

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

FACULTAD DE AGRONOMÍA



**“ANÁLISIS DE CUATRO LÁMINAS DE RIEGO EN EL CULTIVO
DE TOMATE (*Solanum lycopersicum* L. cv Katya) BAJO
CONDICIONES DE CAÑETE”**

Presentado por:

LUIS ANDRÉS ALONSO CERVANTES GARZÓN

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE

INGENIERO AGRÓNOMO

Lima – Perú

2018

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
FACULTAD DE AGRONOMIA

**“ANÁLISIS DE CUATRO LÁMINAS DE RIEGO EN EL CULTIVO DE TOMATE
(*Solanum lycopersicum* L. cv Katya) BAJO CONDICIONES DE CAÑETE”**

Presentado por:

LUIS ANDRÉS ALONSO CERVANTES GARZÓN

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERO AGRÓNOMO

Sustentada y Aprobada por el siguiente jurado:

.....
Ing. Mg. Sc. Gilberto Rodríguez Soto
PRESIDENTE

.....
Ing. M. S. Andrés Casas Díaz
ASESOR

.....
Ing. Saray Siura Céspedes
MIEMBRO

.....
Ing. Mg. Sc. Ruby Vega Ravello
MIEMBRO

Lima – Perú

2018

Dedicatoria

*Dedicado a todos mis colegas de la
carrera de agronomía.*

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer al programa de hortalizas de la facultad de agronomía por darme las facilidades técnicas y a todas las personas involucradas que me brindaron su apoyo en la realización del presente trabajo en especial al Ingeniero Andrés Casas, su experiencia y consejo fueron de gran ayuda en todo este proceso.

INDICE GENERAL

RESUMEN	
I. INTRODUCCIÓN	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA	2
2.1 ASPECTOS GENERALES DEL CULTIVO DE TOMATE	2
2.2 MANEJO AGRONOMICO	7
2.3 NECESIDADES HÍDRICAS DE LOS CULTIVOS	10
2.4 SISTEMA DE RIEGO POR GOTEO SUPERFICIAL	19
2.5 DISTRIBUCIÓN DE AGUA BAJO UN SISTEMA DE RIEGO POR GOTEO	21
2.6 MOVIMIENTO DE AGUA EN LA ZONA NO SATURADA	22
2.7 MODELAMIENTO DE AGUA EN EL SUELO	27
2.8 MEDICION DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DEL SUELO	32
2.9 HYDRUS 2D PARA ANALIZAR LA DINÁMICA DEL AGUA EN EL SUELO	36
III. MATERIALES Y METODOS	38
3.1 AREA EXPERIMENTAL	38
3.2 CARACTERÍSTICAS DEL SUELO	38
3.3 DETERMINACION DE LA CURVA DE HUMEDAD DEL SUELO	40
3.4 MEDICION DE LA HUMEDAD DEL SUELO	42
3.5 CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS	43
3.6 CULTIVO	44
3.7 INSUMOS	44
3.8 MODELO HYDRUS 2D/3D	46
3.9 LAMINAS DE RIEGO EVALUADAS	51
3.10 DISEÑO EXPERIMENTAL	51
IV. RESULTADOS Y DISCUSION	53
4.1 PERFORMANCE DEL MODELO	53
4.2 RENDIMIENTO TOTAL Y DISTRIBUCIÓN DE AGUA	60
4.3 ÁREA FOLIAR Y COBERTURA	65
4.4 DISTRIBUCIÓN DE LOS PATRONES DE HUMEDAD ENTRE DOS GOTEROS	68
V CONCLUSIONES	74
VI RECOMENDACIONES	76
VII BIBLIOGRAFIA	77
VIII ANEXOS	89

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. PRODUCCIÓN, SUPERFICIE COSECHADA Y RENDIMIENTO NACIONAL DE TOMATE.	5
TABLA 2. PARÁMETROS DE VAN GENUCHTEN PARA DIFERENTES TIPOS DE SUELO (LEIJ ET AL., 1996)	32
TABLA 3. ANÁLISIS DE CARACTERIZACIÓN DE SUELO.....	39
TABLA 4. VALORES DEL CONTENIDO DE HUMEDAD A DIFERENTES VALORES DE PF*	41
TABLA 5. PARÁMETROS DEL MODELO DE VAN GENUCHTEN OBTENIDOS CON EL PROGRAMA RETC.....	41
TABLA 6. CONDICIONES METEOROLÓGICAS DE TEMPERATURA, HUMEDAD RELATIVA Y EVAPOTRANSPIRACIÓN (ET) EN EL PERÍODO ENERO – ABRIL. CAÑETE, 2016.....	44
TABLA 7. CARACTERÍSTICAS DE FERTILIZANTES UTILIZADOS EN EL CULTIVO DE TOMATE. CAÑETE-2016.....	45
TABLA 8. ÍNDICES DE ÁREA FOLIAR EMPLEANDO CUATRO LÁMINAS DE RIEGO	49
TABLA 9. LÁMINAS APLICADAS.....	51
TABLA 10. CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA EXPERIMENTAL UTILIZADA.....	52
TABLA 11. INDICADORES DE EVALUACION DE LOS DATOS SIMULADOS Y MEDIDOS	54
TABLA 12. EFECTO DE CUATRO LÁMINAS DE RIEGO EN EL RENDIMIENTO (TN/HA) Y NÚMERO DE FRUTOS PRODUCIDO EN EL CULTIVO DE TOMATE (<i>SOLANUM LYCOPERSICUM</i> L. CV. KATYA).....	60
TABLA 13. EFECTO DE CUATRO LÁMINAS DE RIEGO EN EL NÚMERO DE FLORES EN PLANTAS DE TOMATE (<i>SOLANUM LYCOPERSICUM</i> L. CV. KATYA).	65

TABLA 14.EFECTO DE CUATRO LÁMINAS DE RIEGO EN EL ÁREA FOLIAR (M2)	
EN TOMATE (<i>SOLANUM LYCOPERSICUM L. CV. KATYA</i>).....	66

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. PRODUCCIÓN MUNDIAL DE TOMATE POR PAÍS. STATISTA (2017).....	4
FIGURA 2. COMPONENTES DE UN SISTEMA DE RIEGO, (GARCÍA, 2015).	19
FIGURA 3. PARTES DE LA ZONA HUMEDECIDA POR EL EMISOR, BENAMI Y OFEN (1995).....	21
FIGURA 4. COMPONENTES DE LA ZONA NO SATURADA (ORREGO ,2005).....	23
FIGURA 5. VARIACIÓN DE SUCCION Y DE LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA CON EL CONTENIDO DE HUMEDAD PARA UN SUELO ARCILLOSO (INFIA, 2009)....	24
FIGURA 6. CURVAS TÍPICAS CARACTERÍSTICAS DE SUELOS DE DIFERENTE TEXTURA (TULLER Y OR, 2003).....	25
FIGURA 7. CURVAS DE RETENCIÓN PARA UN SUELO ARENOSO (JYNDEVAD) Y ARENO-FRANCO (ODUM) , LOLL Y MOLDRUP, (2010).....	26
FIGURA 8. PARTES DE LA CURVA DE RETENCIÓN DE HUMEDAD, LOLL Y MULDRUP, (2010).	27
FIGURA 9. CURVA DE RETENCIÓN DE HUMEDAD DEL MODELO DE VAN GENUCHTEN USANDO EL PROGRAMA RETC AJUSTADA A DATOS EXPERIMENTALES DE HUMEDAD	31
FIGURA 10. CURVAS DE LA RELACIÓN ENTRE LA DISTANCIA APARENTE Y EL COEFICIENTE DE REFLEXIÓN, JONES, (2002).	35
FIGURA 11. CURVA DE RETENCIÓN DE HUMEDAD DE VAN GENUCHTEN USANDO EL PROGRAMA RETC	42
FIGURA 12. ARREGLO DE LAS PROBETAS POR BLOQUE Y DEBAJO DEL GOTERO.....	43
FIGURA 13. DOMINIO GEOMÉTRICO EN DOS DIMENSIONES PARA EL FLUJO DE AGUA.....	48

FIGURA 14. FUNCIÓN DE REDUCCIÓN DE EXTRACCIÓN USADO POR FEDDES ET AL (1978).	50
FIGURA 15. COMPARACION DE CURVAS DE HUMEDAD ENTRE DATOS SIMULADOS Y MEDIDOS PARA EL 120 % DE LA ETC.	56
FIGURA 16. COMPARACION DE CURVAS DE HUMEDAD ENTRE DATOS SIMULADOS Y MEDIDOS DEL TRATAMIENTO DE 80 % DE LA ETC.	57
FIGURA 17. COMPARACION DE CURVAS DE HUMEDAD ENTRE DATOS SIMULADOS Y MEDIDOS DEL TRATAMIENTO DE 60 % DE LA ETC.	58
FIGURA 18. COMPARACION DE CURVAS DE HUMEDAD ENTRE DATOS SIMULADOS Y MEDIDOS DEL TRATAMIENTO DE 40 % DE LA ETC.	59
FIGURA 19. COMPARACIÓN DE CURVAS DE HUMEDAD PARA LAS LÁMINAS EVALUADAS A 10 CM (A), 20 CM (B), 30 CM (C) Y 45 CM (D)	62
FIGURA 20. ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR (IAF) EN RELACIÓN A LAS DIFERENTES LÁMINAS DE RIEGO APLICADAS.	67
FIGURA 21. PORCENTAJE DE COBERTURA EN RELACIÓN A LAS DIFERENTES LÁMINAS DE RIEGO APLICADAS.	67
FIGURA 22. DISTRIBUCIÓN DEL AGUA A LOS 5 (A), 25 (B) ,50 (C) Y 70 (C) DÍAS JULIANOS TRATAMIENTO DEL 120% DE LA ETC	70
FIGURA 23. DISTRIBUCIÓN DEL AGUA A LOS 5 (A), 25 (B) ,50 (C) Y 70 (C) DÍAS JULIANOS TRATAMIENTO DEL 80% DE LA ETC.	71
FIGURA 24. DISTRIBUCIÓN DEL AGUA A LOS 5 (A), 25 (B) ,50 (C) Y 70 (C) DÍAS JULIANOS TRATAMIENTO DEL 60% DE LA ETC.	72
FIGURA 25. DISTRIBUCIÓN DEL AGUA A LOS 5 (A), 25 (B) ,50 (C) Y 70 (C) DÍAS JULIANOS TRATAMIENTO DEL 40% DE LA ETC.	73

INDICE DE ANEXOS

ANEXO 1. CURVAS DE HUMEDAD DE LAS REPETICIONES DEL TRATAMIENTO DE 40 % DE LA ETC.....	89
ANEXO 2. FLUJOS VARIABLES DEL MODELO POR TRATAMIENTO.....	92

RESUMEN

La problemática de escases de agua en la agricultura es un punto crítico para la producción en el Perú. Esta situación obliga a buscar y aplicar prácticas de manejo tales como sistemas de riego presurizado para aumentar la eficiencia y disminuir la pérdida de agua y de igual manera el conocer las propiedades de los suelos irrigados para un mejor entendimiento de como el agua se mueve y distribuye en el perfil siendo este conocimiento una herramienta para optimizar el uso de este recurso y tener un impacto positivo en la producción de los cultivos. El presente trabajo experimental realizado en el IRD Costa-Cañete, tuvo como objetivo principal evaluar el efecto de cuatro láminas de riego en la distribución de agua, usando un modelo en 2D y la respuesta del cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum* L. cv. Katya), bajo un sistema de riego por goteo. Para los tratamientos se emplearon cuatro láminas de riego; 120% de la ETc, 80% de la ETc, 60% de la ETc y 40% de la ETc. Se empleó un diseño estadístico de cuadrado latino con 4 tratamientos y 4 repeticiones. El modelo generado por el programa HYDRUS 2D/3D obtuvo valores cercanos a los datos medidos por el equipo TDR. Los indicadores de precisión mostraron que los valores de MRE fueron menores al 20 % y que los valores de RMSE y MAE variaron de 0.03 a 0.09 cm³.cm⁻³ y de 0.02 a 0.05 cm³.cm⁻³ respectivamente, lo cual indica que los valores del modelo explican el 80 % de lo que se midió realmente. Los cuatro tratamientos influyeron significativamente en el rendimiento de tomate, el tratamiento de riego con 120% de la ETc (49.41 tn/ha) obtuvo diferencias estadísticas significativas frente a los demás tratamientos: 80% (27.23 tn/ha), 60% (19.28 tn/ha) y 40% (17.94 tn/ha). En la distribución de humedad entre dos goteros adyacentes se identificaron zonas de estrés hídrico, las cuales aumentaron conforme la disminución de la lámina de riego. Para el tratamiento de 120% de la ETc se encontró que su distribución de humedad es la mas adecuada para que la planta de tomate no sufra estrés hídrico y obtenga un buen rendimiento.

Palabras clave: HYDRUS 2D; Distribución del agua del suelo; riego por goteo; modelación.

I. INTRODUCCIÓN

Existen muy pocos estudios sobre la dinámica del agua en un suelo bajo un sistema de riego por goteo en el Perú, su entendimiento es de suma importancia para la optimización de su manejo y así obtener un incremento en la producción de los cultivos.

El uso de simulaciones por medio de un software con modelos matemáticos validados para optimizar la gestión de esta práctica es un enfoque rápido, complementario al conocimiento actual que se tiene a la hora de realizar un diseño agronómico. En las últimas décadas el modelamiento ha recibido mucha atención presentándose como una herramienta eficiente para la optimización de diferentes procesos. En general existen dos tipos de aproximaciones para simular la distribución del agua en un suelo regado por goteo. Una aproximación está basada en las soluciones analíticas de la ecuación que gobierna el flujo de agua tal como la solución de Philip (1969). Otra aproximación y una de las más usadas es la solución numérica de la ecuación de Rihards tal y como lo usa el software HYDRUS 2D. Debido a la flexibilidad del Hydrus 2d para acomodar diferentes tipos de condiciones limitantes , extracción de agua y nutrientes por parte de la raíz de la planta y por su interfaz gráfica amigable hace que el modelo sea exitosamente utilizado para simular el movimiento del agua en un suelo regado por goteo (Haibin et al., 2014).

Conjugando el modelo de simulación del movimiento de agua en el suelo al diseño agronómico del sistema de riego por goteo y usando cuatro láminas de riego en el cultivo del tomate, se pretende plantear perspectivas para el uso adecuado y eficiente del recurso hídrico para la producción de alimentos.

La presente investigación tiene por objetivo elaborar un modelo de distribución del agua en el suelo en base al análisis de cuatro láminas de riego el cual servirá para darle un mejor manejo al recurso hídrico relacionado a la producción del cultivo de tomate.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 ASPECTOS GENERALES DEL CULTIVO DE TOMATE

2.1.1 Origen

Según Casseres (1980) el centro de origen del tomate es la región comprendida entre Perú y Ecuador sin embargo dice que muchos investigadores creen que este centro no es idéntico con el punto de diversificación de las formas cultivadas y se opina que el área entre Puebla y Veracruz, en México, es un centro de diversificación varietal que ha dado origen a formas, según cuya hipótesis el tomate no es autóctono de México, sino que fue introducido a ese país en tiempos antiguos.

2.1.2 Clasificación taxonómica *

Reino:	Plantae
División:	Magnoliophyta
Clase:	Magnoliopsida
Orden:	Solanales
Familia:	Solanaceae
Género:	Solanun L., 1753
Subgenero:	Potatoe
Seccion:	Petota
Especie:	Solanum lycopersicum L., 1753
Nombre común:	Tomate

* Esta clasificación está de acuerdo con el *Integrated Taxonomic Information System of North América (ITIS)*

2.1.3 Características botánicas

2.1.3.1 Raíz

Está formado por la raíz principal (corta y débil), numerosas y potentes raíces secundarias y por las raíces adventicias. Si se seccionara transversalmente la raíz principal desde fuera hasta dentro, se encontraría la epidermis (se ubican los pelos absorbentes especializados en tomar agua y nutrientes), el cortex y el cilindro central (se sitúa el xilema, conjunto de vasos especializados en el transporte de los nutrientes) (Calleja , 2009).

2.1.3.2 Tallo

El tallo es erguido y cilíndrico en planta joven, a medida que ésta crece, el tallo cae y se vuelve anguloso. Presenta tricomas (vellosidades) en la mayor parte de sus órganos y glándulas que segregan una sustancia color verde aromática. El tallo puede llegar a medir de 40-250 cm. Muestra ramificación abundante y yemas axilares, si al final del crecimiento todas las ramificaciones exhiben yemas reproductivas, estas se clasifican como de crecimiento determinado; y si terminan con yemas vegetativas, son de crecimiento indeterminado (Rick, 1978; Rodríguez et al., 1984; Valadéz, 1990).

2.1.3.3 Hojas

Las hojas son cortas, de tamaño medio o largas y tipo patata (George, 1999). Son compuestas, se insertan sobre los diversos nudos en forma alterna. El limbo se encuentra fraccionado en siete, nueve y hasta once folíolos. El haz es de color verde y el envés de color grisáceo, su tamaño depende de las características genéticas de la variedad. En tomates más rústicos el tamaño de sus hojas es más pequeño (Huerres y Caraballo, 1988).

2.1.3.4 Flores

La flor del tomate es perfecta. Consta de 5 o más sépalos, de igual número de pétalos de color amarillo dispuestos de forma helicoidal y de igual número de estambres que se alternan con los pétalos. Los estambres están soldados por las anteras y forman un cono estaminal que envuelve al gineceo y evitan la polinización cruzada. El ovario es bi o plurilocular. Las flores se agrupan en inflorescencias

denominadas comúnmente como “racimos”,. La primera flor se forma en la yema apical y las demás se disponen lateralmente por debajo de la primera, alrededor del eje principal. Las inflorescencias se desarrollan cada 2-3 hojas en las axilas (Monardes ,2009).

2.1.3.5 Frutos

Las frutas son bayas generalmente biloculares en las especies silvestres, y bilocular o multiloculares en las las variedades cultivadas. El tamaño del fruto, el color y pubescencia son variables, al igual que el tamaño de las semillas, el color y el desarrollo de las paredes radiales de las células de la testa (Hernández ,2011).

2.1.4 Importancia económica

El tomate es la hortaliza más difundida en todo el mundo y la de mayor valor económico. Su demanda aumenta continuamente y con ella su cultivo, producción y comercio. China se posiciona como el primer país productor de tomate con 50 millones de toneladas, mientras que el último puesto se encuentra México con 3.43 millones de toneladas Fig.1.

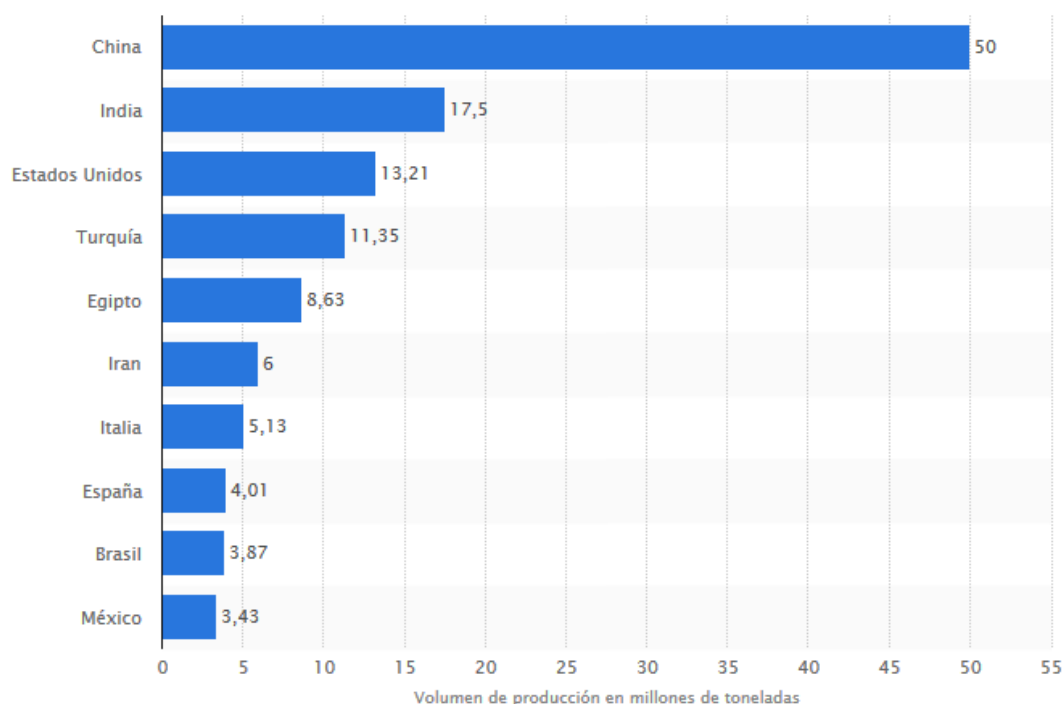


Figura 1. Producción mundial de tomate por país. Statista (2017)

En años recientes, la demanda de tomate está creciendo aceleradamente no solamente en los países desarrollados sino también en los países emergentes y en vías de desarrollo, porque los valores nutritivos del tomate (minerales, licopeno, entre otros) están llamando la atención del mundo (Numata, 2002).

Actualmente el Perú cuenta con 5904 ha de superficie cosechada, (siendo Lima, Ica y Arequipa respectivamente las que poseen mayor área sembrada de tomate). La producción anual para el año 2014 fue de 265948 tn y para el 2015 de 236287 tn (Tabla 1), con un rendimiento de 44.3 tn. ha⁻¹ para el 2014 y 40 tn. ha⁻¹ para el 2015, siendo Ica el departamento que obtuvo el mayor rendimiento promedio de 104.9 tn.ha⁻¹ en el año 2015 (SIEA 2015).

Tabla 1. Producción, superficie cosechada y rendimiento nacional de tomate.

Año	Producción (TM)	Superficie Cosechada (ha)	Rendimiento promedio (Tn/ha)
2015	236287	5904	40
2014	265948	6004.2	44.3
2013	253588	5777	43.89
2012	229356	5580.84	41.09

Fuente : SIEA 2015

2.1.5 Factores Medioambientales

2.1.5.1 Clima

El tomate es una especie de estación cálida razonablemente tolerante al calor y a la sequía y sensible a las heladas Aunque se produce en una amplia gama de condiciones de clima y suelo, prospera mejor en climas secos con temperaturas moderadas (Monardes ,2009).

2.1.5.2 Humedad

La humedad relativa óptima para el desarrollo del tomate varía entre un 60% y un 80%. Humedades relativas muy elevadas favorecen el desarrollo de enfermedades aéreas y el agrietamiento del fruto y dificultan la fecundación, debido a que el polen se compacta, abortando parte de las flores. El rajado del fruto igualmente puede también tener su origen en un exceso de humedad en el suelo o riego abundante a continuación de un período de estrés hídrico. Por otro lado, la humedad relativa demasiado baja dificulta la fijación del polen al estigma de la flor (Monardes ,2009).

2.1.5.3 Temperatura

La temperatura influye en todas las funciones vitales de la planta como la: transpiración, fotosíntesis, germinación, entre otras. Es una planta de clima cálido que requiere de mucho calor; para el tomate, las temperaturas óptimas según el ciclo de vida son las siguientes: temperaturas nocturnas entre 15 y 18 °C, temperaturas diurnas 24 a 25 °C, y temperatura ideal en la floración de 21 °C (Rodríguez et al., 2001).

2.1.5.4 Luz y fotoperiodo

La planta de tomate se desarrolla mejor con alta intensidad luminosa, cuando ésta es baja, se afecta la apertura de los estomas y disminuye el número de éstos por milímetro cuadrado. Investigaciones realizadas con cuatro cultivares de tomate en condiciones controladas aplicando 6,000 lux durante 12 h y 3,000-6,000 lux durante 9 h con temperatura nocturna de 14 °C y 18 °C de día, mostraron una mayor intensidad de la fotosíntesis en el rango de 3,000- 6,000 lux, y tuvieron el mayor crecimiento. Cuando se compararon las plantas expuestas a 6,000 lux con plantas a 8,000 lux, bajó la intensidad fotosintética en las últimas (Huerres y Caraballo, 1988)

2.1.5.5 Humedad del suelo

La exigencia del tomate en cuanto a la humedad del suelo es media, influye sobre todo en el crecimiento de los tejidos, transpiración, fecundación de las flores y desarrollo de las enfermedades criptogámicas, siendo preferibles humedades medias no superiores al 40%, y suelos no encharcados (Rodríguez et al., 2001).

Los periodos críticos de humedad en las plantas de crecimiento determinado son: después del trasplante, poco consumo de agua; en floración e inicio de fructificación, gran demanda de agua; en la etapa de maduración de fruto, poco consumo de agua (Huerres y Caraballo, 1988).

2.1.5.6 Agua

El agua puede influir sobre la mayoría de factores que controlan el crecimiento de las plantas (estructura, textura, aireación, salinidad, hábitos de enraizamiento, temperatura humedad y otros), que cualquier otro factor. Así mismo influye en todos los factores del suelo, altera el microclima al que está expuesta la planta misma, además de cambios en el balance entre el crecimiento vegetativo y reproductivo (Hagan y Vadia, 1978).

2.2 MANEJO AGRONOMICO

2.2.1 Preparación del terreno

Las operaciones de cultivo deben ser principalmente para combatir las malas hierbas; la remoción del suelo debe ser lo más superficial, con un máximo de cinco centímetros de profundidad, tomando en cuenta que el sistema radical no es profundo (Cásseres, 1980).

El grado de refinamiento del suelo está asociado con el sistema de implantación (siembra directa o trasplante). La preparación del terreno se inicia con una o dos labores profundas seguidas de una mayor desmenuzamiento del suelo y sistematización del terreno (Castagnino, 2008).

Al respecto Maroto (2002) nos indica que en primer lugar se dan una o dos labores profundas para airear, facilitar la evacuación del agua de riego, etc. seguidas de sendos pases de rotovador, para dejar el suelo disgregado en su superficie, procediendo a continuación a sistematizar el terreno.

2.2.2 Trasplante

Comparando el sistema de siembra directa con el sistema de trasplante, se puede decir que la siembra directa resulta en una disminución del ciclo de cultivo. La

producción en volumen puede ser mayor en un 5-20% y existe también un ahorro en mano de obra. Por otro lado el método de semilleros y trasplante requiere menos insumos pero más mano de obra. Mediante el trasplante se ocupa el terreno durante más tiempo, lo cual puede ser ventajoso para el cultivo anterior o para el total del plan de producción (Van Haeff, 1983; Nuez et al., 1995).

2.2.3 Riego

La aplicación del riego en el cultivo de tomate debe ser cuidadosa, ya que tanto la sequía como el exceso de agua repercuten en la calidad y producción del fruto. Se ha encontrado una correlación estrecha entre sequías intensas y rajaduras en el fruto. El exceso de agua se asocia con la presencia de enfermedades radicales de la planta y, por consecuencia, con bajos rendimientos (Manjarrez, 1980). Según Manjarrez (1980), el tomate presenta tres períodos críticos de necesidad hídrica: emergencia de plántulas, floración, y cuando los frutos han alcanzado una quinta parte de su crecimiento.

El exceso de agua, especialmente en los suelos fértiles, causa también un crecimiento considerable de las ramas y baja productividad; por el contrario, si el suelo se seca excesivamente, puede ser la causa de que los frutos se revienten (Richardson y Brauer, 1987).

2.2.4 Nutrición

La nutrición de tomate juega un papel muy importante si se desea incrementar la productividad de las plantas y la calidad de los frutos. Muchos de los trabajos realizados muestran que el tomate demanda grandes cantidades de nitrógeno, fósforo y potasio. Un rendimiento alrededor de 40 ton de fruto requiere cerca de 93 kg·N/ha, 20 kg·P/ha y 126 kg·K/ha. Los fertilizantes aplicados al suelo se calculan de acuerdo con la fertilidad de éste. Las siguientes dosis se aplican a suelos de baja fertilidad: 75-100 kg·N/ha, 150-200kg·P/ha y 150-200 kg·K/ha (George, 1999). El fósforo y el potasio se aplican antes del trasplante cuando se cultiva en suelo y para producción de fruto; mientras que el nitrógeno, se distribuye en tres etapas: la primera antes del trasplante, la segunda después de mes y medio, y la tercera en la floración (Salunkhe y Kadam, 1998).

2.2.5 Control de malezas

Las malezas o malas hierbas causan problemas si compiten con el cultivo por luz, agua, nutrientes y espacio, están muy relacionados con aspectos agronómicos como fertilidad del suelo, eficacia del riego y equilibrio de plagas y enfermedades (Ugás et al, 2000).

Un factor detrimental en el cultivo de tomate son las malezas. Menezes (1992), presenta una relación de malezas y la susceptibilidad y tolerancia a algunos herbicidas que afectan el cultivo de tomate en América Latina y el Caribe. Casas (1979), en un experimento realizado en el cultivo de tomate en el distrito de Ate (Lima), menciona que las especies *Nicandra Physaloides* (L) Gaertn y *Portulaca oleracea* L., son las más abundantes en el tratamiento que no recibió ningún tipo de control de malezas. Además, menciona otras especies, entre las que destacan *Amaranthus dubius* Mart, *A. hybridus* L., *Cynodon dactylon* (L) Pers, *Cyperus esculentum* L., *Datura stramonium* L., *Eleusine indica* (L) Gaertn y *Sorghum halepense* (L) Pers.

2.2.6 Plagas

El cultivo de tomate es muy particular en cuanto a la incidencia de plagas, dependiendo de las áreas donde se cultiva (Saldaña, 2002). En una publicación de la University of California (1990), se cita una relación de insectos plaga para la zona de California. Sánchez y Vergara (1998), citan una relación completa de insectos plaga y Sarmiento y Sánchez (2000), establecen una metodología de evaluación para los principales insectos plaga del cultivo. Díaz y Ternero (1998), realizaron observaciones en campos comerciales del cultivo de tomate entre 1992 y 1998.

Entre las principales plagas se puede citar a : *Prodiplosis longifila* Gagné, *Tuta absoluta* (Meyrick), *Spodoptera ochrea* (Guen.), *S. eridania* (Cramer), *Heliothis virescens* (Fabr.), *Pseudoplusia includens* (Walker), *Manduca sexta* (L.), *Agrotis* spp.; *Liriomyza huidobrensis* Blanchard, *Melanagromiza tomaterae* steyskal, *Euchistus convergens* (H. & S.), *Thrips tabaci* Lindeman, *Gryllus peruvianus*, *Alphitobius diaperinus*, *Polyphagotarsonemus latus* (Banks), *Aphis gossypii* Glover, *Macrosiphum euphorbiae* (Thomas), *Bemisia argentifolli* Bellows & Perring, y *Trialeurodes vaporariorum* (Westwood). Para el caso de *B. argentifolli* es particularmente importante, porque se asocia como vector de un geminivirus que

causa el enrollamiento de las hojas de la planta de tomate (Brown et al., 1995; Bolaño, 1997; Sánchez y Vergara, 1998; Rodríguez, 1999).

2.2.7 Enfermedades

Entre los principales patógenos se pueden mencionar a *Ralstonia solanacearum* Smith, razas 1 y 3; *Rhizoctonia solani* Kuhn, *Fusarium oxysporum* Schlecht f. sp. *lycopersici* (Sacc) Snyder y Hans; *Pythium* spp.; *Phytophthora capsici* Leonian; *P.infestans* (Mont) de Bary; *Laveillula taurica* (Lév.) Arn.; *Botrytis cinerea* Pers.; *Alternaria solani* (Ell. y Mart.) Jones y Groot; *Xanthomonas campestris* pv. *Vesicatoria* (Doige) Dye; *Colletotrichum gloeosporioides* (Penz.) Sacc. y *Cladosporium fulvum* Cke.

Los virus constituyen otro importante agente causal de epifitias. Fernández et al. (1976), Fernández and Fulton (1980), Fernández (1995), Panizo (1998) y Echegaray (2000), citan las principales características de los virus en el cultivo de tomate y su incidencia en las regiones de Perú. Entre los principales virus se encuentran Tomato mosaic virus (TMV), Tomato spotted wilt virus (TSWV), Cucumber mosaic virus (CMV), Alfalfa mosaic virus (AMV), Perú tomato virus (PTV), Potato virus X (PVX), Potato virus Y (PVY), Beet curly top virus (BCTV), y Tomato yellow leaf curl virus (TYLCV).

Los nematodos causan severos daños al cultivo, especialmente en zonas donde se realizan monocultivos. Overseas Development Administration (1983), La Torre (1990) y Panizo (1998), citan las principales especies de nematodos que afectan al cultivo: *Meloidogyne incognita* (Kofoid y White) Chitwood, *M. javanica* (Troub.) Chitwood, *M. arenaria* (Neal) Chitwood, *M. hapla* Chitwood.

2.3 NECESIDADES HÍDRICAS DE LOS CULTIVOS

La necesidad de agua de un cultivo es la suma de la evaporación directa de agua desde el suelo y la transpiración de las plantas. Ambos términos suelen considerarse de forma conjunta porque ocurren simultáneamente y es difícil distinguirlos. En las necesidades de agua de los cultivos influyen variables

meteorológicas como la radiación, la temperatura del aire, la humedad relativa y la velocidad del viento. También influyen las características del cultivo, p. ej. especie, variedad, estado de desarrollo, condiciones del cultivo, etc. Para su cálculo, se utiliza el consumo de agua de un cultivo de referencia (ET_o) y un coeficiente de cultivo (K_c) que relaciona el estado de nuestro cultivo con el de referencia. (<http://www.larioja.org/larioja-client/cm/agricultura/images?idMmedia=600180>).

2.3.1 Evapotranspiración

Se conoce como evapotranspiración (ET) la combinación de dos procesos separados por los que el agua se pierde a través de la superficie del suelo por evaporación y por otra parte mediante transpiración del cultivo.

La evaporación y la transpiración ocurren simultáneamente y no hay una manera sencilla de distinguir entre estos dos procesos. Aparte de la disponibilidad de agua en los horizontes superficiales, la evaporación de un suelo cultivado es determinada principalmente por la fracción de radiación solar que llega a la superficie del suelo.

Esta fracción disminuye a lo largo del ciclo del cultivo a medida que el follaje del cultivo proyecta más y más sombra sobre el suelo. En las primeras etapas del cultivo, el agua se pierde principalmente por evaporación directa finalmente cuando este cubre totalmente el suelo, la transpiración se convierte en el proceso principal.

En el momento de la siembra, casi el 100% de la ET ocurre en forma de evaporación, mientras que cuando la cobertura vegetal es completa, más del 90% de la ET ocurre como transpiración. La evapotranspiración se expresa normalmente en milímetros (mm) por unidad de tiempo. Esta unidad expresa la cantidad de agua perdida de una superficie cultivada en unidades de altura de agua. La unidad de tiempo puede ser una hora, día, 10 días, mes o incluso un período completo de cultivo o un año. Como una hectárea tiene una superficie de 10 000 m² y 1 milímetro es igual a 0,001 m, una pérdida de 1 mm de agua corresponde a una pérdida de 10 m³ de agua por hectárea. Es decir 1 mm.día⁻¹ es equivalente 10 m³. ha⁻¹ día⁻¹ (Allen et al., 1998).

Según la FAO (2006) el concepto de evapotranspiración incluye tres diferentes definiciones: evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o), evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET_c), y evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar (ET_{c aj}). ET_o es un parámetro relacionado con el clima que expresa el poder evaporante de la atmósfera. ET_c se refiere a la evapotranspiración en condiciones óptimas presentes en parcelas con un excelente manejo y adecuado aporte de agua y que logra la máxima producción de acuerdo a las condiciones climáticas. ET_{c aj} requiere generalmente una corrección, cuando no existe un manejo óptimo y se presentan limitantes ambientales que afectan el crecimiento del cultivo y que restringen la evapotranspiración, es decir, bajo condiciones no estándar de cultivo

a) Evaporación

La evaporación es el proceso por el cual el agua líquida se convierte en vapor de agua (vaporización) y se retira de la superficie evaporante (remoción de vapor). El agua se evapora de una variedad de superficies, tales como lagos, ríos, caminos, suelos y la vegetación mojada.

Para cambiar el estado de las moléculas del agua de líquido a vapor se requiere energía. La radiación solar directa y, en menor grado, la temperatura ambiente del aire, proporcionan esta energía. La fuerza impulsora para retirar el vapor de agua de una superficie evaporante es la diferencia entre la presión del vapor de agua en la superficie evaporante y la presión de vapor de agua de la atmósfera circundante. Cuando la superficie evaporante es la superficie del suelo, el grado de cobertura del suelo por parte del cultivo y la cantidad de agua disponibles en la superficie evaporante son otros factores que afectan el proceso de la evaporación.

b) Transpiración

La transpiración consiste en la vaporización del agua líquida contenida en los tejidos de la planta y su posterior remoción hacia la atmósfera. Los cultivos pierden agua predominantemente a través de las estomas. Estos son pequeñas aberturas en la hoja de la planta a través de las cuales atraviesan los gases y el vapor de agua de la planta hacia la atmósfera.

La transpiración, igual que la evaporación directa, depende del aporte de energía, del gradiente de presión del vapor y de la velocidad del viento. Por lo tanto, la radiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y el viento también deben ser considerados en su determinación (FAO, 2006).

2.3.2 Evapotranspiración del cultivo de referencia (Eto)

La tasa de evapotranspiración de una superficie de referencia, que ocurre sin restricciones de agua, se conoce como evapotranspiración del cultivo de referencia, y se denomina ETo. La superficie de referencia corresponde a un cultivo hipotético de pasto con características específicas. No se recomienda el uso de otras denominaciones como ET potencial, debido a las ambigüedades que se encuentran en su definición (Allen et al., 1998).

Este concepto se introduce para estudiar la demanda evaporativa de la atmósfera independientemente del tipo de cultivo, de su estado de desarrollo y de su manejo. Dada su definición, los factores que afectan a la evapotranspiración de referencia son los factores climáticos, pudiendo ser calculada con parámetros climatológicos (temperatura, humedad relativa de la atmósfera, velocidad del viento, etc.) (<http://www.economiaandaluza.es/sites/default/files/cap496.pdf>).

ETo expresa el poder evaporante de la atmósfera en una localidad y época del año específicas, y no considera ni las características del cultivo, ni los factores del suelo. Desde este punto de vista, el método FAO Penman-Monteith se recomienda como el único método de determinación de ETo con parámetros climáticos. Este método ha sido seleccionado debido a que aproxima de una manera cercana la ETo de cualquier localidad evaluada, tiene bases físicas sólidas e incorpora explícitamente parámetros fisiológicos y aerodinámicos (FAO, 2006).

2.3.2.1 Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ETc)

La evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar se denomina ETc, y se refiere a la evapotranspiración de cualquier cultivo cuando se encuentra exento de enfermedades, con buena fertilización y que se desarrolla en parcelas amplias, bajo óptimas condiciones de suelo y agua, y que alcanza la máxima producción de acuerdo a las condiciones climáticas existentes (Alves, 1995).

2.3.3. Determinación de la evapotranspiración

La evapotranspiración no es simple de medir. Para determinarla experimentalmente se requieren aparatos específicos y mediciones precisas de varios parámetros físicos o el balance del agua del suelo en lisímetros. Los métodos experimentales de campo, son en general caros, exigiendo precisión en las mediciones, y pueden ser completamente realizados y analizados apropiadamente sólo por personal de investigación suficientemente preparado. A pesar de que estos procedimientos no son apropiados para mediciones de rutina, siguen siendo importantes para la evaluación de las estimaciones de ET obtenidas con otros métodos indirectos (FAO, 2006).

Aguilera y Martínez (1996) indicaron que existen varios métodos para estimar la evapotranspiración, los cuales se han clasificado en métodos directos e indirectos. Los directos proporcionan información directa del total de agua requerida por los cultivos, utilizando para ello instrumentos para la determinación, y proporcionan valores muy apegados a la realidad y, a la vez, sirven para ajustar los parámetros de los métodos empíricos. Entre éstos pueden señalarse: el método gravimétrico, lisimétrico y el evapotranspirómetro de Thornthwaite. Los indirectos proporcionan una estimación del requerimiento de agua a través de todo el ciclo vegetativo mediante la utilización de fórmulas empíricas; los mismos se han clasificado en climatológicos y micrometeorológicos. Los climatológicos estiman la evapotranspiración en períodos mínimos de una semana, dentro de éstos tenemos: Penman modificado, evaporación del tanque tipo "A", Turc, Jensen-Haise, Stephens, Blaney-Cridle, Thornthwaite, Doorenbos-Pruitt, Ivánov y Papadakis.

2.3.3.1 Métodos directos – thornthwaite

El método de Thornthwaite fue desarrollado a partir de datos de precipitación y escorrentía para diversas cuencas de drenaje. El resultado es básicamente una relación empírica entre la ETp y la temperatura del aire. A pesar de la simplicidad y las limitaciones obvias del método, funciona bien para las regiones húmedas. No es necesariamente el método más exacto ni tampoco el que tiene las bases teóricas más profundas. Por el contrario, probablemente esas características corresponden a aquellas que involucran flujo de vapor y balance de calor. Entre las diferencias

más notorias del método de Thornthwaite se encuentra la suposición de que existe una alta correlación entre la temperatura y algunos de los otros parámetros pertinentes tales como radiación, humedad atmosférica y viento. Mientras que tales limitaciones pueden ser poco importantes bajo ciertas condiciones, a veces pueden resultar relevantes.

Thornthwaite y Mather, quienes conocieran que la radiación solar y la turbulencia atmosférica son factores de importancia en la ETR, han establecido que el problema de desarrollar una fórmula para la ETP permanece aún sin resolver. Los métodos que incluyen flujo de vapor y balance de calor requieren datos meteorológicos que, o no son medidos o son observados en pocos puntos, muy espaciados. Por el contrario, la fórmula empírica de Thornthwaite puede ser usada para cualquier zona en la cual se registran la Temperatura máxima y Temperatura mínima diarias (<http://www.filo.uba.ar/contenidos/carreras/geografia/catedras/climatologia/sitio/bcehidrico.pdf>).

La fórmula de Thornthwaite es la siguiente:

$$ETP = 16 (10T/I)^a$$

Donde:

ETP: evapotranspiración en mm.

I: índice calórico, constante para la región dada y es la suma de 12 índices mensuales i , donde i es función de la temperatura media normal mensual [$i: (t/5)^{1,514}$].

T: temperatura media mensual (no normal) en °C

a: exponente empírico, función de I

$$a = 6,75 \cdot 10^{-7} I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} I^2 + 1,79 \cdot 10^{-2} I + 0,49239$$

2.3.3.2 Lisímetros

Si se aísla la zona radicular del cultivo y se controlan los procesos que son difíciles de medir, los diversos términos en la ecuación del balance de agua en el suelo se pueden determinar con apreciable exactitud. Esto se hace en lisímetros que son tanques aislados llenados con suelo disturbado o no disturbado en los que el cultivo crece y se desarrolla. En lisímetros de pesaje de precisión, la evapotranspiración se puede obtener con una exactitud de centésimos de milímetro, donde la pérdida

de agua es medida directamente por el cambio de masa y períodos pequeños tales como una hora, que pueden ser considerados (Bastiaanssen, 1995).

En lisímetros de drenaje, la evapotranspiración es medida por un período dado, restando la cantidad de agua de drenaje, recogida en el fondo de los lisímetros, de la cantidad total de agua ingresada. Un requerimiento de los lisímetros es que la vegetación dentro e inmediatamente fuera del lisímetro sea idéntica (la misma altura e índice de área foliar). Este requisito no se ha respetado normalmente en muchos estudios de lisimetría y ha dado lugar a datos seriamente desviados y poco representativos de ET_c y K_c (FAO , 2006)

2.3.3.3 Métodos de balance de energía y microclimáticos

Los métodos micro meteorológicos estiman la evapotranspiración (ET) en cortos intervalos de tiempo (menores que 30 min), por lo que permiten estimar este parámetro en tiempo real (Rosenberg, 1974).

Antón (2002) menciona que la evaporación de agua requiere cantidades relativamente altas de energía, ya sea en la forma de calor sensible o de energía radiante. Por ello, el proceso de evapotranspiración es controlado por el intercambio de energía en la superficie de la vegetación y es limitado por la cantidad de energía disponible. Debido a esta limitación, es posible predecir la evapotranspiración aplicando el principio de conservación de energía. La energía que llega a la superficie debe ser igual a la energía que sale de la superficie en el mismo periodo de tiempo. Todos los flujos de energía deben ser considerados cuando se deriva una ecuación de balance de energía. La ecuación para una superficie de evaporación se puede escribir como:

$$R_n - G - \lambda T - H = 0$$

Dónde:

R_n es la radiación neta,

H es el calor sensible,

G es el flujo de calor del suelo,

λT es el flujo de calor latente.

Los distintos términos pueden ser positivos o negativos. Cuando R_n es positivo, proporciona energía a la superficie y cuando G , λT y H son positivos retiran energía de la superficie. El flujo de calor latente (λT) representa la fracción de la evapotranspiración que puede ser derivada de la ecuación del balance de energía si todos los otros componentes son conocidos. La radiación neta (R_n) y el flujo de calor del suelo (G) pueden ser medidos o estimados en función de parámetros climáticos

2.3.3.4 Método de balance de agua en el suelo

La evapotranspiración también puede determinarse midiendo varios componentes del balance de agua en el suelo. El método consiste en evaluar los flujos de agua que entran y salen de la zona radicular del cultivo dentro de un determinado periodo de tiempo. El riego (R) y la precipitación (P) proporcionan agua a la zona radicular. Parte de R y P pueden perderse por escurrimiento superficial (ES), y percolación profunda (D) la cual eventualmente recargará la capa freática. El agua también puede ser transportada hacia la superficie mediante capilaridad (C) desde la capa freática sub-superficial hacia la zona de raíces o ser incluso transferida horizontalmente por flujo sub-superficial hacia dentro (FS_{in}) o fuera (FS_{out}) de la zona radicular (FS). Sin embargo, excepto bajo condiciones de pendientes pronunciadas, normalmente los valores de FS_{in} y FS_{out} son mínimos y pueden no ser considerados.

La evaporación del suelo y la transpiración del cultivo pueden agotar el agua de la zona radicular. Si todos los otros flujos aparte de la evapotranspiración (ET) pueden ser evaluados, la evapotranspiración se puede deducir a partir del cambio en el contenido de agua en el suelo (SW) a lo largo de un periodo de tiempo:

$$ET = R + P - ES - D + C \pm FS \pm SW$$

Algunos flujos como el flujo sub-superficial, la percolación profunda y la capilaridad desde la capa freática son difíciles de medir y pueden no considerarse en periodos cortos de tiempo. El método del balance de agua en el suelo generalmente solo puede dar estimaciones de ET para periodos largos de tiempo del orden de una semana o diez días (FAO, 2006).

2.3.3.5 Métodos climatológicos Penman Monteith

Debido a la dificultad de obtener mediciones de campo precisas, ET se calcula comúnmente con datos meteorológicos. Una gran cantidad de ecuaciones empíricas o semi-empíricas se han desarrollado para determinar la evapotranspiración del cultivo o de referencia utilizando datos meteorológicos. Algunos de los métodos son solamente válidos para condiciones climáticas y agronómicas específicas y no se pueden aplicar bajo condiciones diferentes de las que fueron desarrolladas originalmente. Numerosos investigadores han analizado el funcionamiento de los varios métodos del cálculo para diversas localidades. Como resultado de una Consulta de expertos, el método FAO Penman Monteith se recomienda actualmente como el método estándar para la definición y el cálculo de la evapotranspiración de referencia, ETo. La ET del cultivo bajo condiciones estándar se determina utilizando los coeficientes de cultivo (Kc) que relacionan la ETc con la ETo

$$ET_o = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)}$$

Dónde:

ETo: evapotranspiración de referencia (mm día-1)

Rn: radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m-2 día-1)

Ra: radiación extraterrestre (mm día-1)

G: flujo del calor de suelo (MJ m-2 día-1)

T: temperatura media del aire a 2 m de altura (°C)

u₂: Velocidad del viento a 2 m de altura (m s⁻¹)

ea: presión de vapor de saturación (kPa)

ea: presión real de vapor (kPa)

es - ea: déficit de presión de vapor (kPa)

Δ: pendiente de la curva de presión de vapor (kPa °C-1)

γ: Constante psicrométrica (kPa °C-1)

Esta ecuación determina la evapotranspiración de la superficie hipotética de referencia y proporciona un valor estándar con el cual se puede comparar la evapotranspiración en diversos periodos del año o en otras regiones, así como también puede relacionarse con la evapotranspiración de otros cultivos (FAO, 2006).

2.4 SISTEMA DE RIEGO POR GOTEO SUPERFICIAL

Los sistemas de riego por goteo de superficie se utilizaron en un inicio para el riego de cultivos perennes ampliamente espaciados. Hoy en día este tipo de riego se puede utilizar para el riego de cultivos anuales o en hilera también (Lamm et al., 2007). Los componentes de un sistema de riego típico se muestran en la Fig. 2.

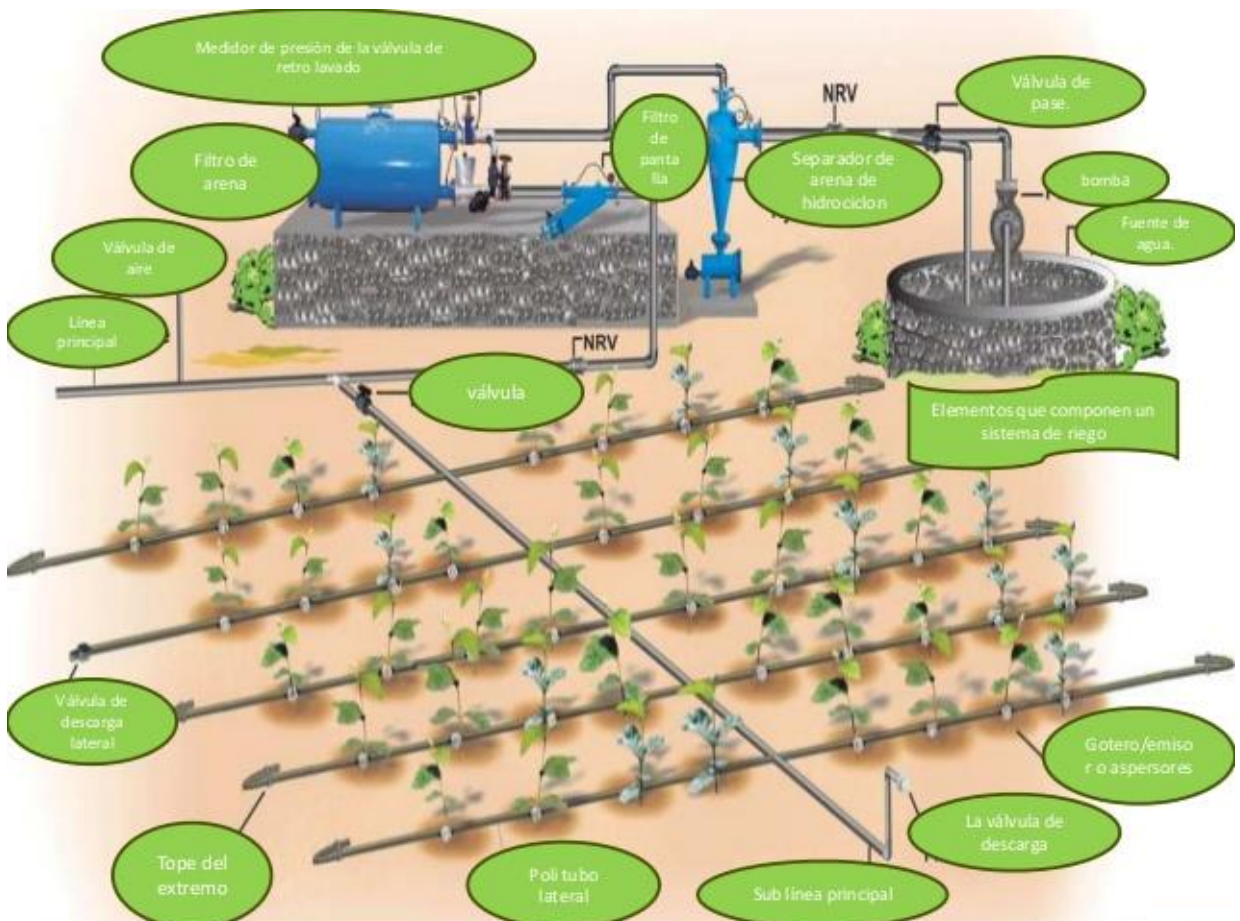


Figura 2. Componentes de un sistema de riego, (García, 2015).

2.4.1 Diseño general del sistema de riego

El diseño del sistema de riego depende de varios factores entre los cuales tenemos: Tipo de suelo, clima, topografía, calidad de agua y tipo de cultivo. Estos factores guiarán la elección de emisores, su distanciamiento y el tamaño de tuberías. El objetivo principal es alcanzar una adecuada distribución a través del suelo y satisfacer las necesidades hídricas del cultivo y la atmósfera. Así mismo debe tener la capacidad de mantener un contenido de agua deseado en la zona radicular (Naglič, 2014).

Los sistemas de riego por goteo pueden aplicar el agua a manera de fuentes puntuales o como fuentes lineales. Las fuentes lineales aplican el agua en un patrón continuo a lo largo de la longitud del lateral y son los más utilizados para cultivos de distanciamiento corto. Su diseño se basa en la tasa de descarga por unidad de longitud. Tuberías o mangueras con emisores discretos usualmente usados para cultivos espaciados son diseñados usando una tasa de descarga por emisor individual. Los emisores de fuente puntual son clasificados en base a sus propiedades de flujo y están distanciados en un rango de 50 mm hasta 1 metro (Dasberg y Or, 1999).

2.4.2 Sistema de riego por goteo superficial para cultivos en hilera

Para algunos cultivos de densidad variable, humedecer toda el área de crecimiento es de gran importancia y es obtenido cuando se traslapa el volumen de suelo humedecido que se forma cerca de cada emisor. Cuando se utiliza este tipo de sistemas, el objetivo apunta humedecer la hilera de forma homogénea y dejar una porción de suelo seca entre hileras. Para mantener el humedecimiento necesario y a la profundidad deseada es necesario que los emisores tengan un buen distanciamiento (Naglič, 2014).

2.5 DISTRIBUCIÓN DE AGUA BAJO UN SISTEMA DE RIEGO POR GOTEO

En la etapa de instalación del sistema, los distanciamientos entre goteros en las líneas de riego ocasionan que el agua infiltrada se limite a una zona pequeña en comparación con el área superficial total de suelo. Según Skaggs (2010), la forma del volumen del área mojada debajo de un gotero está influenciado por las propiedades hidráulicas del suelo, textura del suelo, estructura del suelo, capas impermeables en la superficie del suelo y la anisotropía vertical y horizontal de la permeabilidad. Los patrones de humedad también dependen del manejo del riego (caudal de aplicación, frecuencia y volumen de aplicación), distanciamiento de goteros y contenido de humedad inicial.

Según Benami y Ofen (1995), la zona de humedad cerca del punto de emisión del emisor consiste en tres fases Fig.3. Una zona de transmisión alrededor y debajo del emisor se forma, la cual posee poca aeración y está cerca a la saturación.

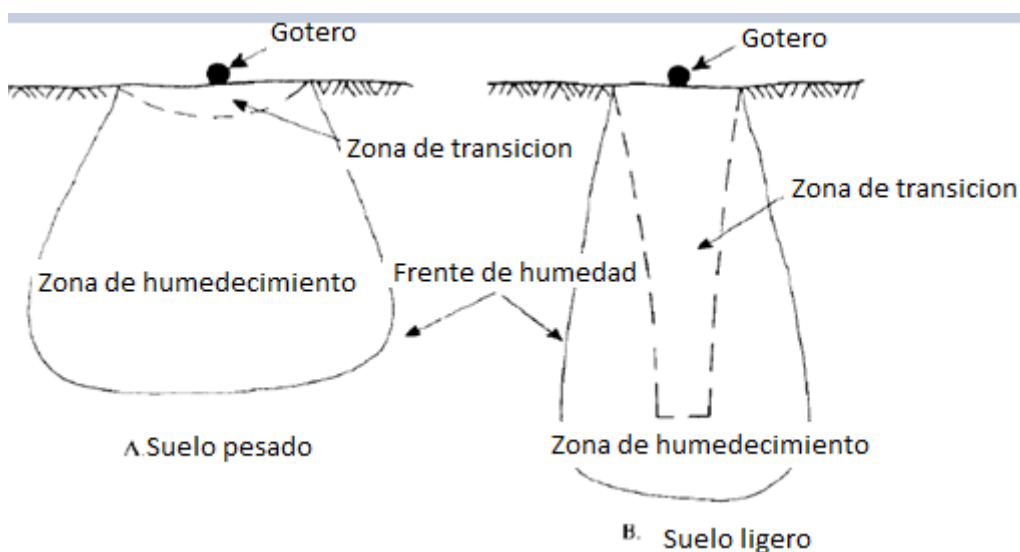


Figura 3. Partes de la zona humedecida por el emisor, Benami y Ofen (1995).

Alrededor de la zona de transmisión se forma la zona de humedecimiento donde la dispersión del agua está sometida a fuerzas gravitatorias y capilares decreciendo el contenido de humedad al alejarse del punto de emisión. La tercera zona es el frente de humedad donde el contenido de humedad es igual al contenido de agua inicial

2.6 MOVIMIENTO DE AGUA EN LA ZONA NO SATURADA

El suelo y la zona no saturada tienen una gran importancia en el ciclo del agua, así como en el transporte y las transformaciones de los compuestos químicos en el suelo. La gestión de las proporciones volumétricas y másicas de las diferentes fases existentes en el suelo constituye la base para el estudio del comportamiento de la zona no saturada.

La zona no saturada, también denominada zona vadosa, es la porción del subsuelo sobre el nivel freático. Esta zona se encuentra dividida en un sistema de tres fases. La primera es la fase sólida, compuesta por minerales y materia orgánica, la segunda es la fase líquida, compuesta por agua y solutos disueltos y la tercera es la fase gaseosa compuesta por vapor de agua y otros gases (https://notendur.hi.is/thorstur/teaching/vatna/GROUNDWATER_chapter.PDF).

La zona no saturada transmite Fig.4 el agua desde la superficie del suelo hasta el nivel de agua subterránea o provee temporalmente de agua cerca de la superficie del suelo para ser usada por las plantas. En el proceso de movimiento de agua a través de la zona no saturada pueden disolverse y / o transportarse los fertilizantes que el agricultor aplica a su campo (Orrego, 2005).

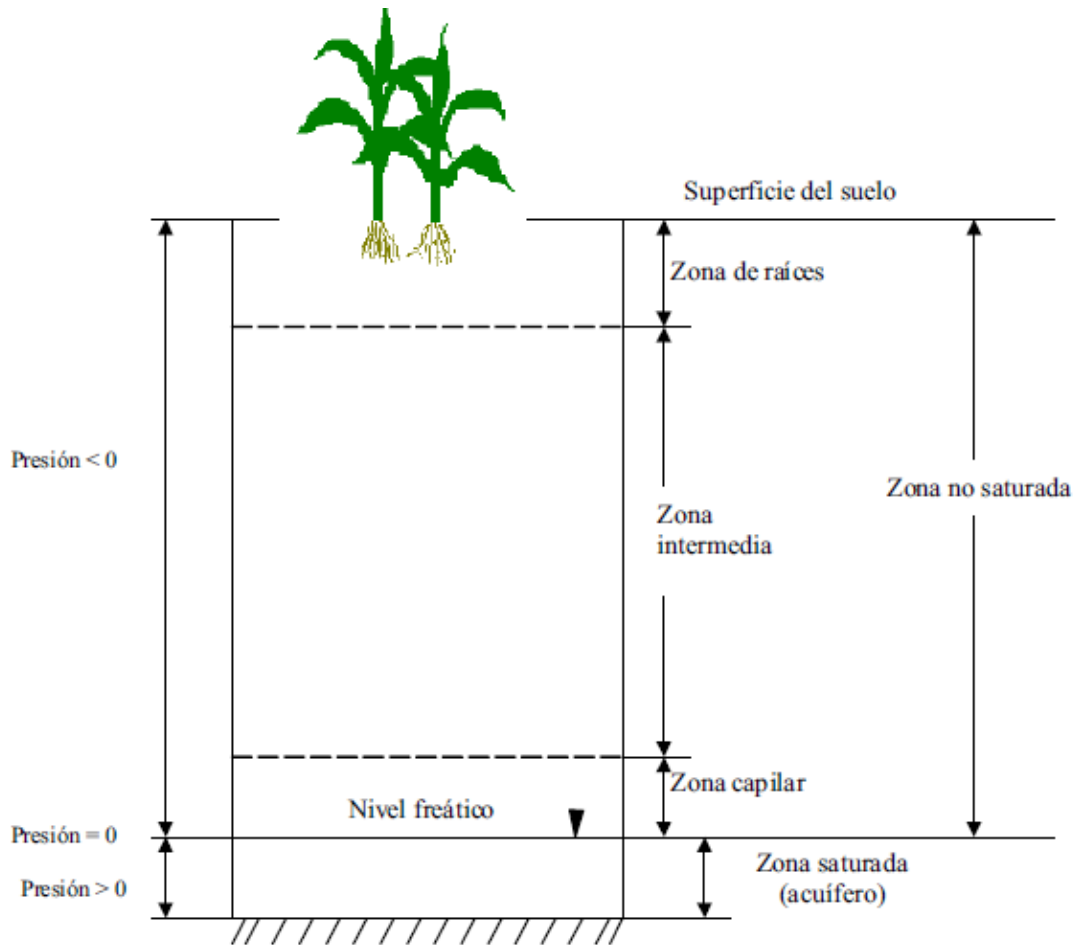


Figura 4. Componentes de la zona no saturada (Orrego ,2005).

2.6.1 Ecuación de Richards

La ecuación de flujo en medios porosos no saturados o ecuación de Richards plantea la relación entre la humedad, la conductividad hidráulica y la succión en un medio poroso no saturado para distintos tiempos.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\theta) \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right]$$

Donde θ es el contenido volumétrico de humedad (L^3L^{-3}), ψ es el potencial matrico (L), t es el tiempo (L) , K es la conductividad hidráulica en función del contenido de humedad (LT^{-1}) y z es la coordenada espacial vertical (L).

El movimiento del agua que se produce a través de los poros del material o de las fracturas que se encuentran en el mismo se puede expresar a través de la ley de

Darcy. Según Romaña (2014), la ley de Darcy establece que la relación de la velocidad de un fluido en un medio poroso y su gradiente hidráulico es una constante llamada conductividad hidráulica, siendo esta constante en suelos saturados. Bajo condiciones de equilibrio la ley de Darcy gobierna el movimiento de agua a través de un medio poroso y relaciona la conductividad hidráulica con un gradiente de energía, el cual depende de la presión que ejerce el agua sobre las partículas del suelo (potencial matricial y gravitacional). La ley de Darcy que describe el movimiento de agua en un medio poroso se muestra a continuación:

$$\vec{v} = -K(\psi)\vec{\nabla}\phi$$

Donde $K(\psi)$ es la conductividad hidráulica en función del potencial matricial y $\vec{\nabla}\phi$ es el gradiente de potencial hidráulico entre dos puntos (Orrego, 2005).

Esta se puede extender a medios no saturados, en una dimensión, considerando que la conductividad es la conductividad hidráulica en función de la humedad del suelo.

Richards planteó la relación entre la humedad, la conductividad hidráulica y la succión en un medio poroso no saturado en función del tiempo Fig.5. Esta ecuación tiene la característica de ser altamente no lineal debido a la dependencia que tiene la humedad y la conductividad hidráulica con la succión (Paniconi et al, 1991).

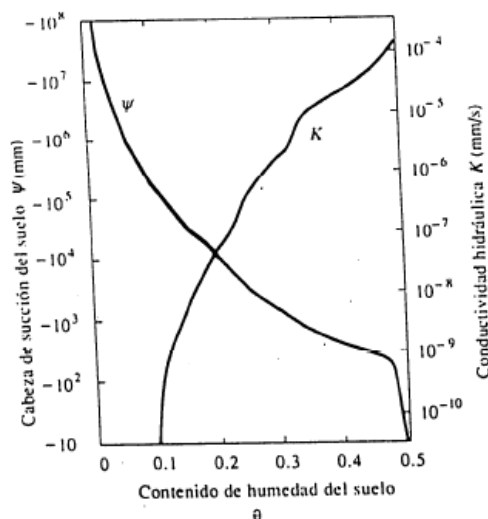


Figura 5. Variación de succión y de la conductividad hidráulica con el contenido de humedad para un suelo arcilloso (Infia, 2009).

Según Reyna (2008), se necesita de la definición de las funciones hidráulicas del suelo para poder resolver la ecuación de Richards , estas funciones hidráulicas requieren la determinación de las propiedades hidráulicas del suelo .La relación entre el contenido de agua en el suelo y la succión o potencial matrico es una parte fundamental de la caracterización de las propiedades hidráulicas de un suelo .Para la determinación de estas, es necesario realizar mediciones ya sea en laboratorio o en campo.

2.6.2 Curva de retención de humedad

La relación entre el contenido de humedad y el potencial matrico Fig.6, especifica cuánta agua es retenida por el suelo dado un potencial específico. Esta relación es específica para cada suelo y debe ser medida experimentalmente. Este tipo de relación es usada de forma extensiva para el modelamiento del flujo de agua en el suelo (Loll y Mudrup ,2010).

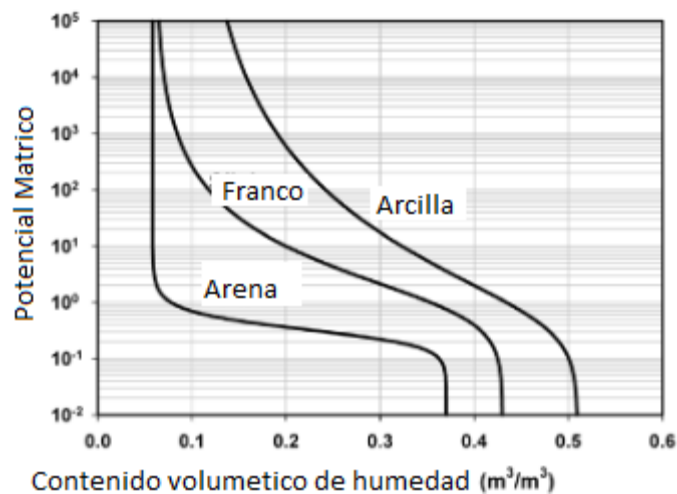


Figura 6. Curvas típicas características de suelos de diferente textura (Tuller y Or, 2003).

En condiciones de saturación o equilibrio el agua del suelo posee una presión igual a la atmosférica, siendo el potencial matricio y de presión cero. Bajo estas condiciones el contenido de agua es aproximadamente igual a la porosidad del suelo. Si una succión ligera es aplicada a un suelo saturado, no ocurre ningún drenaje de agua por parte de los poros hasta que este valor de succión alcance un valor determinado. Cuando se alcanza este umbral también llamado valor de entrada de aire, lo poros más grandes comienzan a drenar agua, su valor es de aproximadamente de -10 cm H₂O para muchos suelos. Su valor es relativamente pequeño en suelos de textura gruesa como las arenas debido a la cuasi uniformidad de sus poros.

La cantidad de agua remanente en el suelo en equilibrio es una función del tamaño y el volumen de los poros que tienen agua. Entonces no existe solamente la relación entre el potencial matricio y la humedad del suelo sino también entre el potencial matricio y el tamaño umbral de poros que poseen agua (Schjønning, 1992).

En adición a los valores antes mencionados, existen otros puntos de la curva de retención de humedad que vale la pena mencionar. Según Loll y Moldrup (2010), en la curva de retención de humedad existe un punto que siempre es alcanzado y que a mayor succión o potencial matricio no causan disminución en el contenido de agua Fig. 7 y 8. Este valor es conocido como contenido de agua residual o irreductible. Otros dos puntos han sido conocidos históricamente como contenido de agua a capacidad de campo y punto de marchitez

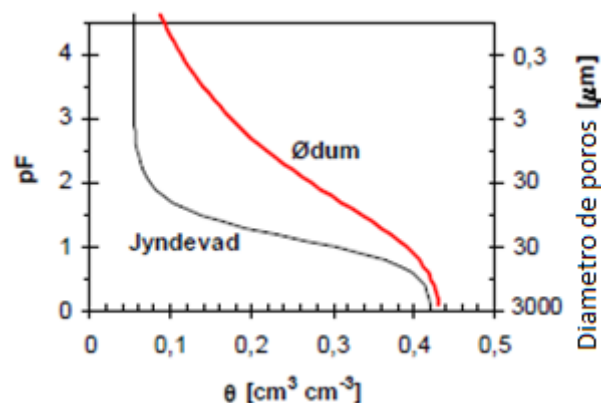


Figura 7. Curvas de retención para un suelo arenoso (Jydevad) y arenoso-franco (Ødum) , Loll y Moldrup, (2010).

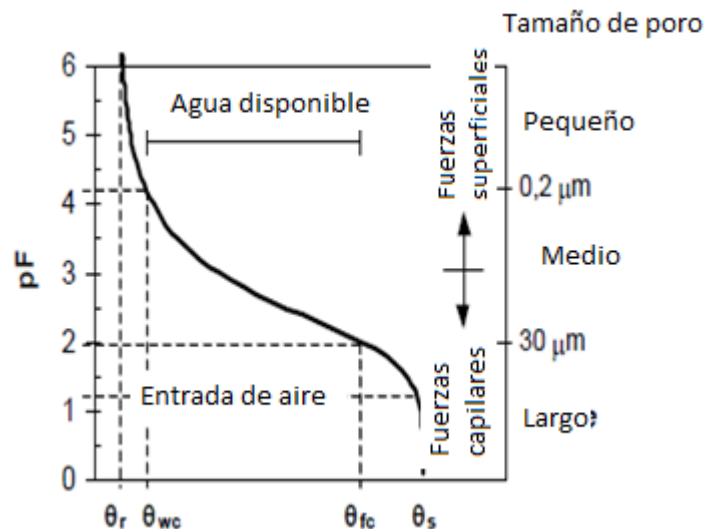


Figura 8. Partes de la curva de retención de humedad, Loll y Muldrup, (2010).

2.7 MODELAMIENTO DE AGUA EN EL SUELO

La medición de la curva de contenido de humedad consume tiempo y es laboriosa. Las mediciones de pares de contenido de humedad y potencial matricio suelen ser fragmentarias y representan solo unas cuantas mediciones del rango de humedad de interés. Para el modelamiento, propósitos de análisis caracterización y comparación entre diferentes suelos es beneficioso representar el contenido de agua en una forma matemática continua (Tuller y Or , 2003).

Para caracterizar el medio no saturado se requiere del conocimiento de las curvas de conductividad $k(\theta)$, y retención $\psi(\theta)$ o bien, difusividad $D(\theta)$, siendo θ , el contenido volumétrico de humedad, $k(\theta)$ la conductividad hidráulica no saturada, $\psi(\theta)$ el potencial mátrico del suelo y $D(\theta)$ el coeficiente de difusividad (Zimmermann y Riccardi ,2000).

2.7.1 Funciones hidráulicas de suelos

Las funciones hidráulicas dependen de algunos parámetros que necesitan para su calibración de las propiedades hidráulicas, determinadas por medio de ensayos. Para lograr las mediciones de las propiedades hidráulicas de suelo nos enfrentamos a numerosas complicaciones debido a dos factores importantes:

La no linealidad de la función de conductividad - succión y

La no linealidad de la función de humedad - succión.

Una solución al problema de las mediciones resulta en utilizar modelos matemáticos (funciones de conductividad - succión; humedad - succión) que permitan representar las propiedades hidráulicas de los suelos no saturados o generalizar los datos experimentales existentes a suelos de comportamiento hidráulico similar. La selección del modelo es importante porque este debe permitir representar al suelo en todos los estados de humedad que pudiere tener (Reyna, 2008).

2.7.1.1 Modelos de humedad y conductividad hidráulica

Los datos que se obtienen de las mediciones realizadas en el campo o en el laboratorio tienen el problema de que no pueden abarcar todo el rango de humedad que sufre el suelo. Los modelos matemáticos tienen la ventaja de representar en forma aproximada al suelo en los puntos donde se realizaron las mediciones y permiten obtener valores en todos los estados del mismo donde no se obtuvieron datos a través de mediciones. Dentro de todos los modelos matemáticos que se pueden emplear, los modelos semi-empíricos tienen la gran ventaja que representan las funciones de conductividad hidráulica y de humedad en función de la succión en forma adecuada y necesitan menor cantidad de mediciones para su definición. La elección del mejor modelo para representar las propiedades hidráulicas de los suelos no saturados dependerá de la posterior utilización que se desea realizar con dichas funciones (Reyna, 2008).

Se han propuesto diversas ecuaciones diferenciales para describir los suelos cerca de la saturación, King (1965), Visser (1968), Laliberte (1969), Su y Brooks (1975) y Clapp y Hornberger (1978). Estas funciones representan los datos del suelo con mayor exactitud, pero son más complicados matemáticamente o necesitan de mayor cantidad de parámetros por lo que los hace menos atractivos para su uso (Van Genuchten y Nielsen, 1985).

a) Modelo de Brooks y Corey

El modelo plantea lo siguiente:

$$\theta = \begin{cases} (\alpha h)^{-\lambda} (\theta_s - \theta_r) + \theta_r & \alpha h > 1 \\ \theta_s & \alpha h \leq 1 \end{cases} \quad 1$$

$$S_e = \begin{cases} |\alpha h|^{-n} & h < -1/\alpha \\ 1 & h \geq -1/\alpha \end{cases} \quad S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad 2 \text{ y } 3$$

$$K = K_s S_e^{2/n+1+2} \quad 4$$

Donde la ecuaciones 1 y 2 son las ecuaciones de humedad del modelo de Brooks y Corey, mientras que la ecuación 3 representa la saturación efectiva o el contenido de agua normalizado adimensional y la ecuación 4 representa la conductividad hidráulica no saturada

El contenido de agua residual θ_r es la cantidad máxima de agua en el suelo que no contribuirá al flujo líquido debido a la fuerte adsorción de la fase sólida (Luckner et al, 1989). Formalmente, θ_r puede definirse como el contenido de agua al cual ambos $d\theta/dh$ y la conductividad tienden a cero cuando h es muy grande.

La humedad saturada no es igual a la porosidad de los suelos; θ_s de campo es generalmente entre un 5% a un 10% menor que la porosidad debido al aire ocluido o al aire disuelto (Van Genuchten et al., 1991).

La ecuación de la humedad de Brooks-Corey puede escribirse en forma adimensional en función del grado efectivo de saturación S_e (Ec 3).

La ecuación de conductividad de Brooks- Corey tiene como términos a la conductividad hidráulica saturada, el cual es un parámetro que se obtiene de forma experimental y al contenido de agua normalizado o saturación efectiva (Ec 4).

Brooks-Corey es adecuado para suelos granulares. Los resultados son menos exactos para suelos con textura fina y suelos no alterados debido a la ausencia de un punto definido para el valor de entrada de aire para estos suelos.

b) Modelo de Van Genuchten

El modelo de retención más utilizado es la expresión analítica de Van Genuchten. Van Genuchten (1980) desarrolló una curva característica de humedad del suelo Fig.9 y, además, desarrolló un modelo para el cálculo de conductividad hidráulica utilizando el modelo de Mualem (1976) (Reyna ,2008).

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + |\alpha h|^n]^m} & h < 0 \\ \theta_s & h \geq 0 \end{cases} \quad 5$$

Ó

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[\frac{1}{1 + (\alpha h)^n} \right]^m \quad 6$$

$$K(h) = K_s S_e^l [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2 \quad 7$$

$$m = 1 - 1/n, \quad n > 1$$

La ecuación posee 5 parámetros independientes θ_s , θ_r , α y n , los cuales deben ser estimados a partir de valores observados de los datos de retención de humedad (Too et al., 2014). De estos 4 parámetros, el contenido de agua saturado θ_s es probablemente el más fácil de encontrar de forma experimental. Desafortunadamente el contenido de agua residual (θ_r) no tiene una medición tan rutinaria, por lo tanto se tiene que estimar extrapolándolo de datos de retención de humedad que estén cercanos a contenidos de agua bastante bajos. Desde un punto de vista práctico el contenido de agua residual se puede definir como aquel que se encuentra acompañado de una succión o potencial matricio bastante negativo como por ejemplo el punto de marchitez permanente (Van Genuchten ,1980). La constante m es siempre asumida como $m=1-1/n$, donde n representa la distribución del tamaño de poros. El parámetro de conectividad de poros l es asumido con el valor de 0.5 para la mayoría de suelos (Šimůnek ,2013).

Propiedades hidrualicas

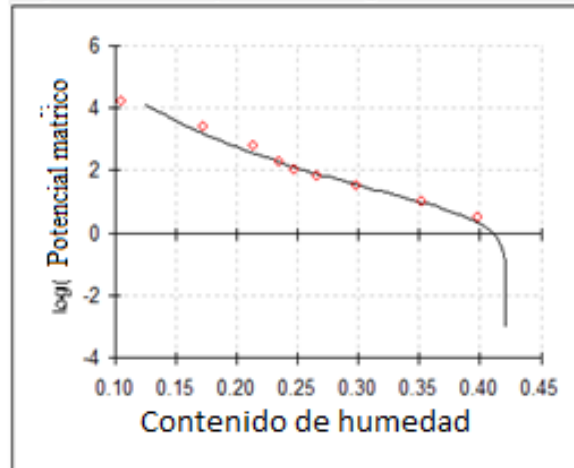


Figura 9. Curva de retención de humedad del modelo de Van Genuchten usando el programa RETC ajustada a datos experimentales de humedad

2.7.2 Propiedades hidráulicas de los suelos

Las funciones hidráulicas de los suelos necesitan de la definición de sus parámetros para ello existen varias opciones. Según Van Genuchten et al (1991), la estimación de los parámetros de Van Genuchten y Brooks y Corey necesita de suficientes datos de humedad para poder caracterizar la forma de la curva de humedad y de un programa que realice una regresión no lineal. Uno de estos programas de computadora para la estimación de parámetros de modelos es RETC.

La base de datos computacional del UNSODA compilado por el laboratorio de salinidad de los estados unidos contiene una exhaustiva colección de información acerca de contenido de humedad y conductividad hidráulica insaturada de diferentes texturas alrededor del mundo ajustados al modelo de Van Genuchten. La tabla N° 2 recopila los para metros para el presente modelo (Leij et al., 1996).

Tabla 2. Parámetros de Van Genuchten para diferentes tipos de suelo (Leij et al., 1996)

Clase textural	N	θ_r [cm ³ /cm ³]	θ_s [cm ³ /cm ³]	α [1/cm]	n
Arena	126	0.058	0.37	0.035	3.19
Arena franca	51	0.074	0.39	0.035	2.39
Árena arcillosa	78	0.067	0.37	0.021	1.61
Franco	61	0.083	0.46	0.025	1.31
Limo	3	0.123	0.48	0.006	1.53
Franco limoso	101	0.061	0.43	0.012	1.39
Arcilla franco arenosa	37	0.086	0.40	0.033	1.49
Franco arcilloso	23	0.129	0.47	0.030	1.37
Limo franco arcilloso	20	0.098	0.55	0.027	1.41
Limosa arcillosa	12	0.163	0.47	0.023	1.39
Arcilla	25	0.102	0.51	0.021	1.20

2.8 MEDICION DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DEL SUELO

El contenido de agua en el suelo, definido como la cantidad de agua removida por secado en estufa a 105° C hasta alcanzar peso constante, es un parámetro básico que permite caracterizar el estatus hidrológico y la capacidad de flujo de agua en el perfil e influye en otras propiedades y procesos físicos del mismo. Existen distintos métodos para estimar la humedad del suelo tanto en campo como en laboratorio e invernadero (gravimétrico, sonda de neutrones, TDR, bloques de yeso, etc.) (Ponizovsky et al., 1999).

2.8.1 Método gravimétrico

El método gravimétrico es el único método directo de medición de la humedad del suelo. Dicho método consiste en tomar una muestra de suelo, pesarla antes y después de su desecado y calcular su contenido de humedad. La muestra de suelo se considera seca cuando su peso permanece constante a una temperatura de 105°C. Se han construido numerosos tipos de equipo de muestreo, así como hornos de secado y balanzas especiales, para ser utilizados con este método. El método gravimétrico es el más exacto para medir el contenido de humedad del suelo y resulta necesario para calibrar el equipo utilizado en los demás métodos. Sin embargo, no puede usarse para obtener un registro continuo de la humedad del

suelo de un lugar determinado, porque es necesario extraer muestras del suelo para su análisis en el laboratorio además no puede ser automatizado, es destructivo, su

ejecución consume mucho tiempo y su precisión no supera el 3% a pesar de ser un método directo (Topp y Davis, 1985; Topp et al., 2000; Morell y Tuñón, 2003).

2.8.2 Sonda de neutrones

La sonda de neutrones es un método indirecto y no destructivo. Es un instrumento que ha sido ampliamente utilizado, desde la década de 1950, primero para estudios de balances hídricos en agronomía e hidrología y luego se extendió su uso para la medida del contenido volumétrico del agua en el suelo (θ , $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$), en estudios de campo sobre las relaciones suelo-agua-planta, donde se requieren, repetidamente, mediciones no destructivas del θ .

El equipo consta de una sonda que contiene una fuente ra-diactiva que emite neutrones rápidos, un detector de neutrones lentos, un sistema de conteo electrónico y un tubo de acceso a través del cual la sonda se introduce en el suelo (International Atomic Energy Agency –IAEA, 1970; Kutílek y Nielsen, 1994)

2.8.3 Método dieléctrico

La constante dieléctrica aparente (permisividad) de un volumen de suelo varía con la cantidad de humedad contenida en el suelo. El suelo es una mezcla compleja de partículas de diferentes composiciones químicas en una matriz de aire y agua. La constante dieléctrica de las partículas del suelo varía entre dos y siete, mientras que las del aire y agua son uno y 80, respectivamente. De esta manera, si la densidad aparente de un suelo seco permanece constante, es decir, el porcentaje del suelo incluido en la matriz permanece constante, su constante dieléctrica aparente será una función de la cantidad de humedad en la matriz. Esta característica permite la conversión de las mediciones de la constante dieléctrica aparente en mediciones del contenido volumétrico de la humedad del suelo (Seyfried ,M.S. y Murdock ,M.D.,2004)

2.8.3.1 Reflectometría de dominio temporal

La reflectometría de dominio temporal (TDR) es un método de medición del contenido de agua en el suelo y conductividad eléctrica. Cada uno de estos atributos tiene una utilidad sustancial en el estudio de una variedad de procesos. La primera aplicación de TDR a las mediciones del agua del suelo fue informada por Topp et al. (1980). Las principales ventajas del TDR sobre otros métodos de medición del contenido de agua en el suelo son: (1) superior Precisión dentro de 1 o 2% de contenido de agua volumétrico; (2) calibración, en muchos casos es específica del suelo es innecesario; (3) falta de peligro de radiación asociado con la sonda de neutrones o técnicas de atenuación gamma; (4) El TDR tiene excelentes resolución temporal; y (5) las mediciones son simples de obtener, y el método es capaz de proporcionar mediciones continuas a través de automatización y multiplexación (Topp et al., 1980).

El TDR determina la constante dieléctrica de un objeto midiendo el tiempo de propagación de las ondas electromagnéticas enviadas de un generador de pulso que sale de un testeador de cable hacia una probeta inmersa en un medio. Estas ondas electromagnéticas son propagadas a través del cable coaxial que va unido a la probeta. Parte de la incidencia de la onda electromagnética es reflejada al inicio de la probeta debido a la diferencia de impedancia entre el cable y la probeta. La parte residual de la incidencia pasa a través de la probeta hasta alcanzar el final de esta donde la onda se refleja (Noborio ,2001).

En el sector de las telecomunicaciones, el TDR se usa para identificar las localizaciones de las discontinuidades en los cables, el término "probador de cable" es un nombre común para uso general de instrumentos TDR. La velocidad de propagación de la señal V_p (una función de la constante dieléctrica del cable) , junto con una reflexión típica en un punto de discontinuidad en un cable, permite al operador determinar localizaciones de saltos de línea u otros daños utilizando el análisis del tiempo de viaje. Utilizando principios similares ,una guía de onda o sonda de longitud L conocida puede ser incrustada en el suelo y el tiempo de viaje para una rampa electromagnética generada por un TDR que atraviesa una sonda de longitud conocida puede ser determinada .A partir del tiempo de viaje se calcula

la constante dieléctrica aparente del suelo, luego a partir de esta se puede inferir el contenido de agua volumétrico del suelo. La constante dieléctrica aparente del suelo ϵ_b que rodea a la sonda o probeta está en función de la velocidad de propagación ($v = 2L/t$).

$$\epsilon_b = \left(\frac{c}{v}\right)^2 = \left(\frac{ct}{2L}\right)^2 \quad (8)$$

Donde c es la velocidad de la luz en el vacío y t es el tiempo de viaje de la onda electromagnética que atraviesa la probeta. El tiempo de viaje es estimado a partir de la distancia aparente o longitud aparente de la probeta, la cual es caracterizada como un dato de salida en la pantalla del TDR por medio de un análisis en los cambios de las ondas donde x_1 marca la entrada de la señal a la probeta, y x_2 marca la reflexión al final de la probeta. Como se observa en la Fig.10, la distancia aparente ($x_2 - x_1$) aumenta conforme lo hace el contenido de agua en el suelo ocasionando una disminución en la velocidad de propagación

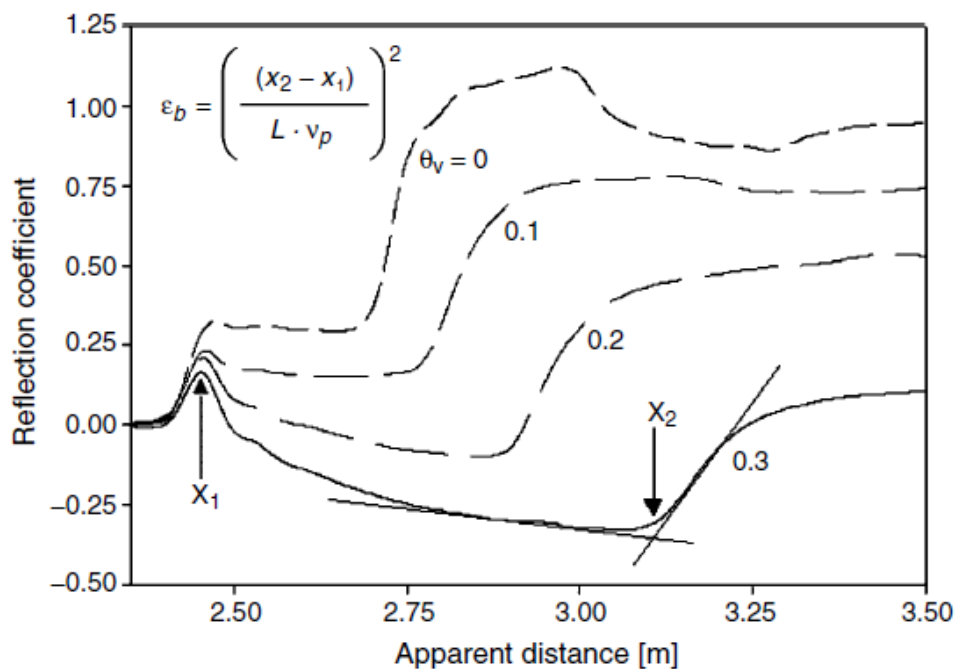


Figura 10. Curvas de la relación entre la distancia aparente y el coeficiente de reflexión, Jones, (2002).

La constante dieléctrica aparente ϵ_b está dominada por la constante dieléctrica del agua $\epsilon_w = 81$ (20 °C) así como los demás constituyentes del suelo los cuales poseen constantes dieléctricas menores como los minerales (3-5) y el aire (1). Esta enorme disparidad entre estas hace que el método sea insensible a la composición del suelo y a su textura y hace que sea un buen método para poder medir el contenido de humedad del suelo (Jones et al., 2002).

2.9 HYDRUS 2D PARA ANALIZAR LA DINÁMICA DEL AGUA EN EL SUELO

El programa HYDRUS 2D es un software de dominio público que resuelve la ecuación de Richards de forma numérica. Este se basa en un modelo de elementos finitos para simular el movimiento unidimensional de agua, calor y solutos múltiples en medios saturados de forma variable.

La ecuación de flujo incorpora un término de extracción para explicar la absorción de agua por las raíces de las plantas. La ecuación de flujo también puede considerar el flujo de tipo de doble porosidad en el que una fracción del contenido de agua es móvil y otra fracción inmóvil, o flujo de tipo de doble permeabilidad que implica dos regiones móviles, una representando la matriz y la otra por macroporos. La ecuación de transporte térmico considera el transporte debido a la conducción y la convección con agua corriente. También se puede considerar el transporte combinado de agua, vapor y energía. Las ecuaciones de transporte de soluto consideran el transporte advectivo-dispersivo en la fase líquida, así como la difusión en la fase gaseosa (PC- PROGRESS ,2013).

2.9.1 Investigaciones realizadas con HYDRUS 2D/3D

No existen reportes o investigaciones dentro del ámbito de física de suelos en los cuales se utilice esta herramienta en nuestro país, sin embargo, existen muchas investigaciones relacionadas a este programa en el extranjero.

Gonzales et al. (2015) utilizó la versión HYDRUS 1-D para simular la dinámica del agua del suelo aplicando cuatro láminas diferentes de agua al cultivo de Maíz siendo el primer tratamiento orientado a satisfacer las necesidades hídricas del

cultivo y los otros tres a ser deficitarios. Obteniendo como resultado que el modelo simuló de forma exitosa la variación temporal la dinámica de agua de los tratamientos.

Por ejemplo, Skaggs et al., (2004) compararon las distribuciones experimentales de agua del suelo para riego por goteo con diferentes cantidades de riego y diferentes duraciones de riego (20, 40 y 60 L m⁻¹ de agua aplicada) con los resultados de simulaciones numéricas con HYDRUS (2D / 3D), obteniendo las propiedades hidráulicas mediante funciones de pedotransferencia. Sus resultados apoyaron el uso de HYDRUS (2D / 3D) como una herramienta importante para investigar y diseñar de prácticas de manejo de riego por goteo.

Aunque en la literatura se sugiere frecuencias de irrigación más altas siendo así una mejor práctica de riego por goteo (Assouline et al., 2006), las simulaciones numéricas de Abou Lila et al., (2013) mostraron que la menor frecuencia de riego produjo un mayor volumen de suelo húmedo sin un aumento en la percolación del agua por debajo de las raíces de las plantas.

Skaggs et al. (2010) evaluaron los efectos de la aplicación de agua, aplicaciones de agua pulsada y el contenido de agua actual del suelo debajo del gotero utilizando tanto datos experimentales como de campo para poder realizar simulaciones en HYDRUS (2D / 3D). Sus resultados mostraron que fue principalmente la textura del suelo y el agua antecedente contenida que determinó la difusión y distribución de agua en el suelo, mientras que la frecuencia de riego y el caudal solo tuvieron muy poco impacto.

De Silva et al. (2008) utilizaron HYDRUS (2D / 3D) para evaluar numéricamente la captación de agua por la raíz y movimiento del agua del suelo en una región con una mezcla de cubierta vegetal natural (es decir, árboles y gramíneas), y concluyó que diferentes cantidades de riego y frecuencias deben utilizarse para diferentes especies de plantas en campos de cultivos intercalados (Haibin et al. 2014).

III. MATERIALES Y METODOS

3.1 AREA EXPERIMENTAL

El presente ensayo se realizó en el fundo Don Germán, de la Universidad Nacional Agraria La Molina, ubicado en el kilómetro 155.5 de la carretera antigua panamericana sur cañete con Latitud Sur: 13°05'57,84" Longitud Oeste :76° 21'54,45" a una Altitud 200 m.s.n.m.

3.2 CARACTERÍSTICAS DEL SUELO

Para obtener las propiedades físicas y químicas del suelo, se tomaron 10 muestras de suelo no perturbado a diferentes profundidades (10, 30 y 45 cm). Los análisis de caracterización de suelo se realizaron en el Laboratorio de Análisis de suelos, plantas, aguas y fertilizantes de la Universidad Nacional Agraria La Molina. Los valores de las principales propiedades físicas están resumidos en la tabla 3.

Tabla 3. Análisis de caracterización de suelo.

Características	15 cm	30 cm	45 cm
pH (1:1)	7.32	8.18	8.18
C.E. (1:1) d S/m	0.71	0.43	0.37
CaCO₃ (%)	0.5	0.8	0.7
M.O. (%)	2.76	1.63	1.35
P ppm	7.3	6.9	3.5
K ppm	280	240	181
Arena (%)	49	49	47
Limo (%)	31	31	29
Arcilla (%)	20	20	24
Clase Textural	Fr.	Fr.	Fr.
CIC (meq/100g)	21.92	14.40	14.40
Ca²⁺ (meq/100g)	18.20	10.61	10.78
Mg²⁺ (meq/100g)	2.63	2.82	2.83
K⁺ (meq/100g)	0.89	0.72	0.53
Na⁺ (meq/100g)	0.20	0.25	0.26
Al³⁺ + H⁺ (meq/100g)	0.00	0.00	0.00
Suma de Cationes	21.92	14.40	14.40
Suma de Bases	21.92	14.40	14.40
% Sat. De Bases	100	100	100

Fuente: Laboratorio de Análisis de suelos, plantas, aguas y fertilizantes de la Universidad Nacional Agraria La Molina. 2016

El suelo presentó clase textural franco, el pH a los 15 cm fue ligeramente alcalino (7.32), a los 30 y 45 cm fue moderadamente alcalino (8.18), con un porcentaje de materia orgánica intermedio a los 15 cm (2.76%) y en las otras profundidades fue bajo (1.63-1.35%, respectivamente).

Los contenidos de Fósforo disponible a los 15 cm fue medio (7.3 ppm) y en las otras profundidades fue bajo (6.9-3.5 ppm respectivamente). El Potasio disponible en las profundidades de 15 y 30 cm fue alto (280-240 ppm respectivamente) y en el de 45 cm fue bajo (181 ppm).

Suelo no salino en las tres profundidades (0.71, 0.43 y 0.37 dS/m, respectivamente), el contenido de carbonato de calcio fue bajo para las tres profundidades (0.5, 0.8 y 0.7%, respectivamente). La capacidad de intercambio catiónico (CIC) a los 15 cm de profundidad fue de nivel medio (21.92 meq/100g), a 30 y 45 cm fue bajo (14.40 meq/100g en ambos casos). El porcentaje de saturación de bases fue alto en las tres profundidades (100 %).

Cabe resaltar que mediante observaciones del perfil en campo se notó la presencia de una capa dura o hardpan a una profundidad de 45 cm, este dato es importante porque se usó como una condición especial en el modelamiento de agua

3.3 DETERMINACION DE LA CURVA DE HUMEDAD DEL SUELO

Para la determinación de la curva de retención de humedad de los primeros 45 cm de profundidad se usaron 10 muestras no perturbadas de suelo usando la técnica de anillos kopeckii para luego colocarlas en las ollas de presión de Richards y así obtener datos de humedad a diferentes valores de pF. Los valores de humedad a diferentes presiones se muestran en la tabla N°4.

Tabla 4. Valores del contenido de humedad a diferentes valores de pF*

*Logaritmo en base 10 de la succión del suelo en cm

	pF									
Profundidad	0.0	0.5	1.0	1.5	1.8	2.0	2.3	2.8	3.4	4.2
0-45 cm	0.44	0.43	0.41	0.37	0.34	0.32	0.30	0.27	0.22	0.13

Como primer paso para realizar el modelamiento de agua se obtuvieron los parámetros para el modelo de Van Genuchten para los primeros 45 cm por medio del programa RETC. Los valores de los parámetros para la capa dura o hardpan se asumieron con el programa HYDRUS 2D/3D dándole características de baja conductividad hidráulica y conectividad de poros. Los valores de las propiedades físicas para el modelo están resumidos en la tabla N° 5

Tabla 5. Parámetros del modelo de Van Genuchten obtenidos con el programa RETC

Profundidad (cm)	θ_r	θ_s	α	n	ks	l
0-30	0.0472	0.4005	0.0062	1.4523	12.18	0.5
45>	0.089	0.43	0.01	1.23	1.68	0.5

Una vez obtenidos los parámetros, se procedió a graficar la curva de humedad por medio del mismo programa y se ajustó a los datos de humedad obtenidos a partir de las ollas de presión de Richards. La Fig.11 nos muestra la curva de humedad de Van Genuchten con el ajuste mencionado para nuestro suelo.

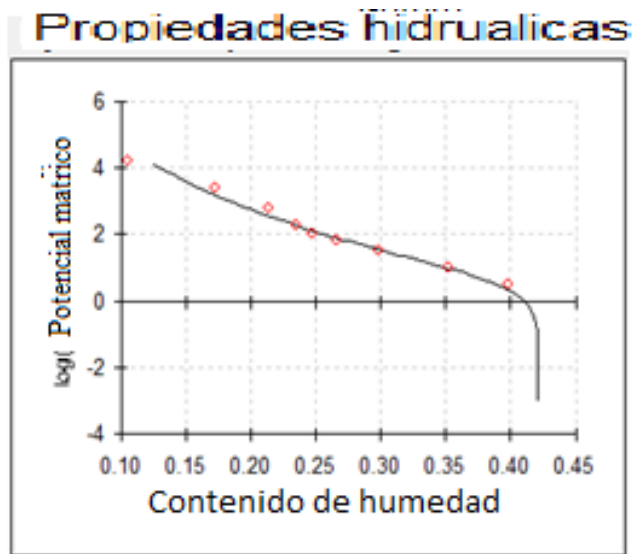
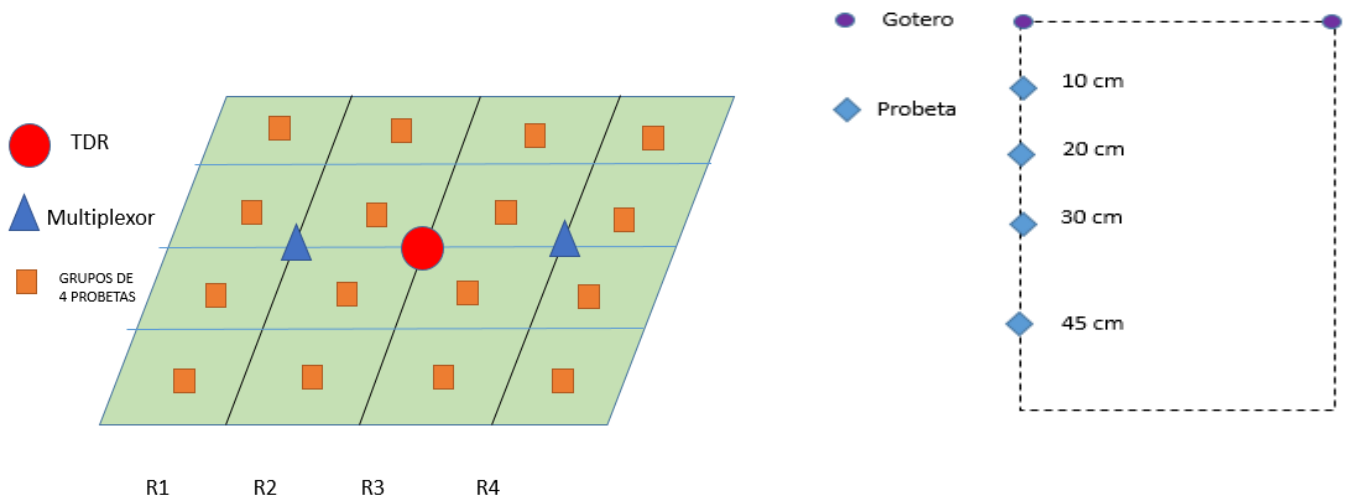


Figura 11. Curva de retención de humedad de Van Genuchten usando el programa RETC

3.4 MEDICION DE LA HUMEDAD DEL SUELO

El contenido de humedad del suelo fue monitoreado por medio de un equipo de reflectometría de dominio temporal o TDR, el cual es usado como un método bastante exacto y automatizable para medir la humedad del suelo. Para monitorear la humedad durante toda la campaña se instalaron probetas a 10 ,20 30 y 45 centímetros debajo de un gotero en la manguera central de riego para cada repetición de los tratamientos de un bloque . El campo se dividió en 4 bloques, lo cual nos dio un total de 32 probetas. El arreglo y la distribución de las probetas instaladas en campo se muestra en las Fig.12 y 13 respectivamente.



Arreglo por bloque

Arreglo debajo del gotero

Figura 12. Arreglo de las probetas por bloque y debajo del gotero

3.5 CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS

La información meteorológica durante el periodo que se desarrolló el ensayo se obtuvo de la estación Davis Ventage Pro del fundo Don German-IRD Costa, Cañete.

En la tabla N° 6 se presenta el resumen de los datos meteorológicos por mes, donde se observa que la temperatura promedio varió entre 21.92 y 24.77 °C. La humedad relativa promedio fue 86.14%. La evapotranspiración varió entre 2.64 y 3.56 mm.

Tabla 6. Condiciones meteorológicas de temperatura, humedad relativa y evapotranspiración (ET) en el período Enero – Abril. Cañete, 2016.

Mes	Temperatura (°C)			ET (mm)	Humedad Relativa (%)
	Promedio	Máxima	Mínima		
Enero	23.19	26.8	19.93	3.54	84.42
Febrero	24.77	28.45	22.09	3.56	85.58
Marzo	24.13	28.16	21.25	3.35	86.18
Abril	21.92	25.81	19.27	2.64	88.36
Prom. Total	23.5	27.31	20.64	3.27	86.14

FUENTE: Estación Meteorológica Davis Ventage Pro del fundo Don German-IRD Costa-Cañete. 2016.

3.6 CULTIVO

En el presente trabajo de investigación se utilizó el cultivar de tomate (*Solanum lycopersicum* L. cv Katya), que es uno de los cultivares más sembrados en la zona.

3.6.1 Cultivar Katya

Hibrido de tomate tipo Roma determinado con excelente calidad de frutos y muy buen rendimiento. Amplia gama de resistencias incluyendo Fol 3, TYLCV, Fol (race 1, 2, 3), ToMV, TSWV, TYLCV. Tiene una forma de fruta ovalada, un peso por fruto de 100 a 170 gr. Se puede cultivar todo el año (Hazera, 2014).

3.7 INSUMOS

Durante la ejecución del presente trabajo de investigación se utilizaron diferentes insumos para la fertilización como para el control de plagas y enfermedades. En la tabla N° 7 se resumen los fertilizantes que se emplearon. La dosis de NPK fue 275-100-500 kg/ha.

Tabla 7. Características de fertilizantes utilizados en el cultivo de tomate. Cañete-2016.

Nombre comercial	Fuente	Fórmula			
			Composición	Dosis utilizada	Presentación
			(N-P ₂ O ₅ -K ₂ O)	(Kg/ha)	(Kg)
Ultrasol K	Nitrato de potasio	KNO ₃	13.75-0-45	500	25
Ultrasol MPK	Fosfato monopotásico	KH ₂ PO ₄	0-52-34	100	25
Ultrasol Nit_one	Nitrato de Amonio	NH ₄ NO ₃	33-0-0	275	25

3.7.1 Materiales de campo

Comprende los siguientes materiales:

- Semillas de tomate (*Solanum lycopersicum* L. cv. Katya)
- Cinta métrica
- Cuaderno de apuntes
- Pipeta de 5ml
- Cámara fotográfica
- Cintas adhesivas de colores
- Manta térmica
- Botellas con tapa de 50 ml
- Cintas de riego
- Palas, picos, martillos y carretilla

Equipos:

- Dream team sistema de riego
- Equipo de reflectometría de dominio temporal
- Software HYDRUS 2D/3D
- Balanza analítica de precisión y comercial
- Potenciómetro
- Tensiómetros
- Refractómetro
- Vernier
- Mochilas de aplicación
- Tanque de evaporación
- Estación Davis ventage pro

3.8 MODELO HYDRUS 2D/3D

El movimiento de agua en el suelo fue simulado en un plano vertical en 2D que pasa entre dos emisores. El programa Hydrus 2D/3D resolvió la ecuación de Richards por medio del método del elemento finito de Galerkin, el cual divide el complejo perfil del suelo en elementos de dos dimensiones para poder aplicar la ecuación de Richards a cada elemento y obtener un contenido de agua para todo el perfil, esto se debe a que la ecuación de Richards no puede aplicarse de forma general a estructuras complejas como lo es el suelo. Además de la ecuación de Richards, el programa utilizó las ecuaciones del modelo de Van Genuchten para representar las propiedades hidráulicas del suelo.

3.8.1 Dominio, condiciones límite y condiciones iniciales

En la Fig.13 muestra el dominio geométrico usado en HYDRUS 2D/3D para caracterizar las condiciones del suelo y del sistema de riego. El dominio fue dividido en dos capas, la primera abarca los primeros 45 cm de profundidad y por debajo de esta se encuentra una capa dura cuyo drenaje es menor favoreciendo la acumulación de agua. Las dimensiones del dominio fueron definidas como 70 cm de ancho por 100cm de profundidad. Las condiciones límite para la simulación fueron: Flujo variable con el tiempo representado por los goteros de 2.1L/h en las esquinas del dominio y con un radio de humedecimiento inicial variable según la lámina aplicada. Flujo atmosférico representado por la evapotranspiración. Drenaje libre al fondo del perfil, usado cuando el nivel freático se encuentra a profundidades mayores y por último se usó la condición de no flujo en los márgenes izquierdo y derecho. Cabe resaltar que se siguieron las recomendaciones del manual de usuario para establecer las condiciones límite.

Se colocaron 4 puntos de observación en el dominio a diferentes profundidades del perfil (10, 20, 30 y 45 cm), estos representan las cuatro probetas del TDR que se colocaron en el campo para la medición de la humedad durante la campaña.

La condición inicial de humedad fue tomada de las mediciones realizadas con el equipo TDR un día antes del trasplante. Mediante la ecuación 5 del modelo de Van Genuchten se transformó el contenido de humedad en potencial matricio y se usó como condición inicial para el experimento.

3.8.3 Determinación de la evaporación, transpiración e índice de área foliar

Dentro de los requerimientos necesarios para el modelo está el de proporcionar los valores de evaporación y transpiración potencial para aplicarlos a la condición límite atmosférica. El programa luego calcula los valores actuales de transpiración evaporación basado en el contenido de humedad que tenga el suelo. Para ello el programa utiliza el valor del índice del área foliar el cual divide la evapotranspiración en sus dos componentes.

El índice de área foliar fue medido 5 veces durante toda la campaña (a los 21, 34, 49, 63, y 85 días después del trasplante) para los cuatro tratamientos de estudio. Este valor es importante debido a su relación con el contenido de materia seca, con capacidad fotosintética de la planta y además sirve para fraccionar la evapotranspiración en evaporación y transpiración los cuales sirven como condiciones límite representado la demanda atmosférica. Sus valores se muestran en la tabla N° 8.

Tabla 8. Índices de área foliar empleando cuatro láminas de riego

DDT	120% Etc	100% Etc	80%Etc	60%Etc
21	0.0489	0.0322	0.0293	0.0284
34	0.4408	0.2363	0.3240	0.2058
49	2.0722	1.1578	0.8321	0.6550
63	3.4934	1.9783	1.2972	1.1785
85	7.2313	2.3753	2.0832	1.0574

DDT: Días después del trasplante

3.8.4 Función de reducción de extracción de agua

Feddes et al. (1978) define los parámetros de la función lineal de reducción de extracción de agua por parte de las raíces (α) mostrados en la figura 14 (h_1 , h_2 , h_3 y h_4). El valor de alfa es adimensional y está comprendido entre 0 y 1. El contenido

de humedad comprendido entre h_2 y h_3 se considera como el intervalo donde la extracción de agua por parte de la raíz es máximo, lo cual, quiere decir que la planta no sufre estrés y que la transpiración potencial es igual a la transpiración actual o real. Estos valores son importantes para evaluar si el contenido de humedad del modelo y de lo medido por el TDR se encontró dentro del rango de extracción potencial o no y en qué etapa del cultivo.

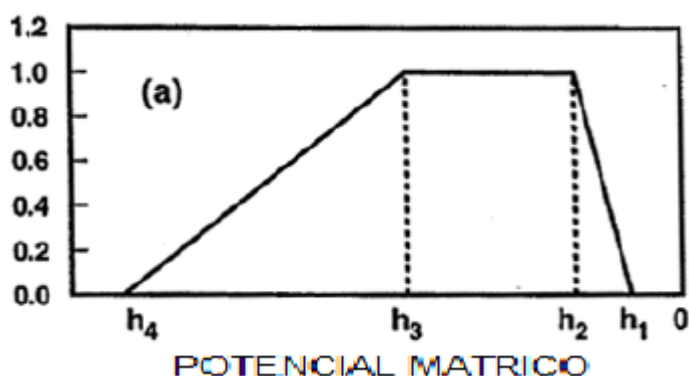


Figura 14. Función de reducción de extracción usado por Feddes et al (1978).

Los valores de potencial matricio cercanos a h_1 (condición cercana a saturación o anaerobiosis) y h_4 (punto de marchitez permanente) denotan estrés hídrico y una disminución en la extracción de agua por parte de la raíz, los valores donde la extracción es máxima y donde no ocurre estrés es entre los valores h_2 (valor de potencial debajo del cual se inicia la extracción potencial) y h_3 (valor límite debajo del cual la extracción decae). Para nuestro caso se escogieron los valores referentes al cultivo de tomate tomados del manual del programa hydrus 1D y se transformaron por medio de la ecuación del modelo de Van genuchten a valores de contenido de agua siendo h_1 , h_2 , h_3 y h_4 : 0.40, 0.38, 0.218 y 0.109 $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ respectivamente.

3.9 LAMINAS DE RIEGO EVALUADAS

Cuatro tratamientos de riego fueron implementados como se muestra en la tabla N° 9. Las láminas aplicadas fueron 40% del ETc, 60% del ETc, 80% ETc, 120% ETc .Se utilizó un sistema de riego por goteo con goteros auto compensados a un distanciamiento de 70 cm y 1.90 cm entre mangueras y con un caudal de 2.4 l/h.

Tabla 9.Laminas aplicadas.

Tratamientos	Lámina de Riego (Porcentaje de la ETc)	Lámina de Riego (mm/ha/campaña)
1	120	398.568
2	80	267.144
3	60	201.432
4	40	135.72

El cronograma de riego fue planeado para regar cada dos días, pero este se vio afectado debido a inconvenientes en la zona experimental, siendo el intervalo de dos a tres días. Se aplicaron riegos de 1 hora previos al trasplante para reducir el estrés, estos riegos no fueron considerados dentro de las láminas evaluadas. La ETc fue calculada multiplicando el valor de la evapotranspiración brindada por la estación Davis Vantage Pro 2 por el coeficiente del cultivo obtenido del boletín de la FAO 56.

3.10 DISEÑO EXPERIMENTAL

Se empleó un diseño cuadrado latino, con cuatro tratamientos y cuatro repeticiones. Las pruebas estadísticas realizadas fueron: Análisis de Variancia y la prueba de Tukey al 5 % para la comparación de medias entre tratamientos y los indicadores estadísticos de performance del modelo como la raíz cuadrada de la media del error al cuadrado (RMSE) , el error medio absoluto (MAE) y el error relativo medio (RME).Estos sirven para evaluar diferencias entre los datos simulados y medidos por el equipo TDR.

Cada unidad experimental tuvo catorce metros de largo por diez metros de ancho y un metro entre calles. Cada unidad experimental tuvo cinco líneas de riego. Asimismo, la distancia entre planta fue de 70 cm y entre línea fue de 1.9 m. Las características de las unidades experimentales empleadas en el presente trabajo se presentan en el Tabla N° 10.

Tabla 10. Características del área experimental utilizada

Área experimental de la parcela	
Número total de parcela	16
Número de líneas por unidad experimental	5
Largo de la unidad experimental	14.7 m
Ancho de la unidad experimental	9.5 m
Área total de la unidad experimental	139.65 m ²
Área experimental de los tratamiento	
Número de tratamientos	4
Número de parcelas por tratamiento	4
Área total de los tratamientos	558.6 m ²
Área experimental de los bloques	
Número de bloques	8
Número de tratamientos por bloque	4
Número de parcelas por bloque	4
Área total del bloque	558.6 m ²
ÁREA NETA EXPERIMENTAL	2234.4 m²

IV. RESULTADOS Y DISCUSION

4.1 PERFORMANCE DEL MODELO

Al analizar los datos se encontraron similitudes entre los contenidos de agua medidos y simulados (cuando los valores de RMSE y MAE son cercanos a cero). Se puede observar que las curvas del modelo siguen la misma tendencia que los datos observados para los cuatro tratamientos. Un mejor ajuste de estas curvas se encuentra para las profundidades de 10 y 20 cm, en comparación con las de 30 y 45 cm, donde las diferencias aumentan (Tabla N° 11). Esto puede deberse a variaciones en las propiedades físicas del suelo a estas profundidades, ocasionando que las curvas de humedad generadas por el modelo difieran de aquellas que provienen de los datos medidos con el equipo TDR. Otro factor que pudo contribuir a estas diferencias son errores en la medición por parte de las probetas lo cual se discutirá más adelante.

Valores cercanos a cero de RMSE y MAE (Tabla N° 11) representan un buen ajuste, los valores de RMSE y MAE que caracterizan las diferencias entre los datos simulados y medidos variaron de 0.02 a 0.05 cm^3/cm^3 y de 0.02 a 0.04 cm^3/cm^3 respectivamente. Estos resultados son muy similares a los reportados por Kandelous et al. (2011) en donde se encontró un rango de 0.026 a 0.087 cm^3/cm^3 de RMSE cuando se compararon los datos simulados y medidos de contenido de agua entre dos emisores donde el dominio utilizado para el experimento fue una geometría de simetría radial en dos dimensiones.

Tabla 11. Indicadores de evaluación de los datos simulados y medidos

	Goodness of fit	TREATMENTS			
		T1	T2	T3	T4
10 cm	RMSE ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$)	0.05	0.05	0.05	0.04
	MAE ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$)	0.04	0.04	0.04	0.03
	MRE (%)	15.30	16.61	16.15	13.39
20cm	RMSE ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$)	0.04	0.04	0.04	0.02
	MAE ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$)	0.03	0.03	0.03	0.02
	MRE %	11.59	12.02	11.57	8.9
30 cm	RMSE ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$)	0.04	0.04	0.03	0.05
	MAE ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$)	0.03	0.03	0.02	0.04
	MRE %	11.66	12.85	9.44	15.19
45 cm	RMSE ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$)	0.04	0.04	0.03	0.03
	MAE ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$)	0.03	0.03	0.03	0.03
	MRE (%)	10.98	17.2	9.08	10.82

Los valores MRE se usaron como una medida de precisión, los valores promedio para los tratamientos fueron: 13.62 % (T1), 16.17% (T2), 14.26% (T3), 18.29 % (T4), lo cual indica que el MRE fue menor al 20 % , esto significa que el modelo posee una precisión en más del 80 % .Este resultado concuerda con aquellos obtenidos por Li et al (2015) donde se reporta un MRE de menos del 20% para sus tratamientos en general y a todas las profundidades de medición. Los valores de MRE mayores a 15% pueden atribuirse además de lo anterior mencionado, a

errores de medición los cuales son comunes al momento de la instalación de las probetas. Según Carlsson (1988) la instalación de las probetas debe ser de una manera que se asegure un buen contacto entre el suelo y esta, lo cual puede ser un riesgo en suelos rocosos debido a que se puede formar aire alrededor de las varillas de la probeta. Bajo las condiciones del experimento realizado se observaron piedras a partir de los 20 cm, esto pudo haber afectado las lecturas de contenido de humedad.

Las comparaciones entre los datos de humedad medidos por el equipo TDR y los generados por el modelo para el periodo de 0 a 104 días para los cuatro tratamientos y a cuatro profundidades (10 ,20 ,30 y 45 cm), se muestran en las Fig. 15 ,16 ,17 y 18 mientras que en la Tabla N° 11 se muestra la evaluación estadística de los contenidos de agua observados y simulados.

Al observar las curvas de humedad se puede apreciar que el cambio del contenido de humedad de las capas superiores fue más drástico que en las zonas más profundas del perfil Fig. (15 ,16 ,17 y 18). Según Han et al. (2015) esto se debe a que la condición atmosférica afecta en mayor medida los primeros 20 cm lo cual hace que las amplitudes sean mayores en la superficie.

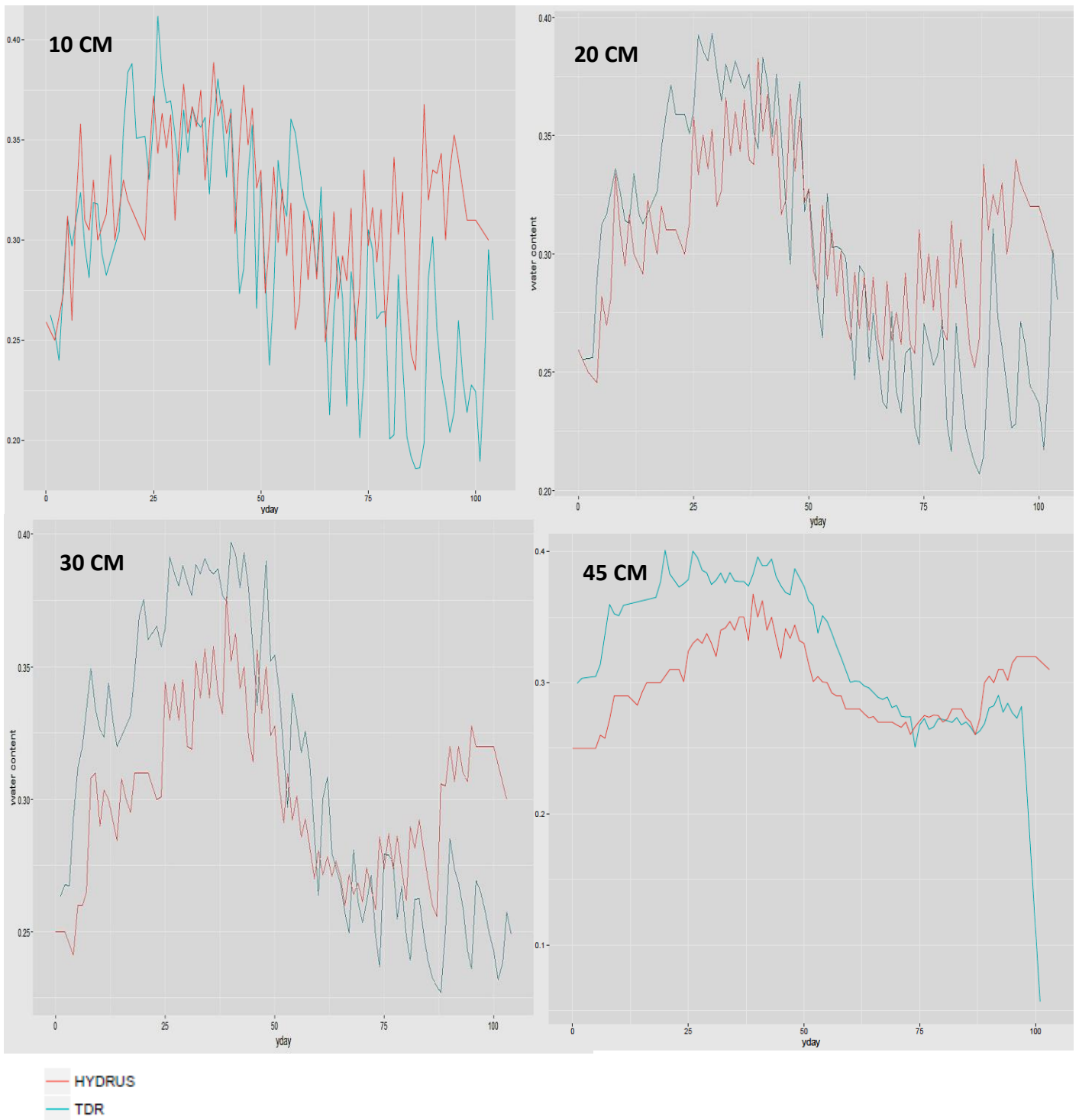


Figura 15. Comparación de curvas de humedad entre datos simulados y medidos para el 120 % de la ETc.

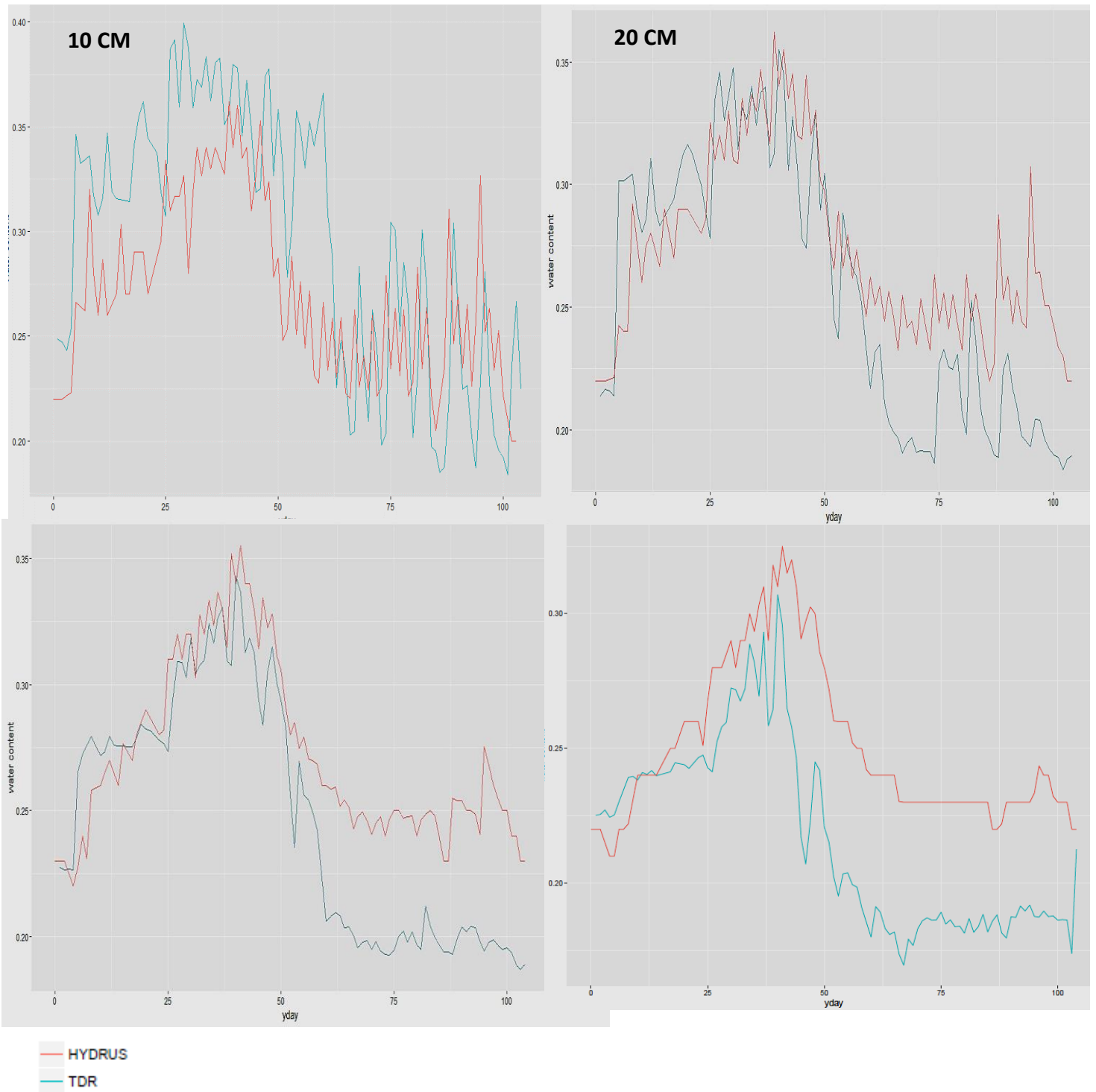


Figura 16. Comparación de curvas de humedad entre datos simulados y medidos del tratamiento de 80 % de la ETC.

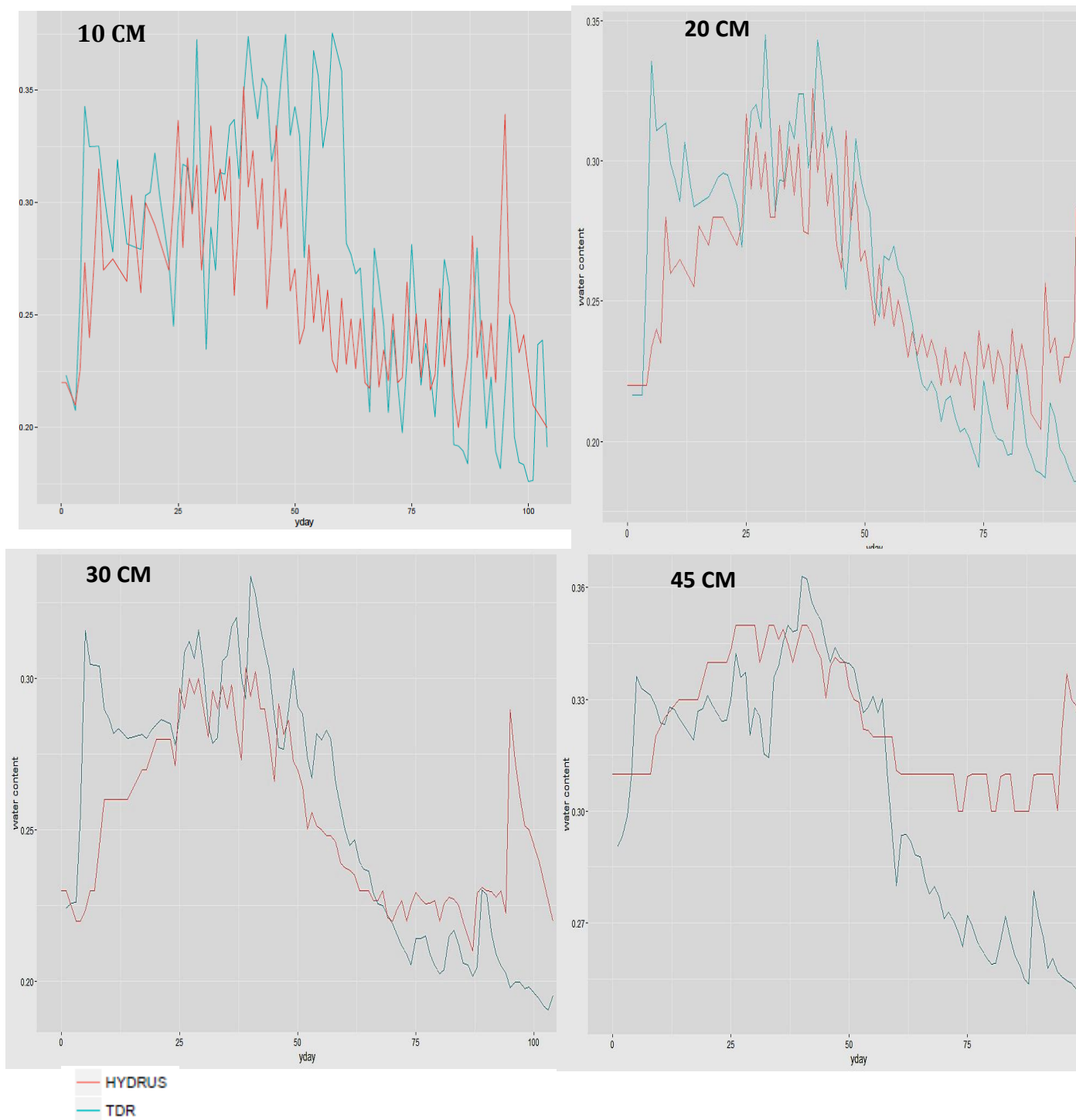


Figura 17. Comparación de curvas de humedad entre datos simulados y medidos del tratamiento de 60 % de la Etc.

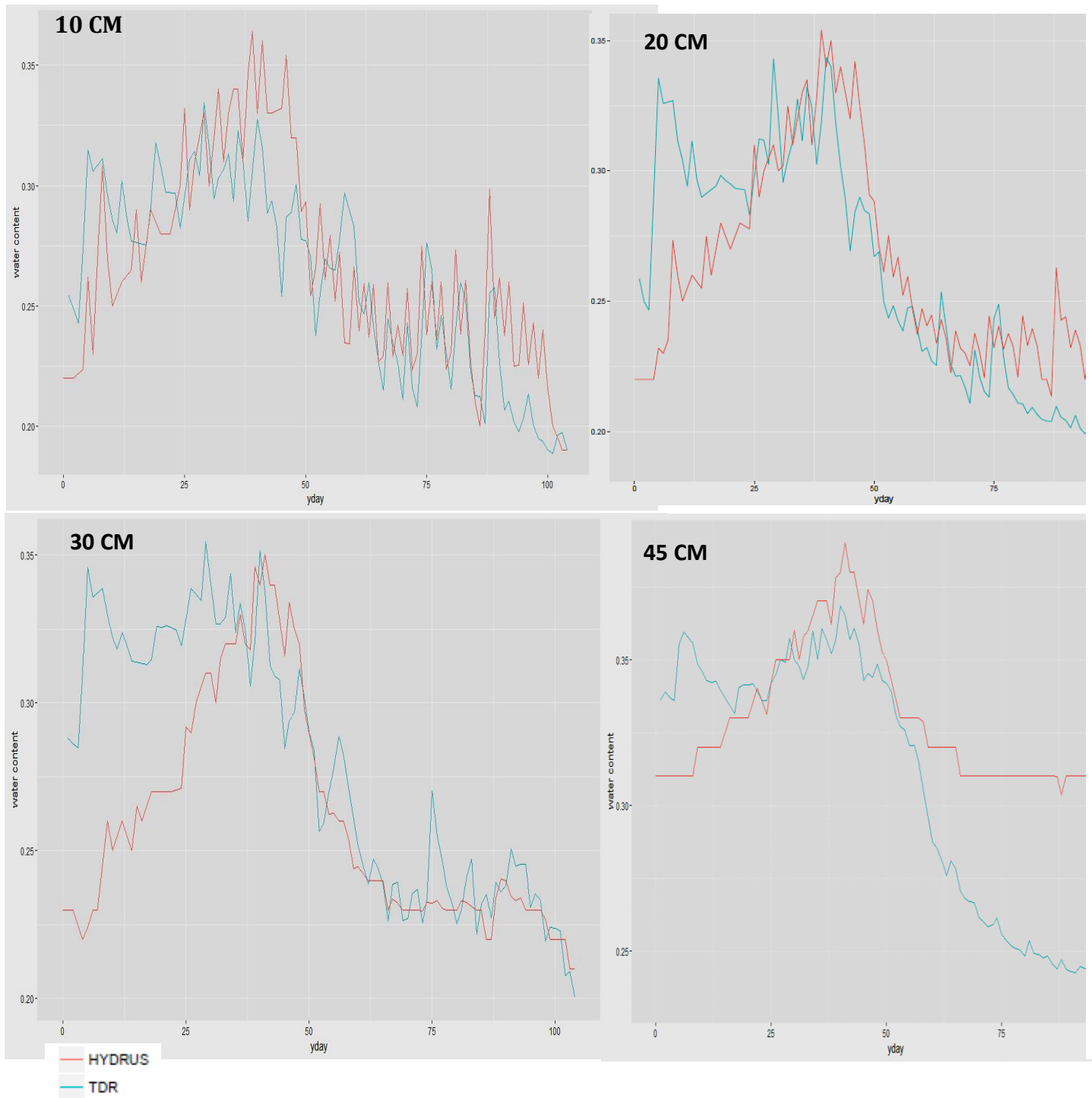


Figura 18. Comparación de curvas de humedad entre datos simulados y medidos del tratamiento de 40 % de la Etc.

4.2 RENDIMIENTO TOTAL Y DISTRIBUCIÓN DE AGUA

Los resultados sobre el efecto de los tratamientos en estudio para rendimiento y número de frutos se muestran en la Tabla 12. Se observa que tanto el rendimiento como el número de frutos se vio afectado por el volumen de agua aplicado, encontrándose diferencias significativas. Por medio del test de comparaciones múltiples de Tukey ($\alpha=0.05$) se observó diferencias entre las medias del tratamiento de 120% de la ET_c y los otros tres tratamientos (80%, 60%, 40%).

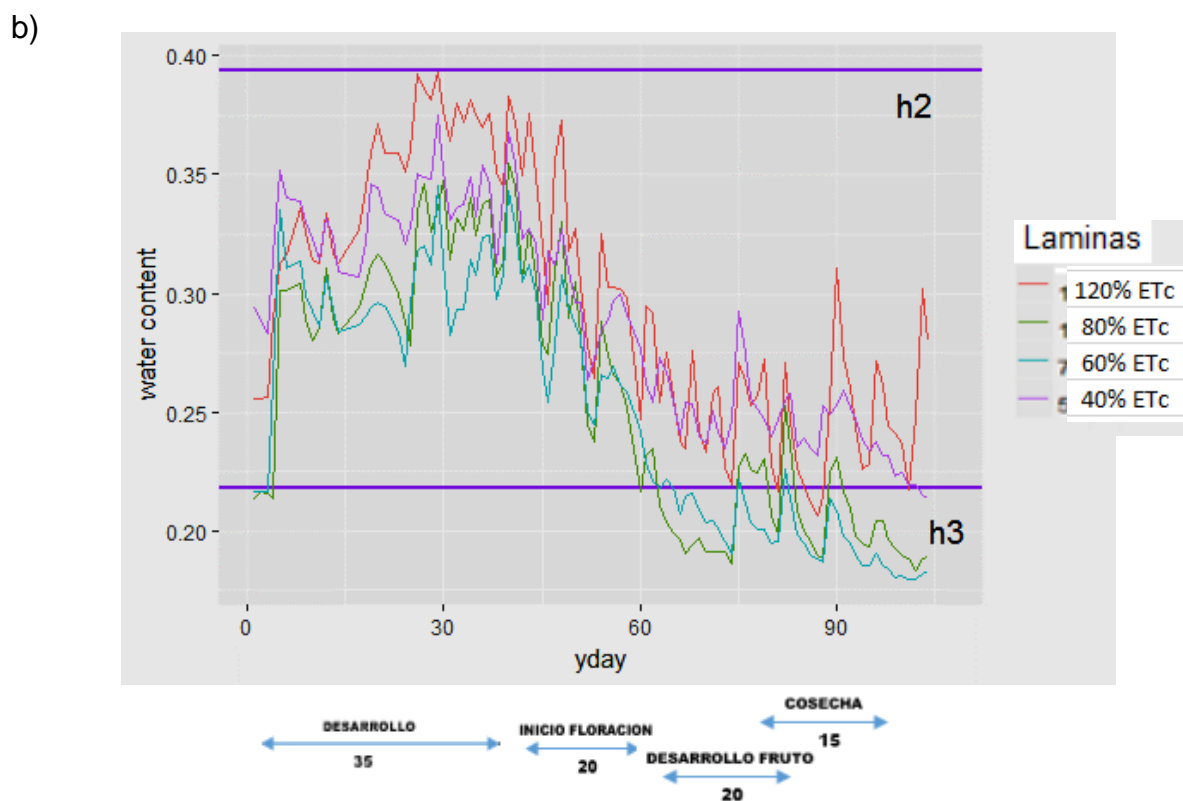
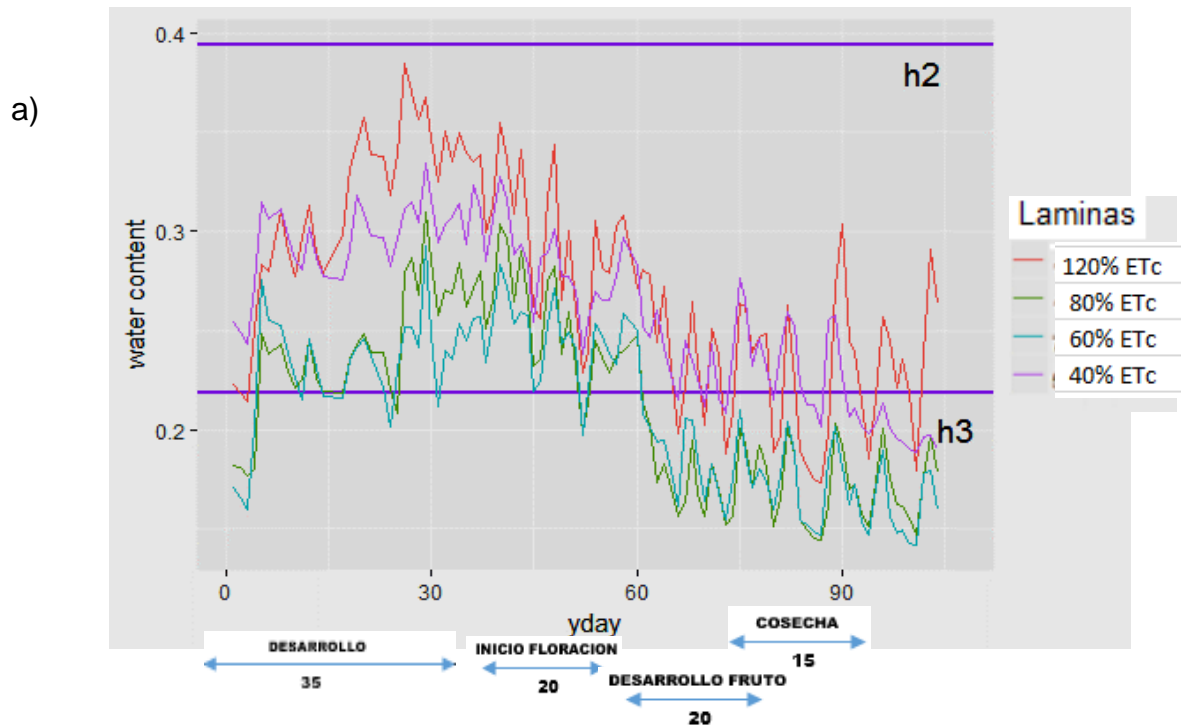
Tabla 12. Efecto de cuatro láminas de riego en el rendimiento (Tn/ha) y número de frutos producido en el cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum* L. cv. Katya).

Tratamiento	Rendimiento (Tn/ha)	Número de frutos (N°/ha)
120% de la ET_c	49.41 a*	647133 a*
80% de la ET_c	27.23 b	447578.2 b
60% de la ET_c	19.28 b	334079 b
40% de la ET_c	17.94 b	346510.7 b
ANVA	*	*
\bar{x}	28.47	443825.23
CV %	23.28	14.21

Al observar los rendimientos en cada uno de los tratamientos se encontró que el rendimiento disminuye conforme la lámina de riego, evidenciando una relación directa para las condiciones del experimento. Sin embargo, al analizar las curvas de distribución de humedad en el perfil y en conjunto con los estadios de crecimiento del cultivo se encontraron otros factores que muestran un contraste en esta relación lo cual será discutido más adelante.

Como se puede observar Fig. 19, durante los primeros 35 días después del trasplante (DDT), desde la etapa de desarrollo del cultivo hasta el término de inicio de floración el tratamiento de 120% de la ET_c estuvo dentro del rango de extracción potencial de humedad de Feddes (mostrado en la Fig.15) a 10, 20, 30

y 45 cm de profundidad del perfil. Esta condición pudo haber influido en el crecimiento de la raíz, lo cual ayudaría a explicar porque el desarrollo de su cobertura e índice de área foliar fue mayor que los otros tres tratamientos (80%, 60%, 40%) en las etapas posteriores como se discutirá más adelante.



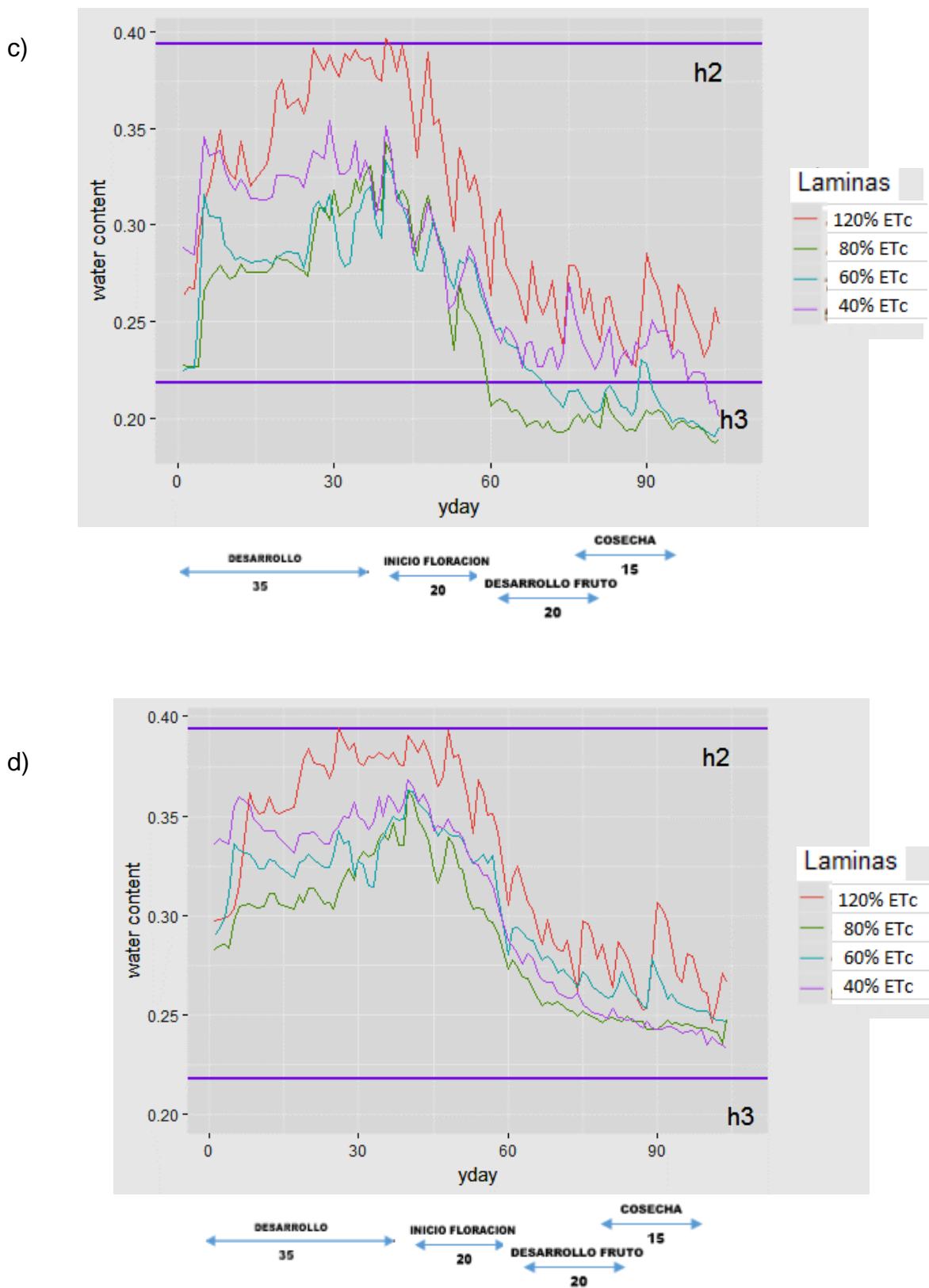


Figura 19. Comparación de curvas de humedad para las láminas evaluadas a 10 cm (a), 20 cm (b), 30 cm (c) y 45 cm (d).

Sin embargo durante la etapa de desarrollo del fruto hasta la cosecha se observó una disminución general en el contenido de humedad para todos los tratamientos llegando a valores de h_3 en algunos casos, este decrecimiento en el contenido de agua se debió principalmente a la gran demanda de agua que supone la etapa de desarrollo y crecimiento de los frutos así como también de la evapotranspiración. Al respecto Al-Harbi et al (2015) en su experimento “ Influencia del déficit de riego y salinidad en el crecimiento, rendimiento y eficiencia en el uso de agua en diferentes etapas de desarrollo en el cultivo de tomate “ , reporta que en su tratamiento numero 4 donde se aplicó el 75 % de la ETc a la etapa de fructificación y el 100% al resto de las etapas de crecimiento , posee uno de los valores más altos de rendimiento siendo 110.86 t.ha⁻¹en comparación con sus demás tratamientos. Esto quiere decir que la disminución del contenido de humedad en el tratamiento de 120% ETc en la etapa de fructificación no fue perjudicial para el rendimiento final además porque el contenido de agua a partir de los 20 , 30 y 45 cm de profundidad se mantuvo dentro del rango de extracción potencial lo que le permitió a la raíz extraer sin problemas el agua y los nutrientes aplicados.

Al analizar la distribución de las curvas de 80 %ETc Y 60 % ETc se encontró de forma general que ambos estuvieron dentro del rango de extracción potencial de Feddes durante los primeros 60 días DDT desde la etapa de desarrollo vegetativo hasta el inicio de la etapa de desarrollo del fruto. Se observa también un incremento en el contenido de humedad a medida que aumenta la profundidad , sin embargo es importante observar que dentro de los 60 DDT después del trasplante , el contenido de humedad a 10 cm llegó a valores cercanos e incluso mayores a h_3 en los primeros 30 días . Luego se puede observar que para las siguientes etapas que corresponden a desarrollo del fruto y cosecha, las curvas de humedad a 20 y 30 cm estuvieron muy por debajo de los valores de h_3 , disminuyendo así la extracción potencial de las raíces. Según Stephun y Raney (2005) el proceso de crecimiento radicular se ve afectado cuando existe condiciones de estrés hídrico lo que conlleva a una menor productividad de las plantas. Levin et al (1979) nos dice que las plantas de tomate que crecen bajo condiciones de estrés hídrico, exhiben por lo general un menor tamaño de la raíz debido a que existe una relación directa entre su tamaño y la cantidad de agua que reciben.

Se encontró además que la reducción de la lámina entre los tratamientos de 80 y 60 % de la ETc, ocasiono una reducción importante del 30 % en el rendimiento con respecto al tratamiento de 80% ETc , resultados similares los presenta Al-Harbi et al (2015), en donde el tratamiento de 60% de la ETc aplicado a todas las etapas , resulto en una reducción del rendimiento de 15 % con respecto al tratamiento de 80% de la ETc.

Al analizar las curvas de humedad del tratamiento de 40 % de la ETc ,se puede observar que el contenido promedio de humedad para todas las profundidades fueron mayores que los tratamientos de 80 y 60 % de la ETc , esto se debió a que las gráficas de humedad de las repeticiones del tratamiento de 40 % de la ETc mostraron valores muy altos de humedad en algunos casos llegando a ser iguales a los del tratamiento de 120% de la ETc esto ocasiono un incremento en el promedio de contenido de humedad, este fenómeno pudo deberse a propiedades físicas de suelo diferentes que le otorgaron mayor capacidad de retención de humedad aunque no se descarta también errores de medición por parte del equipo TDR los cuales son inevitables.

Cuando se analizaron las repeticiones las cuales se encuentran en el anexo N° 1 se encontró que durante la etapa de desarrollo vegetativo las plantas de tomate estuvieron expuestas a un estrés hídrico lo cual pudo haber afectado el crecimiento de la raíz.

Luego se observa que a los 20 y 30 cm desde la etapa de desarrollo de fruto hasta cosecha, la humedad disminuyó y estuvo fuera del rango de extracción potencial. Se observó también que el reducir la lámina de 120 a 40 % de la ETc resulto en una reducción del 34 % del rendimiento en comparación con el tratamiento de 80% de la ETc. Resultados similares los encontró Fortes et al.(2006) donde los tratamientos que obtuvieron una menor producción de tomate respecto al tratamiento control de 100 % de la ETc fueron al aplicar el 50 y 25 % de la ETc en floración, lo que llevo a concluir que las etapas más sensibles de tomate para industria son desde la floración hasta cuajado. Witcombe et al. (2008) nos dice que las etapas más sensibles al déficit hídrico son las comprendidas entre el establecimiento de la planta, inmediatamente después del trasplante, floración y

desarrollo del fruto. El estrés hídrico en estas etapas del cultivo resulta en cambios morfológicos y fisiológicos los cuales afectan el rendimiento del cultivo. Blum (2009) nos dice que el déficit hídrico en el cultivo de tomate conlleva a una disminución en el porcentaje de fructificación, peso fresco y seco de la planta, número de flores y frutos, esto último concuerda con los resultados obtenidos en la tabla N° 13, donde el tratamiento de lámina de riego con 120% de la ETc obtuvo mayor número de flores por planta con respecto a los tratamientos de 80%, 60% y 40% de la ETc. Entre los tratamientos de 60% y 40% no se encontró ninguna diferencia significativa en la producción de flores.

Tabla 13. Efecto de cuatro láminas de riego en el número de flores en plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* L. cv. Katya).

Tratamiento	Número de flores por planta¹
120 % de la ETc	28.5 a*
80% de la ETc	25.0 b
60% de la ETc	18.8 c
40% de la ETc	16.3 c
ANVA	*
\bar{x}	22.15
CV %	5.21

4.3 ÁREA FOLIAR Y COBERTURA

La tabla N° 14 muestra que el tratamiento con 120% de la ETc obtuvo diferencias significativa con respecto a los demás tratamientos en la producción de área foliar, en cambio en los demás tratamientos (80%, 60% y 40% de la ETc) no se encontró ninguna diferencia significativa.

Tabla 14.Efecto de cuatro láminas de riego en el área foliar (m²) en tomate (*Solanum lycopersicum L. cv. Katya*).

Tratamiento	Promedio de área foliar (m²)
120% de la ETc	6.59 a*
80% de la ETc	2.96 b
60% de la ETc	2.75 b
40% de la ETc	1.36 b
ANVA	*
\bar{x}	3.42
CV %	29.96

La figura 20 muestra los valores del IAF (índice de área foliar) a través del tiempo. Se puede observar una marcada diferencia entre el tratamiento de 120 % de la ETc y los demás después de 40 DDT y a los 80 DDT donde se alcanzan los valores máximos de IAF. Estos valores reflejan claramente como la lámina aplicada influye en la formación de follaje siendo mayor cuando se aumenta la lámina , sin embargo en la literatura consultada se encontró además que el crecimiento de follaje tiene una estrecha relación con el crecimiento de la raíz de tomate , según los resultados de Saleh et al (2007) usando el cultivar First Power , el estrés hídrico ocasiona que el crecimiento de los brotes de tomate se vea reducido antes que el crecimiento de la raíz ocasionando que el ratio raíz-brote sea mayor , además reporta que este fenómeno se debe porque la traslocación de carbohidratos desde la raíz hacia la parte aérea se ve interrumpida por el estrés lo que ocasiona un crecimiento prioritario de la raíz en busca de humedad. En nuestro caso se observó que el tratamiento de 120% de la ETc obtuvo un área foliar promedio de 6.59 m² siendo esta la más alta de todos los tratamientos, esto genero una cobertura del 70 % tal como se observa en la figura 21 , haciendo que la perdida de agua por evaporación sea menor además favoreció el incremento de la fotosíntesis influyendo

positivamente en el rendimiento mientras que los tratamiento de 80, 60 y 40 % de la ETc obtuvieron áreas foliares pequeñas que variaron de 1.36 a 2.96 m².

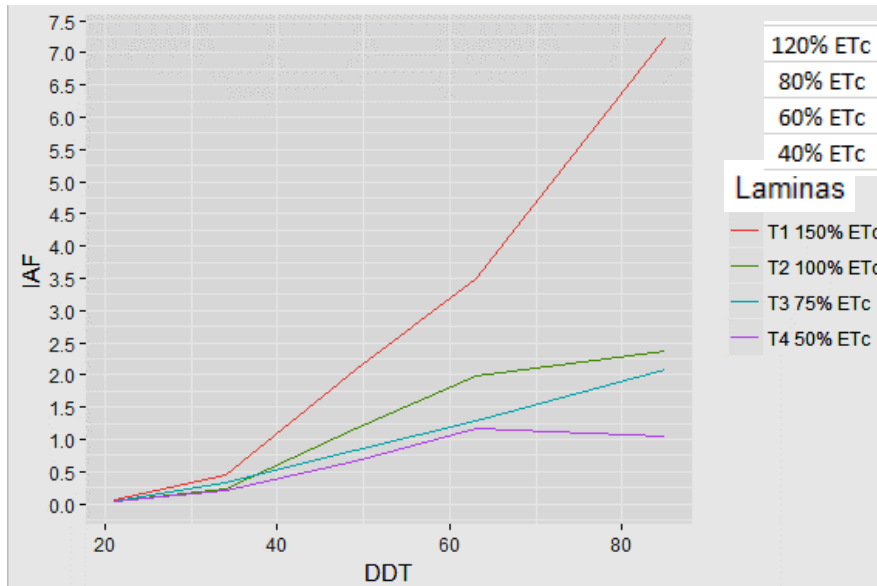


Figura 20. Índice de área foliar (IAF) en relación a las diferentes láminas de riego aplicadas.

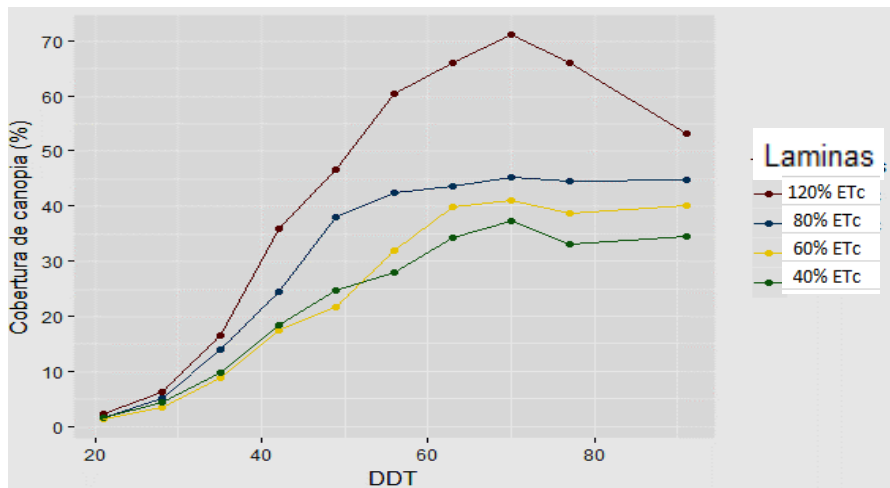


Figura 21. Porcentaje de cobertura en relación a las diferentes láminas de riego aplicadas.

Esto resulto en coberturas que variaron de 32 a 43 % , esto afecto negativamente la capacidad fotosintética de las plantas de tomate , favoreciendo además una perdida mayor de humedad por evaporación y ocasionando una disminución en el rendimiento. Según Florido y Bao (2014) , cuando el déficit hídrico se desarrolla lentamente, se dan cambios en los procesos de desarrollo que afectan el crecimiento como por ejemplo la limitación de la expansión foliar es uno de los procesos más afectados en estas condiciones , pues de ella depende la fotosíntesis ,a su vez nos menciona que otro proceso que se modifica es el crecimiento radicular y que la planta necesita un sistema radical con una arquitectura (densidad, tamaño, proliferación) que responda a la demanda de agua de los órganos aéreos.

4.4 DISTRIBUCIÓN DE LOS PATRONES DE HUMEDAD ENTRE DOS GOTEROS

Además de poder comparar curvas de humedad medidos por el equipo TDR y la simuladas por el programa HYDRUS 2D/3D, el software nos permite también observar cómo se distribuye el agua en el perfil del suelo de forma visual en dos dimensiones. Esta característica es importante porque en base a diferentes parámetros que utilicemos para las simulaciones podemos crear diferentes escenarios de humedad en el perfil del suelo para luego identificar y analizar que zonas del perfil son las que más nos interesan que estén regadas y así poder tomar decisiones acerca del manejo del agua de riego.

La distribuciones de humedad en dos dimensiones entre dos goteros a 70 cm de distanciamiento por tratamiento que se muestran en las figuras 22, 23, 24 y 25 fueron analizadas para evaluar el movimiento de agua en el perfil del suelo a los 5, 25 ,50 y 70 días julianos. Los patrones de humedad formados durante la aplicación de las láminas de riego se clasifican en tres zonas: una zona saturada que se encuentra cerca del emisor (contenido de agua de $0.4 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$) , una zona de bajo contenido de humedad entre goteros (contenido de agua entre 0.196 y $0.26 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$) y otra donde el contenido de humedad es estable debido a la presencia de una capa dura. Los distribución espacial que se observa se debe a la cantidad de agua aplicada , evapotranspiración y propiedades del suelo. Los radios

de los patrones de humedad cambian de forma dinámica y decrecen conforme disminuye la lámina de riego.

Para el tratamiento de 120% de la ET_c , en el día 5 se observa que el bulbo de humedad de los goteros se extiende hasta los primeros 30 cm verticalmente y 20 cm horizontalmente, además se observa que la zona entre goteros exhibe un valor de humedad de $0.26 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ la cual hace de esta una zona de no estrés al no llegar al valor de $h_3 = 0.218 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$. En los días posteriores se observa que los bulbos de humedad crecen notoriamente hasta que sus patrones de humedad comienzan a interactuar entre sí. En el día 70 no hubo evento de riego observándose bajos contenidos de humedad en las capas superiores debido a la influencia de la evapotranspiración sin embargo la humedad se mantiene en valores de $0.26 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ hasta los 30 cm. En general se ve que el perfil de humedad para este tratamiento estuvo libre de estrés hídrico lo que resultó en un buen rendimiento.

Se puede observar que para el día 5, los tratamientos de 80, 60 y 40 % de la ET_c muestran que la zona de estrés entre goteros aumenta gradualmente siendo la de 80 y 60 % de la ET_c muy similares con valores de 0.18 y $0.21 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ y con bulbos de humedad ligeramente menores a 20 cm de forma horizontal y vertical por otro lado el tratamiento de 40 % de la ET_c muestra un valor de $0.193 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ siendo el valor más bajo de contenido de humedad entre goteros, también se puede apreciar que los bulbos de humedad miden vertical y horizontalmente 30 y 20 cm pero con contenidos de humedad cercanos al valor $0.218 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ bajo el cual las raíces no extraen de forma eficiente el agua del suelo generando estrés y afectando su crecimiento.

Posteriormente para los días 25 y 50 se observa el mismo fenómeno anteriormente descrito para todos los tratamientos siendo el área de estrés gradualmente mayor conforme disminuye la lámina de riego, resultando en una limitación de crecimiento y posteriormente en una disminución en el rendimiento total. Según lo que reporta Li et al (2015) a medida que la zona de estrés hídrico aumenta en área mayor influencia tiene en el crecimiento del cultivo de tomate.

Se puede observar también el efecto sobre el contenido de humedad al tener una capa dura o hardpan a 45 cm de profundidad la cual eleva los contenidos de

humedad llevándolo incluso a valores cercanos de capacidad de campo a partir de 30 cm , un efecto parecido fue reportado por Han et. al. (2015) donde al realizar sus simulaciones encontró que se mantenía un nivel de humedad en el perfil de suelo de $0.34 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ a partir de los 60 cm.

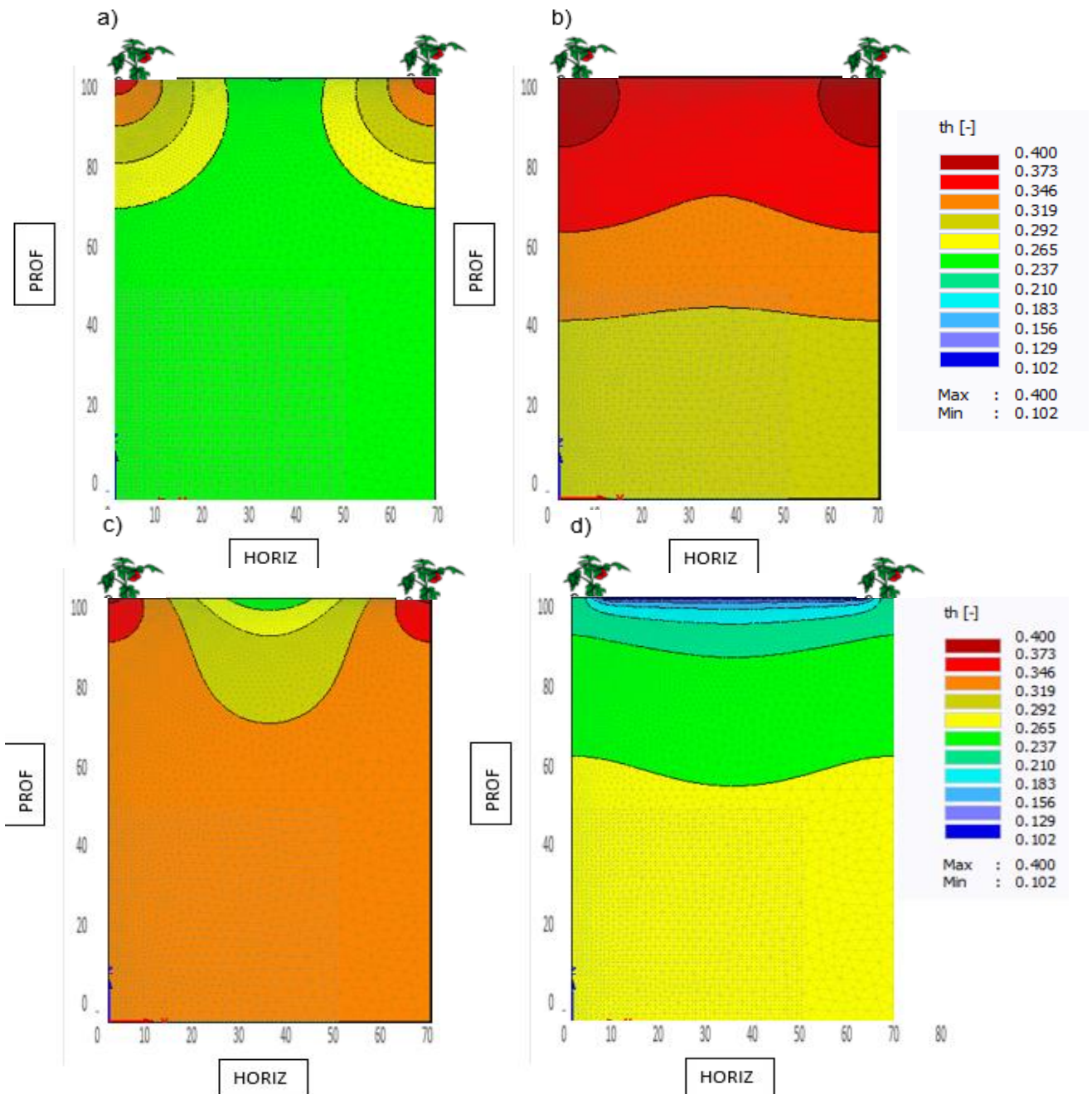


Figura 22. Distribución del agua a los 5 (a), 25 (b) ,50 (c) y 70 (c) días julianos Tratamiento del 120% de la ETc

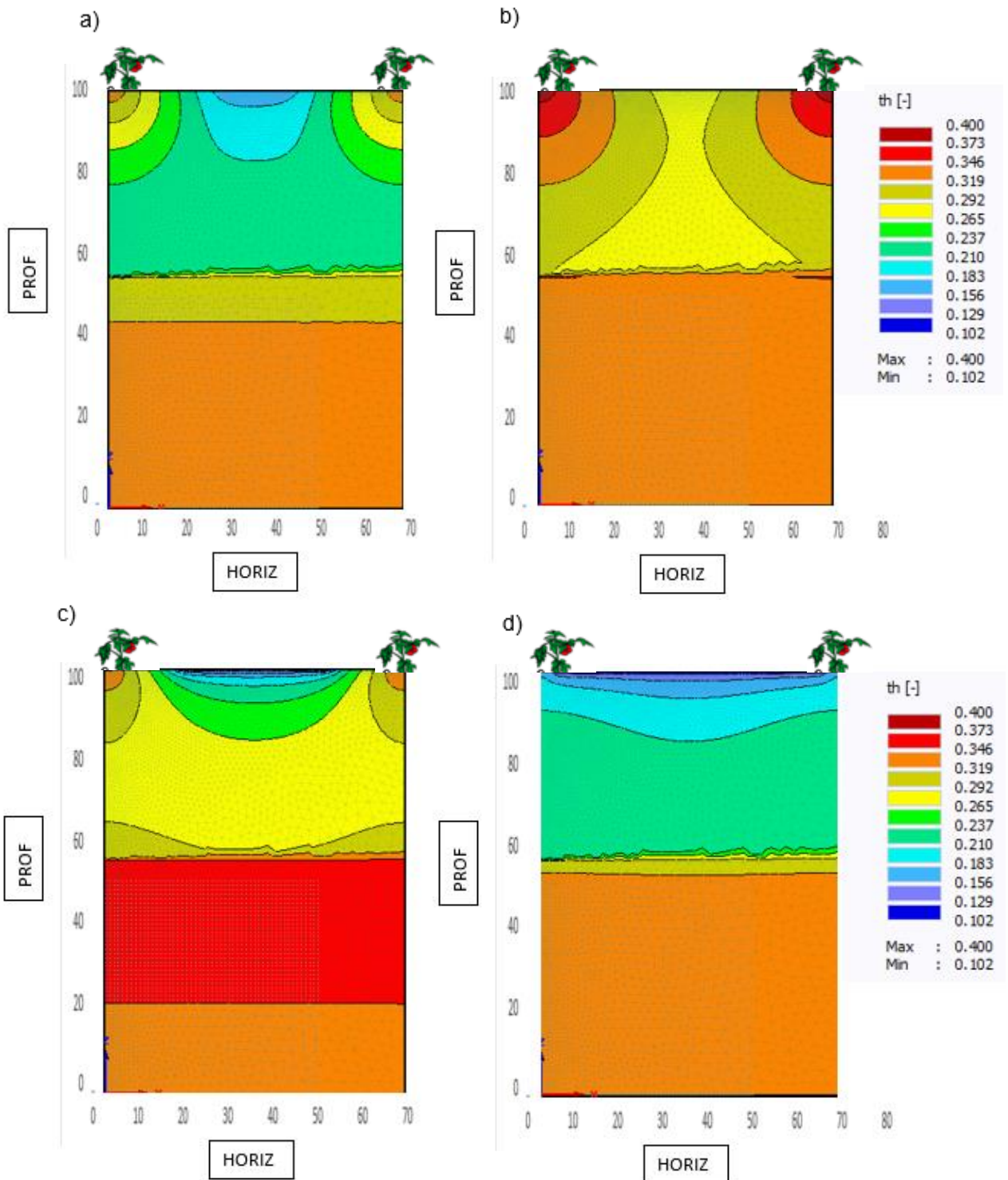


Figura 23. Distribución del agua a los 5 (a), 25 (b) ,50 (c) y 70 (c) días julianos Tratamiento del 80% de la ETc.

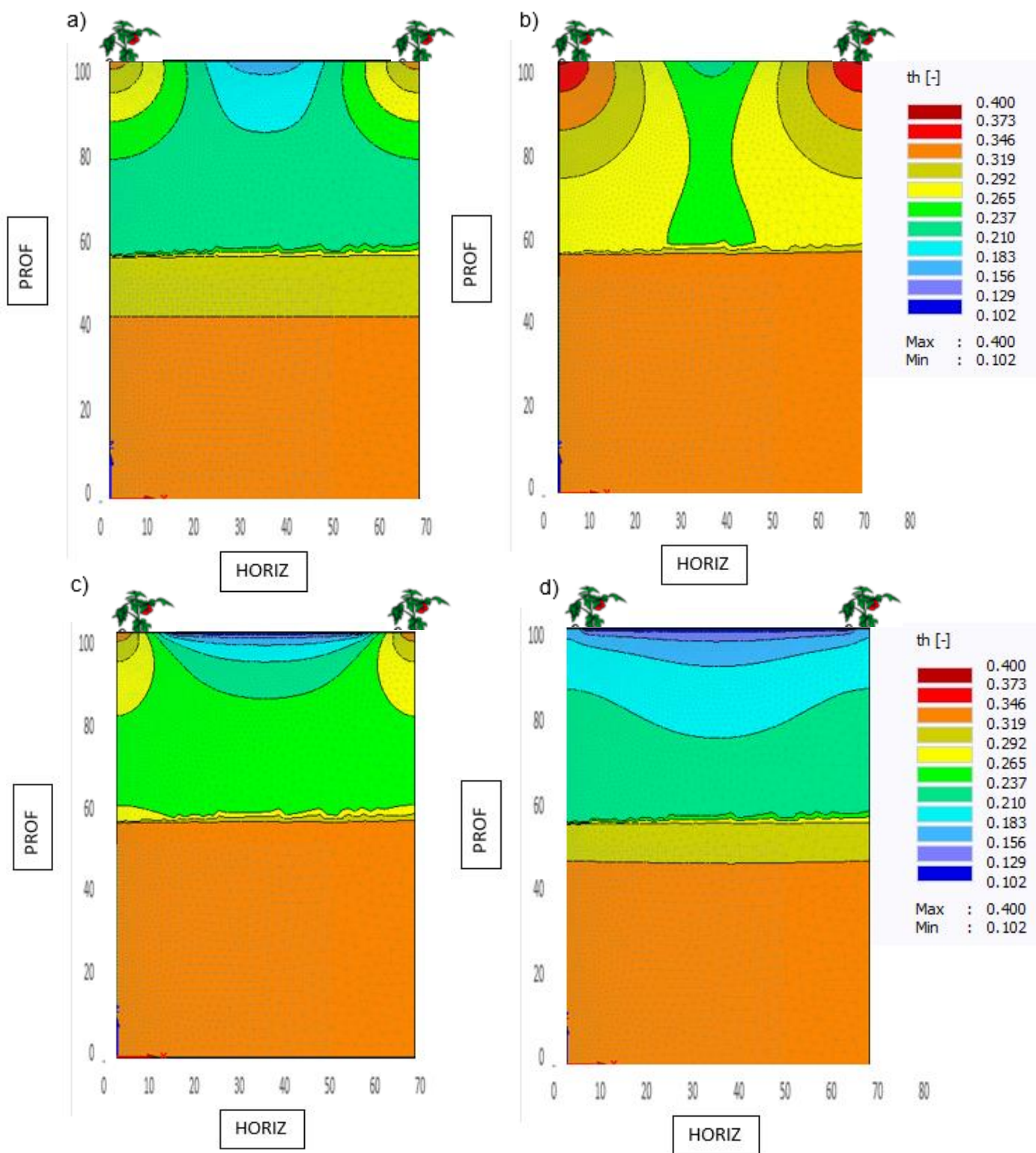


Figura 24. Distribución del agua a los 5 (a), 25 (b) ,50 (c) y 70 (c) días julianos Tratamiento del 60% de la ETc.

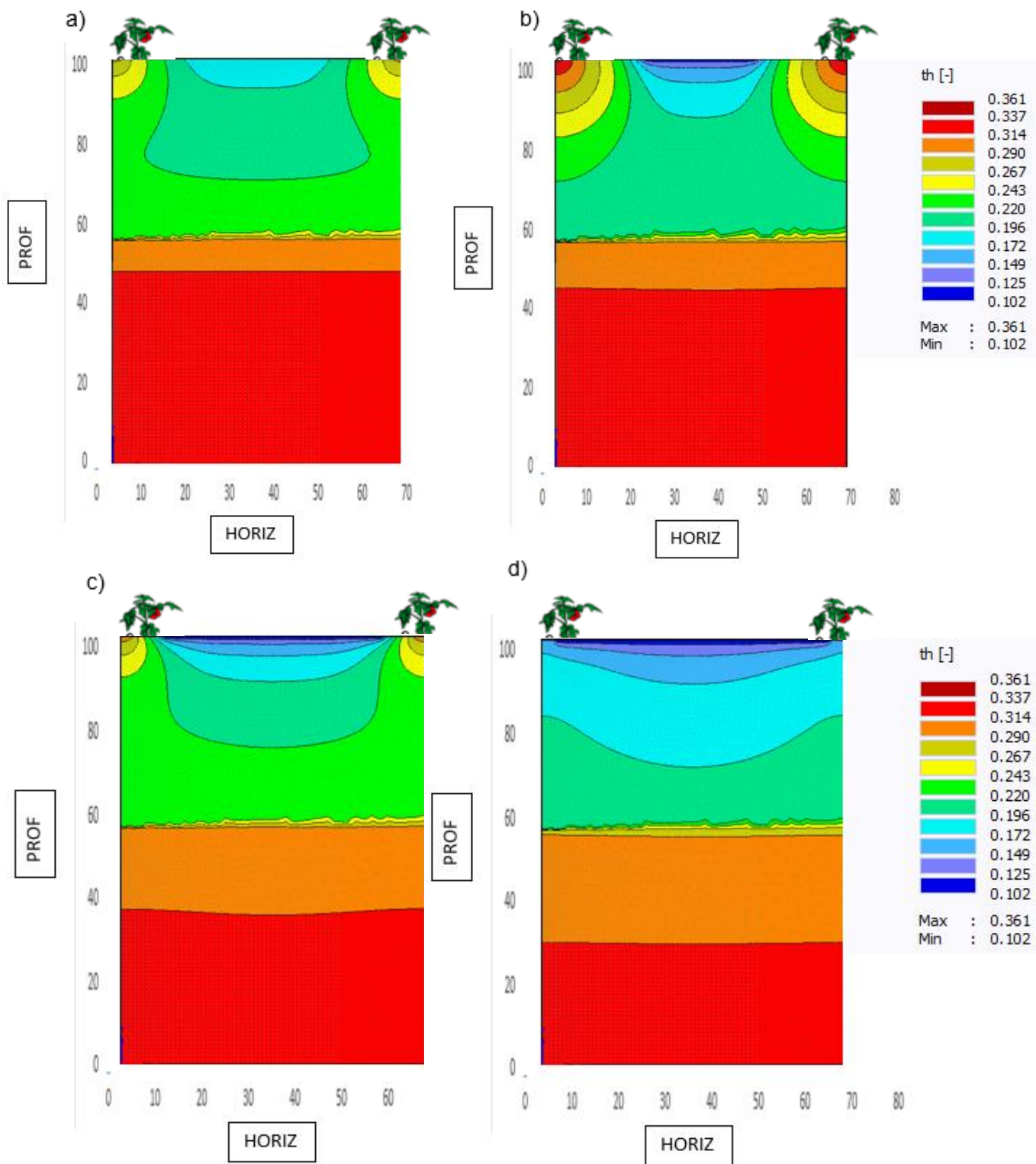


Figura 25. Distribución del agua a los 5 (a), 25 (b) ,50 (c) y 70 (c) días julianos Tratamiento del 40% de la ETc.

V CONCLUSIONES

Bajo las condiciones en que se llevaron a cabo este ensayo se puede concluir lo siguiente:

1. Se concluye que los datos de contenido de agua simulados y medidos son similares en más del 80 % ya que el modelo del programa HYDRUS 2D/3D obtuvo valores cercanos a los datos medidos por el equipo TDR a cuatro profundidades diferentes y con diferentes láminas de riego. Los indicadores de precisión y performance nos mostraron que los valores de MRE fueron menores al 20 % y que los valores de RMSE y MAE variaron de 0.03 a 0.0 $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ y de 0.02 a 0.05 $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ respectivamente.
2. La curvas de humedad del tratamiento de 120% de la ETc que estuvieron entre los valores h2 y h3 indica que las plantas de tomate no sufrieron estrés además una disminución del contenido de humedad a partir del día 60 no afecto de forma negativa el número de flores , frutos y el rendimiento final siendo un 81 % mayor que el tratamiento de 80% de la ETc.
3. Las curvas de humedad a 10 cm de los tratamientos 80 y 60 % de la ETc estuvieron cerca del valor h3 durante los primeros 30 días y posteriormente en las etapas de fructificación y cosecha estuvieron por debajo del mismo a 30 cm de profundidad, esto afecto el número de flores , frutos y el rendimiento final siendo un 30 % menor al disminuir la lámina de 80 a 60 % de la ETc.
4. Las curvas de humedad de las repeticiones del tratamiento de 40 % de la ETc , estuvieron fuera del rango de extracción potencial lo que ocasiono un estrés hídrico durante la etapa de desarrollo vegetativo, posteriormente a 20 y 30 cm en las etapas de desarrollo del fruto y cosecha ,el contenido de humedad estuvo debajo del valor h3. Esto afecto el número de flores , frutos y el rendimiento final siendo un 34 % menor al disminuir la lámina de 80 a 40 % de la ETc.

5. Los tratamientos con diferentes láminas de riego influyeron significativamente en el área foliar producida por la planta de tomate. La planta con el tratamiento de riego con 120% de la ETc produjo mayor área foliar que los demás tratamientos. El área foliar fue disminuyendo a menor lámina de riego aplicada. Por lo que encontramos una relación directa.
6. Los tratamientos con diferentes láminas de riego influyeron en la cobertura producida por la planta de tomate. La planta con el tratamiento de riego con 120% de la ETc produjo una cobertura del 70 % mientras que en los demás tratamientos esta vario de 32 a 43 % . La cobertura fue disminuyendo a menor lámina de riego aplicada. Por lo que encontramos una relación directa.
7. El análisis de la distribución de humedad entre dos goteros a 70 cm revelo que la distribución de agua se ve afectada por la cantidad de agua aplicada, evapotranspiración y propiedades del suelo. Además se identificaron zonas de estrés hídrico entre los goteros, las cuales aumentaron conforme la disminución de la lámina de riego. Para el caso del tratamiento de 120% de la ETc se encontró que su distribución de humedad es la más adecuada para que la planta de tomate no sufra estrés hídrico y obtenga un buen rendimiento.
8. Las láminas de riego evaluadas influyeron significativamente en el rendimiento del tomate. La lámina de riego con 120% de la ETc mostró el mayor rendimiento (49.41 tn/ha) a diferencia de los tratamientos con 80% de la ETc (27.23 tn/ha), 60% de la ETc (19.28 tn/ha) y 40% de la ETc (17.94 tn/ha).

VI RECOMENDACIONES

1. Se recomienda que simulación numérica de HYDRUS 2D/3D sea utilizada como una herramienta para la investigación de la dinámica de agua en el suelo y además para crear diferentes escenarios de humedad en el perfil del suelo para luego identificar y analizar qué zonas del perfil son las que más nos interesan que estén regadas y así poder tomar decisiones acerca del manejo del agua de riego.
2. Se recomienda analizar las láminas de riego aplicadas al experimento usando un modelo en tres dimensiones o simétricamente radial debido a que explicaría mejor la dinámica del agua en el suelo. y con valores de RMSE, MRE Y MAE más bajos, lo cual hace que los datos simulados se acerquen más a la realidad.
3. Se recomienda realizar un modelo validado para el cultivo de tomate cultivar Katya en las condiciones de Cañete para evaluar de forma rápida diferentes técnicas de manejo del agua de riego.

VII BIBLIOGRAFIA

- ABOU LILA TS, BERNDTSSON R, PERSSON M, SOMAIDA M, EI-KIKI M, HAMED Y, MIRDAN A (2013) Numerical evaluation of subsurface trickle irrigation with brackish water. *Irrig Sci* 31:1125–1137
- AGUILERA, C. Y R. MARTÍNEZ E. 1996. Relaciones Agua, Suelo, Planta, Atmósfera. 4a ed. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.
- ANTÓN, A. 2002. El control del clima en los cultivos intensivos: del parral a los invernaderos modernos. Fórum Internacional de Tecnología Hortícola. (FITECH VI). Almería, España.
- AL-HARBI ABDULAZIZ R., ABDULRASOUL M. AL-OMRAN, MEKHLED M. ALENAZI AND MAHMOUD A. WAHB-ALLAH. Salinity and Deficit Irrigation Influence Tomato Growth, Yield and Water Use Efficiency at Different Developmental Stages *Int. J. Agric. Biol.*, 17: 241_250
- ALVES, I. L. 1995. Modelling crop evapotranspiration. Canopy and aerodynamic resistances. Ph.D. Dissertation, ISA, Univ. Tec. Lisboa.
- ALLEN, R.G., L.S. PEREIRA, D. RAES, M. SMITH. 1998. Crop Evapotranspiration Guidelines for Computing Crop Water Requirements, FAO Irrigation and drainage paper 56. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations. ISBN 92-5-104219-5.
- ASSOULINE S, MÖLLER M, COHEN S, BEN-HUR M, GRAVA A, NARKIS K, SIBER A (2006) Soil-plant system response to pulsed drip irrigation and salinity: Bell pepper case study. *Soil Sci Soc Am J* 70:1556–1568

- BALANCE HIDRICO, 2005. Disponible en: <http://www.filo.uba.ar/contenidos/carreras/geografia/catedras/climatologia/sitio/bcehidrico.pdf>).
- BASTIAANSEN, W.G.M. 1995. Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain. Doctoral thesis, Wageningen Agricultural University, Wageningen, Países Bajos, 273 pp.
- BENAMI A, OFEN A. 1995. Irrigation engineering, Haifa, Agripro-Agricultural Projects: 257 p.
- BLUM, A. Effective use of water (EUW) and not water-use efficiency (WUE) is the target of crop yield improvement under drought stress. *Field Crops Res.*, 2009, vol. 112, pp. 119-123.
- BOLAÑO, E. 1997. Determinación de los niveles de daño económico de *Bemisia tabaci* en tomate en el norte de Cesar, Colombia. *Manejo Integrado de plagas. Costa Rica.* 46: 26-33
- BROWN, J., FROHLICH, D. AND ROSELL, R. 1995. The sweetpotato or silverleaf whiteflies: Biotypes of *Bemisia tabaci* or species complex. *Ann. Rev. Entomol.* 40: 511-534.
- CARLSSON. M. Sources of Errors in Time Domain Reflectometry Measurements of Soil Moisture. Swedish University of Agricultural Sciences Department of Soil Sciences Division of Agricultural Hydrotechnics, 1998, 28 p.
- CASAS, A. 1979. Inter-relación entre control de malezas y fertilización en el cultivo de tomate. Tesis para optar el título de ingeniero agrónomo. Universidad nacional agraria la molina. Lima, Perú. 106 p.

- CASTAGNINO, A. 2008. Manual de Cultivos Hortícolas innovadores. 1ra Edición. Editorial Hemisferio Sur S.A. Buenos Aires, Argentina. 356 p.
- CÁSSERES, E. 1980. Producción de hortalizas. Instituto Interamericano de ciencias Agrícolas. San José - Costa Rica.47 p.
- CALLEJA R., P. 2009. El Tomate Terapéutico. En: [www.infoagro.com/noticias /2009/3/5562](http://www.infoagro.com/noticias/2009/3/5562). Consultado noviembre 2016.
- DASBERG S., OR D. 1999. Drip irrigation. Berlin, Springer Verlag: 162 p
- DIAZ, F. Y TERNERO, L. 1998. Plagas insectiles en cultivos comerciales y experimentales de tomate en la costa norte durante el periodo 1992-1998. XI Convención Nacional de Entomología Resúmenes. Lima, Perú. 83 p.
- DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL SCIENCES UNIVERSITY OF CALIFORNIA RIVERSIDE RIVERSIDE, CALIFORNIA , 2013 The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media.
- DOMENICO P.A y F.W. SCHWARTZ. Physical and chemical hydrogeology. Jhon Wiley and Sons, inc. New York (1998)., 506 pp.
- ECHEGARAY, J. 2000. Epidemiología y manejo de enfermedades virales del tabaco en Perú. Monografía para optar el título de ingeniero agrónomo. Universidad nacional agraria la molina. Lima, Perú. 29 p.
- FAO. Irrigation and Drainage Paper. 1977. Crop Evapotranspiration. USA. 326 p.
- FERNÁNDEZ MA D., F. ORGAZ, E. FERERES, J. C. LÓPEZ A. CÉSPEDES, J. PÉREZ, S. BONACHELA, M. GALLARDO. 2006. Programación del Riego en los cultivos hortícolas bajo invernadero en el

- sudeste español. CAJA MAR (Caja Rural de Almería y Málaga) España. 70 pp.
- FERNÁNDEZ SANTAMARÍA, J. (1999). Variedades locales y producción ecológica. En Savia 7. 16-24.
 - FERNÁNDEZ, M. 1995. Los virus patógenos de las plantas y su control. 4º Edición. Tomo II. Argentina. 1277 p
 - FORTES. R ; M.H. PRIETO; J.A. GONZÁLEZ; C. CAMPILLO. Evaluación del riego deficitario controlado sobre la calidad y la producción en las distintas fases fenológicas del cultivo de tomate para industria. Centro de Investigación. Finca La Orden-Valdesequera. Guadajira (Badajoz), 2012.
 - FLORIDO, B. BAO, F. 2014. Tolerancia a estrés por déficit hídrico en tomate (*Solanum lycopersicum* L.). Cultivos Tropicales, vol. 35, no. 3, Cuba. pp. 70-88.
 - GARCIA.D. Operación y mantenimiento de sistemas de riego.UNAM.2015.
 - GEORGE, R. 1999. Vegetable seed production.2nd edition; CABI Publishing.UK at the at the University Press, Cambrige.328 p.
 - GONZALES et al 2015 Modelling soil water dynamics of full and deficit drip irrigated maize cultivated under a rain shelter 1 p.
 - HAGAN. R..N. (1965).Plant water relation. lirgations management and crop yield. Expl. Agric.161-177.
 - HAIBIN et al.,2014 Modeling soil water dynamics in a drip-irrigated intercropping field under plastic mulch 290 p.

- HAN, M ; ZHAO. C ; FENG, G ; YAN, Y ; SHENG, Y. 2015. Evaluating the Effects of Mulch and Irrigation Amount on Soil Water Distribution and Root Zone Water Balance Using HYDRUS-2D, China Article , 2634 p.

- HERNÁNDEZ, C. S. 2011. Producción de tomate en diferentes granulometrías de “tezontle”. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados “Campus Montecillo”, Texcoco, Estado de México, 107 p.

- HUERRES, P. CARABALLO, N. 1988. Horticultura. Ed. Pueblo y educación. La Habana, Cuba. 4-16 pp.

- International Atomic Energy Agency (IAEA). 1970. A guide-book on theory and practice. Technical Reports Series N° 112, IAEA, Vienna, Austria.

- KANDELOUS M, ŠIMU°NEK J, VAN GENUCHTEN MTH, MALEK K (2011) Soil water content distributions between two emitters of a subsurface drip irrigation system. Soil Sci Soc Am J 75(2):488–497

- KUTÍLEK, M.; D. R. NIELSEN. 1994. Soil hydrology. GeoEcology textbook. Catena Verlag, Alemania, 370 p.

- LA EVAPOTRANSPIRACIÓN: CONCEPTOS Y MÉTODOS PARA SU DETERMINACIÓN, 2008. Disponible en: <http://www.economiaandaluza.es/sites/default/files/cap496.pdf>.

- LA TORRE, B. 1990. Plagas de las hortalizas. Manual de manejo integrado. FAO. Santiago, Chile. 520 p

- LAMM F. R., AYARS J. E., NAKAYAMA F. S. 2007. Microirrigation for Crop Production - Design, Operation and Management. Elsevier Publications: 608 p.

- LEIJ, F. J.; ALVES, W. J.; VAN GENUCHTEN, M. TH. Y WILLIAMS, J. R. (1996). The UNSODA .Unsaturated Soil Hydraulic Database – User´s

Manual version 1.0. National Risk Management Research Laboratory. Office of Research and Development. U.S.Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio. U.S.A.

- LEVIN, I., ASSAF, R. AND BRAVDO, B. Soil moisture and root distribution in an apple orchard irrigated by trucklers. ISHS Acta Horticulturae Vol. 89: Symposium on Water Supply and Irrigation, 1979.
- LI, X ; HAIBIN SHI ; JIRŮ ŠIMU°NEK ; XUEWEN GONG ; ZUNYUAN PENG. 2015.Modeling soil water dynamics in a drip-irrigated intercropping field under plastic mulch. Irrig Sci 33 : 289 – 302 p.
- Loll & Moldrup.2010. Soil Characterization and Polluted Soil Assessment, Chapter 2.22-23 p.
- LUCKNER, L.; VAN GENUCHTEN, M. TH. Y NIELSEN, D. R. (1989). A Consistent Set of Parametric Models for the Two-Phase Flow of Inmiscible Fluid in the Subsurface. Water Resources Research. 27, pp. 2113-2124. U.S.A.
- MANJARREZ, J. 1980. Riegos. El cultivo del tomate para consumo fresco en el valle de Culiacán. CEVAS-CIAPAN-SARH.
- MAROTO, J.V. 2002. Horticultura herbácea especial. 5ta Edición. Ediciones Multi – Prensa. Madrid - España. 702 p.
- MENEZES, J. 1992. Producción de tomate en America latina y el caribe. 173-218 pp. En: Izquierdo, j., Paltrinieri, G. y Arias, C. (Ed.). Producción, poscosecha, procesamiento y comercialización de ajo, cebolla y tomate. FAO. Santiago, Chile. 413 p.

- MORELL, I.; J. Tuñón, J. 2003. Algunos problemas instrumentales relacionados con la determinación del balance hídrico del suelo. En “Operatividad de la instrumentación en aguas subterráneas, suelos contaminados y riesgos geológicos”, IGME MADRID, España, 44 p.
- MORELL, A .2006. Lección 7 . Flujo de agua en el suelo. Disponible en : <http://www.agua.uji.es/pdf/leccionRH07.pdf>
- MONARDE, H. 2009 . Manual del cultivo de tomate Nodo agrícola VI región. Santiago de Chile – Chile 10p.
- NAGLIČ ,B. Numerical and experimental evaluation of wetted soil volume in surface drip irrigation systems.Doct. dissertation. Ljubljana, Univ. of Ljubljana, Biotechnical Faculty, 2014, 6-15 p.
- NOBORIO, K .2001 .Department of Agronomy, Iowa State University, Ames, IA 50011 -1010, USA Abstract , 214 -215 p.
- NUEZ, F. 1995. El cultivo del tomate. Ed. Mundi-Prensa. Madrid.
- NUMATA.K ;ITAGAKI.K . 2001 Estudio sobre el caso de la producción creciente del tomate en los desiertos mediante el sistema agrario con poco insumo: desafíos en la zona costera del Perú artículo científico Perú 9 p.
- PANICONI, C.; JAFFE, P.; Y WOOD, E. (1991) *Model Calibration Based on Random Environmental Fluctuations*. Journal of Environmental Engineering, ASCE. Vol. 114, N° 5, pp. 1136-1145. U.S.A.
- ORREGO, V. 2015. Transporte de agua y soluto en la zona no saturada. Ciencia ahora N°15. 2-3 p.
- PANIZO, C. 1998. Estrategias para el manejo integrado de las enfermedades de hortalizas. 191-209 pp. En: Vallejos, D. y Jimenez, A. (Ed). Estrategias

- para el manejo integrado de enfermedades de cultivos. Universidad nacional pedro Ruiz gallo. Chiclayo, Perú. 237 p.
- PASQUALE, M. RAES, D. HSIAO, T. FERERES, E. 2012. AquaCrop: conceptos, fundamento y funcionamiento. Roma Italia.
 - PONIZOVSKY A.A.; S.M. CHUDINOVA; Y.A. PACHEPSKY. 1999. Performance of TDR calibration models as affected by soil texture. Journal of Hydrology 218. pp 35-43.
 - REYNA ,M. 2008. Acoplamiento de los procesos de escurrimiento superficial e infiltración. Facultad de ciencias exactas , físicas y naturales. Universidad de Córdoba. Tesis doctoral.3:20-28 pp.
 - RICHARDSON, R.W. Y O.H. BRAUER. S/F. 1987. El tomate, indicaciones generales para su cultivo. Programa Agrícola Cooperativo de la Secretaría de Agricultura y Ganadería de México y la Fundación Rockefeller
 - RICK, C. M. 1978. The tomato. Sci. Amer., 239: 67-76 pp.
 - RODRÍGUEZ, R. TAVAREZ, R. Y MEDINA, J. 1984. Cultivo moderno del tomate. Ediciones Mundi Prensa. Madrid, España. 206 p.
 - RODRÍGUEZ, R. TAVARES, R. Y MEDINA, 2001. Cultivo moderno del tomate. 2ª Edición. Ediciones Mundi-Prensa. España. 255 p.
 - ROMAÑA GARCÍA, J.J., 2014 . Las limitaciones de la ley de Darcy.Tesis de investigación para magister. Universidad Nacional de Colombia.
 - ROSENBERG, N.J. 1974. Microclimate. The biological environment. John Wiley. New York.
 - SALEH M. ISMAIL ; KIYOSHI OZAWA; NUR A. KHONDAKER. Effect of irrigation frequency and timing on tomato yield, soil water dynamics and

- water use efficiency under drip irrigation. Eleventh International Water Technology Conference, Egypt , 78 p.
- JONES,S .2002. Time domain reflectometry measurement principles and applications. Department of Plants, Soils and Biometeorology, Utah State University, Logan, UT 84322-4820, USA , 142 p.
 - SANCHEZ, G. Y VERGARA, C. 1998. Plagas de hortalizas. Departamento de Entomología y Fitopatología. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú. 269p.
 - SARMIENTO, J. Y SANCHEZ, G. 2000. Evaluación de insectos. Departamento de Entomología y Fitopatología. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú. 117p.
 - SALUNKHE, D. and KADAM, S. 1998. Handbook of vegetable science and technology: production, composition, storage, and processing. Marcel Dekker. New York. 721 p.
 - SCHJØNNING, P., Size distribution of dispersed and aggregated particles and of soil pores in 12 Dan-ish soils, Acta Agric. Scand., Sect. B, Soil and Plant Science, vol. 42, 26-33, 1992
 - SEYFRIED, M.S.; M.D. MURDOCK. 2004. Measurement of soil water content with a 50-MHz soil dielectric sensor. Soil Sci. Soc. Am. J., 68: 394-403.
 - SIAR (Servicio de información agroclimática de la Rioja),2000. Necesidades hídricas de los cultivos. Disponible en línea: <http://www.larioja.org/larioja-client/cm/agricultura/images?idMmedia=600180>).
 - SIEA (Sistema integrado de estadísticas agrarias). 2014. Anuario “Producción agrícola 2014”. Lima- Perú.

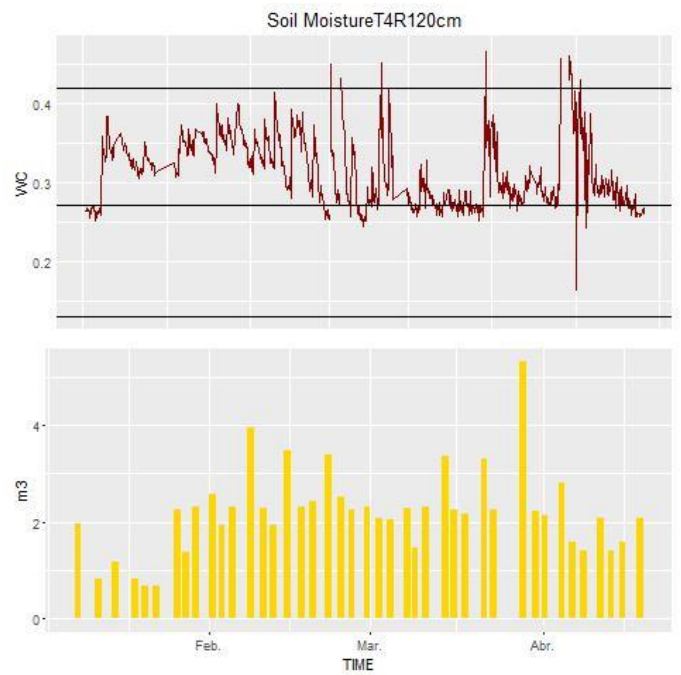
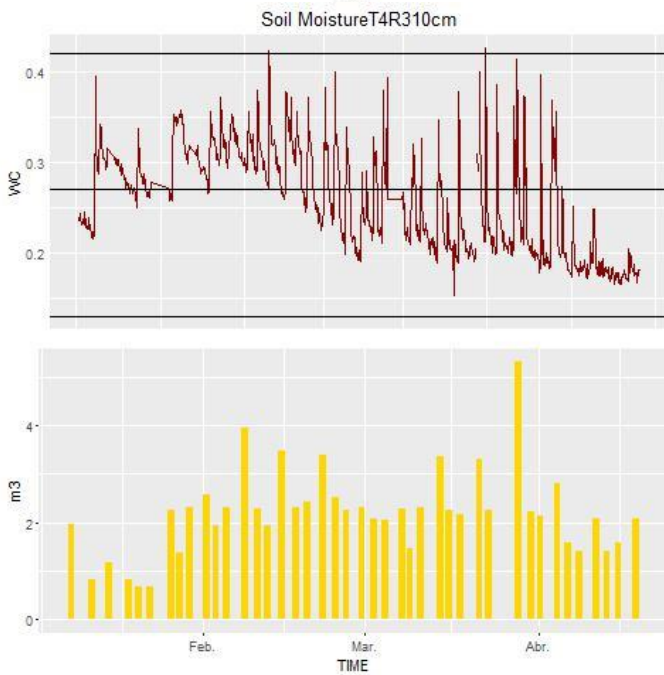
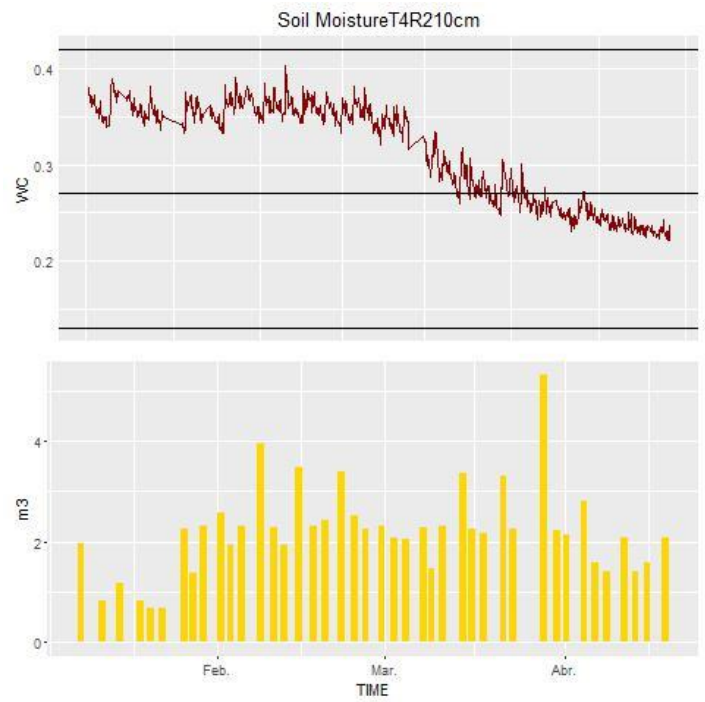
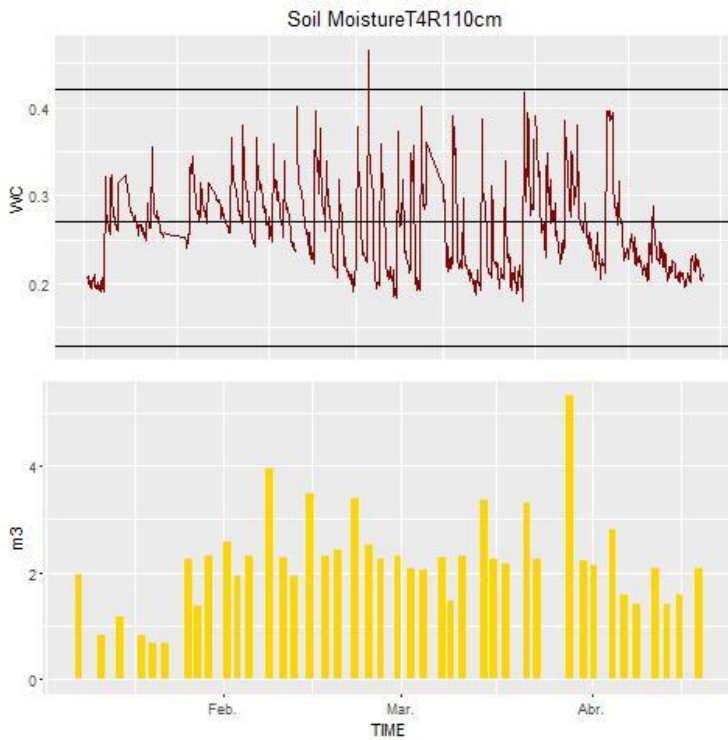
- ŠIMŮNEK, J. 2013. The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media. Ver 4.17. 11-13 p.
- SKAGGS TH, TROUT TJ, ŠIMŮNEK J, SHOUSE PJ (2004) Comparison of Hydrus-2D simulations of drip irrigation with experimental observations. J Irrig Drain Eng 130(4):304–310.
- SKAGGS TH, TROUT TJ, ROTHFUSS Y (2010) Drip irrigation water distribution patterns: effects of emitter rate, pulsing, and antecedent water. Irrig Sci 74:1886–1896.
- STATISTA. Portal de estadísticas. Disponible en: <https://es.statista.com/estadisticas/529413/produccion-de-tomates-frescos-en-el-mundo/>
- STEPUHN, H. Y RANEY, J. Emergence, height, and yield of canola and barley grown in saline root zones. Canadian J. Plant Sci., 2005, vol. 85, pp. 815-827.
- UGÁS, R., SIURA, S., DELGADO DE LA FLOR, F., CASAS, A. Y TOLEDO, J. 2000. Hortalizas. Datos básicos. UNALM. Lima – Perú. 202 p.
- THORSTHUR ,2013.CHAPTER ONE .GROUND WÁTER. Disponible en:https://notendur.hi.is/thorstur/teaching/vatna/GROUNDWATER_chapter.PDF.
- TOO, V. K., OMUTO, C.T. , BIAMAH, E.K. AND OBIERO, J.P. (2014) Review of Soil Water Retention Characteristic (SWRC) Models between Saturation and Oven Dryness.Open Journal of Modern Hydrology, 4, 173-182.

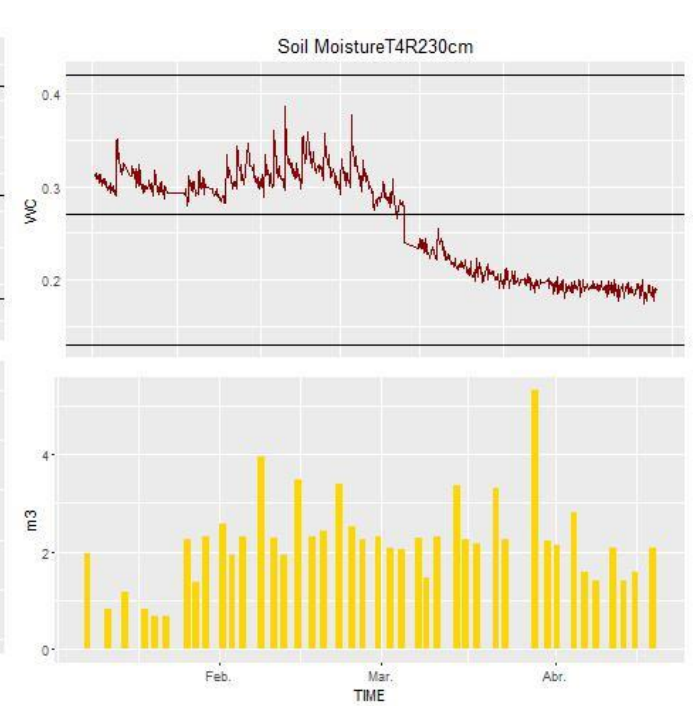
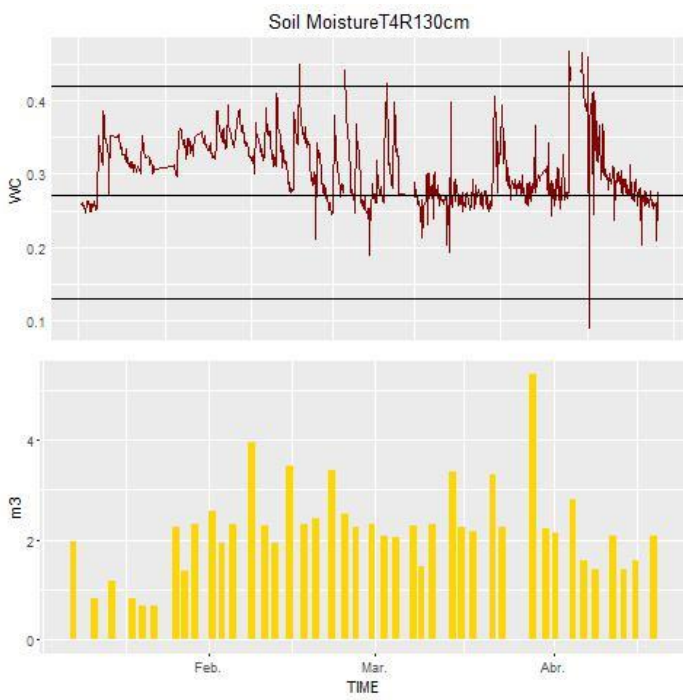
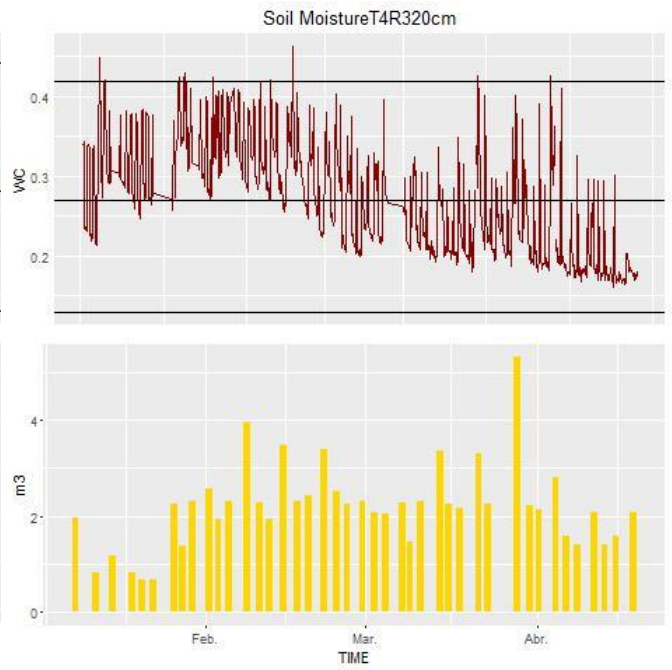
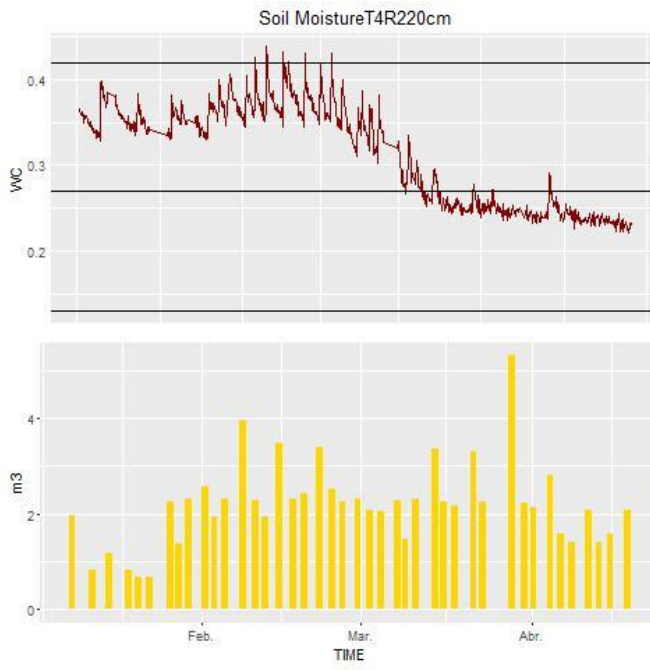
- TOPP, G.C.; J.L. DAVIS, 1985. Measurement of soil water content using time-domain reflectometry (TDR): A field evaluation, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 49: 19-24.
- TOPP, G.C.; S. ZEGELIN; I. WHITE. 2000. Impact of real and imaginary components of relative permittivity on time domain reflectometry measurement in soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 64: 1244-1252.
- TOPP, G.C., J.L. DAVIS; A.P. ANNAN, 1980. Electromagnetic determination of soil water content: Measurements of coaxial transmission lines. *Water Resour. Res.*, 16: 574-582.
- TULLER, M., & OR, D. (2003). Retention of water in soil and the soil water characteristic curve. *Encyclopedia of Soils in the Environment*, 4, 278-289.
- VALADÉZ, L. 1990. Producción de hortalizas. Editorial Limusa. México. 248 p.
- VAN GENUCHTEN, M. TH (1980). A Closed- form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44, pp. 892-898. U.S.A.
- VAN GENUCHTEN, M. TH. Y NIELSEN, D. R. (1985). *On Describing and Predicting the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils*. *Ann. Geophys.* 3, pp. 615-628. U.S.A.
- VAN GENUCHTEN, M. TH., LEIJ, F. J. Y YATES, S. R. (1991). *The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils*. Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory. Office of Research and Development U.S. Environmental Protection Agency. Ada. Oklahoma. U.S.A.
- VAN HAEFF, S. 1988. Manual para la Educación Agropecuaria. Editorial Trillas México. 54 pág.

- ZIMMERMANN E. Y RICCARDI G. (2000) Modelo de Simulación Hidrológica Superficial y Subterránea para áreas de llanuras. XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Córdoba, Argentina.

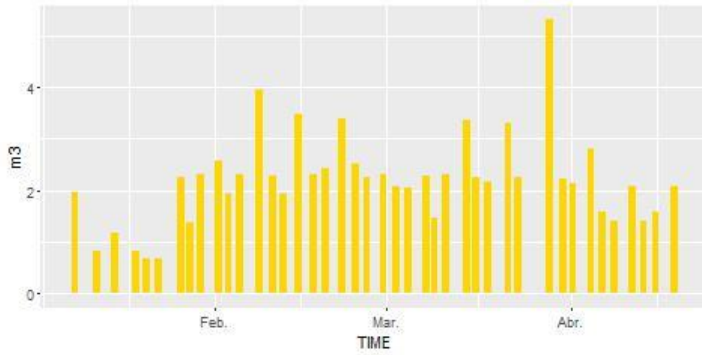
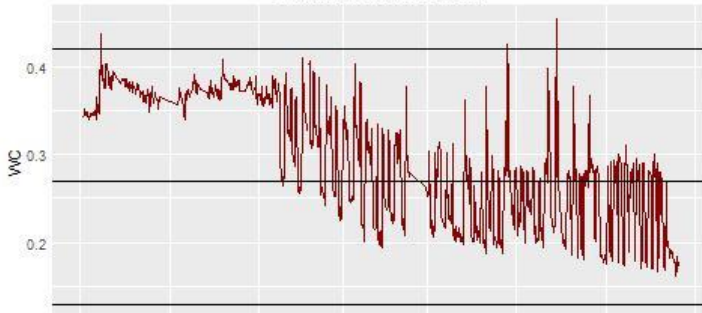
VIII ANEXOS

Anexo 1. Curvas de humedad de las repeticiones del tratamiento de 40 % de la ETc

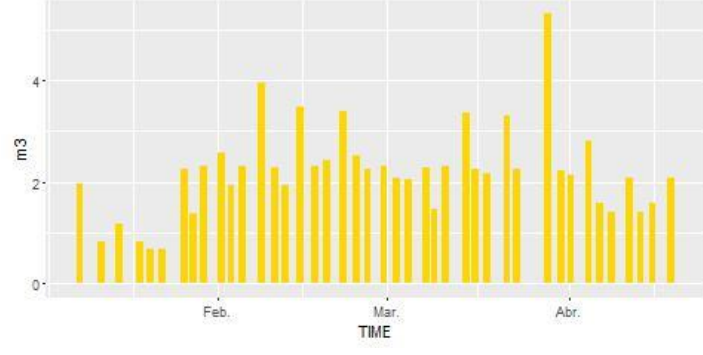
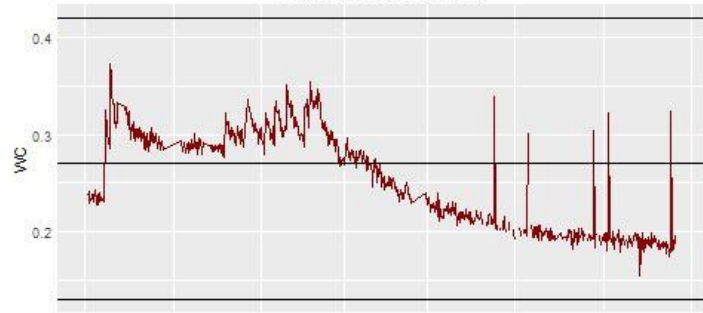




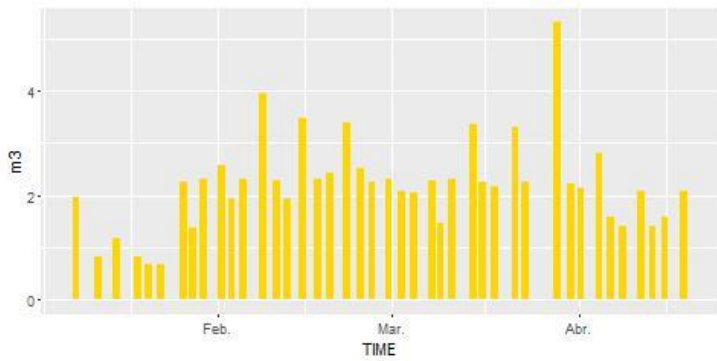
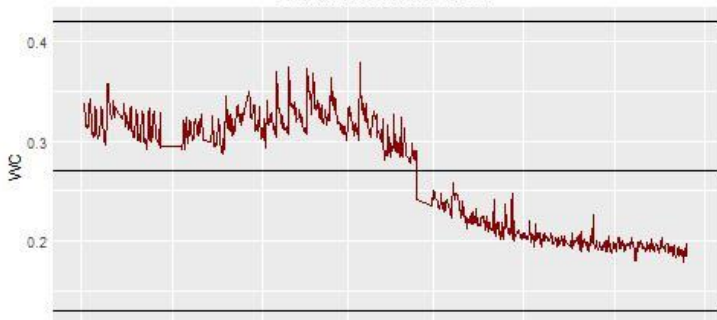
Soil MoistureT4R330cm



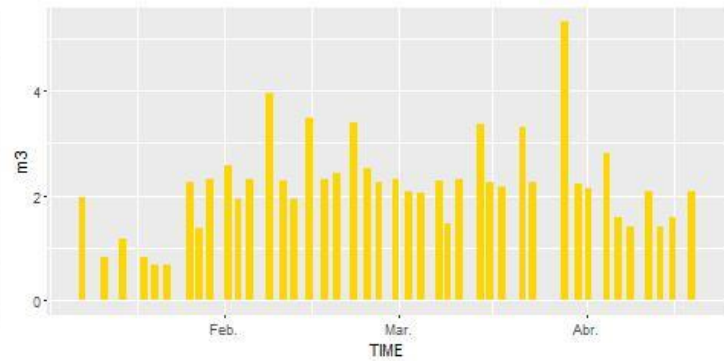
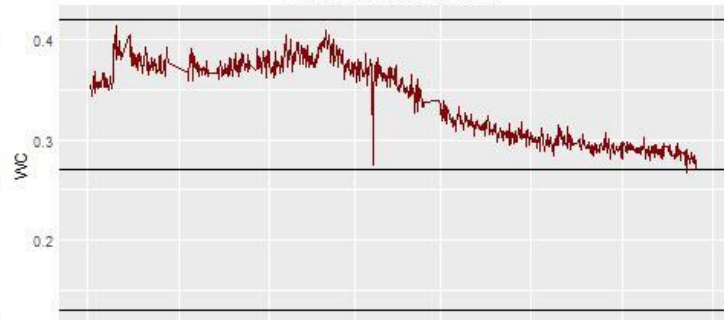
Soil MoistureT4R430cm



Soil MoistureT4R245cm



Soil MoistureT4R445cm



ANEXO 2. FLUJOS VARIABLES DEL MODELO POR TRATAMIENTO

DIA	40% Etc	60% Etc	80% Etc	120% Etc
5	-4.26307883	-6.39462	-8.52616	-12.7892
6	0	0	0	0
7	0	0	0	0
8	-9.28403835	-13.8787	-18.5207	-27.8047
9	0	0	0	0
10	0	0	0	0
11	-3.88413849	-5.77884	-7.72091	-11.605
12	0	0	0	0
13	0	0	0	0
14	0	0	0	0
15	-5.54200248	-8.33669	-11.1314	-16.6734
16	0	0	0	0
17	0	0	0	0
18	-3.93150603	-5.87358	-7.81564	-11.7472
19	0	0	0	0
20	-3.26836044	-4.87886	-6.48935	-9.75771
21	0	0	0	0
22	-2.32100959	-3.45783	-4.64202	-6.36303
23	0	0	0	0
24	0	0	0	0
25	-11.9366207	-17.9049	-23.8732	-35.7625
26	0	0	0	0
27	-6.58408842	-9.89982	-13.1682	-19.7523
28	0	0	0	0
29	-8.09984978	-12.1261	-16.1523	-24.2522
30	0	0	0	0
31	0	0	0	0
32	-12.1734584	-18.2365	-24.3469	-36.5204
33	0	0	0	0
34	-9.09456818	-13.6892	-18.2365	-27.3311
35	0	0	0	0
36	-10.9419023	-16.4365	-21.9312	-32.8731
37	0	0	0	0
38	0	0	0	0
39	-18.6154442	-27.9469	-37.2309	-55.8463
40	0	0	0	0
41	-10.7997997	-16.1997	-21.5996	-32.3994
42	0	0	0	0
43	-9.14193572	-13.6892	-18.2365	-27.3784
44	0	0	0	0
45	0	0	0	0
46	-16.4839048	-24.7259	-32.9678	-49.4517
47	0	0	0	0
48	-5.4472674	-8.1709	-10.8945	-16.3418

49	0	0	0	0
50	-5.778840196	8.69194406	11.5813642	17.3602044
51	0	0	0	0
52	0	0	0	0
53	-8.05248224	12.0787234	16.1049645	24.1574467
54	0	0	0	0
55	-5.968310366	8.95246555	11.9366207	17.9049311
56	0	0	0	0
57	-5.328848541	-8.0051147	10.6813809	16.0102294
58	0	0	0	0
59	0	0	0	0
60	-5.470951169	8.19458487	10.9419023	16.3891697
61	0	0	0	0
62	-4.9499082	7.43670419	-9.8998164	14.8497246
63	0	0	0	0
64	-4.878856886	7.29460156	-9.73403	14.6128869
65	0	0	0	0
66	0	0	0	0
67	-5.447267397	-8.1709011	10.8945348	16.3181184
68	0	0	0	0
69	-3.505198151	5.25779723	-7.0103963	10.5155945
70	0	0	0	0
71	-5.470951169	8.19458487	10.9419023	16.4128535
72	0	0	0	0
73	0	0	0	0
74	-7.981430926	11.9603045	15.9391781	-23.920609
75	0	0	0	0
76	-5.352532312	8.02879847	10.7050646	16.0339132
77	0	0	0	0
78	-5.186745913	7.76827698	10.3498081	-15.536554
79	0	0	0	0
90	-5.281480998	7.93406338	-10.562962	15.8681268
91	0	0	0	0
92	-5.092010828	7.62617436	10.1840217	15.2760325
93	0	0	0	0
94	0	0	0	0
95	-4.973591972	44.9281141	29.9599707	19.9654192
96	0	0	0	0
97	-3.765719636	5.63673757	7.53143927	11.2734751
98	0	0	0	0
99	-3.363095524	5.04464329	6.72619105	10.0892866

ANEXO 3. ANOVA DE LAS VARIABLES ESTUDIADAS

Rendimiento peso total					
ANOVA					
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
tratamiento	3	2541.821322	847.273774	19.28	0.002
repetición	3	200.374574	66.791525	1.52	0.303
Columna	3	275.818106	91.939369	2.09	0.203
Error	6	263.642415	43.940403		
Total	15	3281.656416			

Rendimiento número fruto					
Anova					
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor P
tratamiento	3	2.5145E+11	83816627213	21.07	0.001
repetición	3	40748871204	13582957068	3.41	0.094
Columna	3	53465749004	17821916335	4.48	0.056
Error	6	23866610283	3977768380		
Total	15	3.69531E+11			

Peso de fruto de primera					
Anova					
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor P
tratamiento	3	132489439	44163146	16.41	0.003
repetición	3	6714018	2238006	0.83	0.523
Columna	3	12192893	4064298	1.51	0.305
Error	6	16149720	2691620		
Total	15	167546070			

Peso de fruto de segunda					
Anova					
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor P
tratamiento	3	785108653	261702884	17.06	0.002
repetición	3	10351431	3450477	0.22	0.876
Columna	3	75442712	25147571	1.64	0.277
Error	6	92036535	15339422		
Total	15	962939330			

Peso de fruto de tercera					
Anova					
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor P
tratamiento	3	176359713	58786571	14	0.004
repetición	3	214202586	71400862	17	0.002
Columna	3	63954884	21318295	5.08	0.044
Error	6	25194727	4199121		
Total	15	479711909			

Número de flores					
Anova					
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor P
tratamiento	3	379.25	126.417	94.81	0.000
repetición	3	31.25	10.417	7.81	0.017
Columna	3	5.25	1.75	1.31	0.354
Error	6	8	1.333		
Total	15	423.75			