegos: Huesca, p. 33-34.

Merkley, G; Allen, R. Sprinkle & Trickle Irrigation: Lecture notes. Biological and Irrigation Engineering Department. Utah State University, Logan, Utah: 2004. pág, 195, 218.

Ministerio de Agricultura – Minagricultura e Instituto Colombiano Agropecuario – ICA. 1974. Memorías: Curso de Floricultura. Tibaitatá – Colombia, pp 78.

Ministerio de Agricultura – Minagricultura. 2007. Los biocombustibles en Colombia. Santa Marta. Consultado en minagricultura.gov.co. Consultada 02/10/07.

Miranda, F; Gondim, R; Costa, C. 2006. Evapotranspiration and crop coefficients for tabasco pepper (Capsicum frutescens L.). Agricultural Water Management 82: 237–246.

Montero, J; Antón, A; Muñoz, P; Lorenzo, P.2001. Transpiration from geranium grown under high temperatures and low humidities in greenhouses. Agricultural and Forest Meteorology, Vol. 107, Issue 4: 323-332.

Nieto, D; Flórez, V. 2006. Producción y calidad de rosa y clavel cultivados en cascarilla de arroz y fibra de coco. En: Avances sobre Fertirriego en la floricultura colombiana. Florez *et al* Eds. ISBN: 958-701-722-6. UNIBIBLOS. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, COL. pp 129-142.

Newman, S. 1997. Efectos del clima en la fisiolgía de la floración. En Aspectos fisiológicos de la programación de cosecha en flores. Memorias del Cuarto Curso Internacional de Actualización de Agrónomos. Centro de Investigaciones y Asesorías Agroindustriales. Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. Colombia, pp. 1-14.

Orgaz, F; Fernández, M; Bonachela, M; Ferere, E. 2005. Evapotranspiration of horticultural crops in an unheated plastic greenhouse. Agricultural Water Management 72: 81–96.

Paco, T; Ferreira, M; Conceicao, N. 2006. Peach orchard evapotranspiration in a sandy soil: Comparison between eddy covariance measurements and estimates by the FAO 56 approach. Agricultural Water Management 85: 305 – 313.

Quintero, M. 2009. Propiedades hidro-físicas de cuatro sustratos usados en cultivos de flores de corte en la Sabana de Bogotá. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia.

Rodríguez, M. 1998. Estudio del consumo de agua para un cultivo de rosa bajo invernadero ubicado en el Rosal (Cund.). Tesis. Universidad Nacional de Colombia.

Rouphael, Y; Colla, G. 2004. Modelling the transpiration of a greenhouse zucchini crop grown under a Mediterranean climate using the Penman-Monteith equation and its simplified version. Australian Journal of Agricultural Research 55(9) 931 – 937.

Salisbury & Ross. 1992. Fisiología de las plantas 1. Células: agua, soluciones y superficies. Paraninfo & Thomson-Learning. España.

Sepaskhah, A; Ilampour, S. 1995. Effects of soil moisture stress on evapotranspiration partitioning. Agricultural Water Management 28: 31 l-323.

Sepaskhah, A; Rezaee-pour, S; Kamgar-Haghighi, A. 2006. Water budget approach to quantify cowpea yield using crop characteristic equations. Biosystems Engineering 95: (4), 583–596.

Schilling, K; Kiniry, J. 2007. Estimation of evapotranspiration by reed canarygrass using field observations and model simulations. Journal of Hydrology 337: 356– 363.

Stanghellini, C. 1993. Evapotranspiration in greenhouses with special reference to mediterranean conditions. Acta Hort. (ISHS) 335:295-304.

Stefano, C; Ferro, V. 1997. Estimation of evapotranspiration by Hargreaves formula and remotely sensed data in semi-arid mediterrane an areas. J. Agric. Engng Res 68: 189-199.

Suay, R; Martínez, P; Roca, D; Martínez, M; Herrero, J; Ramos, C. 2003. Measurement and estimation of transpiration of a soilless rose crop and application to irrigation management. Acta Hort. (ISHS) 614:625-630.

Trambouze, W; Bertuzzi, P; Voltz, M. 1998. Comparison of methods for estimating actual evapotranspiration in a row-cropped vineyard. Agricultural and Forest Meteorology 91: 193-208.

Taiz, L; Zeiger, E. 2006. Plant Physiology. Third Edition. Universitat Jaume. Canadá.

Tipis, P. 2006. Comparison of wáter consumption between greenhouse an outdoor cultivation. Thesis. International Institute for Geo-information Science and Earth Observation. Enschede, The Netherlands.

Tyagi, N; Sharma, D; Luthra, S. 2000. Determination of evapotranspiration and crop coeficients of rice and sunflower with lysimeter. Agricultural Water Management 45: 41-54.

Ulloa, Natalí; Vargas, Natalia; Miranda, D; Fischer, G. 2006. Efecto de la salinidad sobre los parámetros de desarrollo en especie hortícolas cultivadas en sistemas sin suelo. En: Avances sobre Fertirriego en la floricultura colombiana. Florez *et al* Eds. ISBN: 958-701-722-6. UNIBIBLOS. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, COL. pp 53-75.

Villalobos, F; Testi, L; Rizzalli, R; Orgaz, F. 2003. Evapotranspiration and crop coefficients of irrigated garlic (Allium sativum L.) in a semi-arid climate. Agricultural Water Management 64: 233–249.

Villa-Nova, N; Pereira, A; Shock, C. 2007. Estimation of Reference Evapotranspiration by an Energy Balance Approach. Biosystems Engineering 96: 605–615.

Wen-jin, Y; Ryo, K; Lian-hua, L; Hirokazu, F.2010. A computer program for automatic watering based on potential evapotranspiration by penman method and predicted leaf area in miniature pot rose production. Agricultural Sciences in China. 9(3): 370-377.

Vu, S; Watanabe, H; Takagi, K. 2005. Application of FAO-56 for evaluating evapotranspiration in simulation of pollutant runoff from paddy rice field in Japan. Agricultural Water Management 76: 195–210.

Wang, S; Deltour, J. 1999. An experimental model for leaf temperature of greenhouse-grown tomato. Acta Hort. (ISHS) 491:101-106.

Wright, J; Allen, R; Howell, T. 2000. Conversion between evapotranspiration references and methods. National irrigation symposium: proceedings of the 4th Decennial Symposium: 251-259. American Society of Agricultural Engineers. Arizona.

Yunusa, I; Walker, R; Lu, R. 2004. Evapotranspiration components from energy balance, sapflow and microlysimetry techniques for an irrigated vineyard in inland Australia.

http://www.lasflores.com:8989/htm/categoria.jsp?cat=18. Consultado 10 de diciembre de 2010.

ANEXOS

Anexo A: Evaluación del Sistema de Riego por Goteo

1 EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE RIEGO

Esta evaluación tuvo como objetivo definir la distribución de uniformidad (DU) del riego a partir del coeficiente de uniformidad (CU) y el coeficiente de variación (υ) de los goteros. Para ello, se realizaron dos tipos de evaluaciones:

- ✓ Con los registros diarios de los 10 RR.
- ✓ Con un aforo de todos los goteros que conformaban el sistema de riego de la UE.

1.1 PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR LA DISTRIBUCIÓN DE UNIFORMIDAD DIARIA EN LOS GOTEROS DE LOS RECIPIENTES RECOLECTORES DE AGUA DE RIEGO

La DU se calculo diariamente mediante los registros de los 10 RR. Se determinó una para cada línea de gotero. El procedimiento seguido para ello fue el siguiente:

1. Se verificó a diario la presión de operación del sistema de riego en 35 psi.
2. Se pesaron diariamente los RR.
3. Se organizaron los registros diarios de RR en orden ascendente.
4. Se calculó el promedio general y la desviación estándar diaria del volumen diario de los goteros en los RR.
5. Se estableció el promedio diario del cuarto menor del volumen diario de los goteros en los RR.
6. Se calculó el CU de cada línea de distribución de la siguiente manera:

$$\boldsymbol{CU = \frac{\overline{q}_{(1/4)}}{\overline{q}} * 100\%}$$

Donde:

CU: Coeficiente de uniformidad de distribución, adimensional
$\overline{q}(1/4)$: Promedio del cuarto menor del volumen diario de los goteros en los RR
$\overline{q}$: Volumen promedio diario de los goteros en los RR

7. Se estimó el υ por línea de distribución:

$$\boldsymbol{\upsilon = \frac{\partial}{\overline{q}}}$$

Donde:

υ: Coeficiente de variación, adimensional

σ: Desviación estándar de las 50 menores muestras, todas a la misma presión de trabajo

$\bar{q}$: Promedio del volumen de los goteros descarga

8. Se determinó la DU con la relación de los valores obtenidos de CU y υ.

La Figura 20 muestra la manera como se tomaron los datos de volúmenes de agua de los goteros y la disposición de las líneas de riego en la CE.

Figura 20. Ensayo de distribución de uniformidad de goteros con frecuencia diaria de toma de datos. a)Toma de datos de volumen de los goteros; b) Ubicación de líneas de riego

(a)

(b)

1.2 UNIFORMIDAD DE TODOS LOS GOTEROS DEL SISTEMA DE RIEGO DE LA UNIDAD EXPERIMENTAL

Se realizó un aforamiento de los 37 goteros que conformaron el sistema de riego de la UE. La Figura 21 muestra el registro fotográfico del ensayo de uniformidad a todos los goteros.

Figura 21. Prueba de aforo para determinación de la distribución de uniformidad.

(a)

(b)

(c)

A continuación se describe el procedimiento llevado a cabo para la determinación de la DU en todos los goteros:

1. Se verificó la presión de operación del sistema de riego en 35 psi.

2. Se programó el controlador de riego para realizar riegos de 2.5 minutos y se apagó el dispositivo.
3. Se instaló un recipiente plástico para recolectar agua de riego por gotero.
4. Se introdujeron, en cada recipiente plástico, los cuatro espigos que conforman la salida de cada gotero.
5. Se encendió el dispositivo de riego, se recolectó agua de riego en cada recipiente plástico. Una vez pasado el tiempo de riego, se retiraron los recipientes y se pesaron.
6. Se repitió el proceso desde el paso 4.
7. Se determinó el caudal de los goteros o emisores de la siguiente manera:

$$q = \frac{\forall}{t}$$

Donde:

q: Caudal de los goteros
$\forall$: Volumen de agua de los goteros
t: Tiempo de descarga de agua en los goteros

8. Se determinó la desviación estándar del caudal de los goteros por cada medición:

$$\sigma = \frac{\sum_{i=1}^{n}(q_I - \overline{q})}{n - 1}$$

9. Se estimó el υ utilizando el valor de desviación estándar más alta obtenida en las diferentes mediciones, por lo tanto:

$$\boldsymbol{\upsilon = \frac{\partial}{\bar{q}}}$$

Donde:

υ: Coeficiente de variación de fabricación, adimensional
σ: Desviación estándar de las 50 menores muestras, todas a la misma presión de trabajo, expresada en l/s
$\bar{q}$: Promedio de descarga, expresada en l/s

10. Se calculó el CU empleando los valores del cuarto menor de los caudales de descarga obtenidos en cada repetición así:

$$\boldsymbol{CU = \frac{\bar{q}_{(1/4)}}{\bar{q}} * 100\%}$$

Donde:

CU: Coeficiente de uniformidad de distribución
$\bar{q}_{(1/4)}$: Promedio del cuarto menor de los caudales de los goteros
$\bar{q}$: Caudal promedio de descarga

11. Se determinó la eficiencia de distribución del sistema de riego del experimento es:

$$E_d = \frac{\sum V_a}{V_d}$$

Donde:

$\sum V_a$: sumatoria de todos los volúmenes suministrados a las unidades de riego
V_c: volumen elevado en todas las estaciones de bombeo

12. Se determinó la DU con la relación de los datos de CU y υ.

1.3 RESULTADOS DE LA DISTRIBUCIÓN DE UNIFORMIDAD DIARIA EN LOS GOTEROS DE LOS RECIPIENTES RECOLECTORES DE AGUA DE RIEGO

Las tablas 1 y 2 presentan los registros de los volúmenes diarios de riego en los RR para la línea de riego 1 y 2, respectivamente. Estos datos se encuentran ordenados ascendentemente para cada día. Las figuras 3 y 4 muestran el comportamiento diario de los volúmenes de riego de los goteros en los RR durante el desarrollo del experimento de ETc en rosa.

Tabla 12. Resultados de la distribución de uniformidad de la línea de riego

Día	Línea de goteo No. 1 Registros diarios ordenados ascendentemente					Promedio general	Promedio 25% registro menores	Desviación estándar	CU (%)		u	DU
1	979.0	1052.0	1071.0	1074.0	1105.0	1056.2	1015.5	47.2	96.1	Excelente	0.04	Excelente
2	692.0	802.0	812.0	813.0	838.0	791.4	747.0	57.1	94.4	Excelente	0.07	Buena
3	1237.0	1357.0	1362.0	1368.0	1411.0	1347.0	1297.0	65.1	96.3	Excelente	0.05	Excelente
4	1217.0	1240.0	1324.0	1344.0	1381.0	1301.2	1228.5	69.9	94.4	Excelente	0.05	Buena
5	1213.0	1321.0	1328.0	1337.0	1377.0	1315.2	1267.0	61.1	96.3	Excelente	0.05	Excelente
6	1210.0	1328.0	1329.0	1339.0	1369.0	1315.0	1269.0	61.0	96.5	Excelente	0.05	Excelente
7	1315.0	1455.0	1462.0	1484.0	1515.0	1446.2	1385.0	77.0	95.8	Excelente	0.05	Buena
8	965.0	1057.0	1063.0	1068.0	1100.0	1050.6	1011.0	50.7	96.2	Excelente	0.05	Excelente
9	1043.0	1195.0	1199.0	1202.0	1234.0	1174.6	1119.0	75.2	95.3	Excelente	0.06	Buena
10	1275.0	1458.0	1461.0	1468.0	1512.0	1434.8	1366.5	92.0	95.2	Excelente	0.06	Buena
11	1421.0	1572.0	1584.0	1586.0	1700.0	1572.6	1496.5	99.4	95.2	Excelente	0.06	Buena
12	1568.0	1716.0	1718.0	1738.0	1785.0	1705.0	1642.0	81.5	96.3	Excelente	0.05	Excelente
13	1606.0	1770.0	1778.0	1796.0	1841.0	1758.2	1688.0	89.4	96.0	Excelente	0.05	Buena
14	1207.0	1316.0	1318.0	1334.0	1371.0	1309.2	1261.5	61.2	96.4	Excelente	0.05	Excelente
15	1148.0	1259.0	1261.0	1271.0	1309.0	1249.6	1203.5	60.3	96.3	Excelente	0.05	Excelente
16	1073.0	1185.0	1190.0	1201.0	1231.0	1176.0	1129.0	60.3	96.0	Excelente	0.05	Buena
17	1205.0	1316.0	1316.0	1325.0	1363.0	1305.0	1260.5	59.2	96.6	Excelente	0.05	Excelente
18	1202.0	1312.0	1318.0	1332.0	1368.0	1306.4	1257.0	62.3	96.2	Excelente	0.05	Excelente
19	1307.0	1422.0	1439.0	1457.0	1510.0	1427.0	1364.5	74.8	95.6	Excelente	0.05	Buena
20	933.0	955.0	1052.0	1061.0	1096.0	1019.4	944.0	71.2	92.6	Buena	0.07	Buena
21	1194.0	1307.0	1325.0	1365.0	1407.0	1319.6	1250.5	80.1	94.8	Excelente	0.06	Buena
22	1075.0	1174.0	1178.0	1186.0	1190.0	1160.6	1124.5	48.3	96.9	Excelente	0.04	Excelente
23	959.0	1046.0	1053.0	1057.0	1089.0	1040.8	1002.5	48.6	96.3	Excelente	0.05	Excelente
24	1194.0	1304.0	1308.0	1309.0	1366.0	1296.2	1249.0	62.6	96.4	Excelente	0.05	Excelente
25	1204.0	1309.0	1312.0	1329.0	1368.0	1304.4	1256.5	60.8	96.3	Excelente	0.05	Excelente
26	799.0	870.0	872.0	887.0	910.0	867.6	834.5	41.5	96.2	Excelente	0.05	Excelente
27	957.0	1054.0	1066.0	1069.0	1090.0	1047.2	1005.5	52.1	96.0	Excelente	0.05	Excelente
28	1316.0	1443.0	1444.0	1462.0	1509.0	1434.8	1379.5	71.6	96.1	Excelente	0.05	Excelente
29	961.0	1053.0	1063.0	1067.0	1094.0	1047.6	1007.0	50.7	96.1	Excelente	0.05	Excelente
30	1383.0	1507.0	1513.0	1541.0	1575.0	1503.8	1445.0	72.7	96.1	Excelente	0.05	Excelente
31	1464.0	1643.0	1672.0	1719.0	1720.0	1643.6	1553.5	105.6	94.5	Excelente	0.06	Buena
32	895.0	1299.0	1301.0	1325.0	1363.0	1236.6	1097.0	192.7	88.7	Buena	0.16	Inaceptable
33	1763.0	1785.0	1820.0	1841.5	1871.0	1816.1	1774.0	43.2	97.7	Excelente	0.02	Excelente
34	1086.0	1186.0	1189.0	1212.0	1242.0	1183.0	1136.0	58.7	96.0	Excelente	0.05	Excelente
35	1199.0	1303.0	1304.0	1336.0	1375.0	1303.4	1251.0	65.4	96.0	Excelente	0.05	Buena
36	1487.0	1623.0	1787.0	1804.0	1878.0	1715.8	1555.0	158.2	90.6	Buena	0.09	Inaceptable
37	1348.0	1463.0	1467.0	1479.0	1535.0	1458.4	1405.5	68.1	96.4	Excelente	0.05	Excelente
38	1437.0	1583.0	1584.0	1601.0	1655.0	1572.0	1510.0	81.0	96.1	Excelente	0.05	Buena
39	1878.0	2061.0	2065.0	2090.0	2154.0	2049.6	1969.5	102.9	96.1	Excelente	0.05	Buena
40	1039.0	1111.0	1139.0	1169.0	1191.0	1129.8	1075.0	59.1	95.1	Excelente	0.05	Buena
41	1699.0	1857.0	1864.0	1883.0	1943.0	1849.2	1778.0	90.5	96.1	Excelente	0.05	Excelente
42	1130.0	1241.0	1246.0	1261.0	1301.0	1235.8	1185.5	63.7	95.9	Excelente	0.05	Buena
43	1090.0	1215.0	1225.0	1230.0	1265.0	1205.0	1152.5	67.0	95.6	Excelente	0.06	Buena
44	1174.0	1304.0	1320.0	1332.0	1361.0	1298.2	1239.0	72.5	95.4	Excelente	0.06	Buena
45												
46	1297.0	1510.0	1520.0	1635.0	1825.0	1557.4	1403.5	193.1	90.1	Buena	0.12	Inaceptable
47	1073.0	1181.0	1182.0	1199.0	1229.0	1172.8	1127.0	59.1	96.1	Excelente	0.05	Buena
48	1190.0	1309.0	1318.0	1330.0	1363.0	1302.0	1249.5	65.9	96.0	Excelente	0.05	Buena
49	1318.0	1437.0	1453.0	1462.0	1497.0	1433.4	1377.5	68.1	96.1	Excelente	0.05	Excelente
50	1194.0	1315.0	1315.0	1324.0	1361.0	1301.8	1254.5	63.2	96.4	Excelente	0.05	Excelente
51	1340.0	1465.0	1475.0	1485.0	1528.0	1458.6	1402.5	70.5	96.2	Excelente	0.05	Excelente
52	1483.0	1627.0	1632.0	1640.0	1698.0	1616.0	1555.0	79.6	96.2	Excelente	0.05	Excelente
53	1479.0	1626.0	1628.0	1632.0	1686.0	1610.2	1552.5	77.5	96.4	Excelente	0.05	Excelente
54												
55	1251.0	1373.0	1383.0	1394.0	1435.0	1367.2	1312.0	69.1	96.0	Excelente	0.05	Buena
56	1631.0	1789.0	1796.0	1802.0	1865.0	1776.6	1710.0	86.9	96.3	Excelente	0.05	Excelente
57	175.0	185.0	191.0	195.0	200.0	189.2	180.0	9.7	95.1	Excelente	0.05	Buena
58	1820.0	1959.0	2004.0	2005.0	2015.0	1960.6	1889.5	81.5	96.4	Excelente	0.04	Excelente
59	1785.0	1965.0	1966.0	1968.0	2053.0	1947.4	1875.0	98.2	96.3	Excelente	0.05	Buena
60	1459.0	1608.0	1609.0	1616.0	1669.0	1592.2	1533.5	78.6	96.3	Excelente	0.05	Excelente
61	1300.0	1433.0	1441.0	1451.0	1508.0	1426.6	1366.5	76.6	95.8	Excelente	0.05	Buena
62	1613.0	1779.0	1779.0	1796.0	1860.0	1765.4	1696.0	91.5	96.1	Excelente	0.05	Buena
63	1321.0	1450.0	1456.0	1472.0	1515.0	1442.8	1385.5	72.7	96.0	Excelente	0.05	Buena
64	1470.0	1598.0	1614.0	1629.0	1682.0	1598.6	1534.0	78.5	96.0	Excelente	0.05	Excelente
65	1530.0	1682.0	1688.0	1700.0	1762.0	1672.4	1606.0	85.7	96.0	Excelente	0.05	Buena
66	3204.0	3439.0	3452.0	3468.0	3580.0	3428.6	3321.5	137.5	96.9	Excelente	0.04	Excelente
67	1335.0	1447.0	1452.0	1470.0	1512.0	1443.2	1391.0	65.7	96.4	Excelente	0.05	Excelente
68	2210.0	2445.0	2448.0	2454.0	2541.0	2419.6	2327.5	123.8	96.2	Excelente	0.05	Buena
69	735.0	737.0	814.0	820.0	844.0	790.0	736.0	50.6	93.2	Buena	0.06	Buena
70	1631.0	1777.0	1778.0	1804.0	1855.0	1769.0	1704.0	83.4	96.3	Excelente	0.05	Excelente
71	763.6	894.2	905.4	909.2	949.4	884.4	828.9	70.7	93.7	Buena	0.08	Buena
72	1237.4	1380.8	1381.8	1387.6	1429.6	1363.4	1309.1	73.3	96.0	Excelente	0.05	Buena
73	1327.0	1610.0	1613.0	1630.0	1668.0	1569.6	1468.5	137.6	93.6	Buena	0.09	Inaceptable
74	1819.0	2091.0	2097.0	2113.0	2190.0	2062.0	1955.0	141.5	94.8	Excelente	0.07	Buena
75	1408.0	1611.0	1614.0	1627.0	1688.0	1589.6	1509.5	106.2	95.0	Excelente	0.07	Buena

Tabla 13. Resultados de la distribución de uniformidad de la línea de riego 2.

Día	Linea de goteo No. 2 Registros diarios ordenados ascendentemente					Promedio general	Promedio 25% registro menores	Desviación estándar	CU (%)		u	DU
1	1059.0	1070.0	1079.0	1079.0	1136.0	1084.6	1064.5	29.9	98.1	Excelente	0.03	Excelente
2	796.0	817.0	817.0	819.0	868.0	823.4	806.5	26.7	97.9	Excelente	0.03	Excelente
3	1346.0	1372.0	1386.0	1391.0	1444.0	1387.8	1359.0	35.9	97.9	Excelente	0.03	Excelente
4	1323.0	1347.0	1362.0	1364.0	1426.0	1364.4	1335.0	38.1	97.8	Excelente	0.03	Excelente
5	1314.0	1350.0	1361.0	1366.0	1432.0	1364.6	1332.0	42.8	97.6	Excelente	0.03	Excelente
6	1315.0	1342.0	1354.0	1363.0	1428.0	1360.4	1328.5	41.9	97.7	Excelente	0.03	Excelente
7	1454.0	1482.0	1490.0	1497.0	1572.0	1499.0	1468.0	44.0	97.9	Excelente	0.03	Excelente
8	1055.0	1082.0	1088.0	1089.0	1144.0	1091.6	1068.5	32.4	97.9	Excelente	0.03	Excelente
9	1177.0	1207.0	1213.0	1219.0	1275.0	1218.2	1192.0	35.6	97.8	Excelente	0.03	Excelente
10	1430.0	1475.0	1484.0	1492.0	1566.0	1489.4	1452.5	49.1	97.5	Excelente	0.03	Excelente
11	1545.0	1598.0	1605.0	1610.0	1684.0	1608.4	1571.5	49.6	97.7	Excelente	0.03	Excelente
12	1710.0	1751.0	1751.0	1764.0	1846.0	1764.4	1730.5	49.9	98.1	Excelente	0.03	Excelente
13	1756.0	1805.0	1809.0	1816.0	1900.0	1817.2	1780.5	52.0	98.0	Excelente	0.03	Excelente
14	1310.0	1339.0	1345.0	1358.0	1420.0	1354.4	1324.5	40.7	97.8	Excelente	0.03	Excelente
15	1250.0	1279.0	1286.0	1287.0	1350.0	1290.4	1264.5	36.6	98.0	Excelente	0.03	Excelente
16	1181.0	1205.0	1210.0	1215.0	1271.0	1216.4	1193.0	33.2	98.1	Excelente	0.03	Excelente
17	1298.0	1334.0	1346.0	1346.0	1411.0	1347.0	1316.0	40.8	97.7	Excelente	0.03	Excelente
18	1421.0	1475.0	1480.0	1483.0	1555.0	1482.8	1448.0	47.7	97.7	Excelente	0.03	Excelente
19	1428.0	1471.0	1472.0	1484.0	1568.0	1484.6	1449.5	51.2	97.6	Excelente	0.03	Excelente
20	1032.0	1042.0	1069.0	1070.0	1076.0	1057.8	1037.0	19.5	98.0	Excelente	0.02	Excelente
21	1300.0	1337.0	1339.0	1344.0	1411.0	1346.2	1318.5	40.2	97.9	Excelente	0.03	Excelente
22	1162.0	1200.0	1206.0	1207.0	1268.0	1208.6	1181.0	38.0	97.7	Excelente	0.03	Excelente
23	1026.0	1066.0	1076.0	1077.0	1128.0	1074.6	1046.0	36.4	97.3	Excelente	0.03	Excelente
24	1271.0	1335.0	1344.0	1345.0	1409.0	1340.8	1303.0	49.0	97.2	Excelente	0.04	Excelente
25	1291.0	1334.0	1345.0	1346.0	1409.0	1345.0	1312.5	42.2	97.6	Excelente	0.03	Excelente
26	855.0	890.0	890.0	895.0	940.0	894.0	872.5	30.3	97.6	Excelente	0.03	Excelente
27	1010.0	1026.0	1033.0	1074.0	1075.0	1043.6	1018.0	29.4	97.5	Excelente	0.03	Excelente
28	1433.0	1467.0	1474.0	1477.0	1550.0	1480.2	1450.0	42.8	98.0	Excelente	0.03	Excelente
29	1049.0	1087.0	1087.0	1094.0	1141.0	1091.6	1068.0	32.8	97.8	Excelente	0.03	Excelente
30	1529.0	1534.0	1537.0	1542.0	1714.0	1571.2	1531.5	80.0	97.5	Excelente	0.05	Buena
31	1288.0	1549.0	1648.0	1653.0	1679.0	1563.4	1418.5	161.7	90.7	Buena	0.10	Inaceptable
32	1281.0	1325.0	1336.0	1339.0	1402.0	1336.6	1303.0	43.3	97.5	Excelente	0.03	Excelente
33	1745.0	1828.0	1832.0	1839.0	1920.0	1832.8	1786.5	62.0	97.5	Excelente	0.03	Excelente
34	1166.0	1203.0	1212.0	1216.0	1272.0	1213.8	1184.5	38.1	97.6	Excelente	0.03	Excelente
35	1292.0	1331.0	1331.0	1342.0	1342.0	1327.6	1311.5	20.6	98.8	Excelente	0.02	Excelente
36	1763.0	1812.0	1826.0	1833.0	1929.0	1832.6	1787.5	60.4	97.5	Excelente	0.03	Excelente
37	1448.0	1488.0	1495.0	1575.0	1585.0	1518.2	1468.0	59.3	96.7	Excelente	0.04	Excelente
38	1569.0	1612.0	1612.0	1630.0	1703.0	1625.2	1590.5	48.9	97.9	Excelente	0.03	Excelente
39	2036.0	2091.0	2103.0	2120.0	2222.0	2114.4	2063.5	67.9	97.6	Excelente	0.03	Excelente
40	1136.0	1157.0	1166.0	1172.0	1226.0	1171.4	1146.5	33.4	97.9	Excelente	0.03	Excelente
41	1845.0	1883.0	1888.0	1910.0	1998.0	1904.8	1864.0	57.1	97.9	Excelente	0.03	Excelente
42	1158.0	1181.0	1202.0	1209.0	1287.0	1207.4	1169.5	48.7	96.9	Excelente	0.04	Excelente
43	1203.0	1235.0	1235.0	1241.0	1296.0	1242.0	1219.0	33.7	98.1	Excelente	0.03	Excelente
44	1286.0	1326.0	1332.0	1340.0	1401.0	1337.0	1306.0	41.4	97.7	Excelente	0.03	Excelente
45												
46	1444.0	1505.0	1511.0	1535.0	1544.0	1507.8	1474.5	39.2	97.8	Excelente	0.03	Excelente
47	1130.0	1194.0	1199.0	1207.0	1265.0	1199.0	1162.0	48.0	96.9	Excelente	0.04	Excelente
48	1295.0	1334.0	1342.0	1396.0	1402.0	1353.8	1314.5	45.0	97.1	Excelente	0.03	Excelente
49	1426.0	1466.0	1466.0	1475.0	1542.0	1475.0	1446.0	42.0	98.0	Excelente	0.03	Excelente
50	1300.0	1332.0	1333.0	1337.0	1396.0	1339.6	1316.0	34.8	98.2	Excelente	0.03	Excelente
51	1459.0	1493.0	1496.0	1502.0	1568.0	1503.6	1476.0	39.7	98.2	Excelente	0.03	Excelente
52	1597.0	1633.0	1654.0	1658.0	1735.0	1655.4	1615.0	50.6	97.6	Excelente	0.03	Excelente
53	1603.0	1645.0	1646.0	1649.0	1725.0	1653.6	1624.0	44.2	98.2	Excelente	0.03	Excelente
54												
55	1332.0	1389.0	1395.0	1407.0	1439.0	1392.4	1360.5	38.9	97.7	Excelente	0.03	Excelente
56	1773.0	1813.0	1813.0	1815.0	1909.0	1824.6	1793.0	50.4	98.3	Excelente	0.03	Excelente
57	180.0	185.0	186.0	196.0	198.0	189.0	182.5	7.7	96.6	Excelente	0.04	Excelente
58	1977.0	2022.0	2033.0	2043.0	2122.0	2039.4	1999.5	52.6	98.0	Excelente	0.03	Excelente
59	1930.0	1973.0	1995.0	2001.0	2092.0	1998.2	1951.5	59.4	97.7	Excelente	0.03	Excelente
60	1756.0	1786.0	1791.0	1801.0	1876.0	1802.0	1771.0	44.6	98.3	Excelente	0.02	Excelente
61	1434.0	1459.0	1459.0	1462.0	1526.0	1468.0	1446.5	34.3	98.5	Excelente	0.02	Excelente
62	1790.0	1813.0	1813.0	1816.0	1896.0	1825.6	1801.5	40.7	98.7	Excelente	0.02	Excelente
63	1608.0	1638.0	1643.0	1647.0	1719.0	1651.0	1623.0	41.0	98.3	Excelente	0.02	Excelente
64	1447.0	1476.0	1478.0	1484.0	1549.0	1486.8	1461.5	37.6	98.3	Excelente	0.03	Excelente
65	1678.0	1715.0	1717.0	1721.0	1797.0	1725.6	1696.5	43.5	98.3	Excelente	0.03	Excelente
66	3422.0	3462.0	3500.0	3529.0	3660.0	3514.6	3442.0	90.7	97.9	Excelente	0.03	Excelente
67	1445.0	1474.0	1482.0	1489.0	1550.0	1488.0	1459.5	38.5	98.1	Excelente	0.03	Excelente
68	2260.0	2310.0	2317.0	2330.0	2425.0	2328.4	2285.0	60.2	98.1	Excelente	0.03	Excelente
69	914.0	977.0	978.0	981.0	992.0	968.4	945.5	31.0	97.6	Excelente	0.03	Excelente
70	1609.0	1641.0	1646.0	1661.0	1731.0	1657.6	1625.0	45.2	98.0	Excelente	0.03	Excelente
71	906.2	911.6	915.8	925.0	960.8	923.9	908.9	21.8	98.4	Excelente	0.02	Excelente
72	1376.8	1398.4	1400.2	1420.0	1458.2	1410.7	1387.6	30.6	98.4	Excelente	0.02	Excelente
73	1603.0	1627.0	1636.0	1653.0	1720.0	1647.8	1615.0	44.2	98.0	Excelente	0.03	Excelente
74	2139.0	2144.0	2155.0	2240.0		2169.5	2141.5	47.5	98.7	Excelente	0.02	Excelente
75	1602.0	1637.0	1640.0	1652.0	1720.0	1650.2	1619.5	43.2	98.1	Excelente	0.03	Excelente

Figura 22. Comportamiento diario de los volúmenes de riego de los goteros en los RR durante el desarrollo del experimento de ETc en rosa – Línea 1.

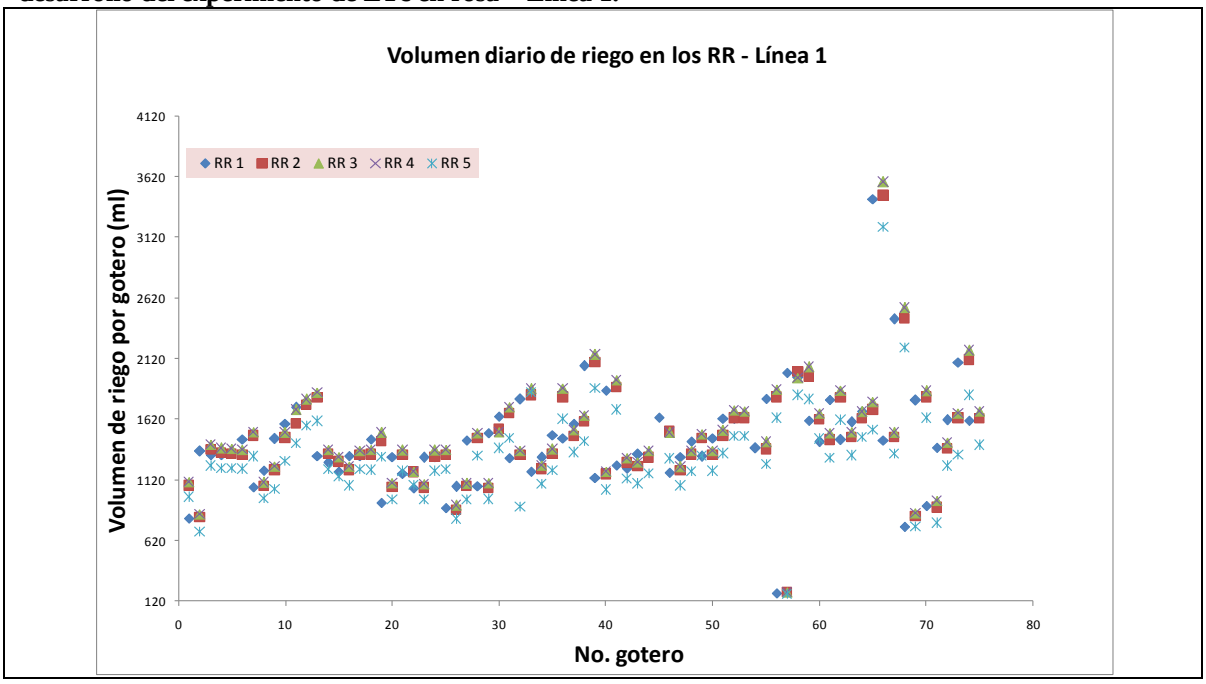
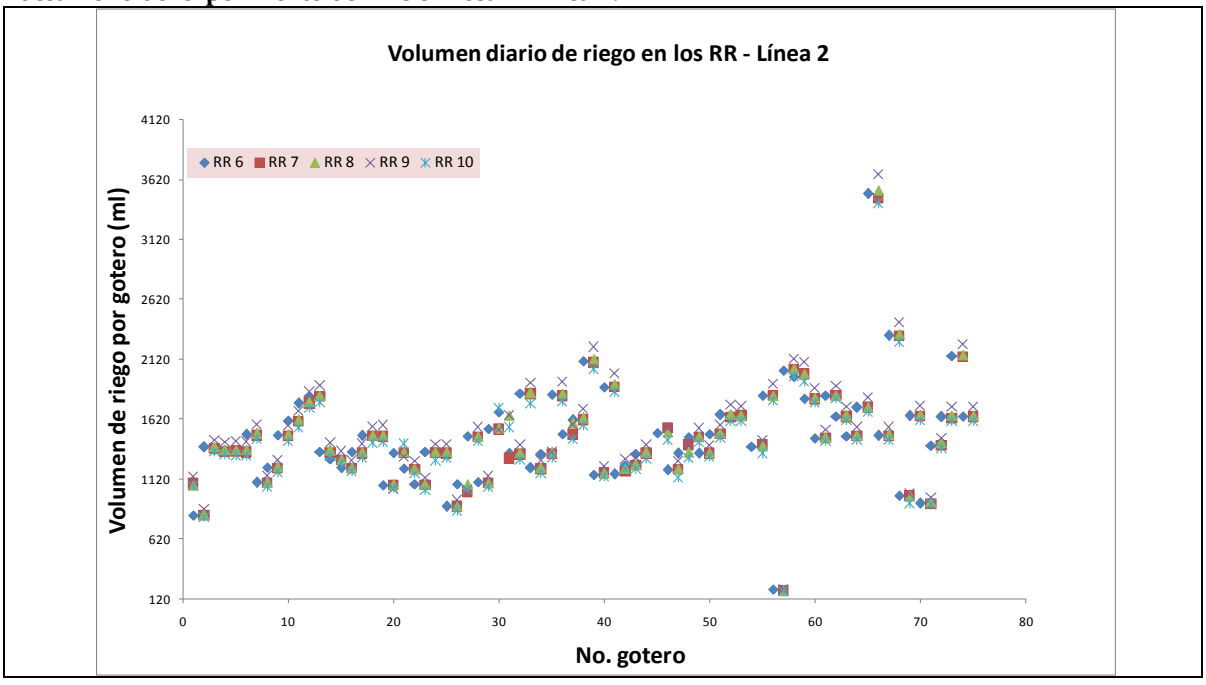


Figura 23. Comportamiento diario de los volúmenes de riego de los goteros en los RR durante el desarrollo del experimento de ETc en rosa – Línea 2.



El CU promedio para el periodo de registro fue superior al 96% en todo el sistema, lo cual significa que este funciona correctamente. En las figuras 5 y 6 se grafican los valores de CU obtenidos diariamente en las líneas de riego de la CE.

Figura 24. Coeficiente de uniformidad de riego – línea 1.

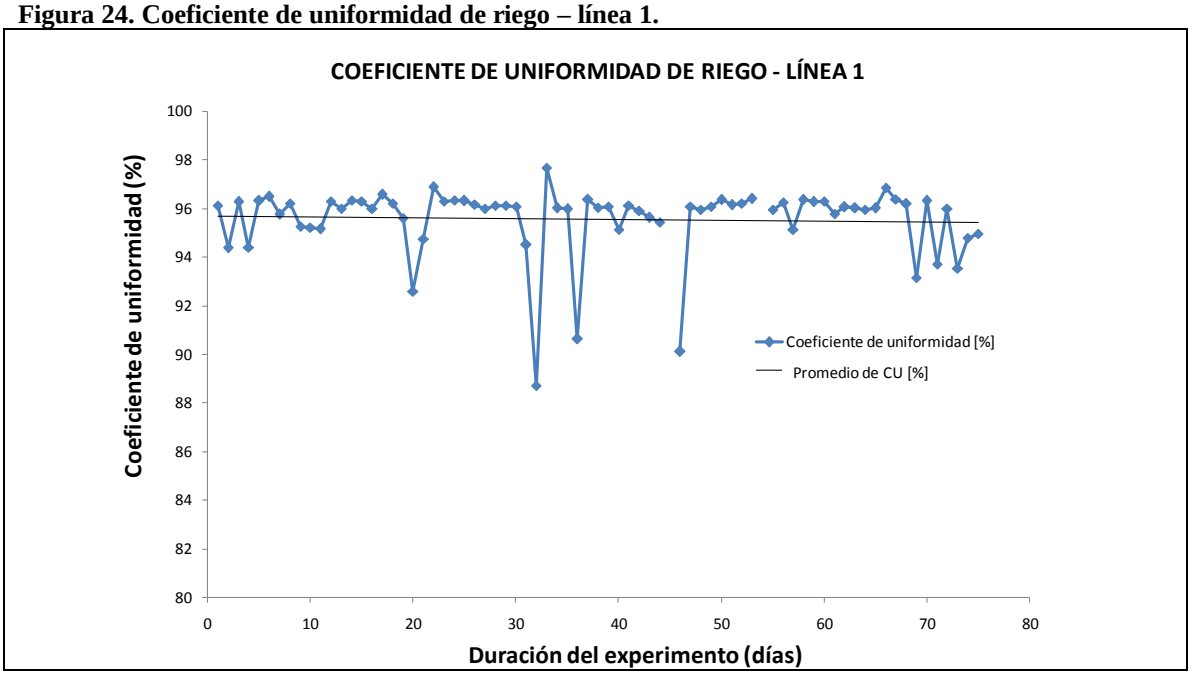
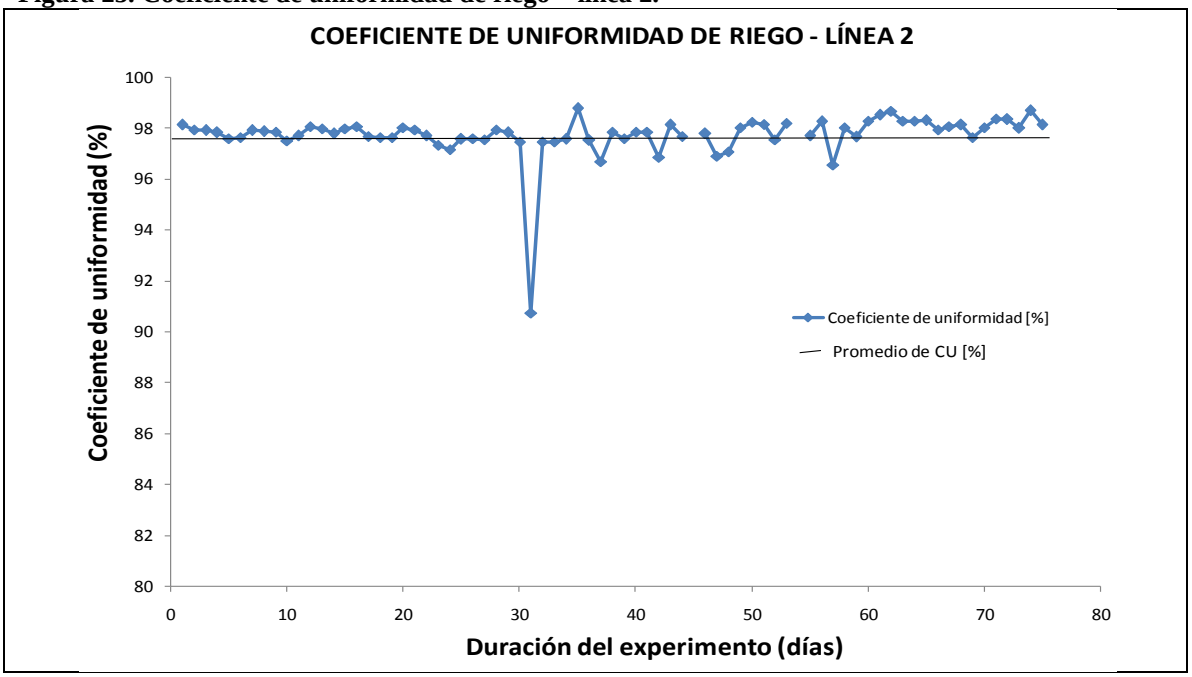


Figura 25. Coeficiente de uniformidad de riego – línea 2.



La Tabla 14 muestra la distribución porcentual de los resultados diarios del CU y DU en cada línea de riego. Para la línea de riego 1, el CU fue excelente en el 90% de los días registrados y buenos para el porcentaje restante; la DU fue excelente en un 48%, buena en

un 47% e inaceptable en un 5%. Para la línea de riego 2, el CU fue excelente para el 99% de los días registrados y bueno para el 1% restante; la DU fue excelente en un 97%, buena en un 1.5% e inaceptable en un 1.5%. Estos resultados permiten concluir que el sistema de distribución del riego de la CE fue homogéneo y fue válido utilizar para el cálculo de la ETc el valor de riego para cada registro del RR más cercano a este.

Tabla 14. Distribución porcentual de los resultados de la clasificación del coeficiente de uniformidad y distribución de uniformidad diaria.

	CU		**DU**		
	Excelente	Bueno	Excelente	Buena	Inaceptable
Línea de riego 1	90%	10%	48%	47%	5%
Línea de riego 2	99%	1%	97%	1.5%	1.5%

1.4 RESULTADOS DEL AFORAMIENTO DE TODOS LOS GOTEROS

La tabla 4 presenta los datos recogidos en campo durante la realización el aforo de todos los goteros para las cuatro mediciones que se realizaron en esta prueba. Se muestra el volumen promedio de agua descargada por gotero y la desviación estándar de cada medición. En el ensayo se encontró que la desviación estándar máxima entre cada medición de volumen de descarga no supero los 4.8 ml, a excepción de los goteros No. 7 y 26. En estos goteros las mediciones sufrieron algún tipo de alteración al momento de retirar los recipientes recolectores del punto de aforo.

Tabla 15. Volumen de agua de los goteros durante el ensayo de aforo de todo el sistema de riego de la unidad experimental.

Emisor*	Volumen de descarga (ml)				Promedio	Desviación
	1	2	3	4	(ml)	Estándar
1	159	158	161	159	159.3	1.3
2	162	157	158	158	158.8	2.2
3	172	172	171	168	170.8	1.9
4	159	161	161	159	160.0	1.2
5	163	163	164	163	163.3	0.5
6	162	161	166	162	162.8	2.2
7	154	149	130	148	145.3	10.5
8	167	168	166	165	166.5	1.3
9	170	170	170	170	170.0	0.0
10	167	165	159	166	164.3	3.6
11	163	161	165	161	162.5	1.9
12	162	159	157	157	158.8	2.4
13	172	171	171	168	170.5	1.7
14	172	172	171	167	170.5	2.4
15	170	169	169	167	168.8	1.3
16	168	169	168	165	167.5	1.7
17	161	164	164	160	162.3	2.1
18	156	167	165	164	163.0	4.8
19	142	141	141	141	141.3	0.5
20	161	163	161	160	161.3	1.3
21	161	160	160	160	160.3	0.6
22	167	163	165	165	165.1	1.6
23	171	169	168	170	169.6	1.3
24	155	158	157	157	156.9	1.3
25	162	163	161	160	161.5	1.3
26	144	150	160	164	154.6	9.1
27	168	166	166	165	166.4	1.3
28	162	162	162	160	161.6	1.1
29	165	166	163	165	164.9	1.3
30	163	158	167	162	162.5	3.7
31	169	166	167	163	166.4	2.5
32	163	161	162	158	161.2	2.2
33	160	155	157	158	157.7	2.1
34	166	166	167	166	165.8	0.5
35	170	176	173	169	171.5	3.2
36	157	156	157	159	156.8	1.3
37	155	159	157	163	158.5	3.4
V**	**6021**	**6016**	**6010**	**5996**		
V***	**6360**	**6360**	**6320**	**6360**		

Emisor*: No. Del gotero o emisor; V**: Volumen total de descarga por emisores; V***: Volumen total suministrado a toda la unidad de riego, obtenido de la lectura del contado

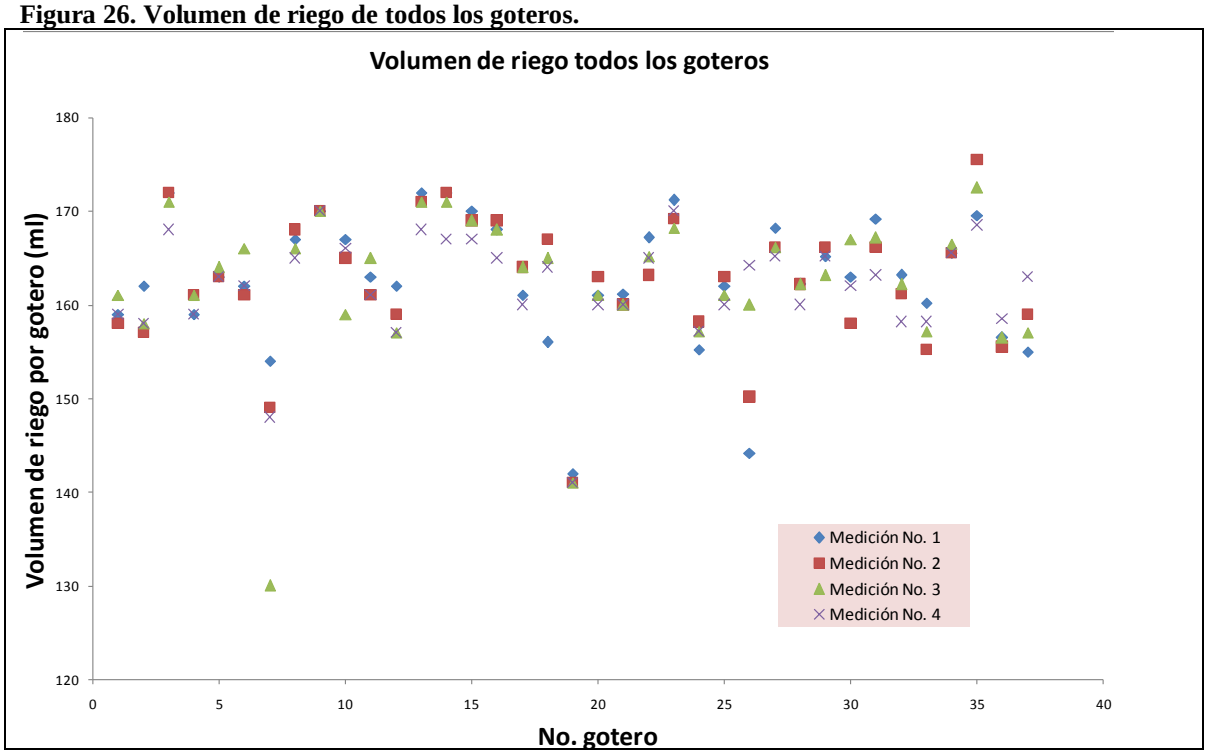
La tabla 5 muestra los caudales de cada gotero aforado. En promedio el caudal obtenido fue de 3.9 [l/s].

Tabla 16. Caudal de descarga de cada emisor del sistema de riego por goteo.

Emisor*	Caudal de descarga (l/h)				Emisor*	Caudal de descarga (l/h)			
	1	2	3	4		1	2	3	4
1	3.8	3.8	3.9	3.8	21	3.9	3.8	3.8	3.8
2	3.9	3.8	3.8	3.8	22	4.0	3.9	4.0	4.0
3	4.1	4.1	4.1	4.0	23	4.1	4.1	4.0	4.1
4	3.8	3.9	3.9	3.8	24	3.7	3.8	3.8	3.8
5	3.9	3.9	3.9	3.9	25	3.9	3.9	3.9	3.8
6	3.9	3.9	4.0	3.9	26	3.5	3.6	3.8	3.9
7	3.7	3.6	3.1	3.6	27	4.0	4.0	4.0	4.0
8	4.0	4.0	4.0	4.0	28	3.9	3.9	3.9	3.8
9	4.1	4.1	4.1	4.1	29	4.0	4.0	3.9	4.0
10	4.0	4.0	3.8	4.0	30	3.9	3.8	4.0	3.9
11	3.9	3.9	4.0	3.9	31	4.1	4.0	4.0	3.9
12	3.9	3.8	3.8	3.8	32	3.9	3.9	3.9	3.8
14	4.1	4.1	4.1	4.0	34	4.0	4.0	4.0	4.0
15	4.1	4.1	4.1	4.0	35	4.1	4.2	4.1	4.0
16	4.0	4.1	4.0	4.0	36	3.8	3.7	3.8	3.8
17	3.9	3.9	3.9	3.8	37	3.7	3.8	3.8	3.9
18	3.7	4.0	4.0	3.9	q**	3.9	3.9	3.9	3.9
19	3.4	3.4	3.4	3.4	s***	0.2	0.2	0.2	0.1
20	3.9	3.9	3.9	3.8	C****				

E*: Emisor
q**: caudal promedio de descarga del sistema
s***: desviación estándar de descarga

Figura 26. Volumen de riego de todos los goteros.



Los caudales correspondientes al cuarto menor del total en todas las mediciones del ensayo se muestran en la Tabla 6.

Tabla 17. Valores de caudal de descarga del cuarto menor del total de cada repetición

Emisor*	Caudal de descarga (l/h)			
	1	**2**	**3**	**4**
1	3.4	3.4	3.1	3.4
2	3.5	3.6	3.4	3.6
3	3.7	3.6	3.8	3.8
4	3.7	3.7	3.8	3.8
5	3.7	3.7	3.8	3.8
6	3.7	3.8	3.8	3.8
7	3.8	3.8	3.8	3.8
8	3.8	3.8	3.8	3.8
9	3.8	3.8	3.8	3.8
q(1/4)*	3.7	3.7	3.7	3.7

$\overline{q}_{(1/4)}$*: Caudal promedio de descarga de los menores valores del 25% de total de emisores

El υ calculado fue de 0.05 y el CU fue del 95%, con lo que se concluye que el sistema presenta una DU excelente. La eficiencia de distribución del sistema del sistema de riego fue del 94% definiéndose como buena, lo que quiere decir es que las pérdidas mínimas de agua entre el punto de bombeo y el gotero más alejado de este punto son poco significativas.

Anexo B: Evapotranspiración potencial (ETo)

ddp	Thornthwaite (1948)	Turc (1954)	Makkink (1957)	Jensen-Haise (1963)	Priestly-Taylor (1972)	Penman-Monteith (1977)	Hargreaves-Samani (1985)	Stanghellini (1987)
1	0,85	3,03	3,79	3,27	0,37	0,29	4,77	0,43
2	0,82	3,05	3,83	3,08	0,37	0,29	4,32	0,48
3	0,87	3,93	4,71	4,24	0,43	0,34	4,50	0,55
4	0,89	4,40	5,06	4,71	0,45	0,36	4,84	0,60
5	0,85	4,95	5,68	4,89	0,50	0,40	5,16	0,68
6	0,83	2,61	3,32	2,78	0,33	0,26	3,86	0,43
7	0,84	4,09	4,83	4,02	0,44	0,35	4,53	0,64
8	0,90	4,34	5,02	4,76	0,45	0,36	5,12	0,57
9	0,87	3,69	4,36	3,90	0,40	0,32	4,99	0,57
10	0,81	2,59	3,29	2,63	0,32	0,26	4,76	0,55
11	0,87	3,19	3,90	3,50	0,37	0,30	4,42	0,50
12	0,86	3,45	4,13	3,60	0,39	0,31	4,85	0,50
13	0,88	3,51	4,13	3,81	0,39	0,31	4,79	0,48
14	0,88	1,70	2,31	2,18	0,26	0,21	3,95	0,24
15	0,85	1,86	2,51	2,22	0,28	0,22	3,82	0,27
16	0,89	3,71	4,40	4,12	0,42	0,33	4,95	0,47
17	0,89	4,00	4,67	4,36	0,44	0,35	5,18	0,50
18	0,80	6,66	7,70	5,86	0,64	0,51	4,80	0,94
19	0,77	2,45	3,21	2,35	0,32	0,26	4,26	0,47
20	0,81	2,66	3,44	2,72	0,35	0,27	4,27	0,41
21	0,83	2,93	3,71	3,05	0,35	0,28	4,37	0,55
22	0,78	4,81	5,61	4,15	0,48	0,38	4,77	0,83
23	0,88	5,64	6,22	5,60	0,53	0,42	5,57	0,78
24	0,83	3,48	4,25	3,51	0,39	0,31	4,67	0,59
25	0,79	2,79	3,60	2,75	0,35	0,28	4,04	0,51
26	0,79	3,54	4,41	3,35	0,40	0,32	3,93	0,63
27	0,78	2,66	3,44	2,58	0,34	0,27	3,77	0,52
28	0,89	5,47	6,14	5,64	0,53	0,42	5,42	0,70
29	0,87	5,28	6,07	5,42	0,52	0,41	5,07	0,73
30	0,83	3,03	3,82	3,37	0,37	0,29	5,34	0,49
31	0,81	2,79	3,58	3,00	0,35	0,28	4,82	0,41
32	0,88	3,26	3,99	3,89	0,38	0,30	4,79	0,45
33	0,85	3,25	4,07	3,69	0,38	0,30	4,23	0,51
34	0,77	2,39	3,23	2,51	0,32	0,26	4,09	0,44
35	0,78	4,16	5,04	3,96	0,45	0,36	4,83	0,64
36	0,86	4,60	5,38	4,91	0,47	0,37	4,87	0,65
37	0,79	3,50	4,50	3,64	0,41	0,33	4,48	0,58
38	0,83	5,01	5,77	5,00	0,49	0,39	5,60	0,76
39	0,80	4,30	5,23	4,28	0,47	0,37	5,14	0,64
40	0,87	3,37	4,11	3,93	0,39	0,31	4,86	0,45
41	0,87	2,29	3,03	2,94	0,32	0,25	4,98	0,29
42	0,87	3,14	3,99	3,82	0,39	0,31	4,86	0,40

ddp	Thornthwaite (1948)	Turc (1954)	Makkink (1957)	Jensen-Haise (1963)	Priestly-Taylor (1972)	Penman-Monteith (1977)	Hargreaves-Samani (1985)	Stanghellini (1987)
43	0,88	2,50	3,26	3,18	0,33	0,26	4,83	0,33
44	0,86	1,96	2,68	2,55	0,29	0,23	4,48	0,31
45	0,76	1,64	2,42	1,85	0,27	0,21	3,52	0,31
46	0,81	4,33	5,23	4,37	0,47	0,37	5,19	0,63
47	0,82	2,62	3,38	2,93	0,34	0,27	5,05	0,39
48	0,88	3,56	4,26	4,14	0,41	0,32	5,03	0,44
49	0,82	2,36	3,15	2,75	0,32	0,25	3,93	0,38
50	0,88	3,82	4,57	4,39	0,43	0,34	5,18	0,46
51	0,88	4,24	4,96	4,75	0,46	0,36	5,40	0,50
52	0,86	3,31	4,03	3,72	0,39	0,31	4,64	0,43
53	0,82	1,81	2,50	2,21	0,27	0,22	3,66	0,26
54	0,83	2,36	3,07	2,74	0,32	0,25	4,22	0,36
55	0,84	5,31	6,08	5,37	0,53	0,42	5,57	0,71
56	0,79	4,11	4,96	3,99	0,45	0,36	4,98	0,64
57	0,82	4,71	5,54	4,72	0,49	0,39	5,25	0,66
58	0,80	3,94	4,77	3,88	0,44	0,35	4,86	0,59
59	0,85	2,89	3,69	3,35	0,36	0,29	4,23	0,39
60	0,82	2,63	3,42	2,94	0,35	0,28	4,66	0,35
61	0,87	3,70	4,50	4,06	0,42	0,33	4,23	0,49
62	0,89	1,89	2,46	2,37	0,27	0,21	4,27	0,24
63	0,86	1,84	2,43	2,19	0,26	0,21	3,94	0,24
64	0,91	3,05	3,65	3,54	0,36	0,28	4,75	0,33
65	0,92	3,48	4,06	3,98	0,39	0,31	4,81	0,33
66	0,88	3,15	3,80	3,48	0,37	0,29	4,38	0,34
67	0,88	2,99	3,65	3,38	0,36	0,28	4,23	0,32
68	0,92	2,30	2,83	2,88	0,30	0,24	4,86	0,23
69	0,88	3,80	4,39	4,00	0,41	0,32	4,71	0,43
70	0,86	4,40	5,03	4,43	0,45	0,36	4,58	0,51
71	0,84	3,93	4,58	3,82	0,42	0,33	4,63	0,48
72	0,83	2,56	3,21	2,69	0,32	0,25	4,15	0,35
73	0,83	2,27	2,95	2,46	0,30	0,24	3,73	0,32
74	0,81	1,90	2,58	2,10	0,27	0,22	3,61	0,28
75	0,87	3,54	4,25	3,80	0,41	0,32	5,07	0,35