

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA
VICERRECTORÍA DE DOCENCIA
ESCUELA DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



Trabajo Final de Graduación presentado a la
Escuela de Ingeniería Agrícola

**DETERMINACIÓN DE LOS REQUERIMIENTOS DE AGUA PARA
DIFERENTES CULTIVOS DE LA ZONA NORTE CARTAGO**

Jeffry Quesada Rodríguez

Cartago, 2017

**DETERMINACIÓN DE LOS REQUERIMIENTOS DE AGUA PARA
DIFERENTES CULTIVOS DE LA ZONA NORTE CARTAGO**

Jeffry Quesada Rodríguez

Informe de Trabajo Final de Graduación presentado a la
Escuela de Ingeniería Agrícola como requisito parcial para
optar al grado de Licenciado en Ingeniería Agrícola

Isabel Guzmán Arias

Asesor

Marvin Villalobos Araya

Director Escuela
Ingeniería Agrícola

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

CARTAGO, COSTA RICA

2017

Índice de Contenidos

Índice de cuadros.....	IV
Índice de figuras.....	VII
RESUMEN.....	X
INTRODUCCIÓN	1
1.2. Objetivo general.....	4
1.3. Objetivos específicos.....	4
REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 El riego en los cultivos	6
2.1.1. Grado de aplicación.....	7
2.1.2. Peso específico aparente.....	8
2.2. Evaporación.....	8
2.3. Transpiración.....	9
2.4. Evapotranspiración (ET)	10
2.4.1. Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET _o).....	16
2.4.2. Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET _c)	17
2.4.3. Lisímetros para medir la evapotranspiración	22
2.4.4. Estación meteorológica	23
2.4.4. Evapotranspiración calculada con datos meteorológicos.....	24
2.5. Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET _o).....	24
2.5.1. Formulación de la ecuación de Penman-Monteith	28
2.5.2. Ecuación de FAO Penman-Monteith	34
2.5.3. Factores meteorológicos que determinan la ET _o	40
2.5.4. Parámetros atmosféricos para determinar ET _o	43
2.6. El coeficiente de cultivo (K _c).....	56
2.6.1. Etapas del crecimiento del cultivo.....	59
2.6.2. Valores tabulados de K _c	63
2.7. Evapotranspiración del cultivo (ET _c).....	63

2.8. Características físicas del suelo.....	64
2.9. El agua en el suelo.....	65
2.10. Velocidad de infiltración de agua en el suelo.....	66
2.11. Cultivos relevantes	67
2.11.1. Papa o patata.....	67
2.11.2. Tomate.....	70
2.11.3. Maíz.....	73
METODOLOGÍA	76
3.1. Localización del área para determinar de los requerimientos de agua para diferentes cultivos de la zona norte Cartago	77
3.2. Comparación de metodologías para determinar ETo	78
3.2.1. Penman-Monteith.....	79
3.2.2. Blaney y Criddle.....	80
3.2.3. Thornthwaite	80
3.2.4. Hargreaves.....	81
3.3. Parámetros para el cálculo de los requerimientos de agua para diferentes cultivos de la zona norte Cartago	81
3.3.1. Textura	81
3.3.2. Capacidad de Campo (CC) y el Punto de Marchites Permanente (PMP)	83
3.3.3. Lámina Neta	83
3.3.4. Lámina bruta	83
3.3.5. Módulo de riego	84
3.3.6. Frecuencia de riego para los cultivos:	84
3.3.7. Grado de aplicación e infiltración básica	84
3.3.8. Grado de aplicación:.....	84
3.3.9. Infiltración básica.....	85
3.3.10. Tiempo de Riego	85
3.4. Método para realizar el análisis social	85

3.5. Método para realizar el análisis económico	85
3.6. Método para realizar el análisis ambiental	86
RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	87
4.1. Resultados y comparaciones de los diferentes métodos sugeridos para determinar ETo. 88	
4.1.2. FAO Penman-Monteith	90
4.1.3. Blaney y Criddle.....	90
4.1.4. Hargreaves.....	91
4.1.5. Thornthwaite	93
4.2. Resultados por el método sugerido FAO Penman-Monteith, para el cálculo de los requerimientos de agua de un cultivo representativo.	94
4.3. Resultados del cálculo de los requerimientos de agua para diferentes cultivos de las fincas modelo.	96
4.4. Análisis social	104
4.5. Análisis económico	115
4.6. Análisis ambiental	118
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	120
5.1. Conclusiones	121
5.2. Recomendaciones.....	122
BIBLIOGRAFÍA.....	131
ANEXOS.....	134

Índice de Cuadros

Cuadro 1. Factores de conversión para expresar evapotranspiración.....	12
Cuadro 2. ETo promedio para diferentes regiones agroclimáticas en mm/día.....	17
Cuadro 3. ETo mensual, método FAO Penman-Monteith para la estación ubicada en Tierra Blanca de Cartago, nombre de la estación Sanatorio Durán	90
Cuadro 4. Evapotranspiración de referencia mensual por el método Hargreaves para la estación ubicada en Tierra Blanca de Cartago, nombre de la estación Sanatorio Durán.	92
Cuadro 5. Evapotranspiración de referencia mensual por el método Thornthwaite para la estación ubicada en Tierra Blanca de Cartago, nombre de la estación Sanatorio Durán.	93
Cuadro 6. Porcentajes de sólidos en suspensión por el método de Bouyoucos para la Finca 1..	97
Cuadro 7. Peso de suelo húmedo y peso suelo seco para muestreo recolectados en la Finca 1..	97
Cuadro 8. CC capacidad de campo y el PMP punto de marchites permanente obtenidos para la Finca 1.....	98
Cuadro 9. Determinaciones para los cultivos para periodo más crítico (marzo), Kc etapa media del cultivo.....	98
Cuadro 10. Porcentajes de sólidos en suspensión por el método de Bouyoucos para la Finca 2.	99
Cuadro 11. Peso de suelo húmedo y peso suelo seco para muestreo recolectados en la Finca 2	99
Cuadro 12. CC capacidad de campo y el PMP punto de marchites permanente obtenidos para la Finca 2.....	100
Cuadro 13. Determinaciones para los cultivos para periodo más crítico (marzo), Kc etapa media del cultivo, Finca 2.....	100
Cuadro 14. Porcentajes de sólidos en suspensión por el método de Bouyoucos para la Finca 3.	101
Cuadro 15. Peso de suelo húmedo y peso suelo seco para muestreo recolectados en la Finca 3.	101
Cuadro 16. CC capacidad de campo y el PMP punto de marchites permanente obtenidos para la Finca 3.....	101
Cuadro 17. Determinaciones para los cultivos para periodo más crítico (marzo), Kc etapa media del cultivo, Finca 3.....	102
Cuadro 18. Porcentajes de sólidos en suspensión por el método de Bouyoucos para la Finca 4.	103
Cuadro 19. Peso de suelo húmedo y peso suelo seco para muestreo recolectados en la Finca 4.	103

Cuadro 20. CC capacidad de campo y el PMP punto de marchites permanente obtenidos para la Finca 4.....	103
Cuadro 21. Determinaciones para los cultivos para periodo más crítico (marzo), Kc etapa media del cultivo, Finca 4.....	104
Cuadro 22. Respuestas de los encuestados sobre los problemas de disponibilidad de agua.....	113
Cuadro 23. Precio de cobro de las dotaciones por la DA.....	116
Cuadro 24. Evapotranspiración de referencia (ETo) promedio mensual para cada una de las estaciones meteorológicas donde se encuentran las SUA´s de la zona de estudio.....	117
Cuadro 25. Cálculo de ganancias de concesión para riego, volumen de agua y cobro del servicio por el método utilizado por la DA y el recomendado para el estudio.....	118
Cuadro 26. Valores del coeficiente de cultivo (Kc) para diferentes cultivos.....	125
Cuadro 27. Valores del coeficiente de cultivo (Kc) para diferentes cultivos.....	126
Cuadro 28. Valores del coeficiente de cultivo (Kc) para diferentes cultivos.....	127
Cuadro 29. Valores del coeficiente de cultivo (Kc) para diferentes cultivos.....	128
Cuadro 30. Porcentaje de eficiencia para diferentes sistemas de riego.....	129
Cuadro 31. Valores del coeficiente de cultivo (Kc) para diferentes cultivos.....	145
Cuadro 32. Valores del coeficiente de cultivo (Kc) para diferentes cultivos.....	146
Cuadro 33. Valores del coeficiente de cultivo (Kc) para diferentes cultivos.....	147
Cuadro 34. Valores del coeficiente de cultivo (Kc) para diferentes cultivos.....	148
Cuadro 35. ETo para la estación ubicada en Llano Grande de Cartago, nombre de la estación Llano Grande.....	149
Cuadro 36. ETo para la estación ubicada entre Llano Grande y Tres Ríos de Cartago, nombre de la estación Avance.....	150
Cuadro 37. ETo para la estación ubicada en Llano Grande, nombre de la estación Corralillo.	151
Cuadro 38. ETo para la estación ubicada en Rancho Redondo, nombre de la estación Rancho Redondo.....	152
Cuadro 39. ETo para la estación ubicada en Pacayas de Cartago, nombre de la estación Pacayas.....	153
Cuadro 40. ETo para la estación ubicada en San Juan de Chicua de Cartago, nombre de la estación Coliblanco.....	154
Cuadro 41. ETo para la estación ubicada en el Volcán Irazú, nombre de la estación Irazú.....	155
Cuadro 42. Datos obtenidos y procesamiento para conocer la Infiltración básica Finca 1.....	160
Cuadro 43. Datos obtenidos y procesamiento para conocer la Infiltración básica Finca 2.....	162
Cuadro 44. Datos obtenidos y procesamiento para conocer la Infiltración básica Finca 4.....	164

Cuadro 45. Evapotranspiración de referencia mensual por el método FAO Penman-Monteith para la estación ubicada en Buenos Aires de Puntarenas, nombre de la estación La Piñera.....	165
Cuadro 46. Evapotranspiración de referencia mensual por el método Hargreaves para la estación ubicada en Buenos Aires de Puntarenas, nombre de la estación La Piñera.....	166

Índice de Figuras

Figura 1.Repartición de la evapotranspiración en evaporación y transpiración durante el periodo de crecimiento de un cultivo anual.....	11
Figura 2. Factores que afectan la evapotranspiración con referencia a conceptos relacionados de ET.....	13
Figura 3. Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET _o), bajo condiciones estándar (ET _c).	16
Figura 4.Representación esquemática de la variación diurna de los componentes del balance de energía sobre una superficie transpirante con suficiente cantidad de agua en un día soleado. ...	20
Figura 5.Balance de agua en el suelo de la zona radicular.	22
Figura 6. Momento de instalación en campo de un lisímetro.	23
Figura 7.Representación simplificada de la resistencia superficial (total) y de la resistencia aerodinámica al flujo de vapor de agua.....	29
Figura 8.Representación típica de la variación del Índice de Área Foliar (IAF) activo (verde) a lo largo del periodo de crecimiento de un cultivo de maíz.....	32
Figura 9.Características del cultivo hipotético de referencia.	34
Figura 10. Ilustración del efecto de la velocidad del viento sobre la evapotranspiración en condiciones atmosféricas secas y caliente comparadas con condiciones húmedas y tibias.	42
Figura 11.Presión de saturación de vapor (e _o) en función de la temperatura: curva de e _o (T)....	47
Figura 12. Variación de la humedad relativa durante un periodo de 24 horas para una presión real de vapor constante de 2,4 kPa.	48
Figura 13. Variación anual de la radiación extraterrestre (R _a) en el ecuador, a los 20° y 40° de latitud norte y sur.	51
Figura 14. Variación anual de las horas de luz del día (N) en el ecuador a los 20° y 40° de latitud norte y sur.	53
Figura 15. Componentes de la radiación.	54
Figura 16. Valores típicos de K _c para diferentes cultivos completamente desarrollados.	58
Figura 17. Rangos extremos de K _c para cultivos completamente desarrollados, en respuesta a variaciones climáticas y meteorológicas.	59
Figura 18. Rangos típicos esperados del valor de K _c para las cuatro etapas del crecimiento.....	62
Figura 19. Curva generalizada del coeficiente del cultivo, correspondiente al procedimiento del coeficiente único del cultivo.	63
Figura 20. Estaciones meteorológicas y fincas en estudio ubicadas en la parte norte de la provincia de Cartago.	78

Figura 21. Triangulo textural de USDA.....	82
Figura 22. ETo para la estación ubicada en Tierra Blanca de Cartago, nombre de la estación Sanatorio Durán.	94
Figura 23. Evapotranspiración del Cultivo de papa en etapa media, para la zona de Tierra Blanca de Cartago.	95
Figura 24. Módulo de riego para el cultivo de papa en etapa media de crecimiento y para una eficiencia del sistema de riego por aspersión del 75% en la zona de Tierra Blanca de Cartago.	96
Figura 25. Género de los agricultores encuestados.	104
Figura 26. Edades de los agricultores encuestados.	105
Figura 27. Porcentajes de grado académico de los agricultores encuestados.....	106
Figura 28. Porcentaje de agricultores encuestados que pertenecen o no a una SUA.	107
Figura 29. Porcentaje de agricultores encuestados pertenecientes a una SUA	108
Figura 30. Ubicaciones en porcentaje de finca o parcela de los agricultores encuestados.....	109
Figura 31. Porcentaje de los cultivos cultivados en las fincas pertenecientes a las zonas norte de Cartago	110
Figura 32. Porcentaje de faltante de agua en las fincas agrícolas según los meses del año.	111
Figura 33. Porcentaje de agricultores entrevistados que creen tener problemas de disponibilidad de agua para el riego.....	112
Figura 34. Área que atiende el sistema de riego vs porcentaje de entrevistados.	114
Figura 35. Porcentaje de entrevistados que tienen conocimiento de conflictos producidos por el faltante de agua para riego.	114
Figura 36. Porcentaje de individuos dispuestos a realizar pruebas de muestreo.....	115
Figura 39. Hojas de cálculo para determinar la evapotranspiración del cultivo de referencia..	138
Figura 40. Ejemplo como deben entrar los datos de latitud en la hoja de cálculo RadiaNet. ...	139
Figura 41. Ejemplo de cómo se debe introducir el numero que corresponde al mes del año.....	139
Figura 42.Ejemplo de cómo insertar el número real de insolación en horas.....	140
Figura 43.Ejemplo de inserción de datos de temperatura máxima y mínima para el cálculo de ETo.....	140
Figura 44. Inserción del dato de punto de rocío; dejarlo en blanco de no contar con él, insertar humedad relativa máxima y mínima o solo la máxima.	141
Figura 45.Procedimiento de cambio de parámetros en la función de no contar con punto de rocío y de contar con la humedad relativa máxima y mínima o solo la máxima; en la hoja de cálculo llamada RadiaNet.	142

Figura 46 . Procedimiento de cambio de parámetros en la función de no contar con punto de rocío y de contar con la humedad relativa máxima y mínima o solo la máxima en la hoja de cálculo llamada ETo.....	142
Figura 47. Introducción en la hoja de cálculo llamada ETo de la temperatura media mensual anterior y posterior al dato del mes que se requiere para encontrar la energía que calienta el suelo (G).....	143
Figura 48. Introducción de datos de velocidad del viento y la altura donde se realizó esa medición, Z=2m es la altura estándar de las estaciones meteorológicas.....	143
Figura 49. Colocación de dato de altura en metros sobre el nivel del mar del punto donde se desea otorgar la dotación.....	144
Figura 50. ETo para la estación ubicada en Llano Grande de Cartago, nombre de la estación Llano Grande.....	149
Figura 51. ETo para la estación ubicada entre Llano Grande y Tres Ríos de Cartago, nombre de la estación Avance.....	150
Figura 52. ETo para la estación ubicada en Llano Grande, nombre de la estación Corralillo. .	151
Figura 53. ETo para la estación ubicada en Rancho Redondo, nombre de la estación Rancho Redondo	152
Figura 54. ETo para la estación ubicada en Pacayas de Cartago, nombre de la estación Pacayas	153
Figura 55. ETo para la estación ubicada en San Juan de Chicua de Cartago, nombre de la estación Coliblanco.	154
Figura 56. ETo para la estación ubicada en el Volcán Irazú, nombre de la estación Irazú.	155
Figura 61. Velocidad de infiltración instantánea Finca 1	161
Figura 62. Infiltración acumulada (Icum) finca 1	161
Figura 63. Velocidad de infiltración instantánea Finca 2.....	163
Figura 64. Infiltración acumulada (Icum) Finca 2.	163
Figura 65. Velocidad de infiltración instantánea Finca 4.....	164
Figura 66. Infiltración acumulada (Icum) Finca 2.	165

RESUMEN

El presente informe consiste en un estudio de determinación de los requerimientos de agua de algunos cultivos que se producen en la zona norte de Cartago. El área en estudio del proyecto abarca siete distritos, uno de la provincia de San José y seis de la provincia de Cartago. La finalidad de este proyecto surgió de la necesidad de evaluar las técnicas de cálculo para determinar los requerimientos de agua que rigen en el proceso de desarrollo de los cultivos en la zona norte de Cartago como propuesta para el Manual de Dotaciones para la Dirección de Agua del Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE) para implementar la técnica de cálculo más adecuada y demostrar los beneficios de dicha evaluación en materia económica, ambiental y social, en una zona que presenta problemas por falta del recurso hídrico especialmente en la época seca o cuando suceden patrones climáticos de fenómenos como el Niño o la Niña.

Para cumplir con los objetivos propuestos, se tomaron y evaluaron cuatro fincas modelo dentro de la zona de estudio y se logró el cálculo idóneo de agua para diferentes cultivos. Primeramente, se evaluó la técnica de cálculo actual que determina las necesidades hídricas para entregar las dotaciones en riego- la Dirección de Agua utiliza una combinación de la metodología de la evapotranspiración y el uso consuntivo aplicando la fórmula de Blaney y Criddle- impresa en el Manual de Dotaciones de la Dirección de Agua del (MINAE), en la cual la única variable de cálculo es la altura en la que el cultivo se encuentra.

Posteriormente, la metodología del manual fue comparada con otros métodos de cálculo para confrontar sus parámetros y resultados establecidos para su medición. Se encontró que la ecuación propuesta para hallar la evapotranspiración de los cultivos de FAO Penman-Monteith es la más adecuada para sustituir la técnica de cálculo actual.

Los parámetros meteorológicos para hallar la evapotranspiración de los cultivos de FAO Penman-Monteith se obtuvieron de las estaciones meteorológicas cercanas a la zona de estudio y a las fincas modelo, con datos históricos muy confiables de hasta 30 años sugeridos para dicha ecuación.

Encontrados los resultados de los requerimientos de agua para algunos de los cultivos de la zona en estudio, se visitó las fincas y se identificó la textura del suelo y la velocidad de infiltración básica, datos necesarios para corroborar que el sistema de riego empleado en dichas fincas no produce escorrentía ni pérdida por percolación.

Los resultados obtenidos en todos los casos para la zona dictaron que la metodología utilizada por el Manual de Dotaciones de la Dirección de Agua entrega concesiones sobrestimadas comparadas con la metodología propuesta en este informe. Por ejemplo, en una hectárea de cultivos en las fincas modelo se podría ahorrar y conservar hasta 10.000 litros de agua, los cuales pueden ser empleados para otras concesiones y generar desde el punto de vista económico nuevos ingresos.

En conclusión, con la aplicación de la propuesta de cálculo de la dotación se generaría conciencia en el método, los sistemas de riego utilizados y en el ahorro del recurso hídrico que ocasionaría en la zona.

Palabras clave:

- Agua
- Dotación
- Evapotranspiración
- Riego

Abstract

The present report consists in a study to determine the water requirements of some crops grown in the northern part of Cartago. The study area of the project covers 7 districts, 1 in the province of San José and 6 in the province of Cartago. The purpose of this project came from the need to evaluate the calculation techniques to determine the water requirements that rule the development process of the crops in the northern zone of Cartago as a proposal for the concession manual for the Dirección de Agua belonging to (MINAE); to implement the most appropriate calculation technique and demonstrate the benefits in an economic, environmental and social assessment, in an area that presents problems with hydric resources especially in the dry season or when occur climatic issues like El Niño o La Niña.

To obtain these assessments at first, we evaluate the current technique what determines the water needs to deliver the endowments in irrigation; for this purpose, la Dirección de Agua uses a combination of the evapotranspiration methodology and the consumptive use by applying the Blaney and Criddle formula, printed in the concession manual of the Dirección de Agua (MINAE), in which unique calculation variable it's the elevation over sea level where the crop is located.

Subsequently the methodology of the manual was compared with other calculation methods to relate its parameters and established results. It was found FAO Penman-Monteith equation to find the evapotranspiration is the most adequate to replace the current calculation technique.

The meteorological parameters to find the evapotranspiration in crops with FAO Penman-Monteith method were obtained from meteorological stations near the study area and the model farms, with very reliable historical data up to 30 years, suggested for this equation.

The results of the water requirements for some of the crops in the study area were determined using the proposed technique, and it was decided to go to the farms and identify the soil texture and the infiltration rate, elementary data to corroborate that the Irrigation used in these farms does not produce runoff or loss percolation.

The results obtained in all the cases for the zone dictated that the methodology used by the Dirección de Agua Manual distribute high concessions compared with the methodology proposed in this report. For example, on a hectare of crops on model farms, up to 10,000 liters of water could be saved and conserved, which could be used for other concessions and generate new income from the economic point of view.

From this conclusion would generate awareness in the method of calculation of the endowment, the irrigation systems used and the water resource saving in the area.

Keywords:

- Water
- Endowment
- Evapotranspiration
- Irrigation

INTRODUCCIÓN

El trabajo titulado: “Determinación de los requerimientos de agua para diferentes cultivos de la zona norte Cartago”, se encuentra ubicado en la zona norte de la provincia de Cartago, el área de estudio fue seleccionada en función de la representatividad de cultivos que se producen en la zona y la cercanía con estaciones meteorológicas que suministran los datos necesarios para la realización de dichos requerimientos. Los puntos seleccionados son: Dulce Nombre, Llano Grande, Tierra Blanca, Potrero Cerrado, Santa Rosa, Pacayas y Rancho Redondo (del cantón de Goicoechea, San José).

La mayor parte de la superficie de la Tierra está compuesta de agua, pero sólo un poco más del 2% es agua dulce y la mayor parte se encuentra en los polos, en estado de hielo, o en depósitos subterráneos muy profundos. De este modo, el agua constituye un insumo indispensable para la vida humana pero extremadamente escasa (Prujel, 2010, p.82). Por lo tanto, incrementar el uso eficiente del agua, no solo desde el punto de vista sostenible de los recursos del planeta, sino también desde el punto de vista social y económico, en todos los aspectos de las actividades humanas es una tarea necesaria y en especial el consumo de las actividades agrícolas, puesto que la agricultura de irrigación es la que demanda mayor cantidad.

El agua determina el crecimiento económico y el desarrollo social de una región. También afecta los patrones regionales de vida y cultura, por lo que se le reconoce como un elemento esencial en el desarrollo de las comunidades. El crecimiento demográfico y económico, la ausencia histórica de criterios de conservación y aprovechamiento sustentable de los recursos naturales, el crecimiento de los regímenes de demanda de agua a nivel regional y la contaminación del líquido han ocasionado que se torne escaso como el encontrado en el área de estudio. De esta manera, el control, el aprovechamiento racional y la preservación del agua a todos los niveles, nacional, regional y local son estratégicos para el desarrollo del país, y la protección de vida digna de los seres humanos (Prujel, 2010).

Para ser más consistentes con la determinación de las necesidades o requerimientos de aguas en las diferentes actividades humanas y entre ellas los usos de agua para riego de cultivos, la División de Fiscalización Operativa y Evaluativa de la Contraloría General de la República de Costa Rica solicitó al Ministerio de Ambiente y Energía, específicamente a la Dirección de Agua, un manual técnico para las dotaciones de agua, que calculara las necesidades de las solicitudes de concesión de aprovechamiento de aguas, denominado Manual Técnico del Departamento de Aguas. El manual fue elaborado y presentado en el diario oficial La Gaceta el 20 de mayo de 2004 y contempla

todos los usos del agua (La Gaceta N°98. Diario Oficial, San José, Costa Rica, 20 de mayo, 2004).

La nueva actividad tecnológica referente al cálculo de la evapotranspiración de los cultivos y los sistemas de riego influyen en el progreso social y económico, y puede ser usada para proteger el medio, buscar soluciones innovadoras y eficientes para resolver de forma sostenible las crecientes necesidades sobre el aprovechamiento de agua en la sociedad costarricense, sin provocar un agotamiento y/o degradación del recurso hídrico del planeta o de aumentar las desigualdades sociales. De acuerdo con Prujel (2010) la agricultura es la actividad humana que más agua demanda. Según datos de la UNESCO, menos del 20% de este total llegan a la planta, el resto es un inmenso desperdicio que, por medio de percolación o escorrentía transporta residuos con sustancias tóxicas que inevitablemente van a parar a los ríos. Desde hace mucho tiempo, la mayor parte del agua consumida por el individuo se destina a la agricultura, que actualmente absorbe alrededor del 70% del agua extraída en el mundo (Prujel, 2010, pp.185-186).

Por su parte, Borlaug & Dowsell (2002) aseveran que:

La rápida expansión del uso del riego a nivel mundial y de los usos urbanos e industriales del agua ha llevado a una escasez creciente de este líquido. La Evaluación Completa de los Recursos de Agua Dulce del Mundo de la ONU, realizada en 1997, estima que aproximadamente un tercio de la población mundial vive en países que están experimentando un estrés moderado o alto por el agua, lo cual es ocasionado por la demanda creciente de una población en aumento y de mayor actividad humana. Se señala que, para el año 2025, casi dos terceras partes de la población del mundo podrían estar bajo condiciones de estrés por agua. (p.15)

Tecnologías ya probadas, tales como riego por goteo, que es más eficiente en el consumo de agua y además reduce la salinidad del suelo, son adecuadas para áreas mucho más grandes que en las que actualmente se usa. Varios sistemas de riego de gran precisión también están por venir; estos suministrarán agua a las plantas sólo cuando la necesitan. También hay una variedad de sistemas de riego por aspersión y microaspersión a pequeña escala mejorados y complementarios para aumentar la productividad de las áreas de secano, los cuales son muy prometedores para los pequeños agricultores (Borlaug & Dowsell, 2002).

Debido al uso de las nuevas tecnologías y los múltiples avances en conocimientos técnicos y científicos, el Manual Técnico del Departamento de Aguas debe ser actualizado, con el fin de diseñar y crear bienes y servicios que faciliten la adaptación al medio ambiente y satisfagan las necesidades esenciales de los requerimientos de aguas de una manera más integral.

1.2. Objetivo general

1. Determinar de los requerimientos de agua para diferentes cultivos de la zona norte Cartago.

1.3. Objetivos específicos

1. Evaluar las técnicas de cálculo para determinar los requerimientos de aguas que rigen en el proceso de desarrollo de los cultivos en la zona norte de Cartago.
2. Proponer nuevos requerimientos de agua para satisfacer las necesidades hídricas para el uso agrícola según los resultados de la evaluación.
3. Demostrar los beneficios económicos, ambientales y sociales de contar con una base de requerimientos de agua para irrigación de cultivos en la zona norte actualizada.

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 El riego en los cultivos¹

Para un correcto desarrollo de los cultivos de forma que se consiga obtener de ellos una producción máxima, debe siempre procurarse que tengan satisfechas sus necesidades de agua. En los sistemas agrícolas de secano el agua es aportada sólo por la lluvia, que en climas húmedos puede satisfacer todas las necesidades de agua de los cultivos, sin embargo, en los secos es muy poco frecuente.

Con el riego se trata, por tanto, de completar las necesidades de agua de los cultivos aportando una cantidad extra a la que cae con la lluvia.

Los métodos de riego engloban las diferentes formas que existen de aplicar el agua al suelo. Han evolucionado notablemente con el tiempo, desde la ejecución del riego en las primeras civilizaciones basándose en la observación de las crecidas y bajadas del nivel del agua en los ríos y el manejo adecuado del agua y el suelo, hasta los riegos totalmente tecnificados, controlados y automatizados que aprovechan el conocimiento que existe en la actualidad de ciencias como la agronomía, hidráulica o la electrónica.

El uso de un método de riego u otro depende de numerosos factores, entre los que es preciso destacar los siguientes:

- La topografía del terreno y la forma de la parcela, es decir la pendiente, longitud y anchura, si existen caminos, acequias u otro tipo de elemento que pueda interferir en el riego y la posibilidad de que el agua pueda ser llevada hasta la parcela sin un coste excesivo.
- Las características físicas del suelo, en particular las relativas a su capacidad para almacenar el agua de riego que debe ser puesta a disposición de las raíces de las plantas.
- Tipo de cultivo, del que es especialmente necesario conocer sus requerimientos de agua para generar producciones máximas, así como su comportamiento en situaciones de falta de agua.
- La disponibilidad de agua, aspecto muy relevante en cuanto puede ser necesario programar los riegos no en función de las necesidades de agua del cultivo sino de la posibilidad de que exista agua suficiente para regar y el precio de la misma.

¹ Fernández, 2010. Manual de riego para agricultores.

- La calidad del agua de riego, lo que puede ser determinante en la elección tanto del método de riego como de ciertos componentes de la instalación.
- La disponibilidad de mano de obra, con la que se garantice la ejecución de todas las labores precisas durante el desarrollo del cultivo, en particular las referidas al riego.
- El coste de la instalación de cada sistema de riego en particular, tanto en lo que se refiere a inversión inicial como en la ejecución de los riegos y mantenimiento del sistema.
- El efecto en el medio ambiente, especialmente en el uso eficiente del agua, la calidad de las aguas de escorrentía y la erosión del suelo.

En la actualidad son tres los métodos de riego utilizados como forma de aplicar el agua al suelo: riego por superficie, riego por aspersion y riego localizado. A escala mundial, el 95% de los más de 220 millones de hectáreas de regadío se riegan por superficie, sin embargo, esta cifra disminuye en los países desarrollados situándose entre el 60 y el 80%. Esto se debe fundamentalmente a que aspersion y localizado son métodos que necesitan tecnología y material más avanzados que el riego por superficie.

Teniendo en cuenta estos aspectos, además de otros factores, se elige un método de riego. A su vez, dentro de cada método existen bastantes tipos de sistemas o variantes cuya elección se realizará teniendo en cuenta aspectos más particulares que están más relacionados con la forma de manejar el suelo y el cultivo y con técnicas concretas de aplicación del riego.

Para que un determinado cultivo evolucione de forma óptima y utilice a la vez el agua eficientemente, es necesario conocer de manera bastante precisa cuál es el consumo de agua en cada fase del desarrollo y así saber qué cantidad aplicar con un riego. En la evapotranspiración las relaciones que existan entre el suelo, el agua, la planta y el clima, son esenciales para manejar un determinado sistema de riego ya que de ellas depende el movimiento del agua en el suelo, en la planta y cómo de esta pasa a la atmósfera.

“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” (FAO, 2006, p.1).

2.1.1. Grado de aplicación

Santos, Valero y Buendía (2010) proponen que el grado de aplicación es la cantidad de agua por unidad de tiempo que debe aplicarse al suelo, ya sea por el método

de aspersión o por cualquier otro sistema. La estructura del suelo generalmente se define como la condición según la cual las partículas del suelo se unen y se arreglan entre sí, disponiéndose en agregados de distintas formas, tamaños y grados de cementación.

La unidad de pluviometría corresponde (mm/h) con el fin de realizar una comparación directa con la infiltración básica y definir fácilmente el estado en el que se encuentra el suelo. Es tan demostrativa que puede revelar si un suelo sufre encharcamiento o aún mejor, escorrentía en la superficie del suelo.

Santos et al. (2010) expresan que la modificación que sufren los distribuidores de agua ya sea el aumento del tamaño de las boquillas o la presión, o la disminución de espaciamientos entre aspersores, aumentan las tasas de aplicación, por ello los fabricantes generan generación necesaria para el cálculo, no tomando en cuenta, condiciones de viento.

Fernández (2010) afirma que la tasa de aplicación deberá ser menor a la infiltración básica para evitar acumulación de agua en la superficie, las pérdidas por escorrentía y la erosión del suelo.

2.1.2. Peso específico aparente

Este parámetro está influenciado por la estructura del suelo, es decir por la disposición de las partículas del suelo textura y la compactación, está relacionado con la capacidad que tienen los suelos de retener agua. Cuando el suelo se encuentra muy compacto, los valores del peso específico aumentan porque hay reducción del espacio poroso, lo valioso de este dato es que se utiliza para definir la lámina de agua que se demanda.

2.2. Evaporación²

“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,

² FAO, 2006. Evapotranspiración del cultivo Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos.

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. A medida que ocurre la evaporación, el aire circundante se satura gradualmente y el proceso se vuelve cada vez más lento hasta detenerse completamente si el aire mojado circundante no se transfiere a la atmósfera o en otras palabras no se retira de alrededor de la hoja. El reemplazo del aire saturado por un aire más seco depende grandemente de la velocidad del viento. Por lo tanto, la radiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y la velocidad del viento son parámetros climatológicos a considerar al evaluar el proceso de la evaporación.

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. Lluvias frecuentes, el riego y el ascenso capilar en un suelo con manto freático poco profundo, mantienen mojada la superficie del suelo. En zonas en las que el suelo es capaz de proveer agua con velocidad suficiente para satisfacer la demanda de la evaporación del suelo, este proceso está determinado solamente por las condiciones meteorológicas. Sin embargo, en casos en que el intervalo entre la lluvia y el riego es grande y la capacidad del suelo de conducir la humedad cerca de la superficie es reducida, el contenido en agua en los horizontes superiores disminuye y la superficie del suelo se seca. Bajo estas circunstancias, la disponibilidad limitada del agua ejerce un control sobre la evaporación del suelo. En ausencia de cualquier fuente de reabastecimiento de agua a la superficie del suelo, la evaporación disminuye rápidamente y puede cesar casi totalmente en un corto lapso de tiempo.

2.3. 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 los 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. El agua, junto con algunos nutrientes, es absorbida por las raíces y transportada a través de la planta. La vaporización ocurre dentro de la hoja, en los espacios intercelulares, y el intercambio del vapor con la atmósfera es controlado por la abertura estomática. Casi toda el agua absorbida del suelo se pierde por transpiración y solamente

una pequeña fracción se convierte en parte de los tejidos vegetales. 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. El contenido de agua del suelo y la capacidad del suelo de conducir el agua a las raíces también determinan la tasa de transpiración, así como la salinidad del suelo y del agua de riego. La tasa de transpiración también es influenciada por las características del cultivo, el medio donde se produce y las prácticas de cultivo. Diversas clases de plantas pueden tener diversas tasas de transpiración. Por otra parte, no solamente el tipo de cultivo, sino también su estado de desarrollo, el medio donde se produce y su manejo, deben ser considerados al evaluar la transpiración (FAO, 2006,p.3).

2.4. Evapotranspiración (ET)³

Como se menciona 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 dosel del cultivo proyecta más y más sombra sobre el suelo. En las primeras etapas del cultivo, el agua se pierde principalmente por evaporación directa del suelo, pero con el desarrollo del cultivo y finalmente cuando este cubre totalmente el suelo, la transpiración se convierte en el proceso principal. En la Figura 1 se presenta la evapotranspiración dividida en sus dos componentes (evaporación y transpiración) en relación con el área foliar por unidad de superficie de suelo debajo de él. 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 de 90% de la ET ocurre como transpiración.

³ FAO, 2006. Evapotranspiración del cultivo Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos.

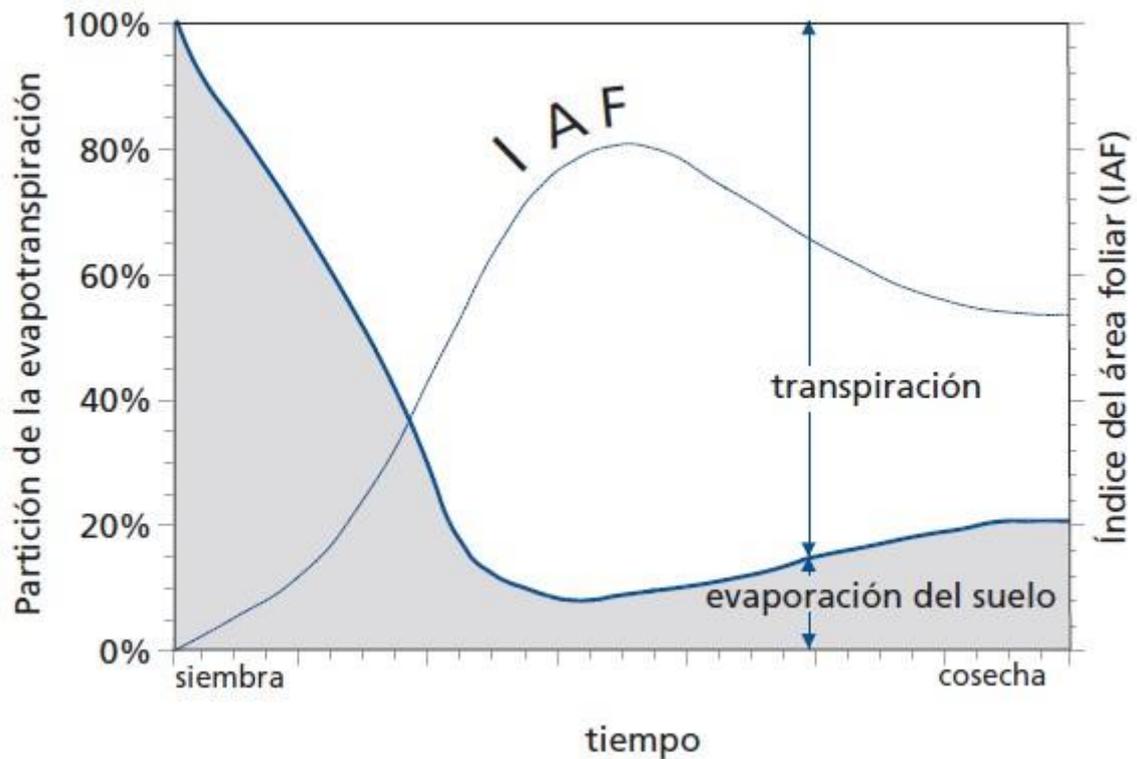


Figura 1. Repartición de la evapotranspiración en evaporación y transpiración durante el periodo de crecimiento de un cultivo anual.

Fuente: FAO, 2006

Unidades de evapotranspiración

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 completo período 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/día. La altura del agua se puede también expresar en términos de la energía recibida por unidad de área. Esto último se refiere a la energía o al calor requerido para vaporizar el agua. Esta energía, conocida como el calor latente de vaporización (λ), es una función de la temperatura del agua. Por ejemplo, a 20°C, λ tiene un valor de cerca de 2,45 MJ/Kg. Es decir 2,45 MJ son necesarios para vaporizar 1 kilogramo o 0,001 m³ de agua. Por lo tanto, un aporte de energía de 2,45 MJ por m² puede vaporizar 0,001 m o 1 milímetro de agua, y entonces 1 milímetro de agua es equivalente a 2,45 MJ/m², así como lo muestra

el Cuadro 1, referenciando los factores de conversión. La evapotranspiración expresada en unidades del MJ/m²/día se representa por λ ET, el flujo del calor latente.

Cuadro 1. Factores de conversión para expresar evapotranspiración.

	Altura de agua	volumen por unidad de área		energía por unidad de área *
	mm día ⁻¹	m ³ ha ⁻¹ día ⁻¹	l s ⁻¹ ha ⁻¹	MJ m ⁻² día ⁻¹
1 mm día ⁻¹	1	10	0,116	2,45
1 m ³ ha ⁻¹ día ⁻¹	0,1	1	0,012	0,245
1 l s ⁻¹ ha ⁻¹	8,640	86,40	1	21,17
1 MJ m ⁻² día ⁻¹	0,408	4,082	0,047	1

* Para el agua con una densidad de 1 000 kilogramos m⁻³ y a 20 °C.

Fuente: FAO, 2006

Factores que afectan la evapotranspiración

El clima, las características del cultivo, el manejo y el medio de desarrollo son factores que afectan la evaporación y la transpiración. Los conceptos relacionados a la ET y representados en la Figura 2 como por ejemplo las variables climática, factores del cultivo entre otros intervienen como conceptos de evapotranspiración.

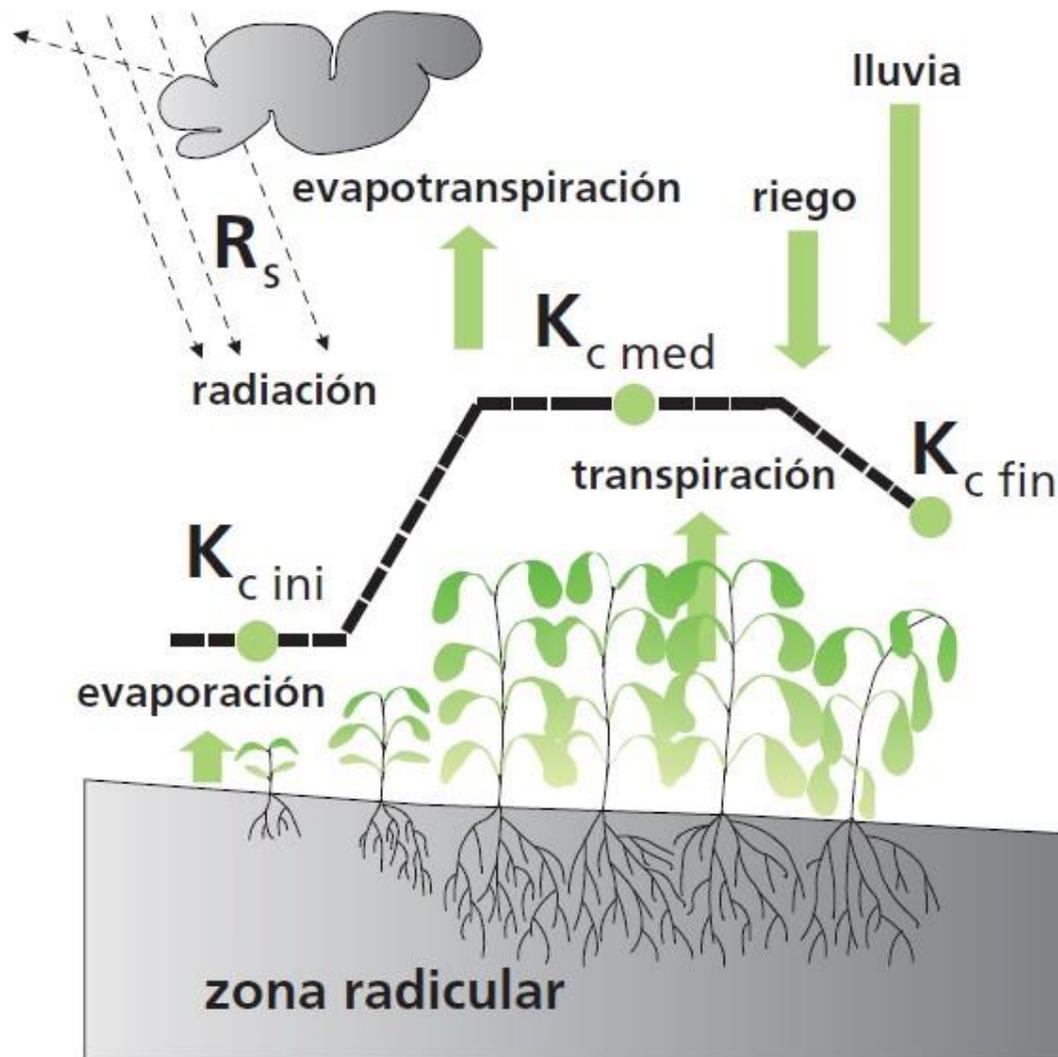


Figura 2. Factores que afectan la evapotranspiración con referencia a conceptos relacionados de ET.

Fuente: FAO, 2006

Variables climáticas que afectan la evapotranspiración

Los principales parámetros climáticos que afectan la evapotranspiración son la radiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y la velocidad del viento. Se han desarrollado varios procedimientos para determinar la evaporación a partir de estos parámetros. La fuerza evaporativa de la atmósfera puede ser expresada por la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o). La evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o) representa la pérdida de agua de una superficie cultivada estándar.

Factores de cultivo que afectan la evapotranspiración

Como menciona FAO (2006,p.5) el tipo de cultivo, la variedad y la etapa de desarrollo deben ser considerados cuando se evalúa la evapotranspiración de cultivos que se desarrollan en áreas grandes y bien manejadas. Las diferencias en resistencia a la transpiración, la altura del cultivo, la rugosidad del cultivo, el reflejo, la cobertura del suelo y las características radiculares del cultivo dan lugar a diferentes niveles de ET en diversos tipos de cultivos aunque se encuentren bajo condiciones ambientales idénticas. La evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET_c) se refiere a la demanda evaporativa de la atmósfera sobre cultivos que crecen en áreas grandes bajo condiciones óptimas de agua en el suelo, con características adecuadas tanto de manejo como ambientales, y que alcanzan la producción potencial bajo las condiciones climáticas dadas.

Manejo y condiciones ambientales que afectan la evapotranspiración

Los factores tales como salinidad o baja fertilidad del suelo, uso limitado de fertilizantes, presencia de horizontes duros o impenetrables en el suelo, ausencia de control de enfermedades y de parásitos y el mal manejo del suelo pueden limitar el desarrollo del cultivo y reducir la evapotranspiración. Otros factores que se deben considerar al evaluar la ET son la cubierta del suelo, la densidad del cultivo y el contenido de agua del suelo. El efecto del contenido en agua en el suelo sobre la ET está determinado primeramente por la magnitud del déficit hídrico y por el tipo de suelo. Por otra parte, demasiada agua en el suelo dará lugar a la saturación de este lo cual puede dañar el sistema radicular de la planta y reducir su capacidad de extraer agua del suelo por la inhibición de la respiración.

Cuando se evalúa la tasa de ET, se debe considerar adicionalmente la gama de prácticas locales de manejo que actúan sobre los factores climáticos y de cultivo afectando el proceso de ET. Las prácticas del cultivo y el método de riego pueden alterar el microclima, afectar las características del cultivo o afectar la capacidad de absorción de agua del suelo y la superficie de cultivo como por ejemplo una barrera rompevientos reduce la velocidad del viento y disminuye la tasa de ET de la zona situada directamente después de la barrera. El efecto puede ser significativo especialmente en condiciones ventosas, calientes y secas aunque la evapotranspiración de los mismos árboles podría compensar cualquier reducción en el campo. La evaporación del suelo de un huerto con

árboles jóvenes, en donde los árboles están ampliamente espaciados, puede ser reducida usando un sistema de riego por goteo bien diseñado. Los goteros aplican el agua directamente al suelo cerca de los árboles, de modo en que dejan la mayor parte de la superficie del suelo seca, limitando las pérdidas por evaporación. El uso de coberturas, especialmente cuando el cultivo es pequeño, es otra manera de reducir substancialmente la evaporación del suelo. Los anti-transpirantes, tales como estimulantes del cierre de los estomas, o los materiales que favorecen el reflejo del suelo, reducen las pérdidas de agua del cultivo y por lo tanto la tasa de transpiración. Cuando las condiciones de campo difieran de las condiciones estándar, son necesarios factores de corrección para ajustar ET_c (ET_c aj). Estos factores de ajuste reflejan el efecto del ambiente y del manejo cultural de las condiciones de campo diferentes a la estandar.

Como se muestra en la Figura 3, los factores que se toman para encontrar la evatraspiracion real del cultivo en base al cultivo de referencia y al factor del cultivo referenciado bajo condiciones de buenas practicas agricolas. ETo 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 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.

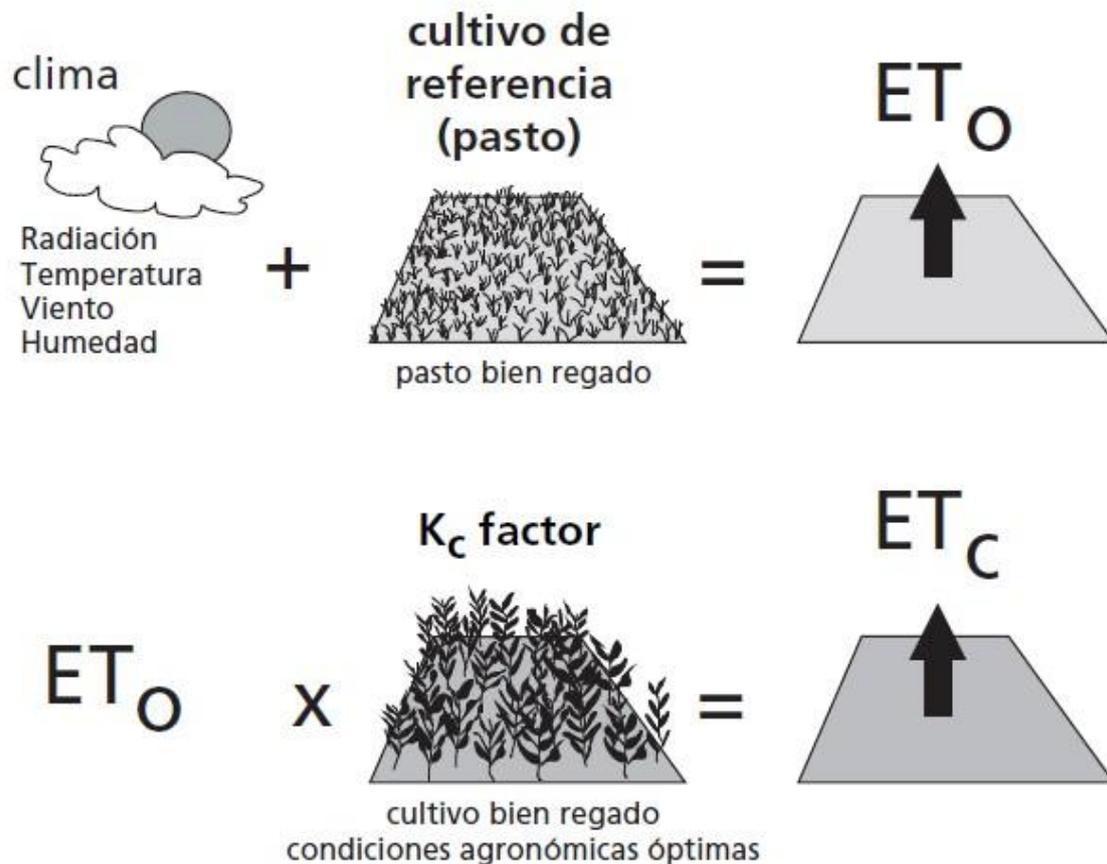


Figura 3. Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o), bajo condiciones estándar (ET_c).

Fuente: FAO, 2006

2.4.1. Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o)

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 ET_o . 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. El concepto de evapotranspiración de referencia se introdujo para estudiar la demanda de evapotranspiración de la atmósfera, independientemente del tipo y desarrollo del cultivo, y de las prácticas de manejo. Debido a que hay una abundante disponibilidad de agua en la superficie de evapotranspiración de referencia, los factores del suelo no tienen ningún efecto sobre ET . El relacionar la ET a una superficie específica permite contar con una referencia a la cual se puede relacionar la ET de otras superficies. Además, se elimina la necesidad de definir un nivel de ET para cada cultivo y periodo de crecimiento. Se pueden comparar valores medidos o estimados de ET_o en diferentes localidades o en diferentes

épocas del año, debido a que se hace referencia a ET bajo la misma superficie de referencia. Los únicos factores que afectan ETo son los parámetros climáticos. Por lo tanto, ETo es también un parámetro climático que puede ser calculado a partir de datos meteorológicos. 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. Además, se han desarrollado procedimientos para la estimación de los parámetros climáticos faltantes. El Cuadro 2 muestra rangos típicos de valores de ETo en diferentes regiones agroclimáticas. Estos valores pretenden familiarizar los rangos, sin recomendar su aplicación directa.

Cuadro 2. ETo promedio para diferentes regiones agroclimáticas en mm/día.

Regiones	Temperatura promedio durante el día (°C)		
	Templada ~10°C	Moderada 20°C	Caliente > 30°C
Trópicos y subtrópicos			
- húmedos y subhúmedos	2 - 3	3 - 5	5 - 7
- áridos y semiáridos	2 - 4	4 - 6	6 - 8
Regiones templadas			
- húmedas y subhúmedas	1 - 2	2 - 4	4 - 7
- áridas y semiáridas	1 - 3	4 - 7	6 - 9

Fuente: FAO, 2006

2.4.2. 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 reinantes. La cantidad de agua requerida para compensar la pérdida por evapotranspiración del cultivo y se define como necesidades de agua del cultivo. A pesar de que los valores de la evapotranspiración del cultivo y de las necesidades de agua del cultivo son idénticos, sus definiciones conceptuales son

diferentes. Las necesidades de agua del cultivo se refieren a la cantidad de agua que necesita ser proporcionada al cultivo como riego o precipitación, mientras que la evapotranspiración del cultivo se refiere a la cantidad de agua perdida a través de la evapotranspiración. La necesidad de riego básicamente representa la diferencia entre la necesidad de agua del cultivo y la precipitación efectiva.

El requerimiento de agua de riego también incluye agua adicional para el lavado de sales, y para compensar la falta de uniformidad en la aplicación de agua. La evapotranspiración del cultivo puede ser calculada a partir de datos climáticos e integrando directamente los factores de la resistencia del cultivo, el albedo y la resistencia del aire en el enfoque de Penman-Monteith. Debido a que todavía existe una considerable falta de información para los diferentes cultivos, el método de Penman-Monteith se utiliza solo para la estimación de la tasa de evapotranspiración del cultivo estándar de referencia (ET_o). La relación ET_c/ET_o que puede ser determinada experimentalmente para diferentes cultivos y es conocida como Coeficiente del Cultivo (K_c), y se utiliza para relacionar ET_c a ET_o de manera que $ET_c = K_c \times ET_o$. Las diferencias en la anatomía de las hojas, características de los estomas, las propiedades aerodinámicas, e incluso el albedo, ocasionan que la evapotranspiración del cultivo difiera de la evapotranspiración del cultivo de referencia bajo las mismas condiciones climáticas. Debido a variaciones en las características del cultivo durante los diferentes periodos de crecimiento, para un determinado cultivo, K_c cambia desde la siembra hasta la cosecha.

Determinación de la evapotranspiración

Medición de ET

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.

Métodos de balance de energía y microclimáticos para determinar evapotranspiración.

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:

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

Donde

R_n es la radiación neta

H es el calor sensible

G es el flujo de calor del suelo

λET es el flujo de calor latente

Los distintos términos pueden ser positivos o negativos. Cuando R_n es positiva, proporciona energía a la superficie y cuando G , λET y H son positivos retiran energía de la superficie, tal como lo muestra la Figura 4 en la variación diurna de los componentes del balance de energía sobre una superficie transpirante con suficiente cantidad de agua en un día soleado.

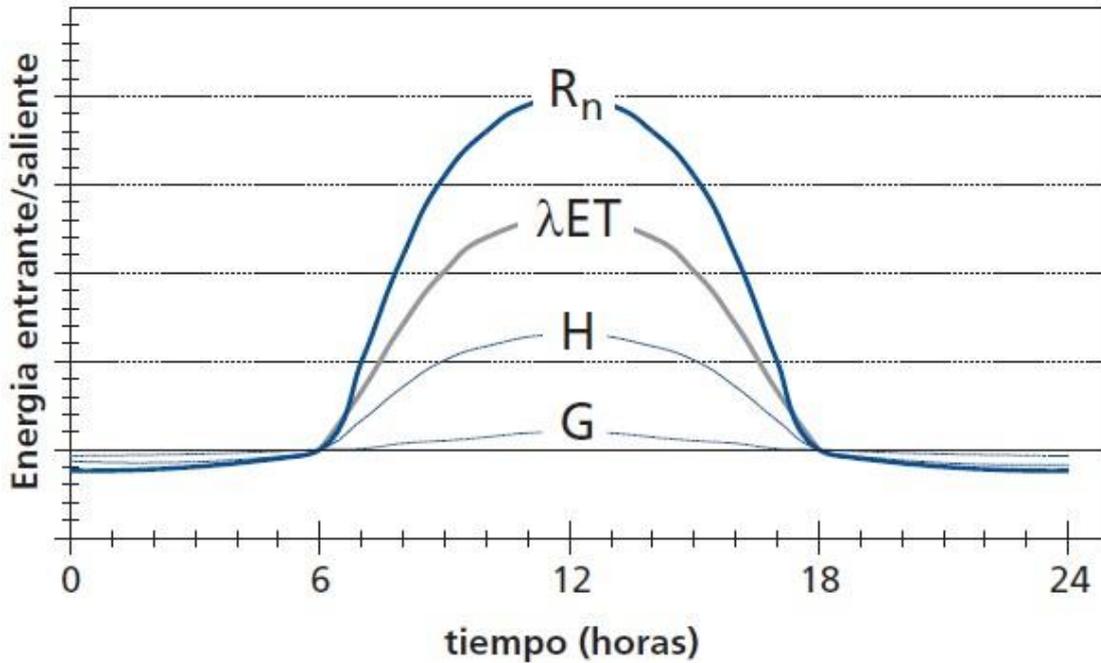


Figura 4. Representación esquemática de la variación diurna de los componentes del balance de energía sobre una superficie transpirante con suficiente cantidad de agua en un día soleado.

Fuente: FAO, 2006

En la ecuación de balance de energía, solamente se consideran flujos verticales y se ignora la tasa neta de energía que se transfiere horizontalmente por advección. Por lo tanto, la ecuación se aplica solamente a superficies grandes y extensas de vegetación homogénea. La ecuación está restringida a cuatro componentes: R_n , λET , H y G. No se consideran otros términos de energía, tal como el calor almacenado y liberado de la planta, o la energía utilizada en actividades metabólicas. Estos términos solo utilizan una pequeña fracción de la radiación solar diaria y pueden ser considerados despreciables cuando se comparan con los otros cuatro componentes. El flujo de calor latente (λET) 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. Por el contrario, la medición del calor sensible (H) es compleja y sus valores no pueden obtenerse fácilmente. La determinación de H incluye mediciones precisas de los gradientes de temperatura por encima de la superficie.

Otro método para estimar la evapotranspiración es el método de transferencia de masa. Este enfoque considera los movimientos verticales de pequeñas cantidades de aire

(remolinos) por encima de una amplia superficie homogénea. Los remolinos transportan la materia (vapor de agua) y la energía (calor, momentum) desde y hacia la superficie de evapotranspiración. Asumiendo condiciones de equilibrio y que los coeficientes de transferencia de los remolinos para el vapor de agua son proporcionales a aquellos para el calor y el momentum, la evapotranspiración puede ser calculada a partir de los gradientes verticales de la temperatura del aire y vapor de agua usando la relación de Bowen. Otros métodos de observaciones directas utilizan gradientes de velocidad del viento y de vapor de agua. Estos métodos y otros como el de la covarianza de remolinos, requieren medidas precisas de la presión de vapor, y de la temperatura del aire o velocidad del viento a diferentes niveles sobre la superficie. Por lo tanto, su aplicación se restringe principalmente, a situaciones de investigación.

Balance de agua en el suelo para determinar evapotranspiración

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 (Figura 5). 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 (FSin) o fuera (FSout) de la zona radicular (ΔFS). Sin embargo, excepto bajo condiciones de pendientes pronunciadas, normalmente los valores de FSin y FSout 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 (ΔSW) a lo largo de un periodo de tiempo: Balance de agua en el suelo.

Cantidad de riego o lluvia = evaporación + transpiración + escurrimiento + percolación

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

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.

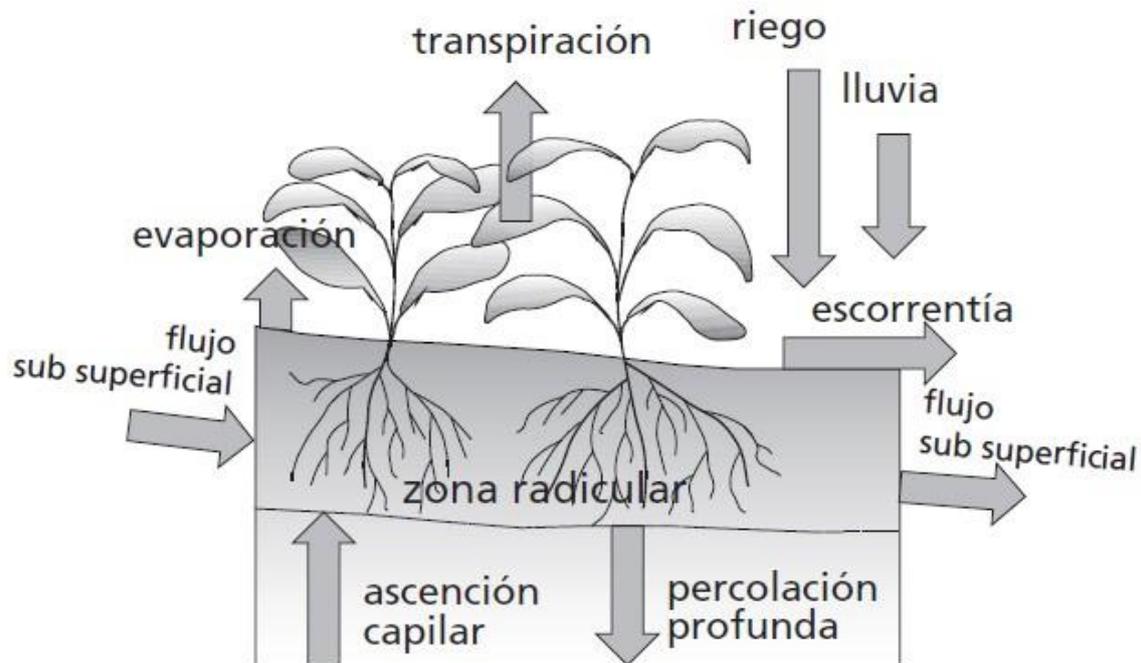


Figura 5. Balance de agua en el suelo de la zona radicular.

Fuente: FAO, 2006

2.4.3. Lisímetros para medir la evapotranspiración⁴

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.

Los lisímetros son dispositivos que contienen un volumen de suelo, aislado hidrológicamente del suelo circundante, en el cual resulta posible controlar y medir los diferentes términos que intervienen en el balance hídrico del suelo. Puppo et al (como se citó en Padilla, 2016).

Un requerimiento de los lisímetros es que la vegetación dentro e inmediatamente fuera del lisímetro sea idéntica, es decir que tenga la misma altura e índice de área foliar. Los lisímetros 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

⁴ Padilla, 2016. Coeficiente de cultivo para el césped americano (*Stenotaphrum secundatum*)

de masa y en períodos pequeños tales como de una hora que pueden ser considerados como buenas medidas.

Como los lisímetros son difíciles de manejar y caros de construir y además su operación y mantenimiento requieren de especial cuidado (Figura 6), su uso se restringe normalmente a trabajos investigativos.



Figura 6. Momento de instalación en campo de un lisímetro.

Fuente: Campeche, 2002

2.4.4. Estación meteorológica

Es un conjunto de instrumentos destinados a medir y registrar regularmente diversas variables meteorológicas. Estos datos se utilizan tanto en la elaboración de pronósticos meteorológicos a partir de modelos numéricos como estudios climáticos. World Meteorological Organization (WMO, 2008).

Para la medición de las variables meteorológicas la estación debe estar compuesta de los siguientes dispositivos:

Termómetro, termógrafo, barómetro, pluviómetro, psicómetro, piranómetro, heliógrafo, anemómetro, veleta y nefobasímetro, cada uno de los dispositivos se unen y forman una estación meteorológica, entre más variables cuantifique más efectivos son los resultados.

Este instrumento permite pronosticar plagas, planificar tareas, trabajar con agricultura de precisión, realizar los cálculos de evapotranspiración y balance de agua para los cultivos, con el fin de programar riego con la mayor eficiencia, el dato

suministrado por este tipo de estación tiene la capacidad de realizar predicciones meteorológicas a partir de modernos, numéricos que hacen que las labores en campo puedan ser más precisas, con ellos aumenta los rendimientos de los cultivos.

2.4.4. Evapotranspiración calculada con datos meteorológicos

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 (FAO, 2006, p.13).

Numerosos investigadores han analizado el funcionamiento de los varios métodos del cálculo para diversas localidades. Como resultado de una Consulta de expertos llevada a cabo en mayo de 1990, el método FAO Penman-Monteith se recomienda actualmente como el método estándar para la definición y el cálculo de la evapotranspiration de referencia, E_{To} . La ET del cultivo bajo condiciones estándar se determina utilizando los coeficientes de cultivo (K_c) que relacionan la E_{Tc} con la E_{To} . La ET de superficies cultivadas bajo condiciones no estándar se ajusta mediante un coeficiente de estrés hídrico (K_s) o modificando el coeficiente de cultivo (FAO, 2006, p.13).

2.5. Evapotranspiración del cultivo de referencia (E_{To})⁵

La evapotranspiración de la superficie de referencia, denominada evapotranspiración del cultivo de referencia o evapotranspiración de referencia y simbolizada como E_{To} . La superficie de referencia es un cultivo hipotético de pasto, con una altura asumida de 0,12 m, con una resistencia superficial fija de 70 s/m y un albedo de 0,23. La superficie de referencia es muy similar a una superficie extensa de pasto verde, bien regada, de altura uniforme, creciendo activamente y dando sombra totalmente al suelo. La resistencia superficial fija de 70 s/m implica un suelo moderadamente seco que recibe riego con una frecuencia semanal aproximadamente.

La E_{To} se puede calcular utilizando datos meteorológicos. Como resultado de una consulta de expertos realizada en mayo de 1990, el método de FAO Penman-Monteith ahora se recomienda como el único método estándar para la definición y el cálculo de la

⁵ FAO, 2006. Evapotranspiración del cultivo Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos.

evapotranspiración de referencia. El método de FAO Penman-Monteith requiere datos de radiación, temperatura del aire, humedad atmosférica y velocidad del viento. Los procedimientos de cálculo necesarios para derivar estos parámetros climáticos de los datos meteorológicos, así como, para estimar las variables faltantes requeridas para calcular ETo. Los procedimientos de cálculo permiten la determinación de ETo con el método de FAO Penman-Monteith bajo casi todas las circunstancias, incluyendo los casos en que falten datos climáticos.

La ETo también se puede estimar también con la evaporación del tanque evaporímetro Clase A. Los tanques han probado su valor práctico y han sido utilizados con éxito para estimar ETo observando la evaporación del tanque y aplicando coeficientes empíricos para relacionar la evaporación del tanque con la ETo. Sin embargo, para la aplicación de este método se deben tomar ciertas precauciones y debe estar garantizado un buen manejo del tanque. La evaporación de una superficie libre de agua proporciona un índice del efecto integrado de la radiación, la temperatura del aire, la humedad del aire y del viento en la evapotranspiración. Sin embargo, diferencias entre la superficie de agua y las superficies cultivadas producen diferencias significativas entre la pérdida de agua de una superficie libre de agua y una superficie cultivada. El tanque ha probado su valor práctico y ha sido utilizado con éxito para estimar la evapotranspiración de referencia observando la pérdida por evaporación de una superficie de agua y aplicando coeficientes empíricos para relacionar la evaporación del tanque con ETo.

Necesidad de un método estándar para determinar Eto

Durante los últimos 50 años se han desarrollado una gran cantidad de métodos más o menos empíricos por numerosos científicos y especialistas en todo el mundo, con el fin de estimar la evapotranspiración a partir de diferentes variables climáticas. A menudo las ecuaciones estaban sujetas a rigurosas calibraciones locales pero demostraron tener limitada validez global. Por otra parte, probar la exactitud de los métodos bajo nuevas condiciones es laborioso y necesita mucho tiempo y dinero. A pesar de ello, los datos de evapotranspiración son necesarios con antelación al planeamiento de proyectos o para programar calendarios de riego. Para cubrir esta necesidad, algunas guías fueron desarrolladas y publicadas en el Documento N° 24 de la Serie FAO Riego y Drenaje «Necesidades de agua de los cultivos». En este documento, y con el fin de adecuarse a

las necesidades de usuarios con diversa disponibilidad de datos, se presentaron cuatro métodos para calcular la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o): Blaney-Criddle, radiación, Penman modificado y el método del tanque de evaporación. El método de Penman modificado se consideró que ofrecía los mejores resultados con el mínimo error posible con relación a un cultivo de referencia (pasto). También se esperaba que el método del tanque de evaporación ofreciese estimaciones aceptables, en función de la localización del tanque. El método de la radiación fue sugerido para las áreas donde los datos climáticos disponibles incluían la medición de las horas de insolación, la nubosidad o la radiación, pero no la velocidad del viento ni la humedad atmosférica. Finalmente, la publicación propuso el uso del método de Blaney-Criddle para las áreas donde los datos climáticos disponibles incluían solamente datos de temperatura del aire.

Los métodos climáticos citados fueron calibrados para obtener valores mensuales o decadiarios y no así para cálculos diarios u horarios de ET_o. Por ejemplo, el método de Blaney-Criddle fue recomendado para períodos de un mes o mayores. El método del tanque de evaporación fue sugerido para ser aplicado a períodos de diez días o más. Lamentablemente, los usuarios no siempre han respetado estas condiciones y con frecuencia los cálculos se han hecho para periodos diarios de tiempo. Por otra parte, los avances en la investigación y la valoración más precisa del uso de agua del cultivo han revelado debilidades en las metodologías propuestas. Numerosos investigadores analizaron el funcionamiento de los cuatro métodos para diversas localidades. Aunque los resultados de tales análisis podrían haber sido influenciados por el sitio, las condiciones de medida o por el sesgo en la recopilación de los datos climáticos, llegó a ser evidente que los métodos propuestos no se comportan de la misma manera en diversas zonas del mundo. Frecuentemente se encontraron desviaciones entre los valores calculados y los observados sobrepasando los rangos indicados por la FAO. Se encontró que el método de Penman modificado con frecuencia sobrestimaba la ET_o, por niveles de hasta 20 por ciento para condiciones evaporativas bajas. Las otras ecuaciones recomendadas mostraron una correlación variable con la evapotranspiración del cultivo estándar de referencia (pasto).

Para evaluar la validez de éstos y de otros procedimientos de estimación bajo diversas condiciones climáticas, se emprendió un importante estudio bajo auspicio del Comité de Requerimientos de Agua para Riego de la Sociedad Estadounidense de Ingenieros Civiles (ASCE por sus siglas en ingles). El estudio de ASCE analizaba el comportamiento de 20

diversos métodos, usando procedimientos detallados para determinar la validez de los resultados de estos métodos comparados con una base de datos cuidadosamente obtenida de lisímetros en 11 localidades, bajo condiciones climáticas variables. El estudio probó y demostró claramente la amplia variabilidad de resultados de los métodos aplicados bajo diversas condiciones climáticas. En un estudio paralelo solicitado por la Comunidad Europea, un consorcio de institutos de investigación europeos evaluó el funcionamiento de los varios métodos de cálculo de evapotranspiración con datos de diversos estudios lisimétricos en Europa. Los estudios confirmaron la sobrestimación de la ETo por parte del método de Penman modificado presentado en el estudio No 24 de la Serie FAO Riego y Drenaje y el resultado variable de los diversos métodos dependiendo de su adaptación a las condiciones locales. Los resultados de los estudios comparativos pueden ser resumidos como sigue:

- Los métodos basados en la ecuación de Penman podrían requerir una calibración local de la función del viento para obtener resultados satisfactorios.
- Los métodos de la radiación demostraron buenos resultados en climas húmedos donde el término aerodinámico es relativamente pequeño, pero su funcionamiento en condiciones áridas fue errático y con tendencia a subestimar la evapotranspiración.
- Los métodos basados en la temperatura del aire al ser empíricos, requieren cuidadosas calibraciones locales para alcanzar resultados satisfactorios. Una excepción posible es el método de Hargreaves (1985) que ha producido resultados razonables de ETo con cierta validez global.
- Los métodos basados en la evaporación del tanque reflejan las limitaciones de estimar la evapotranspiración del cultivo basándose en datos de evaporación libre del agua. Estos métodos son susceptibles a las condiciones microclimáticas bajo las cuales los tanques están funcionando y al rigor de mantenimiento de la estación. Muchas veces su funcionamiento se ha presentado errático.
- La fórmula de Penman-Monteith ha sido reportada por ambos equipos de investigación (ASCE y Europeo) como aquella que produce resultados relativamente exactos y consistentes tanto en climas áridos como en húmedos.

El análisis del funcionamiento y la dispersión de resultados obtenidos por varios métodos de cálculo revela la necesidad de formular un único método estándar para el cómputo de la ETo. Dado el mejor comportamiento y consistencia del método FAO

Penman-Monteith en el ámbito global, este es el único que se recomienda como método estándar de cálculo. Esto se debe a que existe una elevada probabilidad de que este método prediga correctamente los valores de ETo en una amplia gama geográfica y climática y cuenta con previsiones para su uso en situaciones de falta de datos. En este sentido, no se aconseja el uso de las antiguas ecuaciones de FAO o de otra ecuación para el cálculo de ETo (FAO,2006, p.18).

2.5.1. Formulación de la ecuación de Penman-Monteith

Ecuación de Penman-Monteith⁶

En 1948, Penman combinó el balance energético con el método de la transferencia de masa y derivó una ecuación para calcular la evaporación de una superficie abierta de agua a partir de datos climáticos estándar de horas sol, temperatura, humedad atmosférica y velocidad de viento. Este método conocido como combinado fue desarrollado posteriormente por muchos investigadores y ampliado a las superficies cultivadas por medio de la introducción de factores de resistencia. La nomenclatura sobre resistencia distingue entre la resistencia aerodinámica y la resistencia superficial (Figura 7). Los parámetros de la resistencia superficial se combinan a menudo en un solo valor, el de la resistencia superficial total que se combina en serie con la resistencia aerodinámica. La resistencia superficial, (r_s), describe la resistencia al flujo de vapor a través de los estomas, del área total de la hoja y de la superficie del suelo. La resistencia aerodinámica, (r_a), describe la resistencia en la parte inmediatamente superior a la vegetación e incluye a la fricción que sufre el aire al fluir sobre superficies vegetativas. Aunque el proceso del intercambio en la vegetación es demasiado complejo para ser descrito completamente por los dos factores de resistencia mencionados, con esta estimación se obtienen buenas correlaciones entre los valores medidos y calculados de evapotranspiración, especialmente en el caso de una superficie de pasto uniforme (referencia).

⁶ FAO,2006. Evapotranspiración del cultivo Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos.

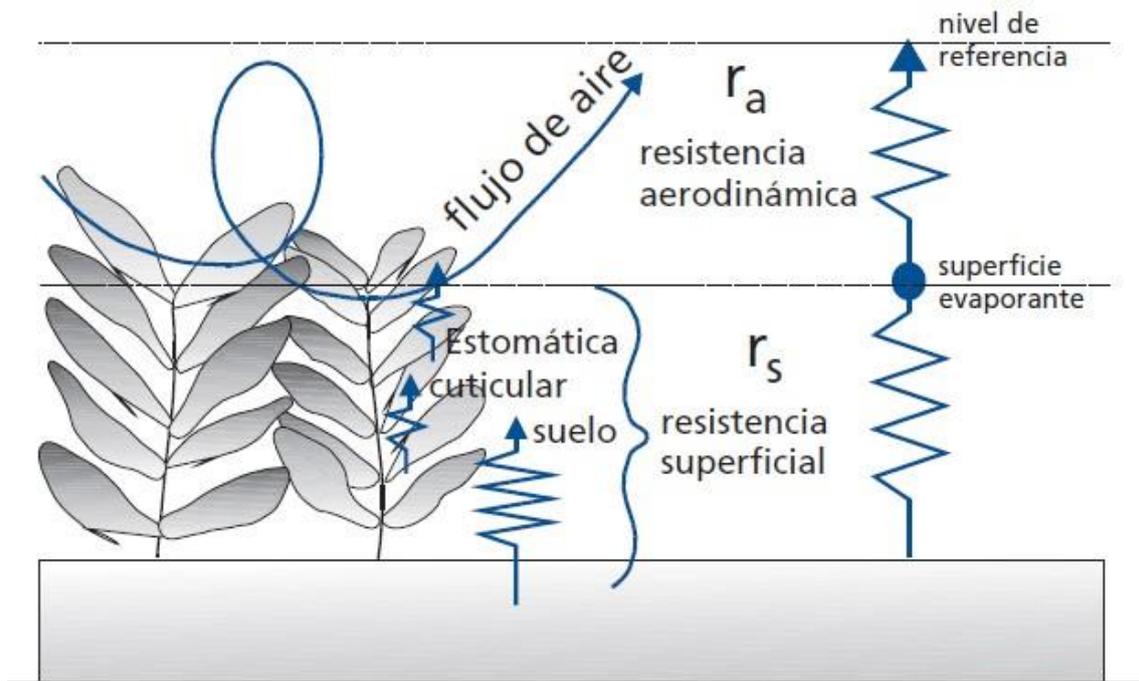


Figura 7. Representación simplificada de la resistencia superficial (total) y de la resistencia aerodinámica al flujo de vapor de agua.

Fuente: FAO, 2006

La ecuación combinada de Penman-Monteith es:

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

Donde:

R_n ; la radiación neta

G ; el flujo del calor en el suelo, $(e_s - e_a)$ representa el déficit de presión de vapor del aire

ρ_a ; la densidad media del aire a presión constante,

c_p ; el calor específico del aire, Δ representa la pendiente de la curva de presión de vapor de saturación,

γ ; la constante psicrométrica,

r_s y r_a ; resistencias superficiales (total) y aerodinámica.

El enfoque de Penman-Monteith incluye todos los parámetros que gobiernan el intercambio de energía y el flujo de calor (evapotranspiración) de grandes extensiones uniformes de vegetación. La mayoría de los parámetros son medidos o pueden calcularse fácilmente de datos meteorológicos. La ecuación se puede utilizar para el cálculo directo de la evapotranspiración de cualquier cultivo pues las resistencias superficial y aerodinámica son específicas para cada cultivo.

Resistencia aerodinámica (r_a)

La transferencia de calor y de vapor de agua desde la superficie evaporante hacia el aire que se encuentra sobre la planta, está determinada por la resistencia aerodinámica:

$$R_a = \frac{\ln \left[\frac{z_m - d}{z_{om}} \right] \ln \left[\frac{z_h - d}{z_{oh}} \right]}{k^2 u_z}$$

donde

r_a ; resistencia aerodinámica [s/m],

z_m ; altura de medición del viento [m],

z_h ; altura de medición de humedad [m],

d ; plano de altura de desplazamiento cero [m],

z_{om} ; longitud de la rugosidad que gobierna la transferencia del momentum [m],

z_{oh} ; longitud de la rugosidad que gobierna la transferencia de calor y vapor de agua [m],

k ; constante de Von Karman, 0,41 [-],

u_z ; velocidad del viento a la altura z [m/s].

La Ecuación de la resistencia aerodinámica se restringe a condiciones neutras de estabilidad, es decir, condiciones en las que la temperatura, la presión atmosférica, y la distribución de la velocidad del viento siguen condiciones casi adiabáticas (sin intercambio de calor). El uso de la ecuación para períodos cortos (horarios o menores) podría requerir la inclusión de correcciones de estabilidad. Sin embargo, al predecir ETo en la superficie de referencia bien regada, el intercambio de calor es pequeño, y por lo tanto normalmente no se requiere la corrección para la estabilidad. Muchos estudios han

explorado la naturaleza del régimen del viento en el dosel de las plantas. Las alturas de desplazamiento cero y las longitudes de rugosidad tienen que ser consideradas cuando la superficie está cubierta por vegetación. Los factores dependen de la altura del cultivo y de su arquitectura. En este sentido, se han desarrollado varias ecuaciones empíricas para la estimación de d , z_{om} y de z_{oh} .

Resistencia superficial (total) (r_s)

La resistencia superficial ‘total’ describe la resistencia al flujo de vapor a través del cultivo transpirante y de la superficie evaporante de suelo. En casos en que la vegetación no cubra totalmente el suelo, el factor de resistencia debe incluir de hecho los efectos de la evaporación de la superficie del suelo. Si el cultivo no está transpirando de manera potencial, la resistencia depende también del estado del agua dentro de la planta. Una aproximación aceptable de una relación muy compleja de la resistencia superficial de una vegetación densa que cubre completamente el suelo es

$$r_s = \frac{r_1}{IAF_{activo}}$$

donde

r_s resistencia superficial (total) [s/m],

r_1 resistencia estomática total de una hoja bien iluminada [s/m],

IAF_{activo} índice activo de área foliar [m^2 (área de la hoja) / m^2 (superficie del suelo)].

El Índice de Área Foliar (IAF), es una cantidad adimensional, que presenta el área de la hoja (lado superior solamente) por unidad de área de suelo debajo de ella. Se expresa como m^2 área foliar por m^2 de área de suelo. El IAF_{activo} es el índice del área foliar que contribuye activamente a la transferencia superficial de calor y de vapor. Esto es generalmente la parte superior, iluminada de un cultivo denso. Los valores de IAF para los diferentes cultivos difieren grandemente, pero valores de 3 a 5 son comunes para muchos cultivos desarrollados. Para un cultivo dado, el IAF cambia a lo largo del periodo de crecimiento y alcanza normalmente su máximo valor antes o en la floración (Figura 8). El IAF también depende de la densidad de las plantas y de la variedad del cultivo.

La resistencia estomática (total), r_1 , es la resistencia media de una hoja individual. Esta resistencia es específica para cada cultivo y difiere entre variedades del cultivo y su manejo. Usualmente aumenta con la edad del cultivo y llega al máximo cuando éste madura. Hay, sin embargo, una carencia de información sólida sobre los cambios de r_1 en un cierto plazo para los diferentes cultivos. La información disponible en la literatura sobre conductancia o resistencia estomática se orienta a menudo hacia estudios fisiológicos o ecofisiológicos. La resistencia estomática, r_1 , está influenciada por el clima y por la disponibilidad de agua, sin embargo, estas influencias varían de un cultivo a otro y diversas variedades pueden ser afectadas diferentemente. La resistencia aumenta cuando el cultivo se encuentra limitado de agua y la disponibilidad de agua en el suelo limita la evapotranspiración del cultivo. Algunos estudios indican que la resistencia estomática está influenciada en algún grado por la radiación, temperatura, y el déficit de presión del vapor.

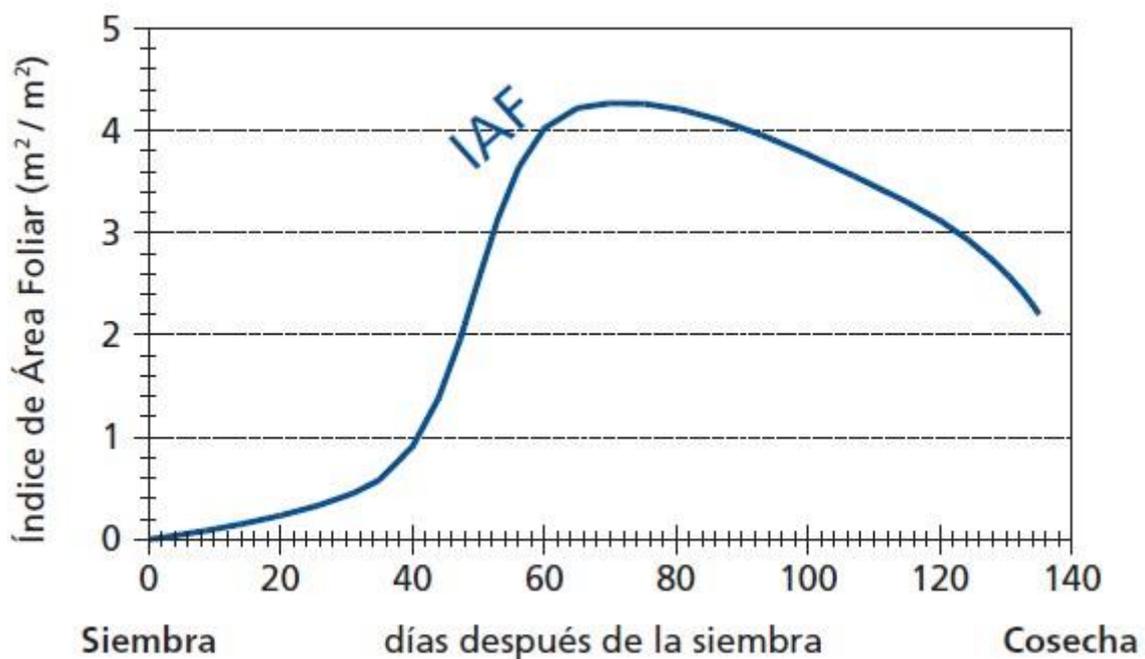


Figura 8. Representación típica de la variación del Índice de Área Foliar (IAF) activo (verde) a lo largo del periodo de crecimiento de un cultivo de maíz.

Fuente: FAO, 2006

Superficie de referencia

El concepto de una superficie de referencia fue introducido con el fin de obviar la necesidad de definir los parámetros únicos de evaporación para cada cultivo y etapa de

crecimiento. Los valores de evapotranspiración de los diferentes cultivos se relacionan con la evapotranspiración de la superficie de referencia (ET_o) por medio de los coeficientes de cultivo. Anteriormente, una superficie libre de agua fue propuesta como superficie de referencia. Sin embargo, las diferencias aerodinámicas, el control de la vegetación y las características de la radiación presentan una fuerte limitación al relacionar la ET con la medición de la evaporación libre del agua. En cambio, el relacionar ET_o con un cultivo específico tiene la ventaja de incorporar los procesos biológicos y físicos implicados en la ET de superficies cultivadas.

El pasto, así como la alfalfa, es un cultivo muy bien estudiado con respecto a sus características aerodinámicas y superficiales y es aceptado ampliamente como superficie de referencia. Debido a que la resistencia a la difusión del vapor depende fuertemente de la altura del dosel del cultivo, de la cobertura de suelo, del índice de área foliar y de las condiciones de humedad del suelo, las características del cultivo de referencia deben ser bien definidas y fijadas. Los cambios en altura del cultivo dan lugar a variaciones en la rugosidad y el índice de área foliar. Consecuentemente, las resistencias del cultivo y aerodinámica variarán notablemente con el tiempo. Por otra parte, el estrés hídrico y el grado de cobertura del suelo también tienen un efecto en las resistencias y en el albedo. Para evitar los problemas que conllevan los trabajos de calibración local que requerirían exigentes y costosos estudios, se ha seleccionado un cultivo hipotético de referencia. Las dificultades con un cultivo de referencia real resultan del hecho de que la variedad y la morfología de la hierba pueden afectar perceptiblemente la tasa evapotranspiratoria, especialmente durante los periodos de máximo consumo de agua. Grandes diferencias pueden identificarse entre pastos de zonas calientes con pastos de zonas templadas. El pasto de zonas templadas tiene un grado más bajo de control estomático y por lo tanto índices más altos de evapotranspiración. También podría tropezarse con el problema de la dificultad de cultivar pastos habituados a zonas templadas en algunos climas tropicales áridos.

La consulta a expertos de la FAO sobre la revisión de las metodologías recomendadas por la FAO para el cálculo de los requerimientos de agua de los cultivos presentó la siguiente definición inequívoca para la superficie de referencia: “Un cultivo hipotético de referencia con una altura asumida de 0,12 m, una resistencia superficial fija de 70 s/m y un albedo de 0,23”, como se muestra en la Figura 9.

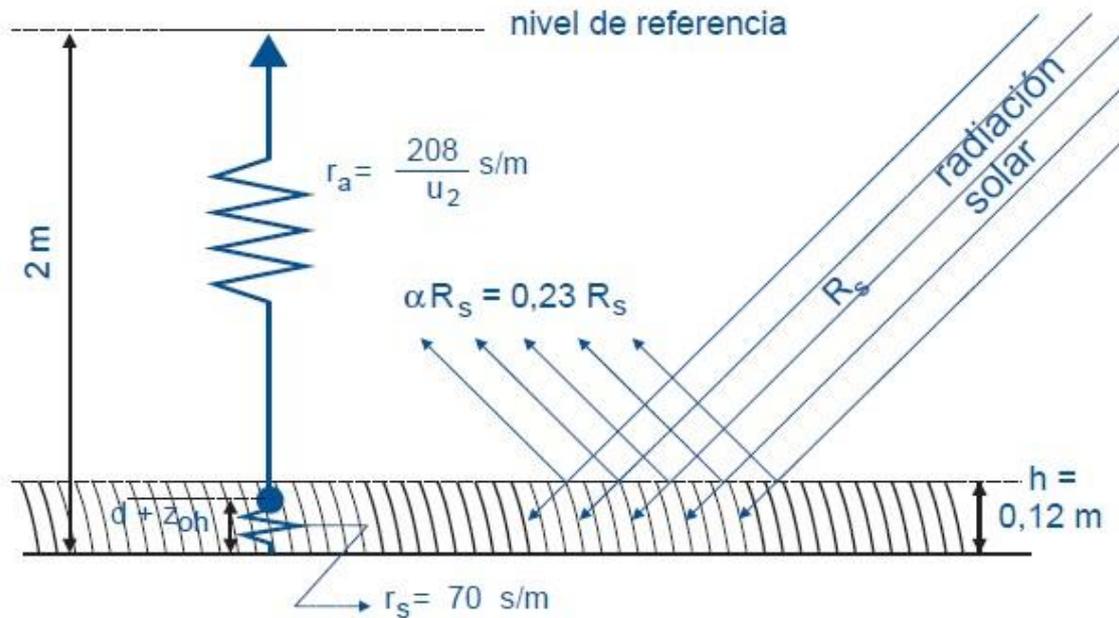


Figura 9. Características del cultivo hipotético de referencia.

Fuente: FAO, 2006

La superficie de referencia se asemeja a una superficie extensa de pasto verde de altura uniforme, creciendo activamente, sombreando totalmente la tierra y con un adecuado aporte de agua. El requisito de que la superficie de pasto debe ser extensa y uniforme, resulta de asumir que todos los flujos de aire son ascendentes. El método de FAO Penman-Monteith fue seleccionado como el método por el cual la evapotranspiración de esta superficie de referencia (ETo) puede ser inequívocamente determinada y con el cual se obtienen valores consistentes de ETo en todas las regiones y climas.

2.5.2. Ecuación de FAO Penman-Monteith⁷

Un panel de expertos e investigadores en riego fue organizado por la FAO en mayo de 1990, en colaboración con la Comisión Internacional para el Riego y Drenaje y con la Organización Meteorológica Mundial, con el fin de revisar las metodologías previamente propuestas por la FAO para el cálculo de los requerimientos de agua de los cultivos y para elaborar recomendaciones sobre la revisión y la actualización de procedimientos a este respecto. El panel de expertos recomendó la adopción del método

⁷ FAO, 2006. Evapotranspiración del cultivo Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos.

combinado de Penman-Monteith como nuevo método estandarizado para el cálculo de la evapotranspiración de la referencia y aconsejó sobre los procedimientos para el cálculo de los varios parámetros que la fórmula incluye. El método FAO Penman-Monteith fue desarrollado haciendo uso de la definición del cultivo de referencia como un cultivo hipotético con una altura asumida de 0,12 m, con una resistencia superficial de 70 s/m y un albedo de 0,23 y que representa a la evapotranspiración de una superficie extensa de pasto verde de altura uniforme, creciendo activamente y adecuadamente regado. El método reduce las imprecisiones del método anterior de FAO Penman y produce globalmente valores más consistentes con datos reales de uso de agua de diversos cultivos.

El método de FAO Penman-Monteith para estimar E_{To} , puede ser derivado de la ecuación original de Penman-Monteith y las ecuaciones de la resistencia aerodinámica y superficial:

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

donde:

E_{To} ; evapotranspiración de referencia (mm/día)

R_n ; radiación neta en la superficie del cultivo (MJ/ m²/ día)

R_a ; radiación extraterrestre (mm/día)

G ; flujo del calor de suelo (MJ/m²/ día)

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

u_2 ; velocidad del viento a 2 m de altura (m/s)

e_s ; presión de vapor de saturación (kPa)

e_a ; presión real de vapor (kPa)

$e_s - e_a$ déficit de presión de vapor (kPa)

Δ ; pendiente de la curva de presión de vapor (kPa/°C)

γ ; constante psicométrica (kPa/°C)

La evapotranspiración de referencia (ET_o) provee un estándar de comparación mediante el cual:

- se puede comparar la evapotranspiración en diversos períodos del año o en otras regiones;
- se puede relacionar la evapotranspiración de otros cultivos.

La ecuación utiliza datos climáticos de radiación solar, temperatura del aire, humedad y velocidad del viento. Para asegurar la precisión del cálculo, los datos climáticos deben ser medidos o ser convertidos a 2 m de altura, sobre una superficie extensa de pasto verde, cubriendo completamente el suelo y sin limitaciones de agua. No se puede esperar que ninguna ecuación formulada para el cálculo de la evapotranspiración y basada en datos climáticos, determine la evapotranspiración perfectamente, bajo diferentes situaciones climáticas específicas. Esto debido principalmente a la simplificación en la formulación y los errores en la recopilación de los datos climáticos. Es probable que instrumentos de precisión, bajo condiciones ambientales y biológicas completamente controladas, demuestren que la ecuación de FAO Penman-Monteith se desvía ocasionalmente de mediciones reales de la ET_o del pasto. Sin embargo, el panel de expertos acordó utilizar la definición hipotética del cultivo de referencia sobre el que se basa la ecuación FAO Penman-Monteith como un valor de comparación homogeneizado de tal manera que los datos de diferentes zonas del mundo sean comparables entre sí.

En caso de que se realicen comparaciones de la ecuación FAO Penman-Monteith con mediciones directas de ET_o, es importante que la ecuación completa de Penman-Monteith y las fórmulas asociadas para el cálculo de r_a y r_s se consideren de tal manera que se tomen en cuenta las variaciones en ET debidas a cambios en la altura del pasto evaluado. Las variaciones en la altura del pasto pueden producir cambios significativos del área foliar, d y z_{om} y el consecuente valor medido de ET_o con relación al valor calculado. Cuando se evalúan los resultados, debe considerarse también que los factores ambientales y de manejo local, tales como la frecuencia de riego, también afectan las observaciones de ET_o.

La ecuación de FAO Penman-Monteith es una representación clara, precisa y simple de los factores físicos y fisiológicos que gobiernan el proceso de la evapotranspiración. Usando la definición de E_{To} sobre la que se basa la ecuación FAO Penman-Monteith, se pueden determinar los coeficientes del cultivo relacionando la evapotranspiración medida del cultivo (E_{Tc}) con la E_{To} calculada, es decir: $K_c = E_{Tc}/E_{To}$. Tomando como base el concepto de coeficiente de cultivo, las diferencias del dosel del cultivo y la resistencia aerodinámica con relación al cultivo hipotético de referencia se consideran dentro del coeficiente de cultivo. El factor K_c representa el resumen de las diferencias físicas y fisiológicas entre los cultivos y la definición de cultivo de referencia. (FAO, 2006, p.25)

Datos para el método FAO Penman-Monteith

Para llevar adelante cálculos diarios, semanales, de diez días o mensuales de E_{To} , además de la localización del sitio, la ecuación FAO Penman-Monteith requiere datos de temperatura del aire, humedad atmosférica, radiación y velocidad del viento. Es importante verificar las unidades en las cuales se encuentran los datos climáticos las cuales deben ser unidades estándar.

Localización

La altura sobre el nivel del mar (m) de la zona para la que se determina la E_{To} y su latitud (grados norte o sur) deben ser especificados. Estos datos son necesarios para ajustar algunos parámetros climáticos al valor medio local de la presión atmosférica (función de la elevación del sitio sobre nivel del mar) y para calcular la radiación extraterrestre (R_a) y, en algunos casos, la duración máxima de la insolación (N). En los procedimientos del cálculo para R_a y N , la latitud se expresa en radianes (grados decimales $\pi/180$). Un valor positivo se utiliza para el hemisferio norte y un valor negativo para el hemisferio sur.

Temperatura

Para la aplicación de la fórmula FAO Penman-Monteith, se requiere información de temperatura diaria (promedio) máxima y mínima en grados centígrados ($^{\circ}C$). En los casos en que solamente se tenga disponibilidad de temperaturas medias diarias, el cálculo de E_{To} todavía es válido, pero se podría esperar una cierta subestimación de E_{To} debido a la relación no-lineal de la presión de vapor de saturación en relación con la temperatura (Figura 11). El uso de la temperatura media del aire en lugar de la temperatura máxima y

mínima tiene como resultado una presión de saturación más baja (e_s), y por lo tanto un déficit de presión de vapor también más bajo ($e_s - e_a$), resultante en una estimación más baja de la evapotranspiración de referencia.

Humedad

El valor de la presión real (promedio) diaria de vapor, (e_a), en kilopascales (kPa) se requiere como dato de entrada para la aplicación de la ecuación FAO Penman-Monteith. En caso de que los valores de presión real de vapor no estén disponibles, estos pueden ser derivados de la humedad relativa máxima y mínima (%), de los datos psicrométricos (temperaturas de bulbo seco y mojado en °C) o de la temperatura del punto de rocío (°C).

Radiación

La radiación neta diaria (promedio) está expresada en megajoules por metro cuadrado por día ($\text{MJ}/\text{m}^2/\text{día}$). Estos datos no están disponibles comúnmente en forma directa, pero pueden derivarse de la radiación de onda corta (promedio) medida con un piranómetro o de la duración real diaria (promedio) del sol brillante (horas por día) medida con el heliógrafo.

Viento

Para la aplicación de la ecuación FAO Penman-Monteith se requiere contar con la velocidad del viento (promedio) diaria en metros por segundo (m/s) medida a 2 m de altura sobre el nivel del suelo. Es importante verificar la altura a la cual se mide la velocidad del viento, pues velocidades del viento medidas a diversas alturas sobre la superficie del suelo presentan con seguridad valores diferentes. En caso de no contar con datos de velocidad de viento a 2 m de altura, el procedimiento del cálculo para ajustar la velocidad del viento a la altura estándar de 2 m.

Derivación de la ecuación de FAO Penman-Monteith para el cultivo hipotético de referencia.

Según (FAO, 2006, p.27-28) teniendo una altura estandarizada para la velocidad del viento, la temperatura y las mediciones de humedad a 2 m (el $z_m = z_h = 2$ m) y la altura del cultivo $h = 0,12$ m, las resistencias aerodinámicas y superficial se convierten en:

$$r_a = 208/u_2 \text{ s/m, (la velocidad del viento } u_2 \text{ a 2 m de altura)}$$

$$r_s = 70 \text{ s/m}$$

$$(1 + r_s/r_a) = (1 + 0,34 u_2)$$

Rn y G se constituyen en la energía disponible por unidad de área y se expresan en MJ/m₂/día. Para convertir las unidades de energía de radiación a alturas equivalentes de agua (mm), el calor latente de vaporización, λ, es utilizado los factores de conversión. Los valores de energía a alturas equivalentes del agua o viceversa se convertir según estas.

$$\text{Radiación (mm/día)} \cong (\text{Radiación MJ/m}^2/\text{día}) / 2,45 = 0,408 \text{ Radiación (MJ/m}^2/\text{día)}$$

Substituyendo c_p y reordenando.

$$c_p = \frac{\gamma \varepsilon \lambda}{P}$$

y considerando la ley de los gases ideales para ρ_a:

$$p_a = \frac{P}{T_{Kv}R}$$

donde T_{Kv} (temperatura virtual), se puede sustituir por:

$$T_{Kv} = 1,01(T + 273)$$

lo cual resulta en:

$$\frac{c_p p_a}{R_a} = \frac{\gamma \varepsilon \lambda}{1,01 (T + 273) R (208)} u_2$$

Donde

c_p; calor específico a presión constante [MJ/kg/°C],

ρ_a;densidad media del aire a presión constante [kg/m₃],

r_a; resistencia aerodinámica [s/m],

γ; constante psicrométrica [kPa/ °C],

ε; cociente del peso molecular del vapor agua /aire seco = 0,622,

λ; calor latente de vaporización [MJ/kg],

u₂; velocidad del viento a 2 m [m/s],

R; constante universal de los gases = 0,287 kJ/kg/ K,

T; temperatura del aire [°C],

P; presión atmosférica [kPa],

$$P = 86400 \frac{\gamma (0,622)\lambda}{1,01 (T + 273) (0,287) (208)} u_2$$

y las unidades están dadas (MJ m²/°C/día)

lo cual, cuando se divide por λ ($\lambda = 2,45$),

$$= \gamma \frac{900}{T + 273} u_2$$

y las unidades están dadas en (mm/°C/día)

Datos meteorológicos

Los métodos para calcular la evapotranspiración partiendo de datos meteorológicos requieren de varios parámetros climatológicos y físicos. Algunos de estos parámetros se miden directamente en estaciones meteorológicas. Otros parámetros se relacionan con los datos comúnmente medidos y se pueden derivar con la ayuda de relaciones directas o empíricas. Los datos meteorológicos se pueden expresar en diferentes unidades. Los factores de conversión entre varios sistemas de unidades y las unidades estándar del S.I. se deben tomar en cuenta. (FAO, 2006)

2.5.3. Factores meteorológicos que determinan la ETo⁸

Los factores meteorológicos que determinan la evapotranspiración son los componentes del tiempo que proporcionan energía para la vaporización y extraen vapor de agua de una superficie evaporante. Los principales parámetros meteorológicos que se deben considerar se presentan a continuación.

Radiación solar

El proceso de la evapotranspiración está determinado por la cantidad de energía disponible para evaporar el agua. La radiación solar es la más importante fuente de energía en el planeta y puede cambiar grandes cantidades de agua líquida en vapor de

⁸ FAO, 2006. Evapotranspiración del cultivo Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos.

agua. La cantidad potencial de radiación que puede llegar a una superficie evaporante viene determinada por su localización y época del año. Debido a las diferencias en la posición del planeta y a su movimiento alrededor del sol, esta cantidad potencial de radiación es diferente para cada latitud y para las diversas estaciones del año. La radiación solar real que alcanza la superficie evaporante depende de la turbidez de la atmósfera y de la presencia de nubes que reflejan y absorben cantidades importantes de radiación. Cuando se determina el efecto de la radiación solar en la evapotranspiración, se debe también considerar que no toda la energía disponible se utiliza para evaporar el agua. Parte de la energía solar se utiliza también para calentar la atmósfera y el suelo.

Temperatura del aire

La radiación solar absorbida por la atmósfera y el calor emitido por la tierra elevan la temperatura del aire. El calor sensible del aire circundante transfiere energía al cultivo y entonces ejerce un cierto control en la tasa de evapotranspiración. En un día soleado y cálido, la pérdida de agua por evapotranspiración será mayor que en un día nublado y fresco.

Humedad del aire

Mientras que el aporte de energía del sol y del aire circundante es la fuerza impulsora principal para la evaporación del agua, la diferencia entre la presión de vapor de agua en la superficie evapotranspirante y el aire circundante es el factor determinante para la remoción de vapor. Áreas bien regadas en regiones áridas secas y calientes, consumen grandes cantidades de agua debido a la gran disponibilidad de energía y al poder de extracción de vapor de la atmósfera. En cambio en regiones húmedas tropicales, a pesar de que el ingreso de energía es elevado, la alta humedad del aire reducirá la demanda de evapotranspiración. En este último caso, como el aire está ya cerca de saturación, puede absorber menos agua adicional y por lo tanto la tasa de evapotranspiración es más baja que en regiones áridas.

Velocidad del viento

El proceso de remoción de vapor depende en alto grado del viento y de la turbulencia del aire, los cuales transfieren grandes cantidades de aire hacia la superficie evaporante. Con la evaporación del agua, el aire sobre la superficie evaporante se satura gradualmente con vapor. Si este aire no se substituye continuamente por un aire más seco,

disminuye la intensidad de remoción de vapor de agua y la tasa de evapotranspiración disminuye. El efecto combinado de los factores climáticos que afectan la evapotranspiración se ilustra en la Figura 10 para dos condiciones climáticas diferentes. La demanda evapotranspiratoria es alta bajo condiciones de tiempo caliente y seco debido a la sequedad del aire y de la cantidad de energía disponible como radiación solar directa y calor latente. Bajo estas circunstancias, mucho vapor de agua puede ser almacenado en el aire mientras que el viento puede promover el transporte del agua permitiendo que se retire mayor cantidad de vapor de agua. Por otra parte, bajo condiciones atmosféricas húmedas, la alta humedad del aire y la presencia de nubes hacen que la tasa de evapotranspiración sea más baja. El aumento de la velocidad del viento para las dos condiciones climáticas presentadas, afecta la evapotranspiración en diferente forma como muestra la pendiente de las curvas en la Figura 10. Cuanto más seca esté la atmósfera, más grande será el efecto sobre la ET y mayor es la pendiente de la curva. Para las condiciones húmedas, el viento puede sustituir el aire saturado solamente por aire levemente menos saturado y así reducir la energía térmica. Por tanto, bajo condiciones húmedas la velocidad del viento afecta la evapotranspiración en un grado mucho menos importante que bajo climas áridos en los que variaciones pequeñas en la velocidad del viento pueden dar lugar a importantes variaciones en la evapotranspiración.

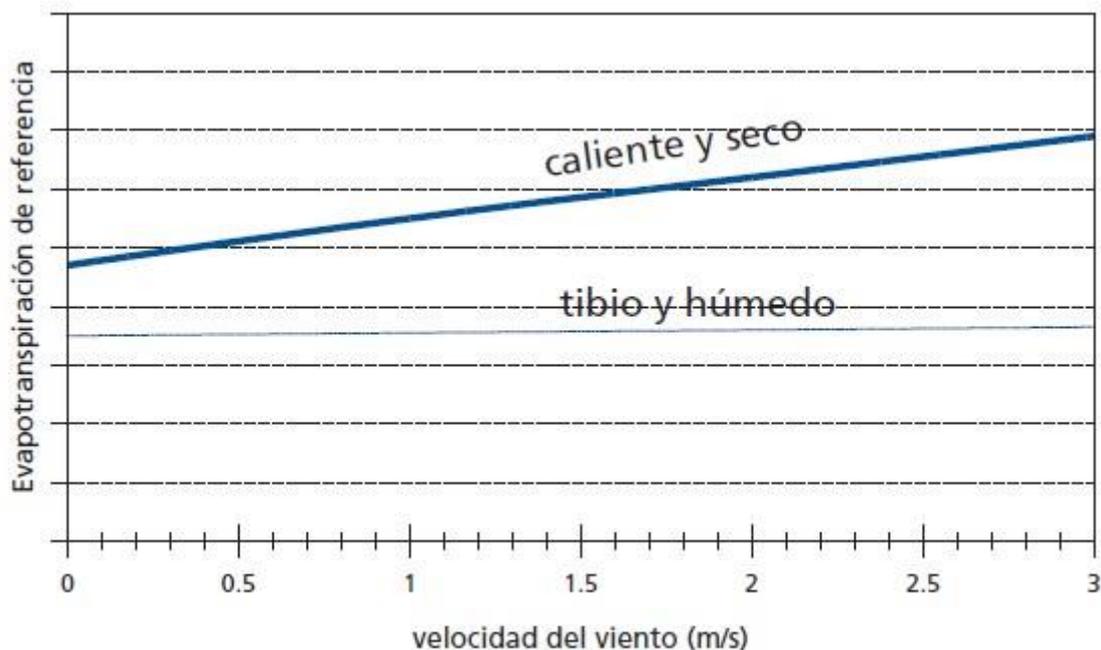


Figura 10. Ilustración del efecto de la velocidad del viento sobre la evapotranspiración en condiciones atmosféricas secas y caliente comparadas con condiciones húmedas y tibias.

Fuente: FAO, 2006

2.5.4. Parámetros atmosféricos para determinar ETo⁹

Se han desarrollado varias metodologías para determinar los parámetros climáticos. El efecto de los principales componentes del tiempo sobre la evapotranspiración se puede determinar con la ayuda de algunas ecuaciones. Algunas de las metodologías requieren parámetros que expresan una característica específica de la atmósfera. Antes de estudiar las cuatro variables principales del tiempo atmosférico se analizan algunos parámetros atmosféricos.

Presión atmosférica (P)

La presión atmosférica, P, es la presión ejercida por el peso de la atmósfera terrestre. La evaporación en altitudes elevadas ocurre en parte gracias a la baja presión atmosférica que se expresa con la constante psicrométrica. Este efecto es, sin embargo, pequeño y en los procedimientos del cálculo, el valor medio para una localidad es suficiente. Para calcular P puede emplearse una simplificación de la ley de los gases ideales, a una temperatura atmosférica estándar de 20°C:

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

donde

P; Presión atmosférica [kPa]

z; Elevación sobre el nivel del mar [m]

Calor latente de vaporización (λ)

El calor latente de vaporización, λ , expresa la energía requerida para cambiar una masa de unidad de agua líquida a vapor de agua bajo presión y temperatura constantes. El valor del calor latente de vaporización varía en función de la temperatura. Cuanto más elevada sea la temperatura, menos energía será requerida. Como λ varía levemente dentro de rangos de temperaturas normales, se considera un valor constante de 2,45 MJ/kg para la simplificación de la ecuación de FAO Penman-Monteith. Este valor corresponde al calor latente de vaporización a una temperatura del aire de alrededor de 20 °C.

Constante Psicrométrica (γ)

⁹ FAO, 2006. Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos.

La constante psicrométrica, γ , se calcula por:

$$\gamma = \frac{c_p P}{\varepsilon \lambda} = 0.665 * 10^{-3}$$

donde

γ ; constante psicrométrica [kPa/°C],

P; presión atmosférica [kPa],

λ ; calor latente de vaporización, 2,45 [MJ/kg],

c_p ; calor específico a presión constante, $1,013 \times 10^{-3}$ [MJ/kg/°C],

ε ; cociente del peso molecular de vapor de agua /aire seco = 0,622.

El calor específico es la cantidad de energía requerida para aumentar la temperatura de una unidad de masa de aire en 1° C a presión constante. Su valor depende de la composición del aire, fundamentalmente de su humedad. Para condiciones atmosféricas medias se puede utilizar el valor $c_p = 1,013 \times 10^{-3}$ MJ/kg/°C. Dado que se aplica un valor medio de presión atmosférica en cada localidad y la constante psicrométrica también se mantiene constante para cada localidad.

Temperatura del aire

La agrometeorología se ocupa de la temperatura del aire al nivel del cultivo. En estaciones meteorológicas convencionales y automáticas, la temperatura del aire se mide dentro de abrigos meteorológicos (pantallas de Stevenson o casetas ventiladas) a 2 m sobre la superficie, de acuerdo a los estándares de la Organización Meteorológica Mundial (OMM). Los abrigos meteorológicos se diseñan para proteger los instrumentos contra la exposición directa a la radiación solar. La construcción con persianas permite el movimiento libre del aire alrededor de los instrumentos. La temperatura del aire se mide con termómetros o termopares instalados en el abrigo. Los termómetros de mínima y máxima registran la temperatura mínima y máxima del aire en un período de 24 horas. Los termógrafos generan gráficos de las temperaturas instantáneas durante un día o una semana. Las estaciones meteorológicas electrónicas comúnmente hacen un muestreo de la temperatura del aire cada minuto y entregan promedios horarios además de los valores máximo y mínimo en 24 horas. Debido a la relación no lineal de la humedad con la temperatura, ambas incluidas en la ecuación FAO Penman-Monteith, la presión de vapor

para cierto período se debe calcular como la media entre la presión de vapor bajo la temperatura máxima y la presión de vapor bajo la temperatura mínima del aire en ese periodo. La temperatura máxima diaria del aire (T_{max}) y la temperatura mínima diaria del aire (T_{min}) son, respectivamente, la máxima y la mínima temperatura del aire observadas durante un período de 24 horas, desde la medianoche. T_{max} y T_{min} por períodos más largos tales como semanas, diez días o meses se obtienen dividiendo la suma de los valores diarios respectivos por el número de días del período. La temperatura media diaria del aire (T_{media}) se emplea en la ecuación FAO Penman-Monteith solamente para calcular la pendiente de la curva de la presión de saturación de vapor (Δ) y del impacto de la densidad media del aire (P_a) pues el efecto de las variaciones de temperatura en el valor de estos parámetros climáticos es pequeño. Para la estandarización, T_{media} para períodos de 24 horas se define como el promedio de las temperaturas máxima (T_{max}) y mínima diaria (T_{min}) en lugar del promedio de las mediciones horarias de temperatura.

$$T_{media} = \frac{T_{max} + T_{min}}{2}$$

La temperatura se expresa en grados centígrados ($^{\circ}C$) o Fahrenheit ($^{\circ}F$). En algunos procedimientos del cálculo, la temperatura se debe expresar en grados Kelvin (K), los que se obtienen agregando 273,16 a la temperatura expresada en grados centígrados (en la práctica $K = ^{\circ}C + 273,16$). La escala centígrada y la Kelvin tienen la misma escala de intervalo.

Humedad del aire

Conceptos

El contenido de agua del aire se puede expresar de diversas maneras. En agrometeorología, la presión de vapor, la temperatura del punto de condensación (punto de rocío) y la humedad relativa son expresiones comunes para indicar la humedad del aire.

Presión de vapor

El vapor de agua es un gas y su presión contribuye a la presión atmosférica total. La cantidad de vapor de agua en el aire se relaciona directamente con la presión parcial ejercida por ese vapor de agua en el aire y esta es por lo tanto una medida directa del contenido de vapor de agua del aire.

Bajo las unidades estándar del S.I., la presión ya no es expresada en centímetros de agua, milímetros de mercurio, bares, atmósferas, etc., sino en pascales (Pa). Mientras que un pascal se refiere a una fuerza relativamente pequeña (1 newton) aplicada a una superficie relativamente grande (1 m^2), múltiplos de esta unidad básica se utilizan frecuentemente la presión de vapor se expresa en los kilopascales ($\text{kPa} = 1\,000 \text{ Pa}$).

Cuando un volumen de aire se encuentra retenido sobre una superficie evaporante de agua, se alcanza un equilibrio entre las moléculas de agua que se incorporan al aire y las que vuelven a la fuente de agua. En ese momento, se considera que el aire está saturado puesto que no puede almacenar ninguna molécula de agua adicional. La presión correspondiente se llama presión de saturación de vapor ($e^{\circ}(T)$). La cantidad de moléculas de agua que se pueden almacenarse en el aire depende de la temperatura (T). Cuanto más alta es la temperatura del aire, más alta es la capacidad de almacenar vapor de agua y más alta es la presión de saturación de vapor (Figura 11).

En la Figura 11, la pendiente de la curva cambia exponencialmente con la temperatura. A temperaturas bajas, la pendiente es pequeña y varía levemente con el incremento de temperatura. A temperaturas elevadas, la pendiente es mayor y pequeños cambios de temperatura producen grandes cambios grandes en la pendiente. La pendiente de la curva de presión de vapor de saturación, Δ , es un parámetro importante para la descripción de la vaporización y se utiliza en algunas ecuaciones de cálculo de ETo con datos climáticos.

La presión real de vapor (e_a) es la presión de vapor ejercida por el vapor de agua en el aire. Cuando el aire no se satura, la presión real de vapor será más baja que la presión de vapor de saturación. La diferencia entre la presión de saturación y la presión real de vapor se llama déficit de presión de vapor o déficit de saturación y es un indicador preciso de la real capacidad evaporativa del aire.

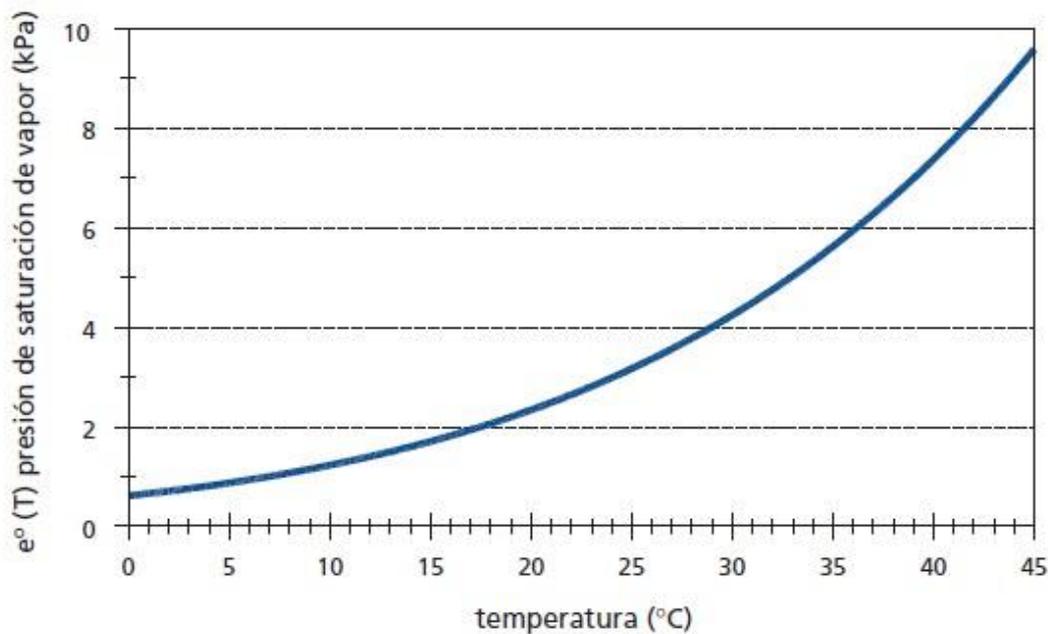


Figura 11. Presión de saturación de vapor (e°) en función de la temperatura: curva de e°(T).

Fuente: FAO, 2006

Humedad relativa

La humedad relativa (HR) expresa el grado de saturación del aire como el cociente entre la presión real de vapor (e_a) a una temperatura dada y la presión de saturación de vapor (e°(T)) a la misma temperatura (T):

$$HR = \frac{e_a}{e^\circ(T)} * 100$$

La humedad relativa es el cociente entre la cantidad de agua que el aire realmente contiene a una determinada temperatura y la cantidad que podría contener si estuviera saturado a la misma temperatura. Es adimensional y se expresa comúnmente como porcentaje. Aunque la presión real de vapor puede ser relativamente constante a lo largo del día, la humedad relativa fluctúa entre un máximo al amanecer y un mínimo a primeras horas de la tarde (Figura 12). La variación de la humedad relativa se produce porque la presión de saturación de vapor depende de la temperatura del aire. Como la temperatura del aire cambia durante el día, la humedad relativa también cambia substancialmente.

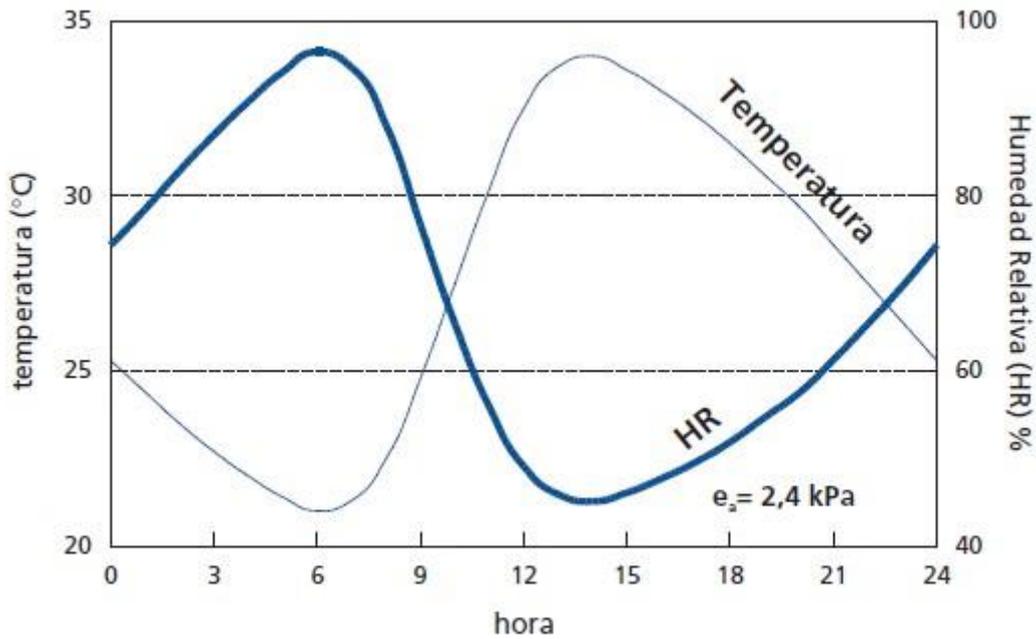


Figura 12. Variación de la humedad relativa durante un periodo de 24 horas para una presión real de vapor constante de 2,4 kPa.

Fuente: FAO, 2006

Medición de la presión de vapor

No es posible medir directamente la presión real de vapor. La presión de vapor se deriva comúnmente de la humedad relativa o de la temperatura del punto de rocío. La humedad relativa se mide directamente con el higrómetro. La medición se basa en las propiedades de algunos materiales como el cabello humano, que se contrae o extiende en respuesta a cambios en humedad del aire, o por medio de una placa eléctrica que es sensible a los cambios de humedad. La presión de vapor puede ser medida indirectamente con psicrómetros que miden la diferencia de temperatura entre dos termómetros, conocidos como termómetro de bulbo seco y termómetro de bulbo húmedo. El termómetro de bulbo seco mide la temperatura del aire. El bulbo del termómetro de bulbo húmedo se cubre con una muselina constantemente humedecida. La evaporación de agua de la muselina requiere energía, la que es tomada del bulbo del termómetro y por tanto enfría el bulbo y descende el valor registrado de temperatura. Cuanto más seco esté el aire, más grande es la evaporación y más grande es el descenso de temperatura. La diferencia entre las temperaturas de bulbo seco y del bulbo húmedo se conoce como la depresión del bulbo húmedo y es una medida de la humedad del aire.

La temperatura del punto de rocío se mide con instrumentos especiales. El principio de funcionamiento de estos instrumentos es el de bajar la temperatura del aire hasta que ocurra la formación del rocío. La temperatura correspondiente es la temperatura del punto de rocío. Los datos de humedad relativa y de la temperatura del punto de rocío comúnmente contienen notables errores de medición.

Presión media de vapor de la saturación (e_s)

La presión de saturación de vapor puede ser calculada en función de la temperatura del aire, pues depende de ella. La relación entre ambas variables se expresa como:

$$e^{\circ}(T) = 0,6108 * \exp \left[\frac{17,27 * T}{T + 237,3} \right]$$

Donde

$e^{\circ}(T)$: presión de saturación de vapor a la temperatura del aire, T [kPa]

T: temperatura del aire [°C]

exp [...]: 2,7183 (base del logaritmo natural) elevado a la potencia [...]

Debido a la característica no-lineal de la ecuación anterior, la presión media de saturación de vapor para un día, semana, década o mes, debe ser calculada como el promedio de la presión de saturación de vapor a la temperatura máxima media y la presión de saturación de vapor a la temperatura mínima media del aire para ese período como:

$$e_s = \frac{e^{\circ}(T_{max}) + e^{\circ}(T_{min})}{2}$$

El uso de la temperatura media del aire en lugar de las temperaturas mínima y máxima da lugar a subestimaciones de la presión media de saturación de vapor. El correspondiente déficit de presión de vapor (un parámetro que expresa la energía evaporante de la atmósfera) también será menor y el resultado será una cierta subestimación de la evapotranspiración del cultivo de referencia. Por lo tanto, es siempre recomendable el calcular la presión media de saturación de vapor como el promedio de la presión de saturación de vapor a la temperatura máxima y a la temperatura mínima del aire.

Pendiente de la curva de presión de saturación de vapor (Δ)

Para el cálculo de evapotranspiración, se requiere calcular la pendiente de la relación entre la presión de saturación de vapor y la temperatura, Δ . La pendiente de la curva a una temperatura dada se da por:

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

Para el cálculo de evapotranspiración, se requiere calcular la pendiente de la relación entre la presión de saturación

Donde:

Δ : pendiente de la curva de la presión de saturación de vapor a la temperatura del aire T [kPa /°C]

T: temperatura del aire [°C]

exp[...]: 2,7183 (base del logaritmo natural) elevado a la potencia [..]

La Presión real de vapor (e_a) se derivada de la temperatura del punto de rocío o de los de datos psicrométricos. (FAO, 2006)

Radiación

Conceptos

Radiación extraterrestre (R_a)

La radiación que choca a una superficie perpendicular a los rayos del sol en el extremo superior de la atmósfera terrestre se llama constante solar, y tiene un valor aproximado de 0,082 MJ/m²/min. La intensidad local de la radiación, sin embargo, está determinada por el ángulo entre la dirección de los rayos solares y la superficie de la atmósfera. Este ángulo cambia durante el día y es diferente en diversas latitudes y en diversas épocas del año. La radiación solar recibida en la parte superior de la atmósfera terrestre sobre una superficie horizontal se conoce como radiación (solar) extraterrestre, R_a . Si el sol se encuentra directamente encima de la cabeza, el ángulo de incidencia es cero y la radiación extraterrestre es 0,082 MJ/m²/min. Así como las estaciones cambian, la posición del sol, la longitud del día y la radiación extraterrestre también cambian. La radiación extraterrestre es entonces una función de la latitud, la época del año y la hora del día. Los valores de R_a a lo largo del año para diversas latitudes se presentan en la Figura 13.

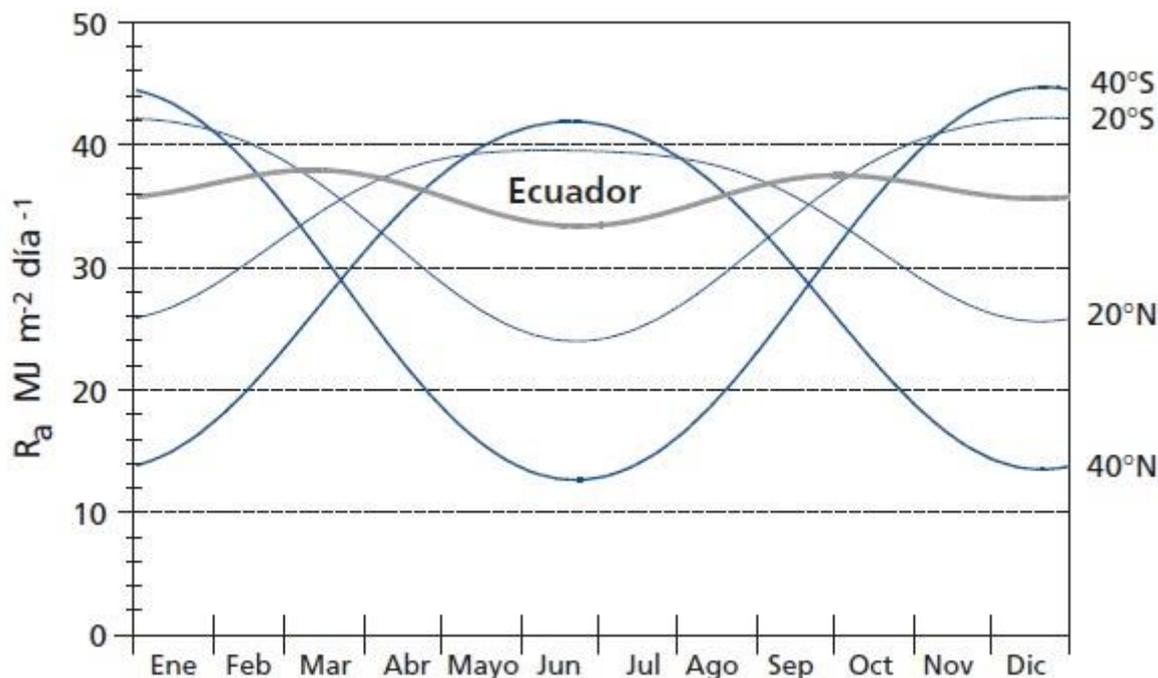


Figura 13. Variación anual de la radiación extraterrestre (Ra) en el ecuador, a los 20° y 40° de latitud norte y sur.

Fuente: FAO 2006

Radiación solar o de onda corta (R_s)

Cuando la radiación atraviesa la atmósfera para llegar a la superficie terrestre, parte de ella se dispersa, refleja o absorbe por los gases, las nubes y el polvo atmosféricos. La cantidad de radiación que llega a un plano horizontal en la superficie terrestre se conoce como radiación solar, R_s . Como el sol emite energía por medio de ondas electromagnéticas caracterizadas por longitudes de onda cortas, la radiación solar también se conoce como radiación de onda corta.

En un día despejado, R_s constituye aproximadamente el 75% de la radiación extraterrestre. En un día nublado este valor disminuye debido a que la radiación se dispersa en la atmósfera. Sin embargo, incluso con una nubosidad muy densa, cerca del 25% de la radiación extraterrestre puede todavía llegar a la superficie terrestre principalmente como radiación difusa de la atmósfera. La radiación solar también se conoce como radiación global, que es la suma de radiación directa de la onda corta del sol y de la radiación difusa resultante de todos los otros ángulos.

Radiación relativa de onda corta (R_s/R_{so})

La radiación relativa de onda corta es el cociente de la radiación solar (R_s) y de la radiación solar de un día despejado (R_{so}). R_s es la radiación solar que realmente llega a la superficie terrestre en un determinado período, mientras que R_{so} es la radiación solar que alcanzaría la misma superficie durante el mismo período si el cielo estuviera despejado.

La radiación relativa de onda corta es una manera de expresar la nubosidad de la atmósfera; cuanto más nublado este el cielo, más pequeño será su valor. El cociente varía aproximadamente entre 0,33 (nubosidad elevada) y 1 (cielo despejado).

Duración solar relativa (n/N)

La duración solar relativa es otro cociente que expresa la nubosidad atmosférica. Es el cociente de la duración real de la insolación, n , y la duración máxima posible de la insolación o de la luz del día N . Bajo condiciones de ausencia de nubosidad la duración real de la insolación es igual a la insolación máxima posible ($n = N$) y el cociente es uno, mientras que en días muy nublados n y el cociente puede tomar el valor de cero. En ausencia de datos directos de R_s , la duración solar relativa, n/N , se utiliza para derivar la radiación solar de la radiación extraterrestre. Como ocurre con la radiación extraterrestre, la duración del día, N , depende de la posición del sol y es por lo tanto una función de la latitud y de la fecha. Los valores diarios de N a través del año, para diversas latitudes, se presentan en la Figura 14.

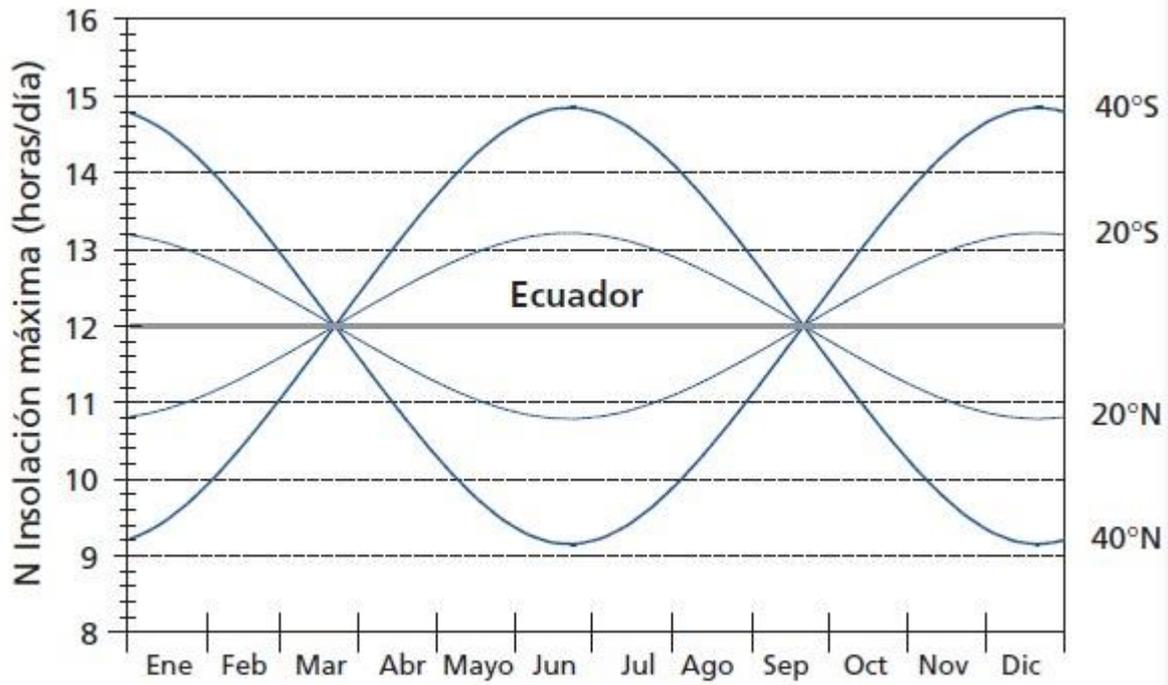


Figura 14. Variación anual de las horas de luz del día (N) en el ecuador a los 20° y 40° de latitud norte y sur.

Fuente: FAO, 2006

Albedo (α) y radiación neta solar (R_{ns})

Una cantidad considerable de la radiación solar que llega a la superficie terrestre se refleja en ella. La fracción, α , de la radiación solar que es reflejada por la superficie se conoce como albedo. El albedo es muy variable de acuerdo al tipo de superficie y el ángulo de incidencia o la pendiente de la superficie terrestre. Su valor puede ser tan elevado como 0,95 para la nieve recientemente caída y tan bajo como 0,05 para un suelo desnudo y húmedo. Una cubierta verde de vegetación tiene un albedo de entre 0,20 a 0,25. Para el cultivo de referencia, se asume que α tiene un valor de 0,23. La radiación neta solar, R_{ns} , es la fracción de la radiación solar R_s que no se refleja en la superficie. Su valor es $(1-\alpha) R_s$. (FAO, 2006)

Radiación neta de onda larga (R_{nl})

La radiación solar absorbida por la tierra se convierte en energía térmica. La tierra pierde esta energía por medio de varios procesos, entre los cuales se encuentra la emisión de radiación. La tierra, que tiene una temperatura mucho más baja que el sol, emite energía radiante con longitudes de onda más largas que el sol. Por ello, la radiación terrestre se conoce como radiación de onda larga. La radiación de onda larga emitida por el planeta es absorbida por la atmósfera o perdida hacia el espacio. La radiación de onda larga recibida por la atmósfera aumenta su temperatura. Por consiguiente, la atmósfera

irradia también energía, según lo ilustrado en la Figura 15. Parte de la radiación emitida por la atmósfera se dirige nuevamente hacia la superficie terrestre. Por lo tanto, la superficie terrestre emite y recibe radiación de onda larga. La diferencia entre la radiación de onda larga entrante y saliente se llama radiación neta de onda larga, R_{nl} . Como la radiación saliente de onda larga es casi siempre mayor que la radiación entrante, R_{nl} representa una pérdida de energía.

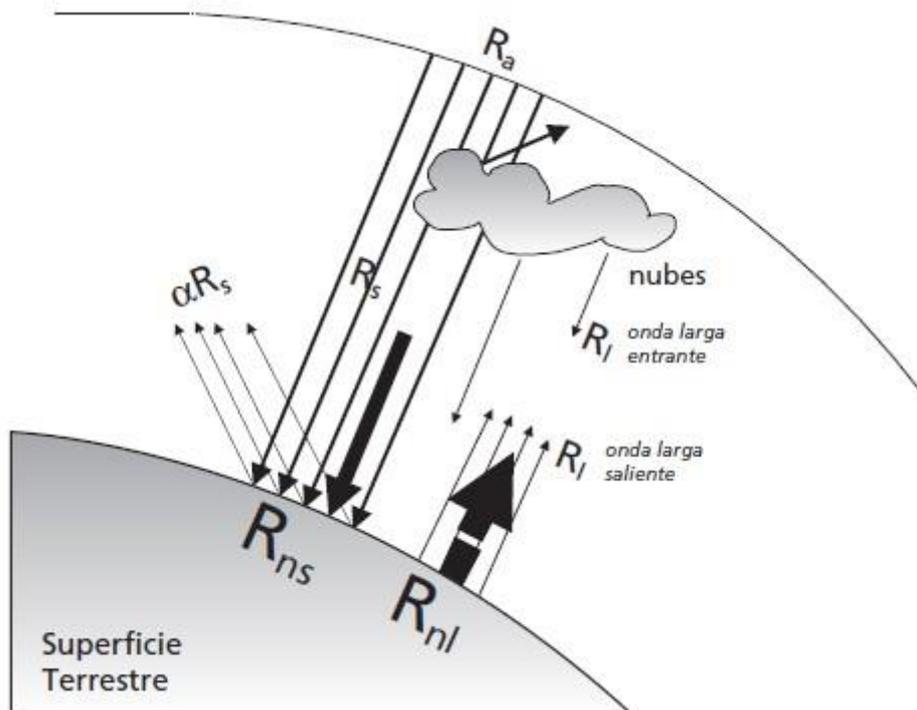


Figura 15. Componentes de la radiación.

Fuente: FAO, 2006

Radiación neta (R_n)

La radiación neta, R_n , es la diferencia entre la radiación entrante y saliente de longitudes de onda cortas y largas. Es el equilibrio entre la energía absorbida, reflejada y emitida por la superficie terrestre o la diferencia de la radiación de onda corta entrante neta (R_{ns}) y la radiación de onda larga saliente neta (R_{nl}) (Figura 15). La R_n es normalmente positiva durante el día y negativa durante la noche. El valor diario total para R_n es casi siempre positivo para 24 horas, excepto en condiciones extremas de latitudes elevadas.

Flujo de calor del suelo

En las estimaciones de evapotranspiración, se deben considerar todos los términos del balance energético. El flujo del calor del suelo, G , es la energía que se utiliza para calentar el suelo. G tiene valores positivos cuando el suelo se calienta y negativos cuando el suelo se enfría. Aunque el flujo calórico del suelo es pequeño comparado con R_n y puede ser no considerado con frecuencia, la cantidad de energía ganada o perdida por el suelo en este proceso teóricamente debe restarse o agregarse a R_n para estimar la evapotranspiración.

Velocidad del viento

Medición de la velocidad del viento

El viento se caracteriza por su dirección y su velocidad. La dirección del viento se refiere a la dirección de la cual el viento está soplando. Para el cómputo de la evapotranspiración, la velocidad del viento es una variable importante. Como la velocidad del viento en una localidad dada varía con el tiempo, es necesario expresarla como el promedio sobre un intervalo determinado de tiempo. La velocidad del viento se mide en metros por segundo (m/s) o kilómetros por día (km/día). La velocidad del viento se mide con los anemómetros. Los anemómetros usados comúnmente en las estaciones meteorológicas se componen de cazoletas o propulsores que giran sobre un eje gracias a la fuerza del viento. El conteo del número de revoluciones en un periodo dado permite determinar la velocidad promedio del viento en dicho período.

Relación del viento con la altura

Las velocidades del viento a diversas alturas sobre la superficie del suelo tienen valores diferentes. La fricción superficial tiende a reducir la velocidad del viento que atraviesa la superficie. La velocidad del viento es menor cerca de la superficie y aumenta con altura. Por esta razón los anemómetros se colocan en una altura estándar elegida, 10 m en meteorología y 2 ó 3 m en agrometeorología. Para el cálculo de la evapotranspiración, se requiere la velocidad del viento medida a 2 m sobre la superficie. Para ajustar los datos de velocidad del viento obtenidos de instrumentos situados a elevaciones diferentes a la altura estándar de 2m, se puede usar una relación logarítmica:

$$u_2 = u_z \frac{4,87}{\ln(67,8z - 5,42)}$$

donde

u_2 : velocidad del viento a 2 m sobre la superficie [m s⁻¹],

u_z : velocidad del viento medida a z m sobre la superficie [m s⁻¹],

z: altura de medición sobre la superficie [m].

Evapotranspiración del Cultivo (ET_c)

2.6. El coeficiente de cultivo (K_c)

En la metodología del coeficiente del cultivo para el cálculo de la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET_c) en las que se desarrollen en campos extensos, bajo condiciones agronómicas excelentes y sin limitaciones de humedad en el suelo. La evapotranspiración de un cultivo será diferente a la del cultivo de referencia (ET_o) en la medida en que sus características de cobertura del suelo, propiedades de la vegetación y resistencia aerodinámica difieran de las correspondientes al pasto (FAO, 2006).

Los efectos de las características que distinguen al cultivo del pasto están incorporadas en el coeficiente del cultivo (K_c). En la metodología del coeficiente del cultivo, la evapotranspiración del cultivo se calcula multiplicando ET_o por K_c .

Las diferencias en evaporación y transpiración entre los cultivos de campo y el pasto de referencia pueden ser integradas en un coeficiente único del cultivo (K_c) el cual se calcula como:

$$K_c = \frac{ET_c}{ET_o}$$

donde

K_c : coeficiente del cultivo [adimensional],

ET_c : evapotranspiración del cultivo [mm/d], establecido con lisímetros.

ET_o : evapotranspiración del cultivo de referencia [mm/d] establecido con lisímetros.

La mayoría de los efectos de los diferentes factores meteorológicos se encuentran incorporados en la estimación de ET_o . Por lo tanto, mientras ET_o representa un indicador

de la demanda climática, el valor de K_c varía principalmente en función de las características particulares del cultivo, variando solo en una pequeña proporción en función del clima (FAO, 2006).

Factores que determinan el coeficiente del cultivo

El coeficiente del cultivo integra los efectos de las características que distinguen a un cultivo típico de campo del pasto de referencia, el cual posee una apariencia uniforme y cubre completamente la superficie del suelo. En consecuencia, distintos cultivos poseerán distintos valores de coeficiente del cultivo. Por otra parte, las características del cultivo que varían durante el crecimiento del mismo también afectarán al valor del coeficiente K_c . Por último, debido a que la evaporación es un componente de la evapotranspiración del cultivo, los factores que afectan la evaporación en el suelo también afectarán al valor de K_c (FAO, 2006).

Tipo de Cultivo

Debido a las diferencias en albedo, altura del cultivo, propiedades aerodinámicas, así como características de los estomas y hojas de las plantas, se presentarán diferencias entre la evapotranspiración de un cultivo bien desarrollado y regado y la de referencia E_{To} , como se muestra en la Figura 16.

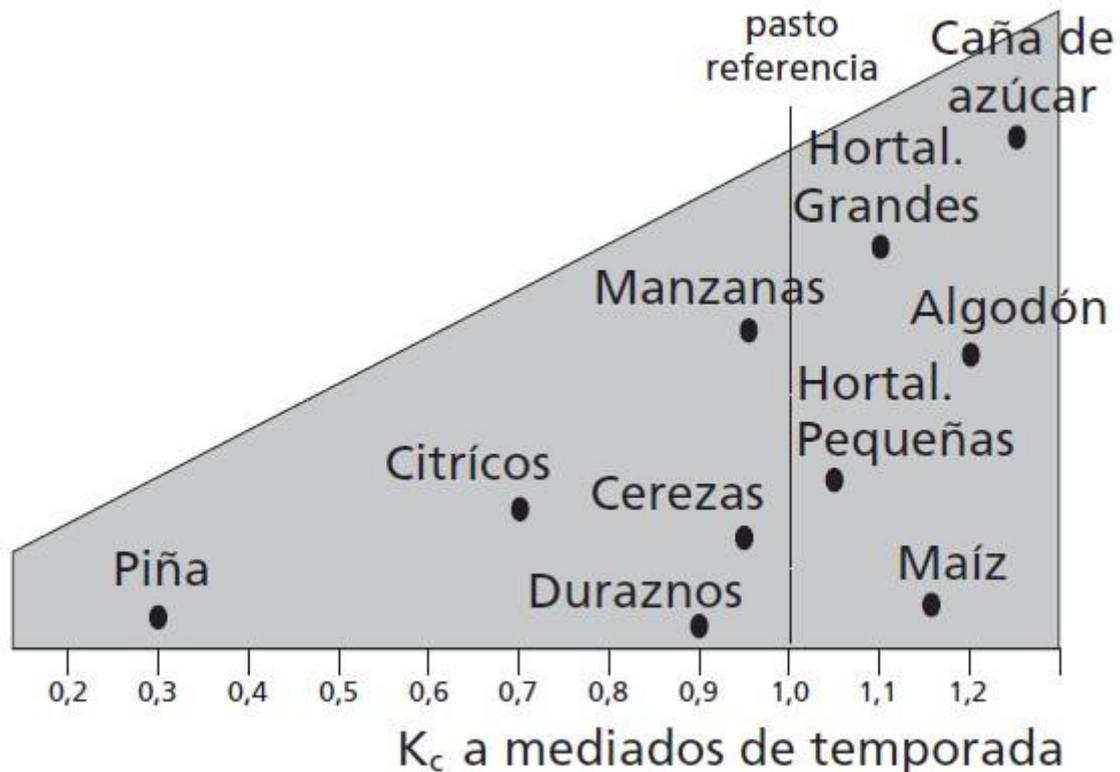


Figura 16. Valores típicos de Kc para diferentes cultivos completamente desarrollados.

Fuente: FAO, 2006

Relación del clima y el Kc

La diferencia entre la resistencia aerodinámica del pasto de referencia y la de otros cultivos agrícolas es no sólo específica del tipo de cultivo, sino que depende además de las condiciones climáticas y la altura del cultivo. Debido a que las propiedades aerodinámicas son más pronunciadas en la mayoría de los cultivos agrícolas, al compararse con el pasto de referencia, el cociente entre ET_c y ET_o (ósea K_c), aumenta en la mayoría de los cultivos cuando la velocidad del viento aumenta y cuando la humedad relativa disminuye. En condiciones de una mayor aridez climática y de una mayor velocidad del viento, los valores de K_c aumentan. Por otro lado, en climas húmedos y en condiciones de velocidades del viento bajas, los valores de K_c disminuyen. Como se muestra en la Figura 17.

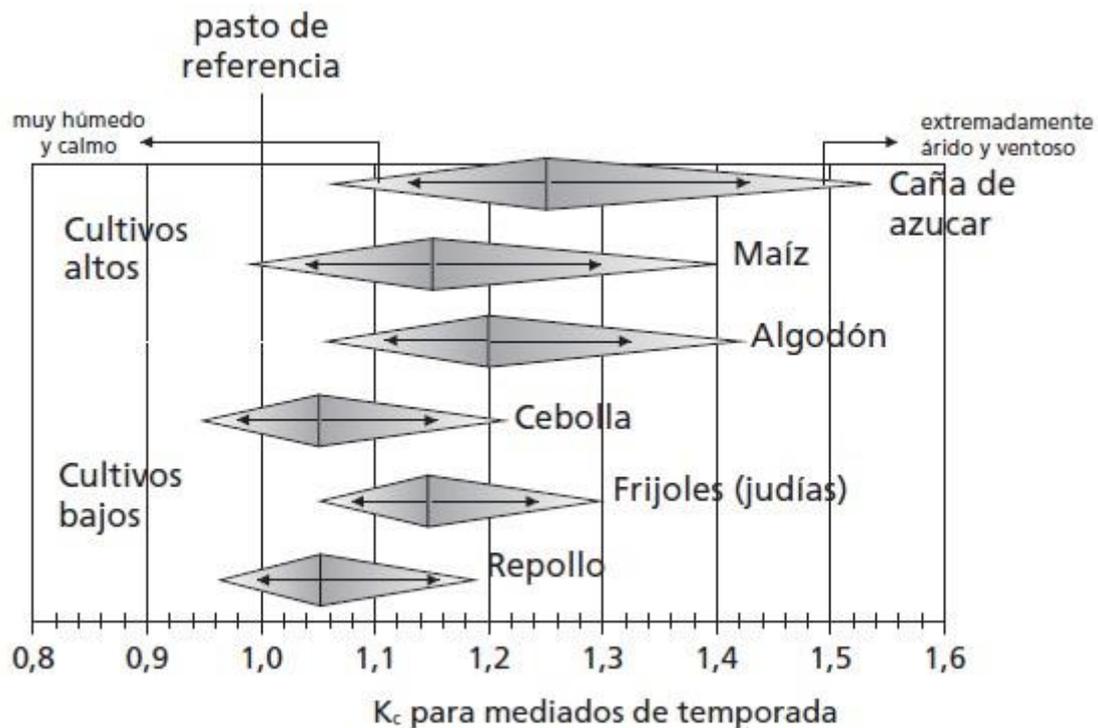


Figura 17. Rangos extremos de K_c para cultivos completamente desarrollados, en respuesta a variaciones climáticas y meteorológicas.

Fuente: FAO, 2006

2.6.1. Etapas del crecimiento del cultivo

A medida que el cultivo se desarrolla, tanto el área del suelo cubierta por la vegetación como la altura del cultivo y el área foliar variarán progresivamente. Debido a las diferencias en evapotranspiración que se presentan durante las distintas etapas de desarrollo del cultivo, el valor de K_c correspondiente a un cultivo determinado también variará a lo largo del período de crecimiento del mismo. Este período de crecimiento puede ser dividido en cuatro etapas: inicial, de desarrollo del cultivo, de mediados de temporada y de final de temporada (FAO, 2006).

Etapas inicial

La etapa inicial está comprendida entre la fecha de siembra y el momento que el cultivo alcanza aproximadamente el 10% de cobertura del suelo. La longitud de la etapa inicial depende en gran medida del tipo de cultivo, la variedad del mismo, la fecha de siembra y del clima. El final de la etapa inicial ocurre cuando la vegetación verde cubre aproximadamente un 10% de la superficie del suelo. Para cultivos permanentes, la fecha

de siembra es reemplazada por el momento en que aparecen las primeras hojas (FAO, 2006).

Durante el período inicial el área foliar es pequeña y la evapotranspiración ocurre principalmente como evaporación en el suelo. Por lo tanto, el valor de K_c durante el período inicial (K_c ini) es alto cuando el suelo se encuentra húmedo debido al riego o lluvia, y es bajo cuando la superficie del suelo se encuentra seca. El tiempo que tardará el suelo en secarse dependerá del intervalo de tiempo entre eventos que humedezcan al suelo, del poder evaporante de la atmósfera (ETo) y de la magnitud del evento de humedecimiento (FAO, 2006).

Etapa de desarrollo del cultivo

La etapa de desarrollo del cultivo está comprendida desde el momento en que la cobertura del suelo es de un 10% hasta el momento de alcanzar la cobertura efectiva completa. Para una gran variedad de cultivos, el estado de cobertura completa ocurre al inicio de la floración. Para cultivos en hileras, donde en las hileras se presenta comúnmente el solape entre las hojas, tales como los frijoles, remolacha azucarera, papas y el maíz, la cobertura efectiva completa puede ser definida como el momento cuando algunas hojas de las plantas en hileras adyacentes comienzan a solaparse, lo que produce un sombreado casi completo del suelo, o cuando las plantas casi alcanzan su tamaño máximo, en el caso que no ocurra el solape entre las hojas. A medida que el cultivo se desarrolla y sombrea cada vez más el suelo, la evaporación se verá cada vez más restringida y la transpiración gradualmente se convertirá en el proceso más importante. Durante la etapa de desarrollo del cultivo, el valor de K_c se corresponderá con la cantidad de la cobertura del suelo y el desarrollo de la planta. En general, si la superficie del suelo se encuentra seca, un valor de $K_c = 0,5$ se corresponderá con un valor de 25-40% de cobertura del suelo debido a los efectos del sombreado y debido al transporte en escala microscópica del calor sensible desde el suelo hacia la vegetación. Un valor de $K_c = 0,7$ generalmente se corresponderá con una cobertura del suelo de alrededor de 40-60%. Estos valores variarán dependiendo del cultivo, la frecuencia del humedecimiento y de si el cultivo utiliza más agua que el cultivo de referencia del pasto, cuando se encuentra en condiciones de cobertura completa -dependiendo de la arquitectura de la vegetación y la altura del cultivo en relación con el pasto de referencia- (FAO, 2006).

Etapa de mediados de temporada

La etapa de mediados de temporada comprende el período de tiempo entre la cobertura completa hasta el comienzo de la madurez. El comienzo de la madurez está indicado generalmente por el comienzo de la vejez, amarillamiento o senescencia de las hojas, caída de las hojas, o la aparición del color marrón en el fruto, hasta el grado de reducir la evapotranspiración del cultivo en relación con la ETo de referencia. La etapa de mediados de temporada representa la etapa más larga para los cultivos permanentes y para una gran variedad de cultivos anuales, siendo relativamente corta para los cultivos hortícolas que son cosechados frescos para aprovechar su vegetación verde. Durante la etapa de mediados de temporada, el coeficiente K_c alcanza su valor máximo. El valor de K_c en esta etapa (K_{cmed}) es relativamente constante para la mayoría de los cultivos y prácticas culturales. Las diferencias entre el valor de K_c med con respecto al valor de referencia '1', son debidas principalmente a las diferencias en la altura del cultivo y la resistencia, entre la superficie del pasto de referencia y el cultivo agrícola, además de diferencias en las condiciones climáticas (FAO, 2006).

Etapa de finales de temporada

La etapa final o tardía de crecimiento comprende el período entre el comienzo de la madurez hasta el momento de la cosecha o la completa senescencia. Se asume que el cálculo de los valores de K_c y E_{Tc} finaliza cuando el cultivo es cosechado, secado al natural, alcanza la completa senescencia o experimenta la caída de las hojas. Para algunos tipos de vegetación perenne en climas libres de heladas, los cultivos pueden desarrollarse durante todo el año, por lo que podría tomarse la fecha de término de la etapa final como la misma fecha de 'siembra' (FAO, 2006).

El valor de K_c al finalizar la etapa final ($K_{c\text{ fin}}$) refleja el efecto de las prácticas de cultivo y el manejo del agua. Si el cultivo es regado frecuentemente hasta el momento de su cosecha en fresco, el valor de $K_{c\text{ fin}}$ será alto. Si se permite la senescencia y secado del cultivo en el campo antes de la cosecha, el valor de $K_{c\text{ fin}}$ será bajo. El estado de senescencia es generalmente asociado a una conductancia menos eficiente de los estomas debido a los efectos del envejecimiento, lo que causa una reducción en el valor de K_c (FAO, 2006).

En las Figuras 18 y 19 se ilustra la variación del valor de K_c para diferentes cultivos, bajo la influencia de factores meteorológicos y de desarrollo del cultivo.

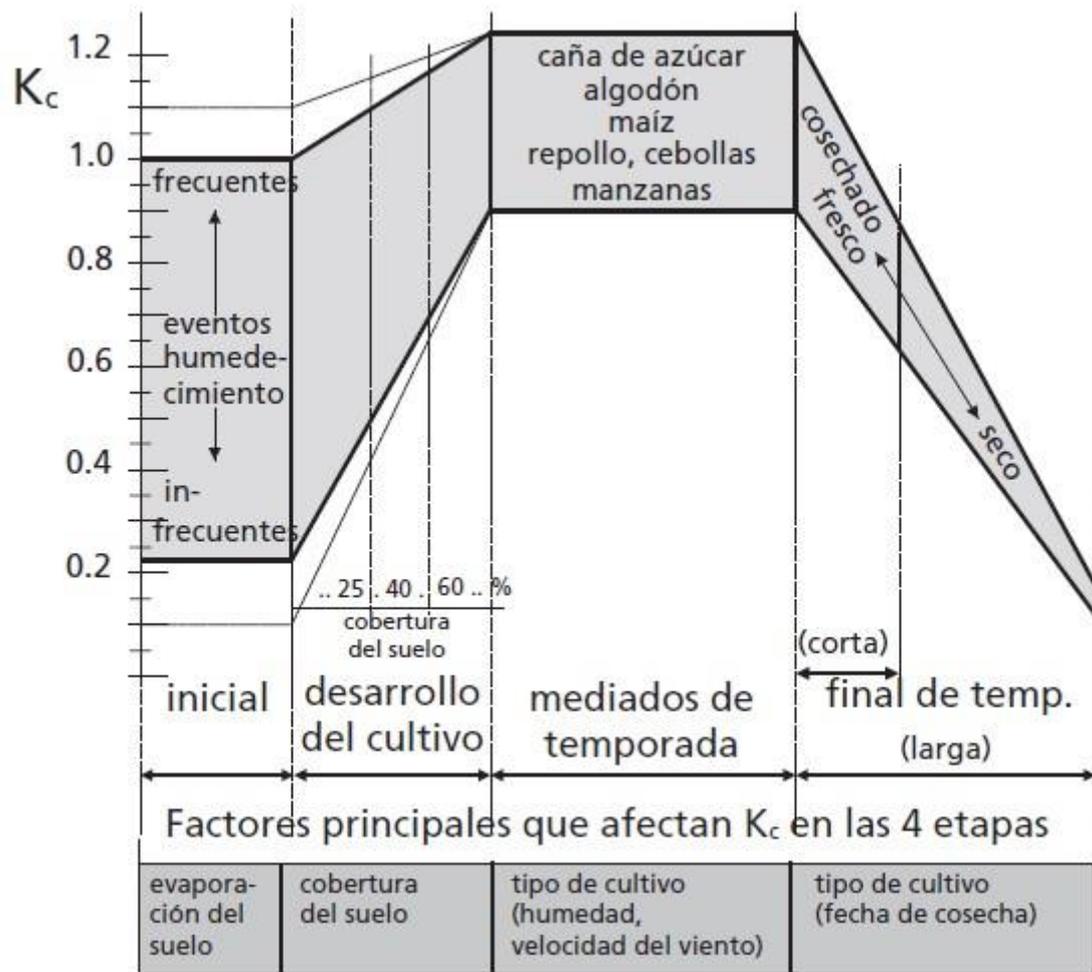


Figura 18. Rangos típicos esperados del valor de K_c para las cuatro etapas del crecimiento.

Fuente: FAO, 2006.

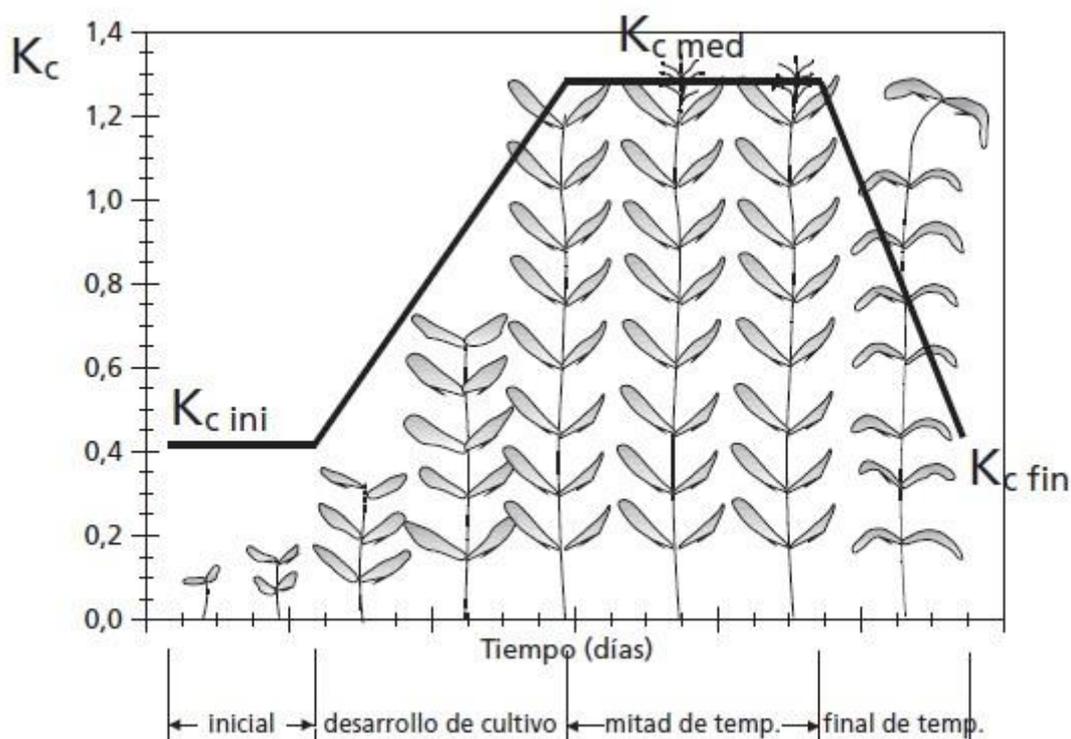


Figura 19. Curva generalizada del coeficiente del cultivo, correspondiente al procedimiento del coeficiente único del cultivo.

Fuente: FAO, 2006

2.6.2. Valores tabulados de Kc

En el anexo de este informe se incluyen valores típicos de $K_{c\text{ini}}$, $K_{c\text{med}}$ y $K_{c\text{fin}}$ correspondientes a distintos cultivos. Los coeficientes presentados son organizados en grupos (ej. hortalizas pequeñas, leguminosas, cereales, etc.) con la finalidad de facilitar la localización del cultivo en el cuadro y para ayudar a comparar cultivos pertenecientes a un mismo grupo. Generalmente, los coeficientes para los miembros de un mismo grupo son parecidos, debido a la similitud de la altura de los cultivos, área foliar, grado de cobertura del suelo y manejo del agua (FAO, 2006).

Los coeficientes presentados en el anexo integran los efectos de la transpiración y la evaporación en el tiempo. El efecto de esta integración en el tiempo representa una frecuencia de humedecimiento promedio para un cultivo «estándar» bajo condiciones típicas de desarrollo bajo riego.

2.7. Evapotranspiración del cultivo (ETc)

La evapotranspiración del cultivo se calcula multiplicando E_{To} por K_c el cual es un coeficiente que expresa la diferencia entre la evapotranspiración de la superficie

cultivada y la superficie del pasto de referencia. Esta diferencia puede ser combinada dentro de un coeficiente único o integrado del cultivo. La selección del procedimiento a seguir dependerá del propósito del cálculo, la precisión requerida, la disponibilidad de datos climáticos y la escala temporal bajo la cual se realizan los cálculos (FAO, 2006).

2.8. Características físicas del suelo

Según Fernández (2010), el suelo constituye el soporte físico para las plantas y les proporciona tanto el agua como los elementos nutritivos disueltos en ella. Es un material poroso, compuesto principalmente por:

- fracción sólida:
- partículas minerales de diferentes formas y tamaños.
- partículas orgánicas
- fracción porosa:
- Aire
- Agua

Los suelos están compuestos de partículas minerales de arena, limo y arcilla, las cuales se diferencian básicamente en su tamaño y forma. La proporción que exista de cada uno de estos grupos define la textura del suelo y su porosidad. Estas características físicas de un suelo son las que determinan la forma y cantidad en que el agua aplicada con un riego es absorbida, infiltrada y redistribuida, es decir, indican la capacidad que tiene para almacenar el agua y cederla a las plantas (Fernández, 2010). Dependiendo de la proporción de arena, limo y arcilla se pueden tener muy diversas texturas:

En general, un suelo arenoso o franco arenoso (normalmente se habla de suelo con textura gruesa o suelo ligero) tiene gran capacidad para absorber el agua e infiltrarla hasta zonas más profundas. Sus poros son grandes, de forma que cuando las raíces de las plantas tratan de extraer el agua de dichos poros no encuentran mucha dificultad para hacerlo. Sin embargo, por estas características, son suelos que permiten que el agua que se infiltra pase a zonas tan profundas como para que no pueda ser explorada por las raíces, de manera que parte del agua aplicada con el riego puede perderse, es decir, tienen poca capacidad de retención de agua, si bien como aspecto positivo no suelen tener problemas de encharcamiento.

En el otro extremo, los suelos arcillosos o francoarcillosos, llamados también suelos pesados o de textura fina, tienen una porosidad muy alta pero los poros son muy pequeños. Esto hace que la absorción e infiltración del agua desde la superficie hacia zonas más profundas sea muy lenta. Estos suelos presentan una elevada capacidad de retención de agua, por lo que no es frecuente que existan grandes pérdidas de agua debidas a una excesiva infiltración, pero la planta encuentra mayor dificultad para absorber el agua que se encuentra en el espacio poroso de este tipo de suelos. Son suelos que no tienen buena aireación y es frecuente encontrar problemas de encharcamiento (Fernández, 2010).

La textura puede determinarse por varios métodos entre los más conocidos se encuentra el tacto, por el medio de la pipeta o por el método de Bouyoucos. Este último método es un proceso de sedimentación de las partículas de arena, limo y arcilla a diferentes tiempos, midiéndose durante el proceso la concentración de los sólidos en suspensión con un densímetro, este instrumento graduado para indicar los gramos de sólidos suspendidos por litro de la mezcla con el suelo a una temperatura dada (19,4 °C); suponiendo que el medio de suspensión sea agua pura. La densidad de la fase líquida se ve afectada con las variaciones de temperatura y con la presencia de los agentes reactivos agrupados al suelo, para los cuales existen tablas de corrección por temperatura. Este método utiliza la ley de Stokes para calcular la velocidad de sedimentación de las partículas (Chavarria, 2012).

Para definir el tipo de textura se relacionan los porcentajes de arenas, limos y arcillas obtenidos por el método de Bouyoucos utilizando el un triángulo textural (Chavarria, 2012).

2.9. El agua en el suelo

Según (Fernández, 2010) en función de la mayor o menor proporción de agua en los poros del suelo, y su disponibilidad para la planta se definen cuatro niveles de humedad:

- Saturación: cuando todos los poros están llenos de agua.
- Límite superior (LS): es un nivel de humedad que se consigue dejando drenar el agua de un suelo saturado. Este contenido de agua supone la mayor cantidad de agua que el suelo puede llegar a almacenar sin drenar. También se conoce como capacidad de campo (CC).

- Límite inferior (LI): si el suelo no recibe un nuevo aporte, la evaporación de agua desde el suelo y la extracción por parte de las raíces hacen que el agua almacenada disminuya hasta llegar a este nivel en el que las raíces no pueden extraer más cantidad. Aunque el suelo aún contiene cierta cantidad de agua, las plantas no pueden utilizarla. Se conoce también como punto de marchitamiento permanente (PMP).
- Suelo seco: situación en que los poros del suelo están totalmente llenos de aire.

El comportamiento del suelo como medio poroso frente a un determinado grado de humedad es muy similar al de una esponja. Supóngase una esponja totalmente seca sobre la que se vierte agua hasta saturarla (mojarla por completo); comenzará a soltar agua por la parte inferior simplemente por gravedad, hasta un momento en que no caiga más, estando entonces en una situación similar al de límite superior. Si la esponja se presiona con fuerza para expulsar el agua, quedará con una humedad equivalente al de límite inferior, es decir, por más que se presione no se expulsa más agua, sin embargo, todavía está ligeramente húmeda. Solamente se podría extraer el agua restante si la esponja se seca en una estufa, lo que sería análogo al suelo seco. En un suelo ocurre de forma similar, y a medida que hay menos agua, la succión que ejerce el suelo sobre el agua es mayor, es decir, a la planta le cuesta más trabajo extraerla y es por lo tanto donde se determina la cantidad de agua a sustituir en la planta mediante los diferentes sistemas de riego (Fernández, 2010).

2.10. Velocidad de infiltración de agua en el suelo

La infiltración se define como la penetración de agua en el perfil del suelo por unidad de tiempo, cuando se cubre la superficie del suelo con una pequeña lámina de agua. Al aplicar agua al suelo, la cantidad absorbida es rápida al inicio y empieza a decrecer a medida que el tiempo aumenta (Villalobos, 2008).

Según Villalobos (2008), los valores de velocidad de infiltración que se obtienen en el campo presentan gran variabilidad en cuanto a distribución espacial, por diversos factores entre los cuales destaca:

- Características físicas del suelo y del perfil
- Nivel de humedad del suelo
- Método de riego utilizado

- Temperatura, aire atrapado, etc.

Por lo anterior no ha sido posible obtener una cifra para la velocidad de infiltración, según tipo de suelo. Existen estudios, pero estos se deben tomar como un valor aproximado cuando se requiere conocer la velocidad de infiltración básica (Villalobos, 2008).

La velocidad de infiltración es un factor determinante del tiempo de riego, el que se puede definir como el número de horas o minutos en que el agua debe escurrir sobre el suelo para que penetre y moje la zona de radicular sin que este tiempo provoque pérdidas por escorrentía o percolación (Fernández, 2010).

Dentro de los métodos más utilizados para llevar a cabo las pruebas de campo, para medir infiltración están los cilindros infiltrómetros. Estos constan de dos cilindros metálicos de 3,17 mm de espesor. Uno de los cilindros tiene de 22 a 30 cm de diámetro y una altura de 30 cm, dicho cilindro se debe colocar en el suelo unos 10 cm. Alrededor de este cilindro se debe colocar otro de mayor diámetro (unos 30 cm mayor) y de 18 cm de altura. El cilindro exterior sirve como regulador del agua, para evitar en parte la infiltración lateral. El exterior se debe de enterrar de 5 a 10 cm. En el cilindro interior se coloca una regla graduada, la cual sirve para medir el descenso del agua (Villalobos, 2008).

2.11. Cultivos relevantes

2.11.1. Papa o patata¹⁰

Descripción General

La papa o patata (*Solanum tuberosum*) es un cultivo tuberoso amiláceo originario de los Andes, y las dos subespecies cultivadas, *S. tuberosum tuberosum* y *S. tuberosum andigena*, representan casi toda la producción mundial. La papa o patata es el cuarto cultivo alimentario más importante del mundo, después del arroz, el trigo y el maíz, con una producción de 329 millones de toneladas en 18,6 millones de hectáreas.

La papa o patata es especialmente apropiada para climas fríos. Se cultiva ampliamente en regiones tropicales frías, subtropicales y templadas, donde se siembra como monocultivo, en rotación, o en multicultivo.

¹⁰ Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2014, pp.190-194).

Crecimiento y desarrollo

Se siembra en camas o en el suelo plano, en condiciones de riego, el cultivo se siembra principalmente en camas. Aunque se puede sembrar como semilla botánica, en casi todos los casos se siembra como tubérculo. Las semillas del tubérculo deberían tener dos o tres ojos, de los cuales brotan nuevas yemas y brotes. La profundidad generalmente es de 5 a 10 cm, mientras que en áreas secas se prefiere la siembra más profunda. La densidad de plantas varía entre 30 000 y 60 000 plantas/ha, y varía dependiendo del tamaño de la semilla, la variedad y el uso. Una mayor densidad de plantas se usa en condiciones de riego y una menor densidad de plantas, en condiciones de secano. El arado durante el período de crecimiento debe procurar no dañar las raíces ni los tubérculos, y a menudo los caballones se aporcan para evitar el enverdecimiento de los tubérculos.

La planta emerge aproximadamente siete días después de la siembra, bajo buenas condiciones. La emergencia puede demorarse por temperaturas más bajas del suelo, humedad limitada del suelo, tubérculos jóvenes o que no brotaron y siembra profunda. La cobertura inicial del dosel depende de la densidad de los tubérculos semilla y de la cantidad de brotes en desarrollo por tubérculo semilla, y de si las camas están juntas o separadas. Las variedades también pueden diferenciarse en este aspecto. Se puede acortar la duración desde la siembra hasta la cobertura del dosel máxima, sembrando a una mayor densidad, y con prácticas que conduzcan a una emergencia más temprana de la planta, temperatura cálida y buen suministro de agua. En el momento de máxima dosel, el porcentaje de cobertura del dosel varía entre 45 % hasta casi 100 % en los trópicos fríos. En la etapa vegetativa temprana, entre la emergencia y el brote de los tubérculos, comienza la formación de estolones y tubérculos, y el agrandamiento de éstos. La duración del período de crecimiento y la producción total de tubérculos dependen de la variedad, la temperatura y la duración del día. La formación de los tubérculos sucede antes de la floración, y la floración no es necesaria para producir tubérculos.

Al igual que se cumple para otros cultivos, la profundidad de raíces de la papa o patata depende en gran medida de las condiciones del suelo, de que no haya capas de suelo que la impidan y de la temperatura del suelo. Se ha mostrado que la extracción de agua por las raíces se hace a más de 1.8 m en condiciones favorables, aunque a menudo se dice que la papa o patata es un cultivo de raíces poco profundas. Normalmente, cuando la capa superior del suelo no es seca, el 70 % del total de absorción de agua ocurre en los

0.30 m superiores y casi el 100 % entre los 0,40 y 0,60 m de profundidad del suelo. Sin embargo, el patrón de absorción también depende de la ubicación del agua y los nutrientes, y la extracción de agua se realiza principalmente en las capas más profundas, cuando la parte superior del perfil del suelo está seca.

Productividad y uso del agua

La papa o patata requiere de 0,35 a 0,8 m³ de agua para producir 1 kg de materia seca de tubérculos. En condiciones de campo, esto se traduce en requerimientos hídricos de 350 a 650 mm durante el período de crecimiento, que dependen del clima y de la variedad. La productividad del agua para rendimiento de tubérculos frescos, que contengan cerca de 75 % de humedad, es de 4 a 11 kg/m³. La productividad del agua producida (expresada como materia seca de tubérculos, varía entre 1,3 y 2,8 kg/m³). En condiciones de suministro hídrico limitado, el suministro disponible, preferencialmente, debería centrarse en maximizar el rendimiento por hectárea en lugar de repartir el agua limitada en un área más grande. Se puede ahorrar agua principalmente a través de un calendario mejorado y profundidad de la aplicación del riego.

Práctica de riego

Los métodos de riego más comunes para la papa son por surcos y aspersión. La respuesta del rendimiento al riego frecuente es considerable y se obtienen rendimientos muy altos con los sistemas mecanizados de aspersión, en el que las pérdidas por evapotranspiración se reponen diariamente o cada dos días. El riego frecuente y oportuno reduce la proporción de tubérculos malformados al momento de la cosecha. Cuando la precipitación es baja y el suministro de agua es restringido, el calendario de riego debería tratar de evitar los déficits hídricos durante la etapa de formación de estolones, la brotación de los tubérculos y después de esta última. El suministro de agua puede ser restringido al principio del crecimiento; es decir, antes de la floración, pero el crecimiento del dosel sería más lento, así que la restricción debe tener ciertos límites. Para usar más el agua almacenada en el suelo, el riego debe cortarse llegando a o en la etapa de senescencia. Esta práctica también puede acelerar la madurez e incrementar el contenido de materia seca de los tubérculos. Una correcta programación del riego puede ahorrar de

1 a 4 aplicaciones de riego, incluido el último riego antes de la cosecha, dependiendo de la situación.

2.11.2. Tomate¹¹

Descripción general

El tomate *Solanum lycopersicum*, L. (anteriormente *Lycopersicon esculentum*, Mill.) es una planta diurna herbácea perenne, de fotoperíodo neutro, que normalmente se cultiva como anual en regiones templadas. Hay tres tipos de tomate cultivado: indeterminado, semideterminado y determinado. Las plantas indeterminadas son altas, frecuentemente de más de 2 m de alto, con un crecimiento vegetativo que continúa por mucho más tiempo después del comienzo de la floración, en comparación con los otros dos tipos. El fruto madura gradualmente a partir de los racimos de frutos basales. Las plantas semideterminadas son de menor altura que las anteriores, alcanzando una altura máxima de 0,9-1,5 m. Su característica es que los racimos de frutos principales maduran juntos, aunque la planta también seguirá produciendo frutos adicionales. Los tomates indeterminados y semideterminados deben estar estacados o en espaldera, se cultivan para el mercado fresco y se cosechan a mano. Los tipos determinados, los llamados tomates de arbusto, en su mayoría reposan en el suelo, y tienen una floración relativamente concentrada y el cuajado de sus frutos dura solamente cerca de tres semanas. El crecimiento vegetativo continúa durante este periodo. La mayoría de los frutos de variedades determinadas maduran en un período relativamente corto y por esta razón son aptos para la recolección mecanizada. Las variedades de tomate para procesamiento se cultivan buscando firmeza y piel fuerte, y son del tipo determinado, con excepción de los tomates pelados tipo San Marzano, que son variedades indeterminadas o semideterminadas.

El tomate requiere suelos con adecuada capacidad de retención de agua y aireación. Se prefieren suelos bien drenados, profundos y francoarenosos, aunque suelos más pesados pueden ser también altamente productivos con un manejo adecuado. El tomate es intolerante a la compactación del suelo y encharcamiento; por lo tanto, la capa superior de 15-20 cm del suelo tiene que ser permeable. En suelos arcillosos, en ocasiones es necesario el arado profundo para permitir el drenaje del agua y una mejor penetración

¹¹ Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2014, pp.198-203).

de las raíces. En algunos lugares, el tomate necesita una rotación de tres años con otros cultivos que no sean solanáceas (por ejemplo, papa o patata, pimienta, berenjena, tabaco) para reducir al mínimo los nematodos, virus y enfermedades bacterianas. El tomate se cultiva generalmente en rotación, a menudo únicamente con un ciclo de dos años.

Crecimiento y desarrollo

Con mucha frecuencia, los tomates se trasplantan para lograr una emergencia, densidad y desarrollo más uniforme de la planta. Es difícil alcanzar uniformidad y un porcentaje alto de emergencia cuando se siembra en el campo, debido a sus semillas pequeñas. La siembra directa se limita generalmente a variedades estándar; este método con híbridos es poco rentable debido al alto costo de las semillas. Los lechos de siembra deben prepararse cuidadosamente para eliminar obstrucciones del suelo que afecten la siembra directa. El uso de máquinas de siembra de precisión, en comparación con plantadoras tradicionales o siembra manual, permite el uso de semillas peletizadas y evita el raleo en la etapa de la cuarta hoja, o después. Los tomates se siembran mejor cuando la temperatura promedio de la capa superior de 100 mm del suelo, durante siete días, es $> 10^{\circ}\text{C}$. El período de siembra se extiende desde finales de febrero a mayo en el hemisferio norte, o de agosto a mediados de diciembre en el hemisferio sur. Por supuesto, la estación está mucho menos definida en los trópicos y subtrópicos.

El tomate requiere suelos con adecuada capacidad de retención de agua y aireación. Se prefieren suelos bien drenados, profundos y francoarenosos, aunque suelos más pesados pueden ser también altamente productivos con un manejo adecuado. El tomate es intolerante a la compactación del suelo y encharcamiento; por lo tanto, la capa superior de 15-20 cm del suelo tiene que ser permeable. En suelos arcillosos, en ocasiones es necesario el arado profundo para permitir el drenaje del agua y una mejor penetración de las raíces.

Productividad y uso del agua

El tomate para procesamiento consume 400-800 mm de agua desde la emergencia/trasplante hasta la cosecha, dependiendo del clima, tipo de planta, suelo, riego y manejo de cultivo. Las plantas de tomate pueden tolerar la sequía en cierto grado;

por lo tanto, los niveles de humedad del suelo pueden alcanzar el 50 % del total de agua disponible sin pérdidas significativas de rendimiento, después de que se ha completado el desarrollo del dosel. Es importante mantener niveles adecuados de humedad en el suelo al inicio del ciclo biológico, al momento del trasplante y desde la primera flor hasta que el cuajado completo del fruto (por ejemplo, del quinto racimo en los ejes principales). El riego puede detenerse un par de semanas antes de la cosecha, dependiendo del almacenamiento de humedad del suelo y las previsiones de lluvia. El uso máximo del agua es en promedio 4-7 mm/día durante el máximo período de crecimiento en un clima subhúmedo, pero puede llegar 8-9 mm/día en zonas más áridas. La productividad del tomate para biomasa oscila entre 1,3 a 3,5 kg/m³, siendo 3 kg/m³ considerada común para condiciones y prácticas favorables. El extremo inferior del rango es posiblemente evidente en climas de alta demanda evaporativa, así como en donde la cobertura del dosel baja y hay humedecimiento frecuente de la superficie expuesta del suelo por lluvia o riego.

Práctica de riego

Los métodos de riego presurizados (riego por aspersión, mini aspersión y goteo) son ahora comunes en muchos de los principales países productores. Los grandes productores de tomate aprendieron desde hace mucho tiempo a limitar el riego a medida que el cultivo se aproxima a la madurez. El manejo del riego debe enfocarse en el ahorro de agua, manteniendo el rendimiento y mejorando la calidad del fruto, debido a los cambios vegetativos que se producen en respuesta al estado hídrico. En los últimos años, los experimentos con riego deficitario se han dirigido a estos objetivos, ya sea manteniendo el déficit a un nivel seleccionado durante un largo tiempo, o con el riego deficitario únicamente en etapas seleccionadas del ciclo biológico del cultivo, lo que se conoce como riego deficitario regulado. En las zonas más áridas se practica el riego de presiembra, cuando las precipitaciones pasadas no son suficientes para reponer el perfil del suelo. Los riegos de presiembra también se utilizan para lixiviar suelos más salinos. Frecuentemente se utilizan uno o dos riegos durante un período de 2-4 semanas para el establecimiento del cultivo, después del trasplante o siembra, si el suelo está inicialmente bien cargado. El riego debe ser suficiente para asegurar un crecimiento rápido del dosel durante su desarrollo y gran parte del período de floración, pero no tanto como para causar un crecimiento foliar excesivo y la caída asociada de flores y frutos jóvenes. Poco después del cambio de color del fruto, se debe reducir el riego, aunque el inicio del recorte del

riego depende de la humedad restante en la zona radicular del suelo y la tasa de ET para ese período. El recorte en el estado de maduración ahorra agua, pero debe ser óptimo para mejorar la calidad del fruto, al tiempo que permite que los últimos frutos alcancen el tamaño comercial y se mantenga la cobertura del dosel para proteger los frutos de las quemaduras solares.

2.11.3. Maíz¹²

Descripción general

El maíz (*Zea mays* L.) ocupa el primer puesto como el cultivo de mayor importancia a nivel mundial en términos de producción de granos; aunque el trigo y el arroz son los más importantes para consumo humano directo. Los humanos consumen las semillas del maíz directamente o después de ser procesadas, y a menudo son el principal componente del pienso. El aceite vegetal, el Jarabe de azúcar, el alcohol como biocombustible y la materia prima para la fabricación del plástico generalmente se derivan de las semillas de maíz. La producción total fue de 819 millones de toneladas en 2009 (FAO, 2011), el último año del que se tienen estadísticas. La producción de granos de trigo y arroz con cáscara en ese año fue, en cada caso, aproximadamente un 16 % inferior a la del maíz, con los cultivos de arroz sembrados en un área casi igual a la del maíz, mientras que los cultivos de trigo fueron sembrados en 30 % más área que el maíz. Casi todas las variedades de maíz de alto rendimiento son híbridas.

El cultivo se originó en América Central, donde se siembra tradicionalmente en colinas. No obstante, la mayor parte del maíz en el mundo se siembra como cultivo en hileras y como monocultivo.

Crecimiento y desarrollo

El germoplasma del maíz es muy diverso, con una amplia gama de tamaños de las semillas, alturas de la planta, hábitos de ahijamiento, cantidad de hojas por tallo, cantidad de panículas por planta y tamaño de las panículas. No obstante, la mejora

¹² Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2014, pp. 119-123).

genética de las plantas y la selección para alto rendimiento han reducido drásticamente la diversidad, haciendo el cultivo altamente determinado.

En buenos suelos, la tasa de profundización de las raíces puede alcanzar un promedio de 2,5 cm por día, donde el enraizamiento efectivo logra una profundidad de 2,8 m o más alrededor del tiempo de madurez. No obstante, la profundidad de raíces que se observa con más frecuencia, especialmente en regiones con temperaturas frías en invierno, es inferior, por el orden de 1,5 a 2 m. La tasa de profundización puede estar notablemente limitada por capas restrictivas (ya sea por factores físicos o químicos) en el suelo, aireación deficiente y temperatura fría del suelo. La tasa de profundización es importante en situaciones donde existe una cantidad considerable de agua almacenada en las capas más profundas, durante períodos de precipitación y riego escasos o nulos.

Riego, uso del agua y productividad

Dentro de los métodos comunes de aplicación se incluyen el riego por surcos y el riego con pivote central. El uso estacional del agua del maíz varía dependiendo de la demanda evaporativa de la atmósfera y, por consiguiente, según el clima, el momento de la estación en la que se siembre el cultivo, la duración del ciclo biológico del cultivo y la disponibilidad de agua. En situaciones de buena distribución de agua, la ET estacional varía de menos de 500 a más de 800 mm, donde la ET estacional típica de una variedad de ciclo medio estación que se siembra en un clima templado a una latitud de 35° a 40° está cerca de 650 mm.

A mediados de la estación, cuando se tiene cobertura del dosel completa y el agua y los nutrientes minerales no son limitados, el maíz transpira a una tasa ligeramente superior a la ET de referencia (ET_o). Datos detallados, muestran que el coeficiente de cultivo (K_c) es ligeramente inferior a los valores indicados anteriormente, únicamente dentro del rango de 1,07 a 1,12. Esto posiblemente es el resultado de una conductancia estomática más baja de las hojas del maíz en relación con la mayoría de las especies de cultivos de hojas anchas. Dado que se trata de un cultivo en stress, la eficiencia en el uso del agua del maíz es alta, principalmente debido a la alta tasa de fotosíntesis, con solamente un aporte mínimo de la tasa de transpiración ligeramente más restringida. En contraposición a opiniones anteriores, el maíz bajo condiciones favorables responde de

manera positiva al incremento del CO₂ atmosférico, como lo indica el aumento del área foliar y de la biomasa, al menos hasta 520 ppm de CO₂.

METODOLOGÍA

3.1. Localización del área para determinar de los requerimientos de agua para diferentes cultivos de la zona norte Cartago

El estudio se ejecutó desde febrero hasta mayo de 2017 en seis distritos de la zona norte de Cartago, a saber: distrito uno Pacayas de Alvarado, distrito tres Potrero Cerrado de Oreamuno, distrito cinco Santa Rosa de Oreamuno, distrito seis Dulce Nombre de Dulce Nombre, distrito ocho Tierra Blanca de Cartago, distrito 10 Llano Grande de Cartago, y uno de la zona noroeste de San José, distrito seis Rancho Redondo de Goicoechea.

Esta zona de la provincia de Cartago se encuentra entre una altitud de 1.600 a 2.100 msnm sobre las "faldas" del Volcán Irazú; el clima es templado, pero frío en comparación con el resto de Costa Rica, ya que combina el tipo de clima de las faldas del Caribe con el clima de las faldas del Pacífico. Se caracteriza por lluvias moderadas y temperaturas frescas y frías. La zona mantiene dependiendo de la época precipitaciones todo el año de variable intensidad. La temperatura máxima promedio es de 26 grados centígrados y la mínima promedio de 10 grados. El bosque asociado es el Húmedo Subtropical y el Páramo en las partes más elevadas (Alvarado, 2009).

Se realizó un muestreo en campo en cuatro fincas de la zona norte de la Cartago, seleccionadas a priori por el tipo de cultivos y la ubicación (Figura 20). Las fincas fueron identificadas por su geo referenciación en: Finca uno: 9° 57' 01" latitud norte y 83° 56' 24" longitud oeste. Finca dos: 9° 55' 32" latitud norte y 83° 54' 14" longitud oeste. Finca tres: 9° 54' 36" latitud norte y 83° 53' 03" longitud oeste. Finca cuatro: 9° 54' 47" latitud norte y 83° 53' 06" longitud oeste.

Los distritos están representados por ocho estaciones meteorológicas pertenecientes al Instituto Meteorológico Nacional (IMN), al Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) y a Acueductos y Alcantarillados (AyA), los datos que se obtuvieron sirven para calcular la evapotranspiración del cultivo de referencia por el método recomendado por la FAO de Penman-Monteith, la evapotranspiración del cultivo y el módulo de riego.

Los datos meteorológicos se solicitaron con un historial de 30 años para darle una confiable valides a los métodos de cálculo y así evitar el sesgo que puede contener eventos meteorológicos aislados.

En las fincas se identificó la textura del suelo, el cálculo del agua consumida por los cultivos, expresada en lámina neta y bruta; y la infiltración básica que demostró que el módulo de riego era el idóneo para que el cultivo creciera adecuadamente sin producir desperdicios de agua por escorrentía e infiltración.

En la Figura 20 se observan las estaciones meteorológicas pertenecientes a la parte norte de la provincia de Cartago.



Figura 20. Estaciones meteorológicas y fincas en estudio ubicadas en la parte norte de la provincia de Cartago.

En la etapa inicial de la investigación, se contrastó con las nuevas tecnológicas en conjunto con los conocimientos técnicos, científicamente ordenados, el método contenido en el Manual de Dotaciones de la Dirección de Agua del Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE), publicado en La Gaceta el jueves 20 de mayo de 2004 para calcular el módulo de riego que determina los requerimientos de aguas que rigen en el proceso de desarrollo de los cultivos.

3.2. Comparación de metodologías para determinar ETo

Se compararon cuatro ecuaciones para encontrar la evapotranspiración que se aplica en el cálculo del módulo de riego, a saber: FAO Penman-Monteith (Ecuación 1),

Blaney y Criddle (Ecuación 2) derivada para el Manual de Dotaciones, Thornthwaite (Ecuación 3) y Hargreaves (Ecuación 4). El estudio bibliográfico arrojó que el método más recomendado en “Estudio FAO: riego y drenaje número 56 de 2006”, para encontrar evapotranspiración es el de FAO Penman-Monteith, en contraposición con el utilizado en el Manual Técnico del Departamento de Aguas en el Capítulo I, sección 1.2 “Dotaciones para riego de cultivos”, el cual se establece mediante la combinación de la metodología de la evapotranspiración y el Uso Consuntivo, aplicando la fórmula de Blaney y Criddle. Conjuntamente se encontró que en caso de no contar con todos los datos meteorológicos para la utilización de la fórmula FAO Penman-Monteith (Ecuación 1), se debe utilizar la Hargreaves (Ecuación 4) que solo depende de Ra (radiación extraterrestre) y la temperatura máxima y mínima del aire.

3.2.1. Penman-Monteith

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

Donde:

ET_o; evapotranspiración de referencia (mm/día)

R_n; radiación neta en la superficie del cultivo (MJ/ m²/ día)

R_a; radiación extraterrestre (mm/día)

G; flujo del calor de suelo (MJ/m²/ día)

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

u₂; velocidad del viento a 2 m de altura (m/s)

e_s; presión de vapor de saturación (kPa)

e_a; presión real de vapor (kPa)

e_s – e_a déficit de presión de vapor (kPa)

Δ; pendiente de la curva de presión de vapor (kPa/°C)

γ; constante psicométrica (kPa/°C)

3.2.2. Blaney y Criddle

$$ET_o = \frac{(2120 - 0.294h)}{360} \dots \dots (2)$$

Donde:

ET_o; evapotranspiración de referencia (mm/día)

h; Altura (m.s.n.m)

3.2.3. Thornthwaite

$$\frac{e_c}{\text{\#días mes}} = ET_o \dots \dots (3)$$

$$e = 16 \left(10 \frac{t}{I} \right)^a \dots \dots (3.1)$$

$$I = \Sigma i \dots \dots (3.2)$$

$$i = \left(\frac{t}{5} \right)^{1.514} \dots \dots (3.3)$$

$$a = 0.6751 \times 10^{-6} I^3 - 0.771 \times 10^{-4} I^2 + 0.01792 I + 0.49239 \dots \dots (3.4)$$

$$e_c = f * e \dots \dots (3.5)$$

ET_o; evapotranspiración de referencia (mm/día)

e; evapotranspiración mensual en mm/mes de 30 días, y 12 horas de duración

t; temperatura media mensual en °C

I; índice térmico anual

i; índice térmico mensual

a; exponente que varía con el índice anual de calor de la localidad

f; factor de Corrección

e_c; evapotranspiración corregida para Costa Rica mm/día

3.2.4. Hargreaves

$$ET_o = 0,0023 (T_{media} + 17,8)(T_{max} - T_{min})^{0,5} R_a \dots \dots (4)$$

ET_o; evapotranspiración de referencia (mm/día)

R_a; radiación extraterrestre (mm/día)

T_{media}; temperatura media del aire (°C)

T_{max}; temperatura media del aire (°C)

T_{min}; temperatura media del aire (°C)

Para agilizar el cálculo y obtener una base de datos confiable para la Dirección de Agua, se elaboró en Excel una hoja de cálculo en la que se automatiza el procedimiento de cálculo de la ET_o (Anexo 4).

3.3. Parámetros para el cálculo de los requerimientos de agua para diferentes cultivos de la zona norte Cartago

Se tomaron muestras de suelo en campo de las diferentes fincas y se llevaron al laboratorio de suelos. Mediante el método de Bouyoucous, se encontraron los porcentajes de arenas, limos y arcillas para determinar la textura del suelo para cada finca, según las ecuaciones (5, 6, 7 y 8) y la Figura 24 del triángulo textural del USDA. Con estos mismos porcentajes, se establecieron las láminas neta y bruta de agua ecuación 9 y ecuación 10, que son las ecuaciones requeridas para el cálculo de láminas de agua de los cultivos de las diferentes fincas. Las fincas mencionadas tenían sistemas de riego localizado porque las láminas calculadas están en función del sistema de riego empleados, ya sea por gravedad o los diferentes sistemas a presión.

3.3.1. Textura

El método de Bouyoucous dicta que en la toma de temperatura del experimento que por cada grado arriba de 19,4 °C, se agregó 0,3 a la lectura del hidrómetro para el parámetro de corrección del método y que por cada grado debajo de 19,4 °C, se reste 0,3; estas lecturas se realizaron a los cuarenta segundos y a los ciento veinte minutos.

$$\% \text{ material en suspensión} = \frac{\text{Lec. Hidro. } 40'' * 100}{\text{Peso muestra}} \dots \dots (5)$$

$$\% \text{ arenas totales} = 100 - \% \text{ material en suspensión} \dots \dots (6)$$

$$\% \text{ de arcilla coloidal} = \frac{\text{Lec. Hidro. } 120' * 100}{\text{Peso muestra}} \dots \dots (7)$$

$$\% \text{ de limo} = 100 - \% \text{ de arenas} + \% \text{ de arcillas} \dots \dots (8)$$

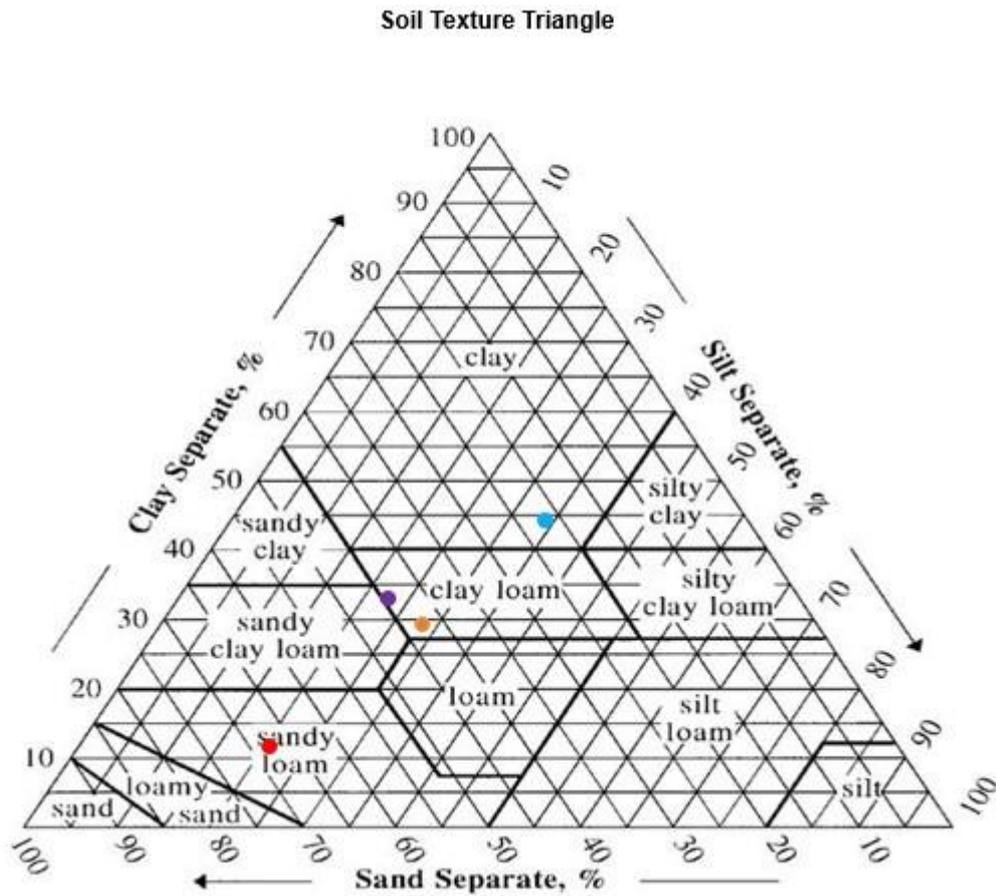


Figura 21. Triangulo textural de USDA.

Fuente: Chavarria, 2012

3.3.2. Capacidad de Campo (CC) y el Punto de Marchites Permanente (PMP)

La Capacidad de Campo (CC) y el Punto de Marchites Permanente (PMP) se establece mediante el método de Bouyoucos basado en los porcentajes de los contenidos de arena, limo y arcilla presentes en el suelo.

3.3.3. Lámina Neta

$$Ln = \frac{CC - PMP}{100} * pes * prof * ag * PAR \dots \dots (9)$$

$$CC = 0,6382 * \% \text{ arcilla} + 0,2845 * \% \text{ limo} + 0,0507 * \% \text{ arena} \dots \dots (9.1)$$

$$PMP = 0,4897 * CC + 1,1666 \dots \dots (9.2)$$

Donde:

Ln; Lámina neta en (mm)

CC; capacidad de campo (%)

PMP; punto de marchites permanente (%)

pes; es el peso específico de la muestra de suelo (gr/cm^3)

porf; profundidad radicular efectiva del cultivo (cm)

ag; fracción de agotamiento permitido por el cultivo (decimal)

PAR; porcentaje del área humedecido bajo riego (decimal)

3.3.4. Lámina bruta

$$Lb = \frac{Ln}{Ef} \dots \dots (10)$$

Lb; Lámina bruta en (mm)

Ln; Lámina neta en (mm)

Ef; eficiencia de aplicación del sistema de riego

3.3.5. Módulo de riego

$$Mr = \frac{ETc}{Ef} * 0,116 \dots \dots (11)$$

$$ETc = ETo * Kc \dots \dots (11.1)$$

Donde:

Mr; módulo de riego en (l/s/ha)

ETc; evapotranspiración del cultivo (mm/día)

ETo; evapotranspiración del cultivo de referencia (mm/día)

Kc; coeficiente del cultivo (adimensional) el cual se puede encontrar en el Anexo 4 Cuadros del 31 al 34.

Ef; eficiencia de aplicación del sistema de riego

0.116; Factor de conversión de unidades

3.3.6. Frecuencia de riego para los cultivos:

$$Fr = \frac{Ln}{ETr} \dots \dots (12)$$

3.3.7. Grado de aplicación e infiltración básica

En cada una de las fincas se determinó la velocidad de infiltración de agua en el suelo cultivado utilizando el método de los cilindros infiltrómetros de doble anillo, ya que la velocidad infiltración básica en campo debe ser mayor al grado de aplicación del riego según las ecuaciones 13 y 14, para así obtener un tiempo de riego correcto para el cultivo sin producir desperdicio de agua.

3.3.8. Grado de aplicación:

$$I = \frac{q}{EA * EL} \dots \dots (13)$$

Donde:

I; grado de aplicación del riego (mm/h)

q; caudal que da el aspersor, micro aspersor o gotero en (l/h)

EA; espaciamiento entre emisores (m)

EL; espaciamiento entre líneas (m)

3.3.9. Infiltración básica

La infiltración básica se determinó metiendo los datos de los cilindros infiltrómetros en una hoja de cálculo de Excel que arrojó resultados como se muestra en el anexo 10.

$$Ib > I$$

3.3.10. Tiempo de Riego

Como la infiltración básica fue mayor que el grado de aplicación de los sistemas de riego para todos los cultivos se determinó el tiempo de riego (Tr) mediante la Ecuación 14.

$$Tr = \frac{Lb}{I} \dots \dots (14)$$

Donde:

Tr; tiempo de riego en horas (h)

Lb; Lámina bruta en (mm)

I; grado de aplicación del riego (mm/h)

3.4. Método para realizar el análisis social

Para analizar el impacto en la sociedad, se realizó una encuesta con 12 preguntas: 10 cerradas y dos abiertas, las cuales se ejecutaron en la zona norte de la provincia de Cartago, a personas mayores de edad de ambos géneros. Las preguntas se formularon para determinar el conocimiento de las personas sobre los suministros de agua para riego de algunos cultivos en la zona de estudio. La encuesta realizada se encuentra en el Anexo 3.

3.5. Método para realizar el análisis económico

Para este análisis se tomaron algunos estados de cuenta en los cánones de concesiones de sociedades de usuarios de agua (SUA).

Con base en los reportes contables de la Dirección de Agua y en comparación con el ahorro en metros m³/mes de agua concesionada al comparar el método de cálculo con la fórmula de Blaney y Criddle empleado en el Manual de Dotaciones de la Dirección de Aguas y la ecuación recomendada FAO Penman-Monteith.

3.6. Método para realizar el análisis ambiental

Para el análisis ambiental se tomó en cuenta el impacto que tendrá la implementación de la nueva técnica de requerimientos de agua en la zona norte de Cartago mediante la ecuación FAO Penman-Monteith.

Adicionalmente, como fuente primaria de recolección de datos, se asistió a tres reuniones de las Sociedades de Usuarios de Agua (SUA) de la zona estudiada, con el fin de aplicar las encuestas y escuchar la problemática de los suministros de agua. Dichas reuniones se realizaron en la sede del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) de Cartago y en la Escuela de Llano Grande de Cartago (ver fotos en Anexo 1 y 2).

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. Resultados y comparaciones de los diferentes métodos sugeridos para determinar ETo.

Se usó un nuevo método para el cálculo de los requerimientos de aguas que rigen en el proceso de desarrollo de los cultivos de la zona Norte de Cartago, basado en primera estancia en el cálculo de la evapotranspiración del cultivo de referencia (ETo) mediante el método FAO Penman-Monteith. Sustituyendo así el método para el cálculo de la (ETo), con la fórmula de Blaney y Criddle empleado en el Manual de Dotaciones de la Dirección de Agua.

Adicionalmente, se estableció que de no contarse con los datos meteorológicos para utilizar la ecuación FAO Penman-Monteith se podría sustituir por la ecuación de Hargreaves para determinar ETo, ya que solo depende de R_a (radiación extraterrestre) y la temperatura máxima y mínima del aire. Se debe verificar la validez de sus resultados comparándolos con estimaciones de la ecuación de FAO Penman-Monteith en estaciones meteorológicas cercanas donde sí se dispone de datos de radiación solar, temperatura del aire, humedad, y velocidad del viento. También es importante recalcar que la ecuación de Hargreaves tiene una tendencia a subestimar los valores de ETo bajo condiciones de viento fuerte ($u_2 > 3$ m/s) y a sobreestimar la ETo bajo condiciones de elevada humedad relativa, condiciones muy comunes durante algunos meses para Costa Rica y la zona norte de la provincia de Cartago donde se realizó este estudio.

Al comparar las cuatro ecuaciones con los mismos datos meteorológicos de georeferenciación y de alturas para encontrar la ETo que se aplica en el cálculo del módulo de riego, a saber: FAO Penman-Monteith, Blaney-Criddle, Thornthwaite y Hargreaves; se encontraron diferencias significativas en el cálculo de la ETo, y que tomando como base la ecuación propuesta de FAO Penman-Monteith arrojaron resultados sobreestimados en todos los casos para las ecuaciones de Blaney-Criddle, y Hargreaves; y resultados subestimados para la ecuación de Thornthwaite en esta zona es específico.

La variación en el cálculo de la ETo en todos los casos fue hasta de 1 mm/día o más para la ecuación de Blaney-Criddle, se puede atribuir a la combinación de la metodología de la evapotranspiración y el Uso Consuntivo aplicados en específico para el Manual Técnico del Departamento de Aguas del Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE), ya que este solo depende de una variable de donde se realiza el estudio que es

en metros sobre el nivel del mar: *la altura* (h), y sin tomar en cuenta las variabilidades de otros datos meteorológicos importantes que tienen que ver con las zonas específicas. Estos resultados con Blaney-Criddle implican una diferencia en el módulo de riego de hasta 10.000 litros por hectárea o más en el agua utilizada para riego. Esta diferencia puede ser muy significativa desde el punto de vista social, ambiental y económico

La variación en el cálculo de la ETo en todos los casos para Hargreaves es pequeña con una media de 0,04 mm/día en la zona de estudio sobre la ecuación FAO Penman-Monteith, lo cual implica una diferencia media de 400 litros de agua por hectárea utilizada para riego. En una zona problemática por el faltante de agua durante algunos meses del año de estrés hídrico y por fenómenos climáticos como por ejemplo el Niño o la Niña o fenómenos locales, esta diferencia puede ser significativa, cada gota del recurso hídrico cuenta. Aun así, este método se recomienda si no se cuenta con los datos meteorológicos necesarios para calcular ETo por FAO Penman-Monteith. De hecho, la diferencia de sobreestimación de la ETo entre Hargreaves y la ecuación sugerida se puede deber a las condiciones de elevada humedad relativa de la zona.

La ecuación de Thornthwaite a diferencia de los dos casos anteriores, arroja datos de menor evapotranspiración en todos los argumentos de la zona en comparación con la ecuación FAO Penman-Monteith. Según Villón (2004), el método Thornthwaite fue desarrollado a partir de datos de precipitación y escorrentía para diversas cuencas de drenaje y es muy utilizado en hidrología para el cálculo de balance hídrico.

Puede ser por el tipo de utilización que se le da al método que incida en la media estimada, que está por debajo en 0,86 mm/día en comparación con FAO Penman-Monteith. Para esta zona Thornthwaite puede ser que no obtenga los requerimientos mínimos para que los cultivos y sus tejidos crezcan y den la producción adecuada, afectando los intereses económicos de los agricultores y productores; sin embargo, esta es una suposición que debe ser sustentada con estudios y bases científicas.

Como ejemplo para este análisis de resultados se tomó la estación ubicada en Tierra Blanca llamada estación Sanatorio Durán y para una altitud de 2230 msnm, en ella se determinó la evapotranspiración del cultivo de referencia para la zona por el método FAO Penman-Monteith.

4.1.2. FAO Penman-Monteith

Esta estación meteorológica que aporta los datos necesarios para encontrar la ETo se encuentra entre 2 y 6 kilómetros a las fincas tomadas modelo para el análisis de los cultivos. Como se muestra en el Cuadro 3, la ETo promedio es de 2,88 mm/día, y los meses con mayor evapotranspiración son marzo y abril, 3,62 y 3,48 mm/día respectivamente, estos coincidiendo con la época seca de la zona y con temperaturas promedio máximas para un periodo de hasta 30 años. Por lo contrario, para la época lluviosa, con la disminución de las temperaturas, con el aumento de la nubosidad y la humedad relativa y en cierto grado la disminución de las horas de insolación entre otros parámetros climatológicos, la ETo disminuye como se puede observar en el Cuadro 3 para los meses de octubre y noviembre con ETo de 2,48 y 2,22 mm/día respectivamente.

Cuadro 3. ETo mensual, método FAO Penman-Monteith para la estación ubicada en Tierra Blanca de Cartago, nombre de la estación Sanatorio Durán

País		Estación					
CR	Tierra Blanca	Sanatorio Durán					
Altitud	2230 m.	Latitud	9.93 °N				
			Longitud				
			83.88 °E				
Mes	Temp Min	Temp Max	Humedad	Viento	Insolación	Rad	ETo
	°C	°C	%	km/día	horas	MJ/m ² /día	mm/día
Enero	11.0	17.9	84	466	8.6	20.0	2.97
Febrero	10.3	18.3	81	472	8.6	21.4	3.34
Marzo	10.5	18.9	81	421	9.0	23.0	3.62
Abril	11.8	20.2	82	360	6.9	20.1	3.48
Mayo	12.7	19.5	87	301	4.8	16.5	2.86
Junio	12.5	19.5	88	315	3.6	14.5	2.59
Julio	12.4	19.3	87	368	3.4	14.2	2.58
Agosto	12.6	19.3	86	349	4.7	16.5	2.87
Septiembre	12.7	19.5	87	288	5.3	17.4	2.95
Octubre	12.4	18.5	92	245	4.5	15.5	2.48
Noviembre	11.8	17.4	92	317	4.9	15.0	2.22
Diciembre	11.2	17.6	87	425	7.1	17.5	2.57
Promedio	11.8	18.8	86	361	5.9	17.6	2.88

4.1.3. Blaney y Criddle

Para el método modificado de Blaney y Criddle empleado en el Manual de Dotaciones de la Dirección de Agua del MINAE el resultado de la evapotranspiración de referencia fue 4,07 mm/día para todos los meses del año, este se da como constante para la zona porque la única variable que posee la ecuación es la altura. Si se compara este

método con el método recomendado FAO Penman-Monteith y su resultado promedio en la zona en estudio que es de 2,88 mm/día se ve que la diferencia es de 1,19 mm/día.

Esta diferencia de más en evapotranspiración para el método empleado por la Dirección de Agua de 1,19 mm/día parecerá poco significativo, pero sí se encuentra la diferencia para una hectárea en términos de cuánta agua más se necesitaría para los requerimientos de los cultivos estaríamos hablando de 11.900 l/ha.

Además, esta diferencia en las comparaciones entre métodos se dejaría notar para los meses de la época seca cuando existe mayor demanda del riego para los cultivos y cuando la zona norte de la provincia de Cartago presenta problemas de abastecimiento del recurso hídrico, según expresan los usuarios de las dotaciones que son dadas a las Sociedades de Usuarios de Agua (SUA) por parte de la Dirección de Aguas. Esta diferencia encontrada entre métodos para el mes de abril y en época seca, por ejemplo, sería de 0,60 mm/día o sea seis mil litros de agua por hectárea y si a esto se suman todas las hectáreas cultivadas de la zona funcionando bajo los sistemas de riego, se encontraría una diferencia abismal en el ahorro del agua bajo el método FAO Penman-Monteith.

Asimismo, si la dotación está otorgada al concesionario en este caso las SUAs y a particulares podría existir un ahorro económico para ellos y una ganancia para la Dirección de Agua, esto porque se tendrían más recurso hídrico a disposición y podría llegar a más usuarios.

Se puede observar que en los meses de época lluviosa la diferencia entre métodos para la determinación de la evapotranspiración de referencia aumenta, por ejemplo en el mes de noviembre es de 2,22 mm/día para el método FAO Penman-Monteith y 4,07 mm/día para el método modificado de Blaney y Criddle, con una diferencia de 1,85 mm/día; lo que representa 18.500 litros de agua por hectárea y que se vería magnificada si se sumarían todas las concesiones dadas, así el agua eventualmente podría ser aprovechada para otros usos y o almacenada para la época seca y de estrés hídrico en la zona.

4.1.4. Hargreaves

En el Cuadro 4 se observan los datos obtenidos para la evapotranspiración de referencia mensual por el método Hargreaves para la estación ubicada en Tierra Blanca de Cartago y cuyo nombre es Estación Sanatorio Durán. La comparación de los promedios para el método FAO Penman-Monteith que es de 2,88 mm/día y el método

Hargreaves que es de 2,92 mm/día es muy poca, de apenas 0,04 mm/día. En la revisión bibliográfica se menciona que este método se puede usar como sustituto del método FAO Penman-Monteith con excelentes resultados y esto se puede comprobar al analizar los resultados del Cuadro 3 y el Cuadro 4. Hargreaves solo utiliza las variables en su método la temperatura media, la radiación extraterrestre y la localización geográfica de la zona, sin embargo, el método puede desviarse en sus resultados con respecto al método FAO Penman-Monteith al cambiar el posicionamiento geográfico y la altura de la zona en estudio. El método FAO Penman-Monteith posee más variables climatológicas es más confiable y esto se puede ver reflejado en el Anexo 11 comparando los cuadros 45 y 46, que contiene los datos de otra estación meteorológica en una zona muy diferente a la zona en estudio.

El ejemplo en concreto pertenece a la zona sur de Costa Rica, datos para la estación meteorológica La Piñera, específicamente en Buenos Aires de Puntarenas, ubicada a una altura de 350 msnm. Se puede observar que la evapotranspiración de referencia promedio para el método FAO Penman-Monteith es de 3,48 mm/día, mientras que por el método Hargreaves es de 4,97 mm/día; una diferencia de 1,49 mm/día, la cual sí es significativa y equivale a casi 15.000 l/ha de agua. Aquí sí se puede notar la diferencia que provoca el cambio geográfico y el cambio de altura de pasar de 2230 msnm en la zona de Tierra Blanca a 350 msnm en Buenos Aires de Puntarenas.

Cuadro 4. Evapotranspiración de referencia mensual por el método Hargreaves para la estación ubicada en Tierra Blanca de Cartago, nombre de la estación Sanatorio Durán.

Mes	Ra (mm/día)	T min (°C)	T max (°C)	T media (°C)	Eto (mm/día)
Enero	13,03	11,00	17,90	14,45	2,54
Febrero	14,09	10,30	18,30	14,30	2,94
Marzo	15,10	10,50	18,90	14,70	3,27
Abril	15,48	11,80	20,20	16,0	3,49
Mayo	15,30	12,70	19,50	16,10	3,11
Junio	15,06	12,50	19,50	16,00	3,10
Julio	15,13	12,40	19,30	15,85	3,08
Agosto	15,31	12,60	19,30	15,95	3,08
Septiembre	15,11	12,70	19,50	16,10	3,07
Octubre	14,28	12,40	18,50	15,45	2,70
Noviembre	13,22	11,80	17,40	14,60	2,33
Diciembre	12,66	11,20	17,60	14,40	2,37
Promedio	14,48	11,83	18,83	15,33	2,92

4.1.5. Thornthwaite

En el Cuadro 5 se presenta la evapotranspiración de referencia mensual por el método Thornthwaite para la estación ubicada en Tierra Blanca de Cartago, nombre de la estación Sanatorio Durán.

Nuevamente la comparación de los promedios para el método FAO Penman-Monteith que es de 2,88 mm/día y el método Thornthwaite que es de 1,97 mm/día, es de 0,91 mm/día de diferencia. Como se puede notar para todos los meses del año la evapotranspiración de referencia por el método Thornthwaite es menor que la evapotranspiración por el método FAO Penman-Monteith, Esta disminución en el método Thornthwaite puede deberse a que dicho método solo utiliza como parámetro meteorológico la temperatura promedio mensual, además del posicionamiento geográfico de la zona en estudio, este a su vez depende de un factor de corrección (f).

Tomar en cuenta el método Thornthwaite puede llevar a someter los cultivos a un estrés hídrico puesto que claramente los métodos anteriores tienen datos de evapotranspiración de referencia superiores. Al verse afectada una cantidad de agua para riego, los cultivos pueden generar pérdidas financieras a los agricultores y comerciantes, generando inestabilidad económica para la zona y creando problemas de índole social.

Cuadro 5. Evapotranspiración de referencia mensual por el método Thornthwaite para la estación ubicada en Tierra Blanca de Cartago, nombre de la estación Sanatorio Durán.

Mes	#días	T	Índice i	e(mm)	Factor f	ec (mm)	Eto (mm/día)
enero	31	14,45	4,987	53,497	0,98	52,427	1,69
febrero	28	14,30	4,908	52,652	0,91	47,914	1,71
marzo	31	14,70	5,118	54,914	1,03	56,561	1,82
abril	30	16,00	5,818	62,487	1,03	64,362	2,15
mayo	31	16,10	5,873	63,083	1,08	68,130	2,20
junio	30	16,00	5,818	62,487	1,06	66,236	2,21
julio	31	15,85	5,736	61,596	1,08	66,524	2,15
agosto	31	15,95	5,791	62,190	1,07	66,543	2,15
septiembre	30	16,10	5,873	63,083	1,02	64,345	2,14
octubre	31	15,45	5,518	59,242	1,02	60,427	1,95
noviembre	30	14,60	5,065	54,346	0,98	53,259	1,78
diciembre	31	14,40	4,960	53,215	0,99	52,683	1,70
		I=Σi	65,467			Promedio	1,97

4.2. Resultados por el método sugerido FAO Penman-Monteith, para el cálculo de los requerimientos de agua de un cultivo representativo.

En la figura 22, se puede observar la línea tendencia en el gráfico de la evapotranspiración del cultivo referencia mensual en mm/día por el método sugerido en el estudio, método FAO Penman-Monteith. Como se puede ver la época seca está bien marcada como la época de mayor evapotranspiración como son los meses de marzo y abril, mientras que la época de menor evapotranspiración es la lluviosa como lo son los meses de octubre y noviembre. La línea de tendencia de la evapotranspiración del cultivo de referencia determina las líneas de tendencia de la evapotranspiración para cada cultivo específico y esta a su vez al módulo de riego.



Figura 22. ETo para la estación ubicada en Tierra Blanca de Cartago, nombre de la estación Sanatorio Durán.

En la Figura 23 se representa la evapotranspiración del cultivo (ETc) de papa en etapa media de crecimiento en la zona de estudio, que es la etapa de mayor consumo de agua para los cultivos, se puede comparar la línea de tendencia de evapotranspiración del cultivo referencia Figura 22, con la línea de tendencia de la Figura 23 , y observar como siguen la misma propensión debido a que la ETc depende de la ETo, al ser un producto que se encuentra al multiplicar la ETo por el coeficiente único del cultivo (Kc) que se desee; en este caso la papa, el Kc medio para la papa para obtener el producto es de 1,15 (adimensional).

Esto se puede reafirmar puesto que en los meses de mayor evapotranspiración para el cultivo de papa son marzo y abril con 4,16 mm/día y 4,00 mm/día en relación con la evapotranspiración del cultivo de referencia de la Figura 22 para los mismos meses.

Estas tendencias mensuales rigen para todos los cultivos de la zona debido al producto explicado anteriormente.

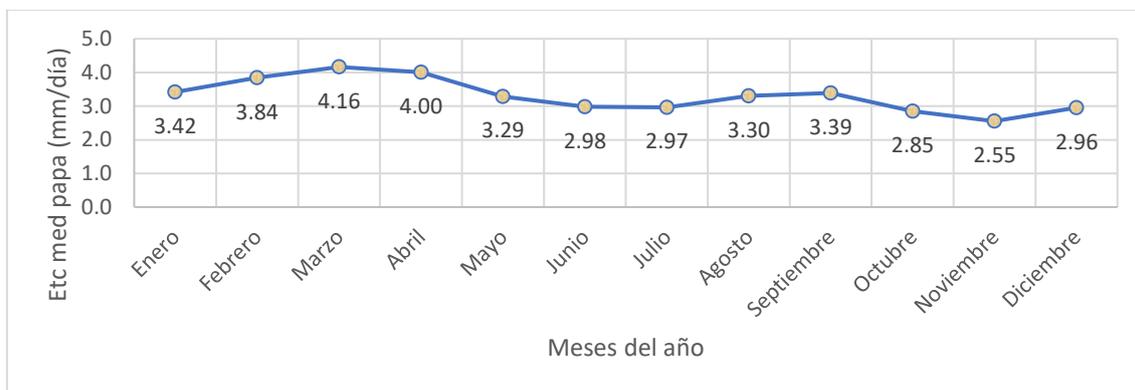


Figura 23. Evapotranspiración del Cultivo de papa en etapa media, para la zona de Tierra Blanca de Cartago.

La Figura 24 muestra la tendencia de la curva para el módulo de riego (M_r) en l/s/ha para el cultivo de papa, si se analiza bien es la misma línea de tendencia de las Figuras 22 y 23, debido a que cada una de ellas depende de la anterior, el módulo de riego es un producto de la ETC entre el porcentaje de eficiencia del sistema de riego que se esté utilizando en la zona del cultivo, a referenciar en este caso el cultivo de papa.

La demanda de mayor requerimiento de agua en una etapa media de crecimiento es para el mes marzo en el cultivo de papa con 0,64 l/s/ha y abril 0,62 l/s/ha, los cuales se deben aplicar en el riego para que este tenga una productividad óptima. En este caso en específico se consideró una eficiencia del 75% para un riego por aspersión.



Figura 24. Módulo de riego para el cultivo de papa en etapa media de crecimiento y para una eficiencia del sistema de riego por aspersión del 75% en la zona de Tierra Blanca de Cartago.

Se debe reconocer que para tener todos los resultados se tiene que crear una base de datos para la zona en estudio, que contenga la ETo y para cada cultivo la ETc y el Mr, en sus diferentes etapas de crecimiento, y para cada mes del año.

Cada una de estas etapas determinaría una evapotranspiración del cultivo generada a su vez por el coeficiente del cultivo de referencia (Kc) para el método FAO Penman-Monteith; esto determinará un módulo de riego para cada mes y para cada etapa de crecimiento.

Las ocho estaciones meteorológicas de las cuales se poseen datos confiables y el método sugerido generaran el cálculo para los cultivos de brócoli, cebolla, coliflor, flores, fresas, maíz, papa, pastos, repollo, tomate y zanahoria; que son los más representativos de la zona. Estos cálculos generaron más de 870 cuadros de resultados; imposible de colocar en los anexos de este estudio. Por lo tanto, si se desea conocer el resultado se debe consultar con el autor de este estudio.

Para los cuadros de la ETo mensual y su línea de tendencia para las ocho estaciones meteorológicas que abarcan el área de estudio se encuentran en el Anexo 5.

4.3. Resultados del cálculo de los requerimientos de agua para diferentes cultivos de las fincas modelo.

De acuerdo con la proximidad de las estaciones meteorológicas con las fincas se calculó para cada una de ellas la ETo, la ETc y el módulo de riego (Mr), para una etapa

media del cultivo, que es la etapa de mayor consumo de agua para riego en su proceso de crecimiento.

Así mismo, para cada finca se calculó la textura del suelo, porcentaje de materiales en suspensión, porcentaje de arenas totales, porcentaje de arcilla y limos, peso específico del suelo, peso suelo seco y peso suelo húmedo, humedad gravimétrica y volumétrica. Para cada finca se determinó también el contenido de humedad presente en el suelo mediante la capacidad de campo (CC) y punto de marchites permanente (PMP). En cada finca se estableció la lámina neta y bruta para el cálculo de riego, la ETo, la ETr en etapa media de crecimiento, la frecuencia de riego (Fr), el módulo de riego (Mr) en etapa media de crecimiento, la velocidad infiltración básica (Ib) del suelo, el grado de aplicación del sistema de riego (I) y el tiempo de riego (Tr).

A continuación, los resultados más relevantes arrojados para cada finca, calculados para una etapa media de crecimiento del cultivo.

Finca uno: 9° 57'01" latitud norte y 83° 56'24" longitud oeste, ubicada a 1,3 km de la estación meteorológica Corralillo de la cual se tomaron los datos meteorológicos para hacer los cálculos de ETo, ETr y Mr.

En el Cuadro 6 se muestran los porcentajes de sólidos en suspensión arrojados por el método de Bouyoucos para determinación de la Textura obteniendo un Suelo Franco Arenoso para la Finca 1.

Cuadro 6. Porcentajes de sólidos en suspensión por el método de Bouyoucos para la Finca 1.

% Materia en suspensión	32,25
% arenas totales	67,75
% Arcilla	11,25
% Limos	21,00

En el Cuadro 7 se muestra en gramos el peso de suelo húmedo y peso suelo seco, recolectados en cilindros metálicos para muestras en la Finca 1.

Cuadro 7. Peso de suelo húmedo y peso suelo seco para muestreo recolectados en la Finca 1.

PSH (gr)	137,10
PSS (gr)	87,70

Para encontrar las láminas netas en mm para los diferentes cultivos se ocuparon los resultados del Cuadro 6, CC capacidad de campo y el PMP punto de marchites permanente. Además, con un volumen en el cilindro de muestreo de 85,05 cm³, se encontró un peso específico 1,03 gr/cm³ de la muestra de suelo; la profundidad radicular efectiva para cada cultivo (cm), fracción de agotamiento permitido para cada cultivo (decimal) y porcentaje del área humedecido bajo riego (PAR) que para todos los casos fue del 100 % ya que los sistemas de riego por aspersion y goteo cubrían toda el área.

Cuadro 8. CC capacidad de campo y el PMP punto de marchites permanente obtenidos para la Finca 1.

CC (%)	16,59
PMP (%)	9,29

El Cuadro 9 muestra las determinaciones para los cultivos para el periodo más crítico (marzo), como lo son: láminas netas (Ln) y brutas (Lb), además de la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o), el coeficiente del cultivo (K_c) para periodo más crítico, la evapotranspiración del cultivo (ET_c), la frecuencia de riego (Fr), el módulo de riego (Mr), el grado de aplicación (I) y el tiempo de riego (Tr).

Cuadro 9. Determinaciones para los cultivos para periodo más crítico (marzo), K_c etapa media del cultivo.

Cultivo periodo más crítico (marzo) K_c etapa media del cultivo					
	Papa	Fresa	Repollo	Brócoli	Zanahoria
Ln (mm)	13,17	3,76	22,01	16,93	19,76
Lb (mm)	18,82	4,18	31,45	24,19	28,22
ET _o (mm/día)	3,57	3,57	3,57	3,57	3,57
K _c	1,15	0,85	1,05	1,05	1,05
ET _c (mm/día)	4,11	3,03	3,75	3,75	3,75
Fr (días)	3,21	1,24	5,87	4,52	5,27
Mr (l/s/ha)	0,63	0,39	0,58	0,58	0,58
I (mm/h)	6,80	40,00	6,80	6,80	6,80
Tr (h)	2,77	0,10	4,62	3,56	4,15

Como la infiltración básica tomada en campo en la Finca 1 fue de 331,49 mm/h y esta fue mayor que el grado de aplicación de los sistemas de riego para todos los cultivos se determinó que no ocurrirían problemas por percolación ni escorrentía.

Finca 2: 9°55'32" latitud norte y 83°54'14" longitud oeste, ubicada a 3 km de la estación meteorológica Llano Grande de la cual se tomaron los datos meteorológicos para hacer los cálculos de ETo, ETr y Mr.

En el Cuadro 10 se muestra los porcentajes de sólidos en suspensión arrojados por el método de Bouyoucos para determinación de la Textura obteniendo un Suelo Franco Arcilloso para la Finca 2.

Cuadro 10. Porcentajes de sólidos en suspensión por el método de Bouyoucos para la Finca 2.

% Materia en suspensión	57,25
% arenas totales	42,75
% Arcilla	28,75
% Limos	28,5

En el Cuadro 11 se muestra en gramos el peso de suelo húmedo y peso suelo seco, recolectados en cilindros metálicos para muestras en la Finca 2.

Cuadro 11. Peso de suelo húmedo y peso suelo seco para muestreo recolectados en la Finca 2

PSH	137,1
PSS	87,7

Para encontrar las láminas netas en mm para los diferentes cultivos se ocuparon los resultados del Cuadro 12, CC capacidad de campo y el PMP punto de marchites permanente. Además, con un volumen en el cilindro de muestreo de 85,05 cm³, se encontró un peso específico 0,98 gr/cm³ de la muestra de suelo; la profundidad radicular efectiva para cada cultivo (cm), fracción de agotamiento permitido para cada cultivo (decimal) y porcentaje del área humedecido bajo riego (PAR) que para todos los casos fue del 100 % ya que los sistemas de riego por aspersión y goteo cubrían toda el área.

Cuadro 12. CC capacidad de campo y el PMP punto de marchites permanente obtenidos para la Finca 2.

CC	28,62
PMP	15,18

El cuadro 13 muestra las determinaciones para los cultivos para el periodo más crítico (marzo), como lo son: láminas netas (Ln) y brutas (Lb), además de la evapotranspiración del cultivo de referencia (ETo), el coeficiente del cultivo (Kc) para periodo más crítico, la evapotranspiración del cultivo (ETc), la frecuencia de riego (Fr), el módulo de riego (Mr), el grado de aplicación (I) y el tiempo de riego (Tr).

Cuadro 13. Determinaciones para los cultivos para periodo más crítico (marzo), Kc etapa media del cultivo, Finca 2.

Mes marzo	Flores	Fresa
Ln (mm)	68,45	6,61
Lb (mm)	76,05	7,35
Eto(mm/día)	3,74	3,74
Kc	1,15	0,85
Etr (mm/día)	4,30	3,18
Fr (días)	15,91	2,08
Mr (l/s/ha)	0,67	0,41
I (mm/h)	40,00	40,00
Tr (h)	1,90	0,18

Como la infiltración básica tomada en campo en la Finca 2 fue de 514,29 mm/h y esta fue mayor que el grado de aplicación de los sistemas de riego para todos los cultivos se determinó que no ocurrirían problemas por percolación ni escorrentía.

Finca tres: 9°54'36" latitud norte y 83°53'03" longitud oeste, ubicada a 2 km de la estación meteorológica Sanatorio Duran de la cual se tomaron los datos meteorológicos para hacer los cálculos de ETo, ETr y Mr.

En el Cuadro 14 se muestra los porcentajes de sólidos en suspensión arrojados por el método de Bouyoucos para determinación de la Textura obteniendo un Suelo Arcilloso para la Finca 3.

Cuadro 14. Porcentajes de sólidos en suspensión por el método de Bouyoucos para la Finca 3.

% Materia en suspensión	78,00
% arenas totales	22,00
% Arcilla	43,75
% Limos	34,25

En el Cuadro 15 se muestra en gramos el peso de suelo húmedo y peso suelo seco, recolectados en cilindros metálicos para muestras en la Finca 3.

Cuadro 15. Peso de suelo húmedo y peso suelo seco para muestreo recolectados en la Finca 3.

PSH	147,20
PSS	109,10

Para encontrar las láminas netas en mm para los diferentes cultivos se ocuparon los resultados del Cuadro 16, CC capacidad de campo y el PMP punto de marchites permanente. Además, con un volumen en el cilindro de muestreo de 85,05 cm³, se encontró un peso específico 1,28 gr/cm³ de la muestra de suelo; la profundidad radicular efectiva para cada cultivo (cm), fracción de agotamiento permitido para cada cultivo (decimal) y porcentaje del área humedecido bajo riego (PAR) que para todos los casos fue del 100 % ya que los sistemas de riego por aspersion y goteo cubrían toda el área.

Cuadro 16. CC capacidad de campo y el PMP punto de marchites permanente obtenidos para la Finca 3.

CC	38,78
PMP	20,16

El cuadro 17 muestra las determinaciones para los cultivos para el periodo más crítico (marzo), como lo son: láminas netas (Ln) y brutas (Lb), además de la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o), el coeficiente del cultivo (K_c) para

periodo más crítico, la evapotranspiración del cultivo (ETc), la frecuencia de riego (Fr), el módulo de riego (Mr), el grado de aplicación (I) y el tiempo de riego (Tr).

Cuadro 17. Determinaciones para los cultivos para periodo más crítico (marzo), Kc etapa media del cultivo, Finca 3.

Mes marzo	Papa	Cebolla	Zanahoria
Ln (mm)	41,81	37,63	62,71
Lb (mm)	59,72	41,81	89,59
Eto(mm/día)	3,62	3,62	3,62
Kc	1,15	1,00	1,05
Etr (mm/día)	4,16	3,62	3,80
Fr (días)	10,04	10,39	16,50
Mr (l/s/ha)	0,64	0,47	0,59
I (mm/h)	4,72	4,72	4,72
Tr (h)	12,65	8,85	18,97

No se pudo realizar el experimento de cilindros infiltrómetros para determinar la infiltración básica puesto que no existía la disponibilidad de agua para la realización en la Finca 3, sin embargo, la bibliografía sugiere que las infiltraciones básicas para suelos arcillosos están en un rango de 5-10 mm/h y esta es mayor que el grado de aplicación de los sistemas de riego para todos los cultivos se determinó que no ocurriría problemas por percolación ni esorrentía.

Finca cuatro: 9°54'47" latitud norte y 83°53'06" longitud oeste, ubicada a 2 km de la estación meteorológica Sanatorio Duran de la cual se tomaron los datos meteorológicos para hacer los cálculos de ETo, ETr y Mr.

En el Cuadro 18 se muestra los porcentajes de sólidos en suspensión arrojados por el método de Bouyoucos para determinación de la Textura obteniendo un Suelo Franco Arcilloso para la Finca 3.

Cuadro 18. Porcentajes de sólidos en suspensión por el método de Bouyoucos para la Finca 4.

% Materia en suspensión	55,50
% arenas totales	44,50
% Arcilla	32,50
% Limos	23,00

En el Cuadro 19 se muestra en gramos el peso de suelo húmedo y peso suelo seco, recolectados en cilindros metálicos para muestras en la Finca 4.

Cuadro 19. Peso de suelo húmedo y peso suelo seco para muestreo recolectados en la Finca 4.

PSH	129,50
PSS	94,40

Para encontrar las láminas netas en mm para los diferentes cultivos se ocuparon los resultados del Cuadro 20, CC capacidad de campo y el PMP punto de marchites permanente. Además, con un volumen en el cilindro de muestreo de 85,05 cm³, se encontró un peso específico 0,98 gr/cm³ de la muestra de suelo; la profundidad radicular efectiva para cada cultivo (cm), fracción de agotamiento permitido para cada cultivo (decimal) y porcentaje del área humedecido bajo riego (PAR) que para todos los casos fue del 100 % ya que los sistemas de riego por aspersión y goteo cubrían toda el área.

Cuadro 20. CC capacidad de campo y el PMP punto de marchites permanente obtenidos para la Finca 4.

CC	29,54
PMP	15,63

El cuadro 21 muestra las determinaciones para los cultivos para el periodo más crítico (marzo), como lo son: láminas netas (Ln) y brutas (Lb), además de la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o), el coeficiente del cultivo (K_c) para periodo más crítico, la evapotranspiración del cultivo (ET_c), la frecuencia de riego (Fr), el módulo de riego (Mr), el grado de aplicación (I) y el tiempo de riego (Tr).

Cuadro 21. Determinaciones para los cultivos para periodo más crítico (marzo), Kc etapa media del cultivo, Finca 4.

Mes marzo	Papa	Cebolla	Zanahoria
Ln (mm)	27,01	24,31	40,52
Lb (mm)	38,59	27,01	57,89
Eto(mm/día)	3,62	3,62	3,62
Kc	1,15	1,00	1,05
Etr (mm/día)	4,16	3,62	3,80
Fr (días)	6,49	6,72	10,66
Mr (l/s/ha)	0,64	0,47	0,59
I (mm/h)	4,72	4,72	4,72
Tr (h)	8,17	5,72	12,26

Como la infiltración básica tomada en campo en la Finca 4 fue de 120,81 mm/h y esta fue mayor que el grado de aplicación de los sistemas de riego para todos los cultivos se determinó que no ocurrirían problemas por percolación ni escorrentía.

4.4. Análisis social

En primer lugar, se consultó por el género del encuestado donde se obtuvo que un 87% eran del género masculino y un 13% del género femenino, así como lo muestra la Figura 25. Claramente se ve la tendencia que la mayoría de los agricultores son hombres y muy pocas mujeres debido a razones culturales.

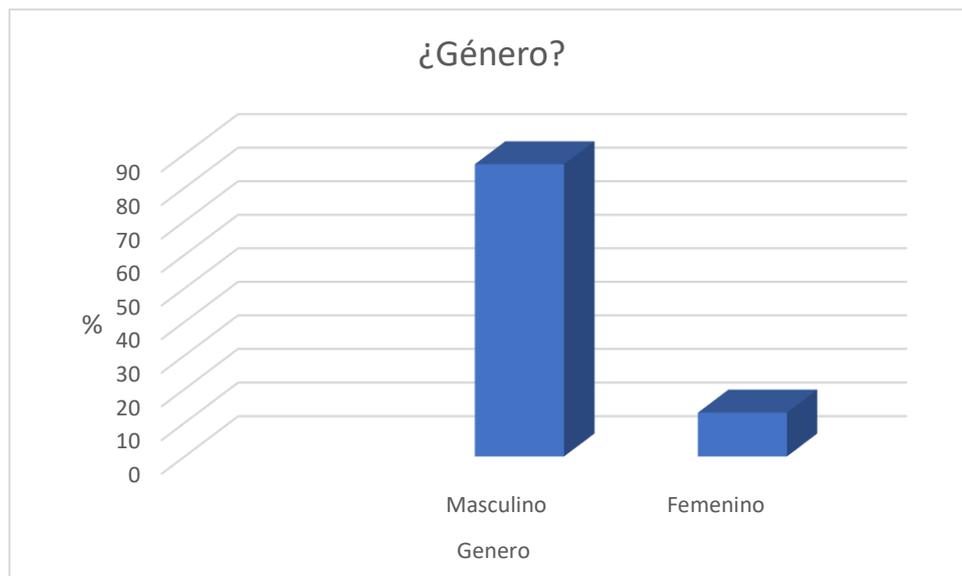


Figura 25. Género de los agricultores encuestados.

La segunda pregunta que se realizó fue la edad de los agricultores encuestados donde se encuentra que el mayor porcentaje está entre 50 a 60 años que equivale a un 35% pertenecientes a este rango, seguidamente las edades comprendidas entre 40 a 50 años y entre 30 a 40 años obtuvieron un porcentaje del 22% de los encuestados; además un 17% tenían una edad de 60 años o más y con un porcentaje muy bajo, de tan solo el 4% para personas jóvenes de entre 20 a 30 años de edad.

Lo que nos muestra la Figura 26 es que los encargados e interesados en la materia agrícola es gente mayor a los 50 años, que probablemente dentro de algunos años dejen dicha actividad. En contraste, la gente joven representa un porcentaje muy bajo lo que nos indica que el rango de agricultores de entre 20 a 30 años es muy poco, probablemente este grupo poblacional se esté dedicando a otras labores lo que da a entender que en un futuro el agro carecerá de mano de obra debido al cambio generacional.

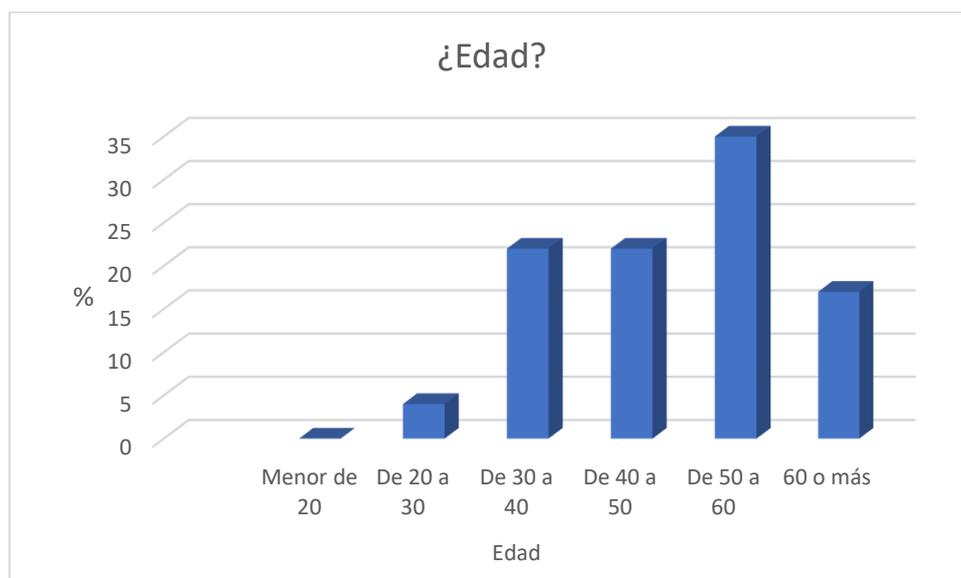


Figura 26. Edades de los agricultores encuestados.

Otra de las preguntas realizadas fue cual es el grado académico de los encuestados la Figura 27 representa los porcentajes, se encontró que la mayoría de los encuestados un 48% solo poseen estudios en primaria, y que conforme se va avanzando en el grado académico el porcentaje disminuye, puesto que para secundaria un 30% poseen este grado académico, 13% con bachillerato, y solo un 4% para licenciatura o maestría.

Mucha de la problemática de la zona se debe al desperdicio del recurso hídrico al utilizar sistemas de riego que no son adecuados. También las prácticas culturales en el

riego son una problemática puesto que si el agricultor no ve la porción de suelo completamente mojada no creen que el cultivo recibió su dosis de riego; esto sin conocer exactamente las láminas netas para el riego ni sus tiempos de riego. Se sabe que sistemas de riego localizado son más efectivos y precisos si se saben utilizar adecuadamente.

Este desconocimiento generalizado se puede deber a la baja escolaridad con que cuentan la mayoría de los agricultores como lo demuestra la encuesta.

Esto no quiere decir que se desecha su labor cultural solo indica que prepararse mejor académicamente solucionaría mucho de los problemas concernientes al manejo del recurso hídrico presentados en la zona.

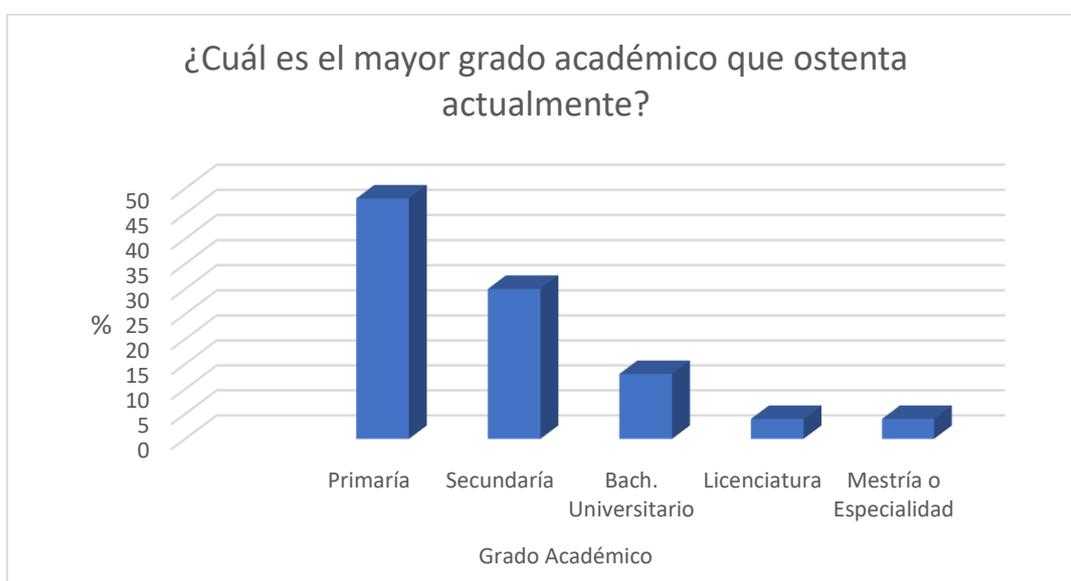


Figura 27. Porcentajes de grado académico de los agricultores encuestados.

La pregunta 4 de la encuesta es sobre si los encuestados pertenecían a alguna sociedad de usuarios (SUA), las cuales son sociedades alentadas a formarse por la Dirección de Agua del MINAE, para que la sociedad y sus usuarios administren de forma responsable y equitativamente el recurso hídrico.

La Dirección de Agua les concede a estas (SUA's) un caudal en litros por segundo proveniente de una fuente cercana y debido a este otorgamiento la DA cobra un canon trimestral.

La Figura 28 muestra el porcentaje de los encuestados que pertenecen a una SUA, y este porcentaje es alto, un 96% de los encuestados respondió que sí y solo un 4% que no. Es bien conocida la problemática por falta del recurso hídrico para el riego de cultivos, los productores han optado por asociarse y buscar una solución a las complicaciones de producción provocados en algunos meses de la estación seca, por fenómenos meteorológicos como el Niño y la Niña y la sobreexplotación del recurso.

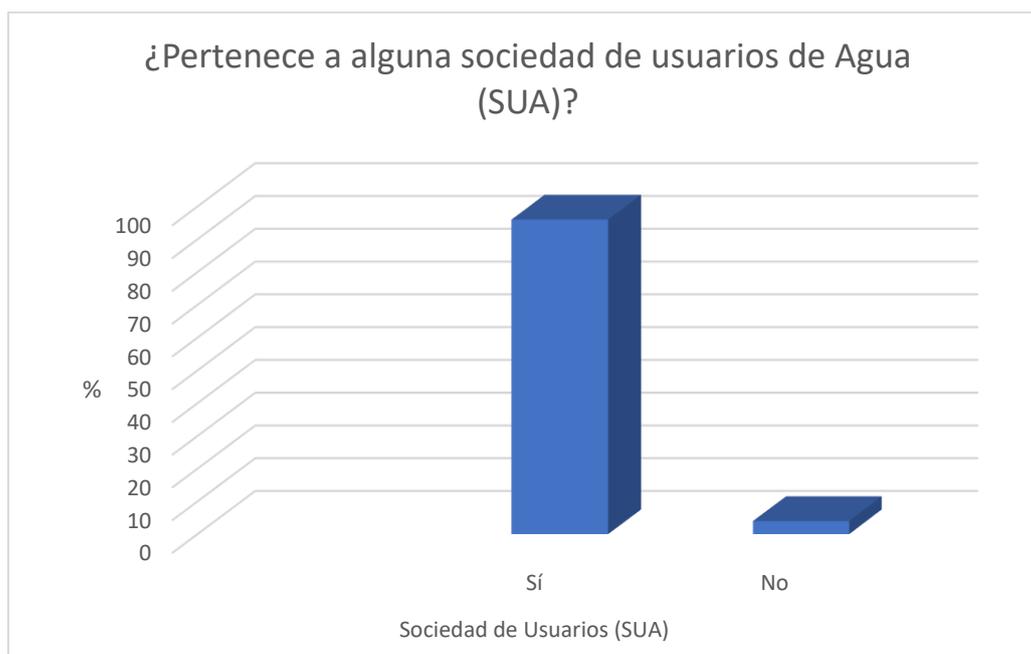


Figura 28. Porcentaje de agricultores encuestados que pertenecen o no a una SUA.

Como se muestra en la Figura 29 relacionada a la pregunta 4, en las entrevistas a los encuestados el 48 % pertenecían a la SUA Quebrada Pavas, 4% a la SUA San Blas y a la SUA Reventado, 9% a la SUA Tiribí, 4% a la SUA Retes, 4% a la SUA Rodeo, 9% a la SUA Sanatorio Durán y a la SUA Llano Grande; y un 9% para encuestados que no respondieron o que no pertenecían a ninguna sociedad de usuarios.

El porcentaje tan alto de encuestados pertenecientes a la SUA Quebrada Pavas se debe a que las reuniones de asistencia para este estudio en el MAG de Cartago y la escuela de Llano Grande llevó una gran cantidad de asociados, puesto que esta SUA presenta una gran problemática de desabastecimiento del recurso hídrico. Esto es por su ubicación, esta SUA se encuentra en Llano Grande de Cartago, una de las zonas más afectadas en la época seca y por la gran cantidad de actividad agrícola presente en ella, por lo tanto, siempre hay demanda de este recurso.

El caudal otorgado para la SUA Quebrada Pavas es de 10,65 l/s y cuya fuente es del mismo nombre; el expediente administrativo de concesión es el N° 9794, datos otorgados por la DA para este estudio. Sin embargo, cabe mencionar el interés de la directiva de la SUA por defender sus derechos y por estar abiertos a las recomendaciones de los inspectores de la DA, hechos comprobados para este estudio en las visitas a los agricultores en campo y en reuniones de asociados.

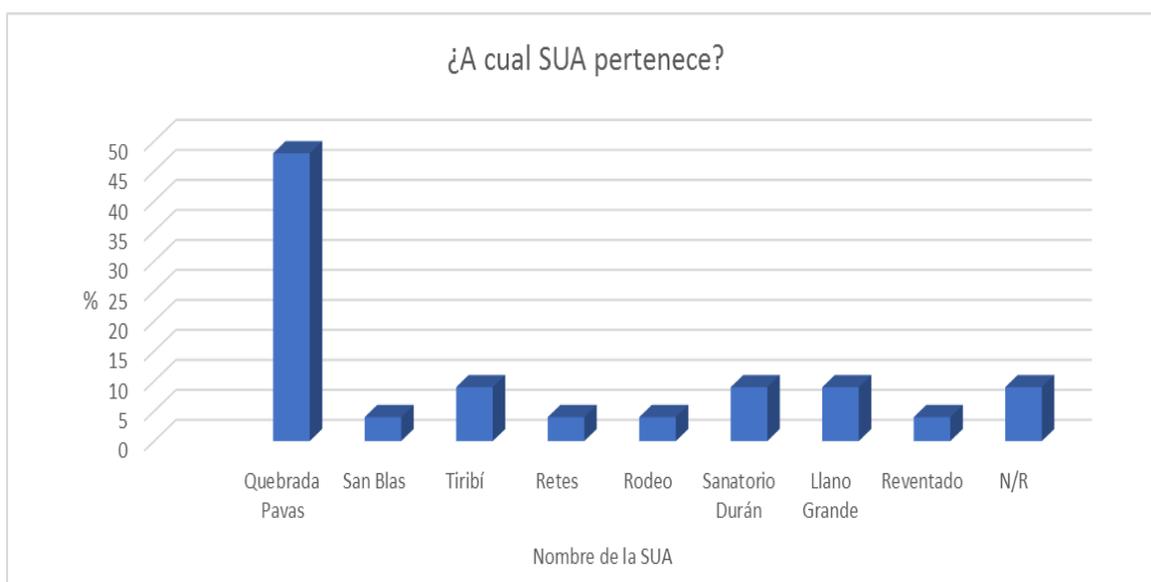


Figura 29. Porcentaje de agricultores encuestados pertenecientes a una SUA

La pregunta 5 va dirigida por la ubicación de la finca o parcela de los encuestados, como se observa en la Figura 30, el 70% de los encuestados contestó que pertenecían a Llano Grande de Cartago, mientras que el 22% se ubican en Tierra Blanca y en un porcentaje menor de 4% pertenecían sus fincas a San Rafael de Oreamuno y Potrero Cerrado, este último perteneciente a la provincia de San José.

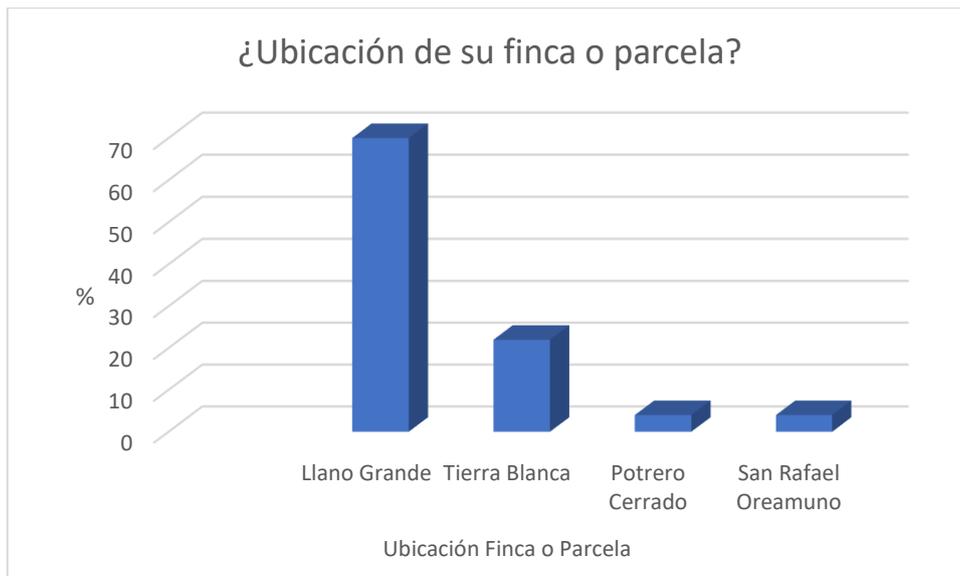


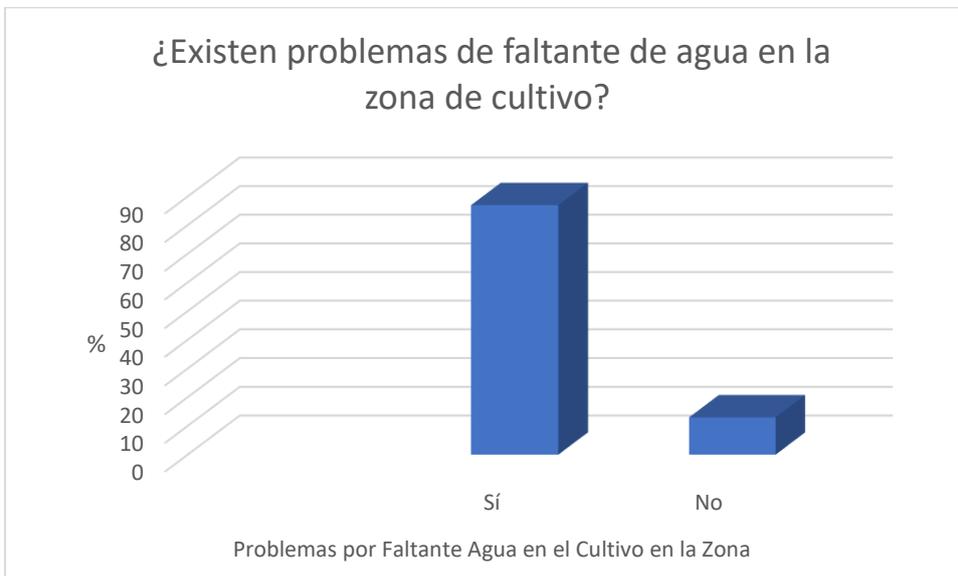
Figura 30. Ubicaciones en porcentaje de finca o parcela de los agricultores encuestados.

La Figura 31 relaciona la pregunta 6 de la encuesta donde se pregunta sobre productos cultivados en la parcela de los encuestados, el análisis arroja los productos característicos para la zona norte de Cartago, como lo es la papa que se siembra en las parcelas de los encuestados, de las totalidades en un 24% de las fincas, otro producto característico es la cebolla un 12%, la fresa 24%; la zanahoria 8% y las flores 12%; todos ellos cultivos representativos de esa zona.



Figura 31. Porcentaje de los cultivos cultivados en las fincas pertenecientes a las zonas norte de Cartago

Otra pregunta sugiere si existen problemas por faltante de agua en las zonas de cultivo; donde la mayoría un 87% contestó que sí y solo un 13% que no.



La pregunta 8 de la encuesta es para conocer en que época del año ocurre el faltante de agua, como muestra la Figura 32, la tendencia sugiere que la época seca es cuando la carencia de agua es alta. Los encuestados coinciden que los meses de mayor

faltante son febrero, marzo y abril, en un 38%, 81% y el 100% respectivamente. En estos meses es cuando se producen la mayoría de los problemas por falta del recurso hídrico, problemas que causan daños a los cultivos, pérdidas económicas y disputas entre los concesionados. Muchos de los pequeños agricultores se quejan que las grandes corporaciones agrícolas de la zona se llevan todo el recurso hídrico en esos meses para atender las necesidades de sus riegos y que no les queda nada para poner sus sistemas de riego a funcionar, inclusive se puede ver en muchos de las fincas de los pequeños agricultores reservorios para almacenamiento de agua, la cual recolectan jalando tanquetas de 1000 litros y estañones de 200 litros de capacidad en sus automóviles de trabajo; lo que representa un gasto económico por consumo de combustible y mano de obra.

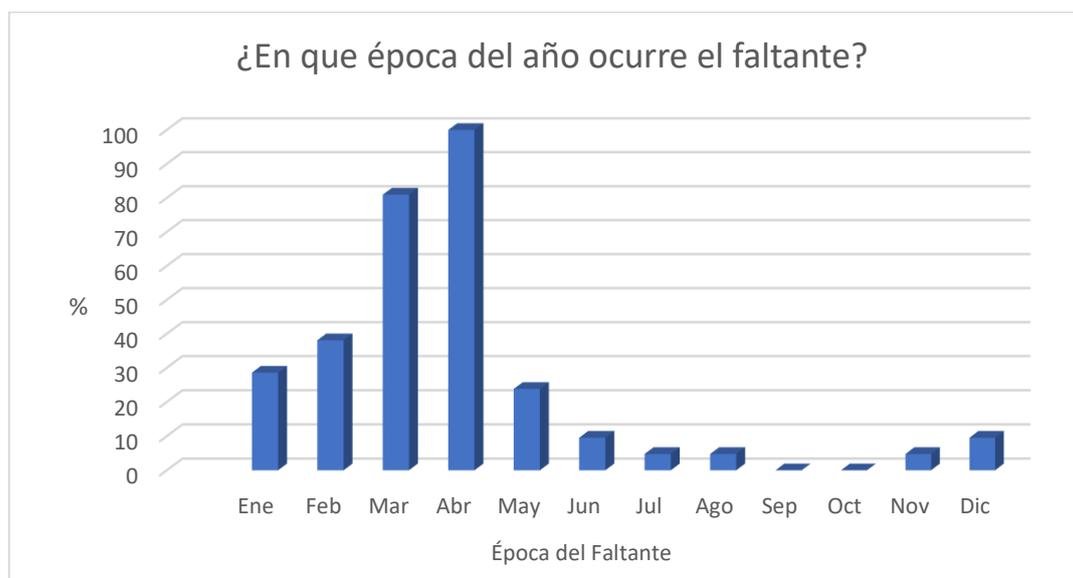


Figura 32. Porcentaje de faltante de agua en las fincas agrícolas según los meses del año.

Otra pregunta fue si se tenían problemas de disponibilidad de agua para el riego de sus cultivos, la Figura 33 reafirma la problemática de la cual se ha venido haciendo mención, el 83% afirma que sí tienen problemas de disponibilidad y solo un 17% que no.

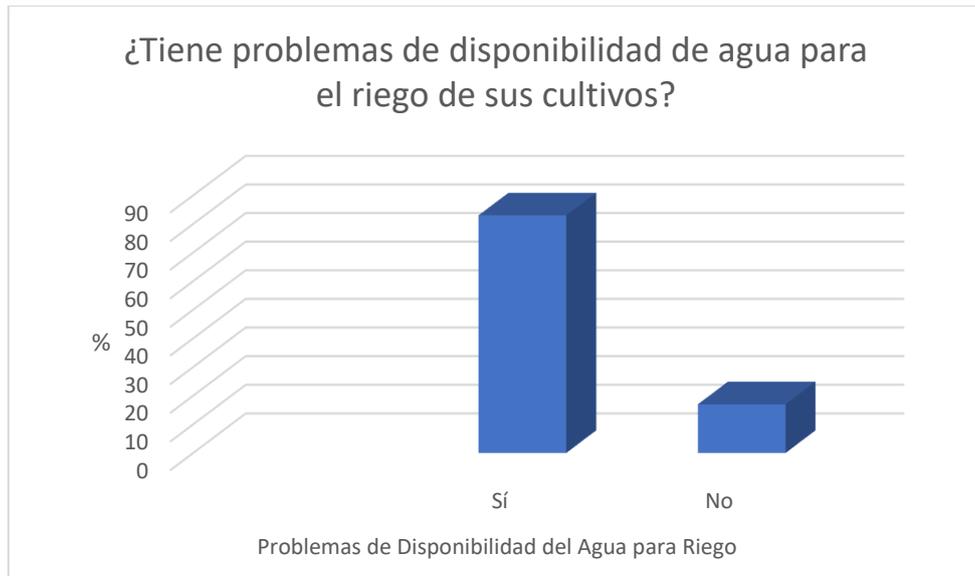


Figura 33. Porcentaje de agricultores entrevistados que creen tener problemas de disponibilidad de agua para el riego.

Debido a esto se hizo una pregunta abierta sobre los problemas de disponibilidad de agua para el riego de los cultivos y algunos de los agricultores explicaron los porqués o las razones que ellos consideraban que los producía. Así lo expresaron en el Cuadro 22. De hecho, una de las respuestas sugeridas habla de la importancia de contar con tablas de necesidades de agua para el cultivo, el entrevistado número 13 hace referencia a uno de los objetivos de este estudio de tener a disposición una base de datos tabulados para saber los requerimientos de riego para cada cultivo.

Cuadro 22. Respuestas de los encuestados sobre los problemas de disponibilidad de agua.

Entrevistado	Respuesta
1	Mucho viento. Faltante de agua. No tener conocimiento técnico de la cantidad de agua que necesito para el cultivo o llámese plantas.
2	Escasa o poca agua en la fuente que nos abastece y además el agua concesionada no alcanza para el área proyectada, aparte que es una zona con un suelo de mucha infiltración.
3	Por el momento no tenemos agua fija en el lugar.
4	El problema es la cantidad de usuarios y la poca agua. Se deben recuperar los mantos acuíferos.
5	Por falta de agua y mala distribución.
6	Faltante de agua debido a muchos usuarios y poco caudal.
7	Faltante de agua debido a las grandes empresas.
8	Faltante de agua en la fuente del río Toyogres.
9	Muy poca agua.
10	Cuando hay un verano largo casi no hay agua todo el año, no alcanza el agua.
11	Es por falta de agua.
12	La poca cantidad o mala distribución.
13	En finca la Saltera que tiene riego a veces tenemos faltante de agua en especial si es un año Niño, creo que este se puede optimizar usando riego por goteo y no con microaspersores; en riego por goteo no hay experiencia en la zona por lo tanto es importante asesoría en este campo, es necesario tener hidrómetros y tablas de necesidades de agua para el cultivo.

La pregunta número 10 de la encuesta es sobre cuanta área atiende el sistema de riego, para el 57% de los entrevistados el sistema atendía 1 hectárea de cultivos; 9% a 1,5 ha de cultivos; 17% a 2 ha de cultivos, 9% a 3 ha de cultivos, 4% a 4 ha de cultivos y 4% a 10 ha de cultivos. Como se ve en la Figura 34 la mayoría son pequeños productores.

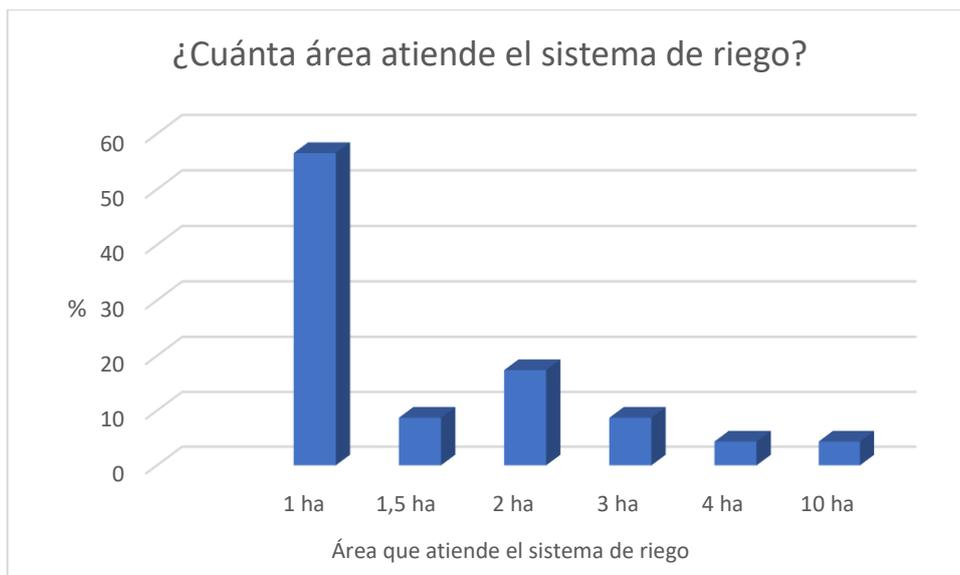


Figura 34. Área que atiende el sistema de riego vs porcentaje de entrevistados.

En la pregunta 11 de la encuesta se cuestiona sobre el conocimiento de problemas o conflictos entre personas que tienen cultivos para riego por motivo del faltante del recurso hídrico. Como se muestra en la Figura 35 el 87% de los encuestados tiene conocimiento de roces producidos por este problema, un porcentaje muy alto que reafirma la inseguridad de no contar con agua suficiente para la producción agrícola.

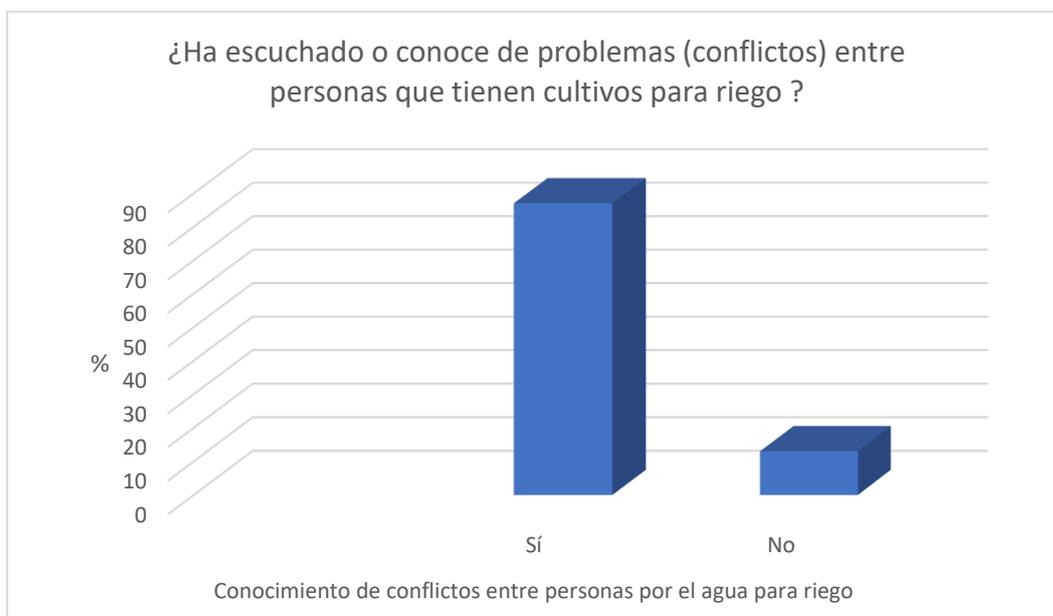


Figura 35. Porcentaje de entrevistados que tienen conocimiento de conflictos producidos por el faltante de agua para riego.

La última pregunta de la encuesta se realizó con el propósito de encontrar fincas modelo que llenaran las expectativas del estudio, expectativas como localización y tipos de cultivo. Además, ver si los agricultores estaban dispuestos a colaborar para hacer el trabajo de campo del estudio; un trabajo de campo que arrojara resultados de la textura del suelo y la infiltración básica del mismo.

Como se ve en la figura 36, el 87% de los encuestados estuvieron de acuerdo con el este estudio, se les solicitó nombre y número de teléfono para coordinar visitas en caso de recurrir a muestreos y pruebas. El 13% no estuvo de acuerdo con la propuesta.

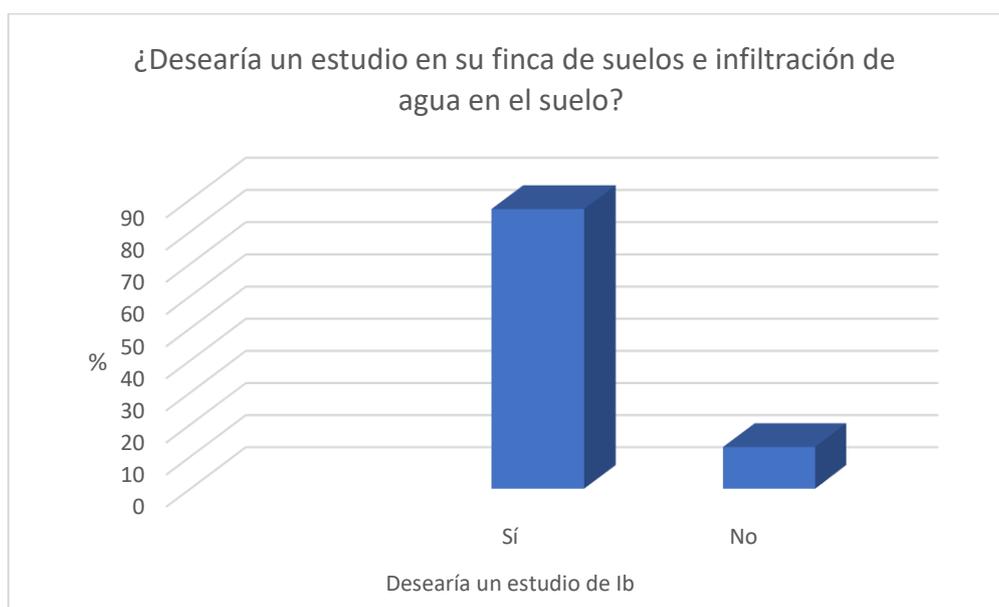


Figura 36. Porcentaje de individuos dispuestos a realizar pruebas de muestreo.

4.5. Análisis económico

En la zona en estudio como lo es la parte norte de la provincia de Cartago, La Dirección de Agua (DA), otorga a las SUA´s que tienen en expediente administrativo de concesión un caudal total 118,17 litros por segundo, este caudal se divide en concesiones para cada SUA dependiendo de la zona y la fuente de la que se toma el caudal. Existen otras SUA´s en la zona, pero no están concesionadas, puesto que están en trámite o tienen un estado cancelado y en el cual se halla el retomar del expediente administrativo. Se conocen estos estados de concesión por un documento suministrado por la DA para este estudio el cual se puede observar en el Anexo 12.

Como se puede apreciar en la Cuadro 23, la DA tiene tabulado todos los precios del canon en colones por metro cubico, para este estudio en particular solo se tomará el

precio por canon para agua superficial y para un uso agropecuario.; agua superficial puesto que todas las fuentes pertenecen a ríos y quebradas. El rubro para este canon es de un colón con veintinueve céntimos por metro cubico de agua.

Cuadro 23. Precio de cobro de las dotaciones por la DA.

(1) Uso	(2) Canon (Colones / m ³)	
	Agua	Agua
	superficial	subterránea
Consumo Humano	1,46	1,63
Industrial	2,64	3,25
Comercial	2,64	3,25
Agroindustrial	1,90	2,47
Turismo	2,64	3,25
Agropecuario	1,29	1,40
Acuicultura	0,12	0,16
Fuerza Hidráulica	0,12	-

Otro elemento a considerar en el análisis económico es la diferencia promedio en la evapotranspiración al utilizar los diferentes métodos para su cálculo.

Para todas las ocho estaciones meteorológicas de la zona, el método modificado de Blaney y Criddle empleado en el Manual de Dotaciones de la Dirección de Agua del MINAE y el método recomendado FAO Penman-Monteith es de 1,32 mm/día para la zona en estudio.

Estas ocho estaciones están representadas en el Cuadro 24, como se menciona anteriormente la evapotranspiración de referencia (ET_o), afecta la evapotranspiración del cultivo (ET_c) y el módulo de riego (Mr) pues siguen una misma línea de tendencia.

El cálculo de ETo incide directamente en la ETc y al Mr pues estas dependen de la evapotranspiración del cultivo de referencia.

Por lo tanto, el Mr también afecta el caudal concesionado Q (m³/s), si todas estas fórmulas dependen una de la otra un cambio en la ETo, afectara los resultados de las otras.

Si la ETo promedio mensual por el método FAO Penman-Monteith es de 2,78 mm/día y la ETo promedio mensual por el método que utiliza la DA es de 4,10 mm/día; entonces por lo mencionado anteriormente, un factor adimensional de correlación (f) que relaciona los dos métodos, será válido.

Por lo tanto 2,78/4,10 dará un factor de conversión (f) de 0,6770 lo que quiere decir que la evapotranspiración de 2,78 mm/día es el 67,70% de los 4,10 mm/día totales.

Si el 4,10 mm/día representa el 100% del total utilizado para el cálculo de las dotaciones tendríamos un ahorro del 32,30% utilizando el método FAO Penman-Monteith, lo que implica que el factor de correlación (f) sería igual a 0.3230.

$$f=0.3230$$

Por lo tanto (f) afectaría todos los cálculos para encontrar las dotaciones a otorgar, cambiando el método utilizado actualmente por la DA al método sugerido por este estudio.

Cuadro 24. Evapotranspiración de referencia (ETo) promedio mensual para cada una de las estaciones meteorológicas donde se encuentran las SUA's de la zona de estudio.

Nombre Estación Meteorológica	Metodo Calculo de ETo, Promedio Mensual	
	Blaney y Criddle (mm/día)	FAO Penman-Monteith (mm/día)
Sanatorio Durán	4,07	2,88
Llano Grande	4,08	2,83
Avance	4,36	3,11
Corralillo	4,14	2,67
Rancho Redondo	4,44	3,08
Pacayas	4,47	2,70
Coliblanco	4,09	2,40
Irazú	3,17	2,55
Promedio	4,10	2,78

Si se toma en cuenta que $1 \text{ l/s} = 86,4 \text{ m}^3/\text{día}$ y una lámina de 1 milímetro de agua.

Entonces se muestra los resultados en la Figura 25, la cual posee todas las comparaciones utilizando los factores de correlación.

Entonces se utilizará $f=0,6770$ para el cálculo de las dotaciones utilizando el método FAO Penman-Monteith y $f=0,3230$ para conocer el ahorro al remplazar el método modificado de Blaney y Criddle empleado en el Manual de Dotaciones de la Dirección.

En el Anexo 13 se ve como ejemplo el reporte contable del estado de cuenta de concesiones para aguas superficiales de la DA, perteneciente a la SUA Quebrada Pavas de Llano Grande, la cual tiene una concesión de 10,65 l/s.

Como se puede ver en el Cuadro 25 para este análisis económico, existe un ahorro de 127.614,27 colones mensuales por parte de las SUA's que poseen en concesión.

La zona norte se verá beneficiada, desde la perspectiva de un cobro menor por la misma área de cultivos bajo riego, o también beneficio para la DA que por el mismo caudal concedido pueda llegar a más usuarios y percibir un 32,30% más de ganancias al utilizar el método recomendado para este estudio.

Cuadro 25. Cálculo de ganancias de concesión para riego, volumen de agua y cobro del servicio por el método utilizado por la DA y el recomendado para el estudio.

Cálculo de	Método Cálculo		Ahorro
	Utilizando Blaney y Criddle	Utilizando FAO Penman-Monteith	
Concesión (l/s)	118,17	80,00	38,17
Concesión (m ³ /día)	10.209,89	6.912,36	3.297,53
Volumen Diario (m ³ /día)	10.209,89	6.912,36	3.297,53
Volumen mensual (m ³ /mes)	306.296,64	207.370,85	98.925,79
Cobro (colones/día)	13.170,76	8.916,95	4.253,81
Cobro (colones/mes)	395.122,67	267.508,40	127.614,27

4.6. Análisis ambiental

Para el análisis ambiental se tomó en cuenta el impacto que tendrá la implementación de la nueva técnica de requerimientos de agua para riego en la zona norte de Cartago mediante la ecuación FAO Penman-Monteith.

Como se puede ver en el Cuadro 25, hay una reducción significativa del desperdicio del recurso hídrico utilizado para el riego de cultivos. Utilizando el método de cálculo recomendado por el estudio la reducción del desperdicio sería de 98.925,79 m³/mes, aproximadamente 98,9 millones de litros mensuales.

Esta cifra es para nada despreciable tomando en cuenta la problemática encontrada en el análisis social. Se solucionarían muchos problemas, las quebradas y ríos de la zona norte de Cartago se vería beneficiados, más agua significa más vida, la flora y fauna prosperarían, la biota crecería y con ello el mejoramiento de los sistemas, entre ellos los suelos.

El agua para riego agrícola es la que más demanda de consumo requiere de todas las actividades humanas y la que tiene un impacto sumamente significativo en el medio ambiente.

Al ahorrarse por mes 98 mil metros cúbicos de agua producirá una mejora del ciclo del agua, aumentando la acumulación de humedad en la atmósfera originando lluvia en la zona y mejorando la distribución de las mismas.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Se concluyó que al evaluar los diferentes métodos de cálculo para determinar los requerimientos de aguas que rigen en el proceso de desarrollo de los cultivos en la zona norte de Cartago, que el método más apto para comprobación de la evapotranspiración de referencia para el cálculo de los requerimientos de riego para los cultivos fue el método FAO Penman-Monteith.

El método FAO Penman-Monteith se comparó con otros tres métodos Blaney-Criddle, Thornthwaite y Hargreaves, primero los resultados se sometieron a una evaluación bibliográfica y luego a una evaluación cuantitativa; arrojando que existían diferencias a considerar entre ellos, probablemente porque ninguno está libre de suposiciones puesto que son métodos empíricos o modificaciones de otros métodos, con constantes arbitrarias o por dificultades técnicas de observación y medición en la manipulación de datos.

El método FAO Penman-Monteith es el más recomendable (entre otros métodos) porque posee más variables para la determinación de E_{To} , variables que dependen de los datos suministrados por estaciones meteorológicas, posicionamiento geográfico y altura.

El método utilizado por la Dirección de Agua del MINAE, debe ser actualizado y remplazado puesto que solo depende de una variable, la altura (h). Este método es el oficial para la determinación de dotaciones para riego de cultivos en Costa Rica y presentó una diferencia de hasta 1mm/día o más de evapotranspiración en el cultivo de referencia comparado con el método FAO Penman-Monteith, lo que significa que en una hectárea se puede producir un desperdicio de agua para riego de hasta 10 mil litros por hectárea de siembra.

Se concluyó también que la terminología del Manual de Dotaciones para riego que determinan la E_{To} , la E_{Tr} y el M_r , debe ser modificada desde el punto 1.2 (Dotaciones para riego de Cultivos) incisos del **a** hasta el **g** del Capítulo 1 del Manual Técnico del Departamento de Aguas impreso en la Gaceta el jueves 20 de mayo de 2004.

Se determinó que existen fuertes problemas y disputas por el recurso hídrico de la zona entre pequeños agricultores y grandes corporaciones agrícolas y entre los mismos pequeños y medianos agricultores. Problemas como tomas ilegales, disputas jurisdiccionales y mal uso de los sistemas de riego.

En el análisis social y en las visitas de campo, se determinó que hay poco conocimiento cultural y técnico sobre los sistemas de riego y los cultivos e inexperiencia sobre las nuevas tendencias de producción, desconocimiento de la legislación actual y de las normas que rigen el recurso hídrico.

El análisis económico arrojó una ganancia de 127.614,27 colones mensuales que podría obtener la DA, equivalente a un tercio de más de lo percibido en la actualidad. Puede parecer no muy significativo, pero hay que recordar que la zona de la parte norte de Cartago a la que pertenecen las SUA´s es solo una pequeña porción de las concesiones, comparada a las concesiones para riego de cultivos totales del país. Si se recibiera un 32% de más por el rubro de concesiones para riego, la diferencia sí sería muy significativa. Además, el reordenamiento y reestructuración de la Dirección de Agua muestran un crecimiento en bienes y servicios. En un futuro cercano las concesiones de agua para riego en el país crecerán rápidamente, por lo tanto, al modificar el método actual de concesión de agua para riego, el beneficio de aumentar las entradas económicas en un 32% ayudaría en gran manera los intereses de la Dirección de Agua como órgano dependiente del MINAE desde el punto de vista presupuestario.

5.2. Recomendaciones

Se recomienda utilizar el método para el cálculo de la evapotranspiración del cultivo de referencia el método FAO Penman-Monteith.

Se sugiere que de no tener acceso a los datos meteorológicos suficientes para determinar la ETo por el método FAO Penman-Monteith, se utilice el método Hargreaves que depende solo de la temperatura media y el posicionamiento geográfico de la zona.

Con la nueva terminología que conlleva el nuevo método de cálculo recomendado de la ETo, la ETr y el Mr, se sugiere hacer una modificación en el punto 1.2 (Dotaciones para riego de Cultivos) incisos del *a* hasta el *g* del Capítulo 1 del Manual técnico del Departamento de Aguas impreso en la Gaceta.

Por lo tanto, dicho manual quedaría:

Dotaciones de agua para calcular las necesidades de las solicitudes de concesión de aprovechamiento de aguas en el uso de agua para riego de cultivos.

1.2 Dotaciones para riego de cultivos.

- a) Usos de agua por los cultivos. La estimación del consumo de agua por las plantas se lleva a cabo mediante la utilización de la evapotranspiración del cultivo (ETc) y esta se calcula a su vez como el producto de la evapotranspiración del cultivo de referencia (ETo) y el coeficiente del cultivo (Kc). (FAO, 2006)

La evapotranspiración del cultivo de referencia (ETo) se calcula con el método de la FAO Penman-Monteith que se recomienda como el único método para determinarla.

El cálculo de la evapotranspiración del cultivo (ETc) bajo condiciones estándar se da considerando que no existen limitaciones en el desarrollo del cultivo debido a estrés hídrico o salino, densidad del cultivo, plagas y enfermedades, presencia de malezas o baja fertilidad. El valor de ETc es calculado a través del enfoque del coeficiente del cultivo, donde los efectos de las condiciones del tiempo atmosférico son incorporados. Los efectos combinados de la transpiración del cultivo y la evaporación del suelo se integran en un coeficiente único del cultivo. El coeficiente único Kc incorpora las características del cultivo y los efectos promedios de la evaporación en el suelo. Para la planificación normal del riego y propósitos de manejo, para la definición de calendarios básicos de riego y para la mayoría de los estudios de balance hídrico, los coeficientes promedios del cultivo son los apropiados y más convenientes que los valores de Kc calculados con base diaria usando coeficientes separados de cultivo y suelo. (FAO, 2006)

El cálculo de la dotación para riego se realiza mediante la combinación de la metodología para la evapotranspiración del cultivo ETc, la eficiencia del sistema de riego y el área de cultivo a regar.

- b) Dotación: Para el cálculo de la dotación en base al uso consuntivo, se utilizan las siguientes formulas.

$$ETc = Kc * ETo$$

donde

ETc evapotranspiración del cultivo [mm/día],

K_c coeficiente del cultivo [adimensional],

ET_o evapotranspiración del cultivo de referencia [mm/día].

- c) Evapotranspiración de cultivo de referencia (ET_o): El método de FAO Penman-Monteith requiere datos de radiación, temperatura del aire, humedad atmosférica y velocidad del viento.

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

donde:

ET_o ; evapotranspiración de referencia (mm/día)

R_n ; radiación neta en la superficie del cultivo (MJ/ m²/ día)

R_a ; radiación extraterrestre (mm/día)

G ; flujo del calor de suelo (MJ/m²/ día)

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

u_2 ; velocidad del viento a 2 m de altura (m/s)

e_s ; presión de vapor de saturación (kPa)

e_a ; presión real de vapor (kPa)

$e_s - e_a$ déficit de presión de vapor (kPa)

Δ ; pendiente de la curva de presión de vapor (kPa/°C)

γ ; constante psicométrica (kPa/°C)

- d) Coeficientes K_c para diferentes cultivos.

A medida que el cultivo se desarrolla, tanto el área del suelo cubierta por la vegetación como la altura del cultivo y el área foliar variarán progresivamente. Debido a las diferencias en evapotranspiración que se presentan durante las distintas etapas de desarrollo del cultivo, el valor de K_c correspondiente a un cultivo determinado también variará a lo largo del período de crecimiento del mismo. Este período de crecimiento puede ser dividido en cuatro etapas: inicial, de desarrollo del cultivo, de mediados de temporada y de final de temporada.

Para el procedimiento de cálculo es necesario identificar las etapas de desarrollo del cultivo, determinando la duración de cada etapa y seleccionando los valores correspondientes de K_c . En el Cuadro 26,27,28 y 29 se incluyen valores típicos de $K_{c\ ini}$, $K_{c\ med}$ y $K_{c\ fin}$ correspondientes a distintos cultivos. Los coeficientes presentados son organizados en grupos (ej. hortalizas pequeñas, leguminosas,

cereales, etc.) con la finalidad de facilitar la localización del cultivo en el cuadro y para ayudar a comparar cultivos pertenecientes a un mismo grupo. Generalmente, los coeficientes para los miembros de un mismo grupo son parecidos, debido a la similitud de la altura de los cultivos, área foliar, grado de cobertura del suelo y manejo del agua. (FAO, 2006)

Propuesta de valores actualizados de Kc para el país

Cuadro 26. Valores del coeficiente de cultivo (Kc) para diferentes cultivos.

Cultivo	K _{c ini} ¹	K _{c med}	K _{c fin}	Altura Máx. Cultivo (h) (m)
a. Hortalizas Pequeñas	0,7	1,05	0,95	
Brécol (Brócoli)		1,05	0,95	0,3
Col de Bruselas		1,05	0,95	0,4
Repollo		1,05	0,95	0,4
Zanahoria		1,05	0,95	0,3
Coliflor		1,05	0,95	0,4
Apio (Céleri)		1,05	1,00	0,6
Ajo		1,00	0,70	0,3
Lechuga		1,00	0,95	0,3
Cebolla – seca		1,05	0,75	0,4
– verde		1,00	1,00	0,3
– semilla		1,05	0,80	0,5
Espinaca		1,00	0,95	0,3
Rábano		0,90	0,85	0,3
b. Hortalizas– Familia de la Solanáceas	0,6	1,15	0,80	
Berenjena		1,05	0,90	0,8
Pimiento Dulce (campana)		1,05	0,90	0,7
Tomate		1,15	0,70–0,90	0,6
c. Hortalizas– Familia de las Cucurbitáceas	0,5	1,00	0,80	
Melón	0,5	0,85	0,60	0,3
Pepino – Cosechado Fresco	0,6	1,00	0,75	0,3
– Cosechado a Máquina	0,5	1,00	0,90	0,3
Calabaza de Invierno		1,00	0,80	0,4
Calabacín (zucchini)		0,95	0,75	0,3
Melón dulce		1,05	0,75	0,4
Sandía	0,4	1,00	0,75	0,4
d. Raíces y Tubérculos	0,5	1,10	0,95	
Remolacha, mesa		1,05	0,95	0,4
Yuca o Mandioca – año 1	0,3	0,80	0,30	1,0
– año 2	0,3	1,10	0,50	1,5
Chirivía	0,5	1,05	0,95	0,4
Patata o Papa		1,15	0,75	0,6
Camote o Batata		1,15	0,65	0,4
Nabos (Rutabaga)		1,10	0,95	0,6
Remolacha Azucarera	0,35	1,20	0,70	0,5

Fuente: FAO, 2006

Cuadro 27. Valores del coeficiente de cultivo (Kc) para diferentes cultivos.

Cultivo	K _{c ini} ¹	K _{c med}	K _{c fin}	Altura Máx. Cultivo (h) (m)
e. Leguminosas (Leguminosae)	0,4	1,15	0,55	
Frijoles o judías, verdes	0,5	1,05	0,90	0,4
Frijoles o judías, secos y frescos	0,4	1,15	0,35	0,4
Garbanzo (chick pea)		1,00	0,35	0,4
Habas – Fresco	0,5	1,15	1,10	0,8
– Seco/Semilla	0,5	1,15	0,30	0,8
Garbanzo hindú	0,4	1,15	0,35	0,8
Caupís (cowpeas)		1,05	0,60-0,35	0,4
Maní		1,15	0,60	0,4
Lentejas		1,10	0,30	0,5
Guisantes o arveja – Frescos	0,5	1,15	1,10	0,5
– Secos/Semilla		1,15	0,30	0,5
Soya		1,15	0,50	0,5-1,0
f. Hortalizas perennes (con letargo invernal y suelo inicialmente desnudo o con mantillo)	0,5	1,00	0,80	
Alcachofa	0,5	1,00	0,95	0,7
Espárragos	0,5	0,95	0,30	0,2-0,8
Menta	0,60	1,15	1,10	0,6-0,8
Fresas	0,40	0,85	0,75	0,2
g. Cultivos Textiles	0,35			
Algodón		1,15-1,20	0,70-0,50	1,2-1,5
Lino		1,10	0,25	1,2
Sisal®		0,4-0,7	0,4-0,7	1,5
h. Cultivos Oleaginosos	0,35	1,15	0,35	
Ricino		1,15	0,55	0,3
Canola (colza)		1,0-1,15	0,35	0,6
Cártamo		1,0-1,15	0,25	0,8
Sésamo (ajonjolí)		1,10	0,25	1,0
Girasol		1,0-1,15	0,35	2,0
i. Cereales	0,3	1,15	0,4	
Cebada		1,15	0,25	1
Avena		1,15	0,25	1
Trigo de Primavera		1,15	0,25-0,4	1
Trigo de Invierno – con suelos congelados	0,4	1,15	0,25-0,4	1
– con suelos no-congelados	0,7	1,15	0,25-0,4	
Maíz, (grano)		1,20	0,60,0,35	2
Maíz, (dulce)		1,15	1,05	1,5
Mijo		1,00	0,30	1,5
Sorgo – grano		1,00-1,10	0,55	1-2
– dulce		1,20	1,05	2-4
Arroz	1,05	1,20	0,90-0,60	1

Fuente: FAO, 2006

Cuadro 28. Valores del coeficiente de cultivo (Kc) para diferentes cultivos.

Cultivo	K _c ini ¹	K _c med	K _c fin	Altura Máx. Cultivo (h) (m)	
j. Forrajes					
Alfalfa (heno)	– efecto promedio de los cortes	0,40	0,95	0,90	0,7
	– períodos individuales de corte	0,40	1,20	1,15	0,7
	– para semilla	0,40	0,50	0,50	0,7
Bermuda (heno)	– efecto promedio de los cortes	0,55	1,00	0,85	0,35
	– cultivo para semilla (primavera)	0,35	0,90	0,65	0,4
Trébol heno, Bersím	– efecto promedio de los cortes	0,40	0,90	0,85	0,6
	– períodos individuales de corte	0,40	1,15	1,10	0,6
Rye Grass (heno)	– efecto promedio de los cortes	0,95	1,05	1,00	0,3
Pasto del Sudán (anual)	– efecto promedio de los cortes	0,50	0,90	0,85	1,2
	– período individual de corte	0,50	1,15	1,10	1,2
Pastos de Pastoreo	– pastos de rotación	0,40	0,85-1,05	0,85	0,15-0,30
	– pastoreo extensivo	0,30	0,75	0,75	0,10
Pastos (césped, turfgrass)	– época fría	0,90	0,95	0,95	0,10
	– época caliente	0,80	0,85	0,85	0,10
k. Caña de azúcar	0,40	1,25	0,75	3	
l. Frutas Tropicales y Árboles					
Banana	– 1 ^{er} año	0,50	1,10	1,00	3
	– 2 ^{do} año	1,00	1,20	1,10	4
Cacao		1,00	1,05	1,05	3
Café	– suelo sin cobertura	0,90	0,95	0,95	2-3
	– con malezas	1,05	1,10	1,10	2-3
Palma Datilera		0,90	0,95	0,95	8
Palmas		0,95	1,00	1,00	8
Piña ¹⁶	– suelo sin cobertura	0,50	0,30	0,30	0,6-1,2
	– con cobertura de gramíneas	0,50	0,50	0,50	0,6-1,2
Árbol del Caucho		0,95	1,00	1,00	10
Té	– no sombreado	0,95	1,00	1,00	1,5
	– sombreado	1,10	1,15	1,15	2
m. Uvas y Moras					
Moras (arbusto)		0,30	1,05	0,50	1,5
Uvas	– Mesa o secas (pasas)	0,30	0,85	0,45	2
	– Vino	0,30	0,70	0,45	1,5-2
Lúpulo		0,3	1,05	0,85	5

Fuente: FAO, 2006

Cuadro 29. Valores del coeficiente de cultivo (Kc) para diferentes cultivos.

Cultivo	K _{c ini} ¹	K _{c med}	K _{c fin}	Altura Máx. Cultivo (h) (m)
n. Árboles Frutales				
Almendras, sin cobertura del suelo	0,40	0,90	0,65	5
Manzanas, Cerezas, Peras				
– sin cobertura del suelo, con fuertes heladas	0,45	0,95	0,70	4
– sin cobertura del suelo, sin heladas	0,60	0,95	0,75	4
– cobertura activa del suelo, con fuertes heladas	0,50	1,20	0,95	4
– cobertura activa del suelo, sin heladas	0,80	1,20	0,85	4
Albaricoque, Melocotón o Durazno, Drupas				
– sin cobertura del suelo, con fuertes heladas	0,45	0,90	0,65	3
– sin cobertura del suelo, sin heladas	0,55	0,90	0,65	3
– cobertura activa del suelo, con fuertes heladas	0,50	1,15	0,90	3
– cobertura activa del suelo, sin heladas	0,80	1,15	0,85	3
Aguacate, sin cobertura del suelo	0,60	0,85	0,75	3
Cítricos, sin cobertura del suelo				
– 70% cubierta vegetativa	0,70	0,65	0,70	4
– 50% cubierta vegetativa	0,65	0,60	0,65	3
– 20% cubierta vegetativa	0,50	0,45	0,55	2
Cítricos, con cobertura activa del suelo o malezas				
– 70% cubierta vegetativa	0,75	0,70	0,70	4
– 50% cubierta vegetativa	0,80	0,80	0,80	3
– 20% cubierta vegetativa	0,85	0,85	0,85	2
Coníferas	1,00	1,00	1,00	10
Kiwi	0,40	1,05	1,05	3
Olivos (40 a 60% de cobertura del suelo por el dosel)	0,65	0,70	0,70	3-5
Pistachos, sin cobertura del suelo	0,40	1,10	0,45	3-5
Huerto de Nogal	0,50	1,10	0,65	4-5

Fuente: FAO, 2006

- e) Módulo de riego. Es el caudal por unidad de área, requerido por el cultivo en litros por segundo por hectárea, y se calcula con la siguiente formula:

$$Mr = \frac{ETc}{Ef} * 0,116$$

Donde;

Mr: Módulo de riego (l/s/ha)

Ef: Eficiencia del sistema de riego

0.116; Factor de conversión de unidades

- f) Eficiencia de riego

Cuadro 30. Porcentaje de eficiencia para diferentes sistemas de riego.

Metodo de riego	Eficiencia en %
Melgas con pendiente	60-75
Melgas sin pendiente	60-80
Desbordamiento	50-55
Surcos	55-70
Aspersión	75-80
Goteo	85-90

Fuente: Villalobos, 2016

- g) Cálculo de caudal requerido para riego en litros por segundo con el que se otorga la dotación

$$Q = Mr * A$$

Donde;

Q: Caudal (l/s)

Mr: Módulo de riego (l/s/ha)

A: Área de riego en hectáreas (ha)

Asimismo se recomienda:

Tabulación de los requerimientos de ETo, ETc y Mr para el cálculo del caudal de otorgamiento.

Para la ETc y el Mr tabular cada una de las fases fenológicas de los cultivos: fase inicial, media y final.

Creación de un programa informático para el cálculo de los parámetros mencionados anteriormente.

Agilización del proceso de tramitología de otorgamiento y renovación de concesiones de las dotaciones para el riego de cultivos.

Capacitación y asesoría a los productores de una misma zona o SUA sobre temas de legislación del recurso hídrico, conceptos técnicos y nuevas tecnologías de producción.

Mejoramiento de los sistemas de riego existentes, adquirir nuevos o modificarlos por sistemas de riego localizado.

Búsqueda de nuevas técnicas como sensores de reconocimiento remotos por medio de fotometría y otras técnicas -drones y satélites espaciales- para determinar la evapotranspiración de las plantas.

Fortalecimiento desde todo punto de vista las SUA´s existentes.

Elaboración de una base de datos meteorológicos, por lo menos de los últimos 30 años, suministrados por instituciones con las que se posea convenios, a saber: Instituto Meteorológico Nacional (IMN), Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), Acueductos y Alcantarillados (AyA).

BIBLIOGRAFÍA

Alvarado, G. (2009). *Los Volcanes de Costa Rica*. San José: UNED.

Borlaug, N. E., & Dowsell, C. R. (2002). Perspectivas de la agricultura mundial para el siglo XXI. Recuperado de:
<https://scholar.google.es/scholar?hl=es&q=e1+70+%25+del+agua+dulce+del+planeta+se+destina+a+la+agricultura%2C+&btnG=&lr=>

Campeche, L. F. S. M. (2002). Construção, calibração e análise de funcionamento de lisímetros de pesagem para determinação da evapotranspiração da cultura da lima ácida 'Tahiti' (*Citrus latifolia* Tan.). *Citrus latifolia*. Recueprado de:
<http://www.hidro.ufcg.edu.br/twiki/pub/Main/DiegoLima/luis.pdf>

Chavarria, A. (2012). *Manual de laboratorio de Edafología*. Cartago: Centro de Ediciones de Material Bibliográfico.

Estudio FAO: riego y drenaje 66. Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua. (2014). Recuperado de: <http://www.fao.org/3/a-i2800s.pdf>

FAO. (2006). *Evapotranspiración del cultivo Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Roma: Publicación Electrónica de la Dirección de Información de la FAO.

Fernández, R. (2010). *Manual de riego para agricultores*. Sevilla: Cosejería de Agricultura y Pesca.

La Gaceta N°98. Instituto Meteorológico Nacional. Manual Técnico del Departamento de Aguas. Jueves 20 de mayo de 2004. Recuperado de:
<http://www.dse.go.cr/es/02ServiciosInfo/Legislacion/PDF/Ambiente/Aguas/ManualTecnicoDpto.pdf>

Padilla, J. (2016). Coeficiente de cultivo para el césped americano (*Stenotaphrum secundatum*) utilizando lisímetros de drenaje, durante la estación de otoño-UNALM. Recuperado de:
<http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/2483>

Prujel, E. (2010). Impacto de las políticas ambientales en el desarrollo económico y condiciones de vida dignas para los habitantes: El agua como elemento de vitalidad en el desarrollo del ser humano. *Revista Internacional de Investigación en Ciencias Sociales*, 6(1), 181. Recuperado de:
<http://revistacientifica.uaa.edu.py/index.php/riics/article/view/49/49>

Santos, L. (2010). *El riego y sus tecnologías*. España: Europa-América en Lisboa.

Villalobos, M. (2008). *Fundamentos de riego*. Cartago: Centro de Ediciones de material Bibliográfico.

Villalobos, M. (2016). *Principios de riego y drenaje en suelos tropicales*. San José: UNED.

Villón, M. (2004). *Hidrología*. Cartago: Editorial Tecnológica de Costa Rica.

World Meteorological Organization, WMO. (2008). *Guidelines for Converting Between Various Wind Averaging Periods in Tropical Cyclone Conditions*. World Meteorological Organization. Ginebra, Suiza.

ANEXOS

Anexo 1. Reunión entre las Sociedades de Usuarios de Agua (SUAs) de la zona norte de Cartago, la Dirección de Aguas (DA) y el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG)



Anexo 2. Reunión realizada en la escuela de Llano Grande por la directiva y miembros de la SUA Quebrada Pavas de Llano Grande de Cartago.



Anexo 3. Encuesta aplicada a los productores agrícolas de la zona norte de Cartago

Nombre del entrevistador: _____

Nombre de la comunidad: _____

Fecha: _____

Hora inicio: _____

- 1) Género: a) Masculino b) Femenino
- 2) Edad:
- | | |
|--|--|
| a) <input type="checkbox"/> Menor de 20 años | d) <input type="checkbox"/> De 40 años a menos de 50 |
| b) <input type="checkbox"/> De 20 años a menos de 30 | e) <input type="checkbox"/> De 50 años a menos de 60 |
| c) <input type="checkbox"/> De 30 años a menos de 40 | f) <input type="checkbox"/> 60 años o más |

- 3) ¿Cuál es el mayor grado académico que ostenta actualmente?
- | | |
|---|--|
| a) <input type="checkbox"/> Primaria | d) <input type="checkbox"/> Licenciatura |
| b) <input type="checkbox"/> Secundaria | e) <input type="checkbox"/> Maestría o |
| c) <input type="checkbox"/> Bachillerat universitario | Especialidad |

4) Pertenece a alguna sociedad de usuarios de Agua (SUA): Sí _____ NO _____
¿Cuál?: _____

5) Ubicación de su finca o parcela:
Cantón _____ Distrito _____
Dirección _____

6) ¿Qué o cuál producto (s) cultiva?

7) ¿Existen problemas de faltante de agua en la zona de cultivo?
Sí _____ No _____

8) ¿En que época del año ocurre el faltante?
Ene__ Feb__ Marz__ Abr__ May__ Jun__ Jul__ Ago__ Set__ Oct__ Nov__ Dic__

9) ¿Tiene problemas de disponibilidad de agua para el riego de sus cultivos?
Sí _____ No _____

Si su respuesta es sí, podría explicar el problema

10) ¿Cuánta área tiene el sistema de riego?: _____ ha

11) Ha escuchado o conoce usted de problemas (conflictos) entre personas que tienen cultivos para riego
Sí__ No__

12) Desearía usted un estudio en su finca de suelos e infiltración de agua en el suelo
Sí__ NO__

Con el fin de dar seguimiento a este estudio como parte de mi trabajo final de graduación, me gustaría saber si puedo contar con su nombre y número de teléfono para coordinar algunas visitas en caso de que deba recurrir a muestreos y pruebas.

Tel _____

Anexo 4

Para agilizar el cálculo y obtener una base de datos confiable para la Dirección de Aguas, se elaboró en Excel una hoja de cálculo en la que se automatiza el procedimiento de cálculo de la ETo.

En la hoja de cálculo de Excel llamada EToMetodoFAO se despliegan dos hojas de cálculo: RadiaNet y ETo, en la parte inferior izquierda del ordenador, y hacen referencia a la radiación neta en la superficie del cultivo producida por los rayos solares y evapotranspiración del cultivo de referencia (Figura 39).

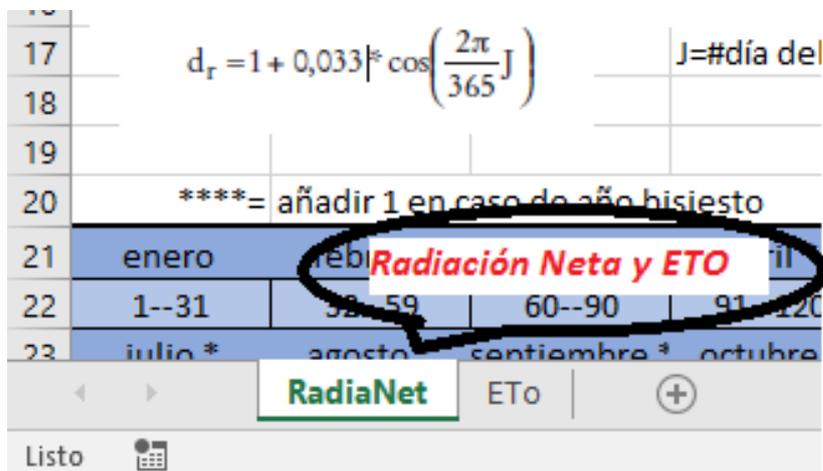


Figura 37. Hojas de cálculo para determinar la evapotranspiración del cultivo de referencia.

Al introducir datos indispensables para el cálculo de la evapotranspiración del cultivo de referencia y, para que no existan errores, se determinó que se utilicen tres colores en las celdas de cálculo aludiendo a los colores del semáforo.

- Rojo para dato de introducción indispensable
- Verde para en caso de no existir el dato en color rojo corregir por el dato en color verde
- Amarillo para resultado obtenido al introducir datos en color rojo o ya sea verde.

Pasos para introducir datos:

Paso 1.

Dato 1: Entrada latitud en grados y minutos en color rojo como se muestra en la Figura 40, la intensidad local de la radiación está determinada por el ángulo entre la dirección de los rayos solares y la superficie de la atmósfera. Este ángulo cambia durante el día y es diferente en diversas latitudes y en diversas épocas del año.

F	G	H	I	J	K	L	M
Insolación máxima							
					latitud es negativa si esta en el hemisferio sur		
		Entrada latitud					
>		Grados	Minutos	latitud radianes (φ)			
>		9	54.6	0.17			
						rad	
(ω)							

Figura 38. Ejemplo como deben entrar los datos de latitud en la hoja de cálculo RadiaNet.

Paso 2

Dato 2: Como se muestra en la Figura 41 es importante conocer el día del año, pero como los datos que se andan buscando son promedios mensuales se requiere un dato que promedie el número del día del mes que represente al cálculo de la evapotranspiración del cultivo de referencia para el mes del año que se anda buscando, por ejemplo, en la Figura 41 el mes de abril se representa con un número 4 y la hoja de cálculo regresa el día promedio para ese mes que sería el 107. De optar por conocer la ETo diaria sería solo colocar el número de día en la casilla correspondiente.

J=#día del año						
			#mes	#día		
siesto			4	107		
abril *	mayo *	junio *	Numero del mes		$d_r = 0.991$	
91--120	121--151	152--181			$\delta = 0.176$	
octubre *	noviembre *	diciembre *			$\omega_s = 1.602$	
274--304	305--334	335--365			$R_a = 37.9$	MJ/m ² día
días por mes						
9)			Evaporación equivalente		15.48 mm/día	

Figura 39. Ejemplo de cómo se debe introducir el número que corresponde al mes del año.

Paso 5

Dato 5: Temperatura de rocío o punto de rocío, este tipo de dato puede que no se encuentre fácilmente puesto que algunas estaciones meteorológicas no lo den o que los procesadores de estos datos lo omitan, de ser así se puede obviar siempre y cuando se cuente con la humedad promedio relativa máxima y mínima mensual o solo la humedad relativa máxima mensual en sustitución del punto de rocío como lo muestra la Figura 44 en color verde; por ser datos que se pueden cambiar en las ecuaciones de radiación neta de onda larga y evapotranspiración del cultivo de referencia ETo, se recomienda en las celdas donde se encuentran las funciones programadas cambiar los parámetros de cálculo como se muestra en la Figura 45, por ejemplo en la celda I79 posicionarse y cambiar el parámetro K71 por K77 de contar con la humedad relativa mensual máxima y mínima, y de no contar con la humedad relativa mínima solo usar la máxima cambiando en la celda I79 el parámetro K71 por K73; algo similar sucede en la hoja de cálculo de la ETo como se muestra en la Figura 46, por lo tanto en la celda J71 posicionarse y cambiar el parámetro M20 por K31 de contar con la humedad relativa mensual máxima y mínima, y de no contar con la humedad relativa mínima solo usar la máxima cambiando en la celda J71 el parámetro M20 por M35. Se pide que los datos que no se posean dejar la celda en blanco o sea sin ningún número.

Tmax (°C)=		<i>Punto de rocío de no contar con el dato usar HR max y min</i>	366
Tmin (°C)=	11.5		e (kPa)= 1.35098578
Trocío(°C)=	14.36		e _a (kPa)= 1.63633623
HRmax(%)=	83		e _a (kPa)= 1.1262982
HRmin(%)=	80		e _a (kPa)= 2.14106693
			e _a (kPa)= 1.63368256

Figura 42. Inserción del dato de punto de rocío; dejarlo en blanco de no contar con él, insertar humedad relativa máxima y mínima o solo la máxima.

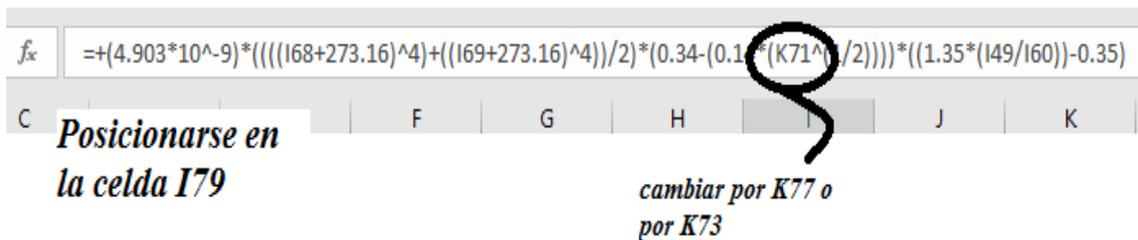


Figura 43. Procedimiento de cambio de parámetros en la función de no contar con punto de rocío y de contar con la humedad relativa máxima y mínima o solo la máxima; en la hoja de cálculo llamada RadiaNet.

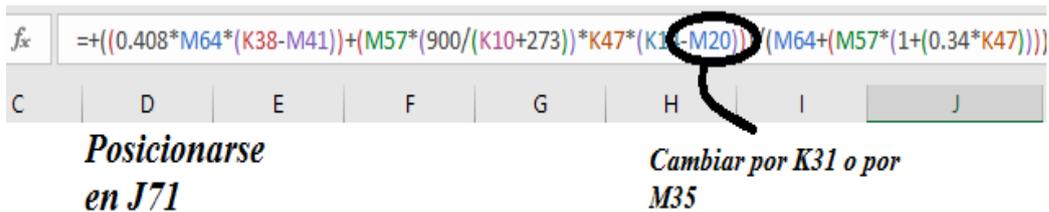


Figura 44 . Procedimiento de cambio de parámetros en la función de no contar con punto de rocío y de contar con la humedad relativa máxima y mínima o solo la máxima en la hoja de cálculo llamada ETo.

Paso 6

Datos: Los resultados de radiación extraterrestre (Ra), temperatura máxima y mínima, así como punto de rocío, humedad relativa y radiación neta (Rn); automáticamente se cargarán de la hoja de cálculo llamada RadiaNet a la hoja de cálculo llamada ETo por lo tanto la entrada de esos datos en dicha hoja no serán necesarios.

Paso 7

Dato 6: En la hoja de cálculo llamada ETo se deben ingresar los valores que están en las celdas de color rojo los cuales únicamente son cuatro; temperatura media anterior y posterior al dato de la temperatura utilizada como máxima y mínima, velocidad del viento y la altura del lugar en metros sobre el nivel del mar. Como se muestra en la Figura 47 al ingresar los datos de temperatura promedio mensual del mes anterior y del mes posterior encontramos el resultado del flujo de calor en el suelo (G) que es la energía que se utiliza para calentar el suelo.

Rn(MJ/m²* día)	10.10	<i>Flujo de calor en el suelo (G)</i>	
Tmed Mes anterior °C	16		
Mes Actual	*****	Gmes (MJ /m ² día)=	0.091
Tmed Mes Posterior °C	17.3		

Figura 45. Introducción en la hoja de cálculo llamada ETo de la temperatura media mensual anterior y posterior al dato del mes que se requiere para encontrar la energía que calienta el suelo (G).

Paso 8

Dato 7: Velocidad del viento (u_2), como se ve en la Figura 48 la velocidad se introduce en metros por segundo, tomada a 2 m sobre la superficie, esta altura es estándar en las estaciones meteorológicas por lo tanto se recomienda mantener la altura en 2 metros de no ser así se debe aplicar un factor de corrección colocando la nueva altura (Z).

Velocidad del viento a 2m de altura	
U2 [m/s]	3.2
Altura Z(m)	2
U2=Uz	3.2

Altura estandar, si no cambiar nueva Z

Figura 46. Introducción de datos de velocidad del viento y la altura donde se realizó esa medición, Z=2m es la altura estándar de las estaciones meteorológicas.

Paso 9

Dato 8: Altura sobre el nivel del mar (m.s.n.m) donde se encuentra el punto de estimación de la dotación en metros como se muestra en la Figura 49 para encontrar la presión atmosférica (P) y la constante psicométrica (λ) para la ecuación de ETo.

U2=Uz	
Dato para conocer P y λ	
Altura z(m.s.n.m)	1735
P (kPa)=	82.4037601

Figura 47. Colocación de dato de altura en metros sobre el nivel del mar del punto donde se desea otorgar la dotación.

Ya con todos los datos introducidos, se obtuvo el resultado requerido para deducir la evapotranspiración del cultivo de referencia el cual está representado en la celda J71 de la hoja de cálculo llamada ETo que contiene la Ecuación 1 como función; esencial para el cálculo de la dotación de riego. De no contar con estos datos, la hoja de cálculo está diseñada para producir un dato alternativo de evapotranspiración del cultivo de referencia mediante el método de Hargreaves (Ecuación 4) recomendado por la FAO, que posee únicamente como variables la temperatura máxima y mínima y el dato de radiación extraterrestre, dato que se encuentra en la celda J78 de la hoja de cálculo llamada ETo.

A continuación, se detallan los valores de Kc para los cultivos según FAO (2006).

Cuadro 31. Valores del coeficiente de cultivo (Kc) para diferentes cultivos.

Cultivo	K _{c ini} ¹	K _{c med}	K _{c fin}	Altura Máx. Cultivo (h) (m)
a. Hortalizas Pequeñas	0,7	1,05	0,95	
Brécol (Brócoli)		1,05	0,95	0,3
Col de Bruselas		1,05	0,95	0,4
Repollo		1,05	0,95	0,4
Zanahoria		1,05	0,95	0,3
Coliflor		1,05	0,95	0,4
Apio (Céleri)		1,05	1,00	0,6
Ajo		1,00	0,70	0,3
Lechuga		1,00	0,95	0,3
Cebolla – seca		1,05	0,75	0,4
– verde		1,00	1,00	0,3
– semilla		1,05	0,80	0,5
Espinaca		1,00	0,95	0,3
Rábano		0,90	0,85	0,3
b. Hortalizas– Familia de la Solanáceas	0,6	1,15	0,80	
Berenjena		1,05	0,90	0,8
Pimiento Dulce (campana)		1,05	0,90	0,7
Tomate		1,15	0,70–0,90	0,6
c. Hortalizas– Familia de las Cucurbitáceas	0,5	1,00	0,80	
Melón	0,5	0,85	0,60	0,3
Pepino – Cosechado Fresco	0,6	1,00	0,75	0,3
– Cosechado a Máquina	0,5	1,00	0,90	0,3
Calabaza de Invierno		1,00	0,80	0,4
Calabacín (zucchini)		0,95	0,75	0,3
Melón dulce		1,05	0,75	0,4
Sandía	0,4	1,00	0,75	0,4
d. Raíces y Tubérculos	0,5	1,10	0,95	
Remolacha, mesa		1,05	0,95	0,4
Yuca o Mandioca – año 1	0,3	0,80	0,30	1,0
– año 2	0,3	1,10	0,50	1,5
Chirivía	0,5	1,05	0,95	0,4
Patata o Papa		1,15	0,75	0,6
Camote o Batata		1,15	0,65	0,4
Nabos (Rutabaga)		1,10	0,95	0,6
Remolacha Azucarera	0,35	1,20	0,70	0,5

Fuente: FAO, 2016

Cuadro 32. Valores del coeficiente de cultivo (Kc) para diferentes cultivos

Cultivo	K _{c ini} ¹	K _{c med}	K _{c fin}	Altura Máx. Cultivo (h) (m)
e. Leguminosas (Leguminosae)	0,4	1,15	0,55	
Frijoles o judías, verdes	0,5	1,05	0,90	0,4
Frijoles o judías, secos y frescos	0,4	1,15	0,35	0,4
Garbanzo (chick pea)		1,00	0,35	0,4
Habas – Fresco	0,5	1,15	1,10	0,8
– Seco/Semilla	0,5	1,15	0,30	0,8
Garbanzo hindú	0,4	1,15	0,35	0,8
Caupís (cowpeas)		1,05	0,60-0,35	0,4
Maní		1,15	0,60	0,4
Lentejas		1,10	0,30	0,5
Guisantes o arveja – Frescos	0,5	1,15	1,10	0,5
– Secos/Semilla		1,15	0,30	0,5
Soya		1,15	0,50	0,5-1,0
f. Hortalizas perennes (con letargo invernal y suelo inicialmente desnudo o con mantillo)	0,5	1,00	0,80	
Alcachofa	0,5	1,00	0,95	0,7
Espárragos	0,5	0,95	0,30	0,2-0,8
Menta	0,60	1,15	1,10	0,6-0,8
Fresas	0,40	0,85	0,75	0,2
g. Cultivos Textiles	0,35			
Algodón		1,15-1,20	0,70-0,50	1,2-1,5
Lino		1,10	0,25	1,2
Sisal*		0,4-0,7	0,4-0,7	1,5
h. Cultivos Oleaginosos	0,35	1,15	0,35	
Ricino		1,15	0,55	0,3
Canola (colza)		1,0-1,15	0,35	0,6
Cártamo		1,0-1,15	0,25	0,8
Sésamo (ajonjolí)		1,10	0,25	1,0
Girasol		1,0-1,15	0,35	2,0
i. Cereales	0,3	1,15	0,4	
Cebada		1,15	0,25	1
Avena		1,15	0,25	1
Trigo de Primavera		1,15	0,25-0,4	1
Trigo de Invierno – con suelos congelados	0,4	1,15	0,25-0,4	1
– con suelos no-congelados	0,7	1,15	0,25-0,4	
Maíz, (grano)		1,20	0,60,0,35	2
Maíz, (dulce)		1,15	1,05	1,5
Mijo		1,00	0,30	1,5
Sorgo – grano		1,00-1,10	0,55	1-2
– dulce		1,20	1,05	2-4
Arroz	1,05	1,20	0,90-0,60	1

Fuente: FAO, 2016.

Cuadro 33. Valores del coeficiente de cultivo (Kc) para diferentes cultivos.

Cultivo	K _{c ini} ¹	K _{c med}	K _{c fin}	Altura Máx. Cultivo (h) (m)	
j. Forrajes					
Alfalfa (heno)	– efecto promedio de los cortes	0,40	0,95	0,90	0,7
	– períodos individuales de corte	0,40	1,20	1,15	0,7
	– para semilla	0,40	0,50	0,50	0,7
Bermuda (heno)	– efecto promedio de los cortes	0,55	1,00	0,85	0,35
	– cultivo para semilla (primavera)	0,35	0,90	0,65	0,4
Trébol heno, Bersím	– efecto promedio de los cortes	0,40	0,90	0,85	0,6
	– períodos individuales de corte	0,40	1,15	1,10	0,6
Rye Grass (heno)	– efecto promedio de los cortes	0,95	1,05	1,00	0,3
Pasto del Sudán (anual)	– efecto promedio de los cortes	0,50	0,90	0,85	1,2
	– período individual de corte	0,50	1,15	1,10	1,2
Pastos de Pastoreo	– pastos de rotación	0,40	0,85-1,05	0,85	0,15-0,30
	– pastoreo extensivo	0,30	0,75	0,75	0,10
Pastos (césped, turfgrass)	– época fría	0,90	0,95	0,95	0,10
	– época caliente	0,80	0,85	0,85	0,10
k. Caña de azúcar	0,40	1,25	0,75	3	
l. Frutas Tropicales y Árboles					
Banana	– 1 ^{er} año	0,50	1,10	1,00	3
	– 2 ^{do} año	1,00	1,20	1,10	4
Cacao		1,00	1,05	1,05	3
Café	– suelo sin cobertura	0,90	0,95	0,95	2-3
	– con malezas	1,05	1,10	1,10	2-3
Palma Datilera		0,90	0,95	0,95	8
Palmas		0,95	1,00	1,00	8
Piña ¹⁶	– suelo sin cobertura	0,50	0,30	0,30	0,6-1,2
	– con cobertura de gramíneas	0,50	0,50	0,50	0,6-1,2
Árbol del Caucho		0,95	1,00	1,00	10
Té	– no sombreado	0,95	1,00	1,00	1,5
	– sombreado	1,10	1,15	1,15	2
m. Uvas y Moras					
Moras (arbusto)		0,30	1,05	0,50	1,5
Uvas	– Mesa o secas (pasas)	0,30	0,85	0,45	2
	– Vino	0,30	0,70	0,45	1,5-2
Lúpulo		0,3	1,05	0,85	5

Fuente: FAO, 2016.

Cuadro 34. Valores del coeficiente de cultivo (K_c) para diferentes cultivos.

Cultivo	$K_{c\ ini}^1$	$K_{c\ med}$	$K_{c\ fin}$	Altura Máx. Cultivo (h) (m)
n. Árboles Frutales				
Almendras, sin cobertura del suelo	0,40	0,90	0,65	5
Manzanas, Cerezas, Peras				
– sin cobertura del suelo, con fuertes heladas	0,45	0,95	0,70	4
– sin cobertura del suelo, sin heladas	0,60	0,95	0,75	4
– cobertura activa del suelo, con fuertes heladas	0,50	1,20	0,95	4
– cobertura activa del suelo, sin heladas	0,80	1,20	0,85	4
Albaricoque, Melocotón o Durazno, Drupas				
– sin cobertura del suelo, con fuertes heladas	0,45	0,90	0,65	3
– sin cobertura del suelo, sin heladas	0,55	0,90	0,65	3
– cobertura activa del suelo, con fuertes heladas	0,50	1,15	0,90	3
– cobertura activa del suelo, sin heladas	0,80	1,15	0,85	3
Aguacate, sin cobertura del suelo	0,60	0,85	0,75	3
Cítricos, sin cobertura del suelo				
– 70% cubierta vegetativa	0,70	0,65	0,70	4
– 50% cubierta vegetativa	0,65	0,60	0,65	3
– 20% cubierta vegetativa	0,50	0,45	0,55	2
Cítricos, con cobertura activa del suelo o malezas				
– 70% cubierta vegetativa	0,75	0,70	0,70	4
– 50% cubierta vegetativa	0,80	0,80	0,80	3
– 20% cubierta vegetativa	0,85	0,85	0,85	2
Coníferas	1,00	1,00	1,00	10
Kiwi	0,40	1,05	1,05	3
Olivos (40 a 60% de cobertura del suelo por el dosel)	0,65	0,70	0,70	3-5
Pistachos, sin cobertura del suelo	0,40	1,10	0,45	3-5
Huerto de Nogal	0,50	1,10	0,65	4-5

Fuente: FAO, 2016

Anexo 5

Cuadro 35. ETo para la estación ubicada en Llano Grande de Cartago, nombre de la estación Llano Grande

País		CR-Finca 1		Estación		Llano Grande	
Altitud	2220 m.	Latitud	9.95 N	Longitud	83.97	°E	
Mes	Temp Min	Temp Max	Humedad	Viento	Insolación	Rad	ETo
	°C	°C	%	km/día	horas	MJ/m²/día	mm/día
Enero	8.4	17.9	78	714	6.5	17.1	3.13
Febrero	8.1	18.7	76	648	7.3	19.4	3.54
Marzo	8.5	19.3	76	641	7.2	20.3	3.74
Abril	9.9	19.3	79	575	5.3	17.7	3.36
Mayo	10.9	18.5	85	446	3.2	14.2	2.61
Junio	10.8	18.5	85	396	2.8	13.4	2.53
Julio	10.6	18.4	82	434	3.1	13.9	2.73
Agosto	10.5	18.6	83	435	3.2	14.2	2.73
Septiembre	10.7	18.3	84	357	3.2	14.1	2.62
Octubre	10.6	17.7	88	419	2.9	13.0	2.25
Noviembre	10.0	17.6	89	419	3.4	12.9	2.13
Diciembre	9.1	17.9	83	521	5.4	15.1	2.62
Promedio	9.9	18.4	82	500	4.5	15.4	2.83



Figura 48. ETo para la estación ubicada en Llano Grande de Cartago, nombre de la estación Llano Grande

Cuadro 36. ETo para la estación ubicada entre Llano Grande y Tres Ríos de Cartago, nombre de la estación Avance.

País		CR-Llano Grn-3Rios		Estación		Avance	
Altitud	1870 m.	Latitud	9.95 N	Longitud	83.96 E		
Mes	Temp Min	Temp Max	Humedad	Viento	Insolación	Rad	ETo
	°C	°C	%	km/día	horas	MJ/m²/día	mm/día
Enero	9.5	21.0	78	714	6.5	17.1	3.54
Febrero	9.1	21.8	76	648	7.3	19.4	3.98
Marzo	9.7	22.6	76	641	7.2	20.3	4.23
Abril	10.6	21.6	79	575	5.3	17.7	3.63
Mayo	12.5	21.3	85	446	3.2	14.2	2.84
Junio	12.7	21.0	85	396	2.8	13.4	2.71
Julio	12.3	21.0	82	434	3.1	13.9	2.95
Agosto	12.2	21.1	83	435	3.2	14.2	2.94
Septiembre	12.2	20.9	84	357	3.2	14.1	2.82
Octubre	12.4	20.5	88	419	2.9	13.0	2.45
Noviembre	11.8	20.3	89	419	3.4	12.9	2.32
Diciembre	10.7	20.4	83	521	5.4	15.1	2.86
Promedio	11.3	21.1	82	500	4.5	15.4	3.11



Figura 49. ETo para la estación ubicada entre Llano Grande y Tres Ríos de Cartago, nombre de la estación Avance.

Cuadro 37. ETo para la estación ubicada en Llano Grande, nombre de la estación Corralillo.

País		CR-LLano Grande		Estación		Corralillo	
Altitud		2140 m.		Latitud		9.95 °N	
				Longitud		83.93 °E	
Mes	Temp Min	Temp Max	Humedad	Viento	Insolación	Rad	ETo
	°C	°C	%	km/día	horas	MJ/m²/día	mm/día
Enero	7.2	19.5	84	714	6.5	17.1	2.97
Febrero	6.5	19.8	83	648	7.3	19.4	3.28
Marzo	7.0	20.6	82	641	7.2	20.3	3.57
Abril	8.4	20.5	85	575	5.3	17.7	3.14
Mayo	10.5	19.9	90	446	3.2	14.2	2.46
Junio	11.1	19.9	90	396	2.8	13.4	2.38
Julio	10.6	19.8	88	434	3.1	13.9	2.53
Agosto	10.9	20.1	89	435	3.2	14.2	2.54
Septiembre	10.4	19.8	90	357	3.2	14.1	2.47
Octubre	10.4	19.2	93	419	2.9	13.0	2.11
Noviembre	9.8	18.8	92	419	3.4	12.9	2.08
Diciembre	8.6	19.3	88	521	5.4	15.1	2.49
Promedio	9.3	19.8	88	500	4.5	15.4	2.67



Figura 50. ETo para la estación ubicada en Llano Grande, nombre de la estación Corralillo.

Cuadro 38. ETo para la estación ubicada en Rancho Redondo, nombre de la estación Rancho Redondo.

País		CR-Rancho Redondo		Estación		Rancho Redondo		
Altitud	1780	m.	Latitud	9.97	°N	Longitud	83.97	°E
Mes	Temp Min	Temp Max	Humedad	Viento	Insolación	Rad	ETo	
	°C	°C	%	km/día	horas	MJ/m ² /día	mm/día	
Enero	9.7	20.0	78	714	6.5	17.1	3.39	
Febrero	9.6	20.4	76	648	7.3	19.4	3.76	
Marzo	10.1	21.2	76	641	7.2	20.3	3.99	
Abril	11.3	21.7	79	575	5.3	17.7	3.62	
Mayo	13.0	21.9	85	446	3.2	14.2	2.89	
Junio	13.1	21.7	85	396	2.8	13.4	2.77	
Julio	12.7	21.2	82	434	3.1	13.9	2.97	
Agosto	12.7	21.4	83	435	3.2	14.2	2.96	
Septiembre	12.9	21.5	84	357	3.2	14.1	2.86	
Octubre	12.9	21.5	88	419	2.9	13.0	2.53	
Noviembre	12.4	21.1	89	419	3.4	12.9	2.38	
Diciembre	10.8	20.5	83	521	5.4	15.1	2.88	
Promedio	11.8	21.2	82	500	4.5	15.4	3.08	



Figura 51. ETo para la estación ubicada en Rancho Redondo, nombre de la estación Rancho Redondo

Cuadro 39. ETo para la estación ubicada en Pacayas de Cartago, nombre de la estación Pacayas

País		CR Cartago Pacayas		Estación		PACAYAS		
Altitud	1735	m.	Latitud	9.91	°N	Longitud	83.81	°W
Mes	Temp Min	Temp Max	Humedad	Viento	Insolación	Rad	ETo	
	°C	°C	%	km/día	horas	MJ/m²/día	mm/día	
Enero	10.7	20.7	82	61	4.6	14.5	2.50	
Febrero	10.4	21.2	78	69	4.8	15.7	2.80	
Marzo	10.7	21.3	78	78	5.0	16.9	3.04	
Abril	11.5	22.2	81	69	4.3	16.1	2.98	
Mayo	12.2	22.4	84	61	4.3	15.9	2.94	
Junio	12.6	22.5	85	52	3.8	14.8	2.79	
Julio	12.4	22.2	88	52	3.0	13.7	2.60	
Agosto	12.1	22.3	86	52	3.5	14.6	2.75	
Septiembre	12.1	22.7	86	52	3.4	14.5	2.74	
Octubre	12.1	22.2	86	52	3.2	13.5	2.53	
Noviembre	11.9	21.3	84	52	3.4	12.9	2.36	
Diciembre	11.3	21.0	84	52	4.3	13.6	2.38	
Promedio	11.7	21.8	84	58	4.0	14.7	2.70	



Figura 52. ETo para la estación ubicada en Pacayas de Cartago, nombre de la estación Pacayas

Cuadro 40. ETo para la estación ubicada en San Juan de Chicua de Cartago, nombre de la estación Coliblanco.

País		CR Zona Chicua		Estación		COLIBLANCO	
Altitud	2200 m.	Latitud	9.95 °N	Longitud	83.80 °W		
Mes	Temp Min	Temp Max	Humedad	Viento	Insolación	Rad	ETo
	°C	°C	%	km/día	horas	MJ/m²/día	mm/día
Enero	8.1	15.0	92	61	4.6	14.4	2.19
Febrero	8.0	15.8	94	69	4.8	15.7	2.40
Marzo	8.2	16.8	94	78	5.0	16.9	2.65
Abril	8.9	16.9	95	61	4.3	16.1	2.61
Mayo	10.2	17.3	94	52	4.3	15.9	2.65
Junio	10.5	17.0	94	52	3.8	14.9	2.52
Julio	10.1	16.3	93	52	3.0	13.7	2.34
Agosto	10.3	16.5	92	52	3.5	14.6	2.48
Septiembre	10.2	17.0	93	52	3.4	14.5	2.47
Octubre	9.9	16.8	96	52	3.2	13.5	2.26
Noviembre	9.9	15.9	96	52	3.4	12.9	2.09
Diciembre	9.1	15.3	93	52	4.3	13.6	2.12
Promedio	9.4	16.4	94	57	4.0	14.7	2.40

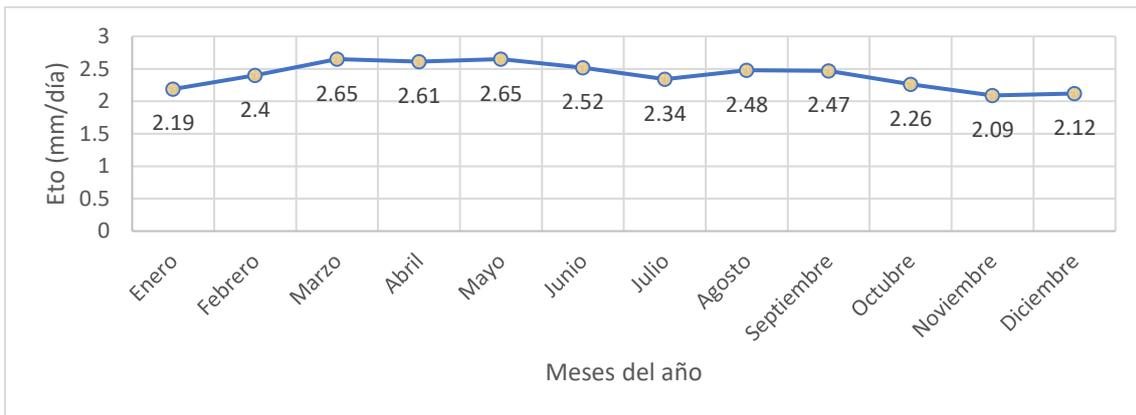


Figura 53. ETo para la estación ubicada en San Juan de Chicua de Cartago, nombre de la estación Coliblanco.

Cuadro 41. ETo para la estación ubicada en el Volcán Irazú, nombre de la estación Irazú.

País		CR-Volcán Irazú		Estación		Irazú	
Altitud	3331 m.	Latitud	9.98 N	Longitud	83.84	°E	
Mes	Temp Min	Temp Max	Humedad	Viento	Insolación	Rad	ETo
	°C	°C	%	km/día	horas	MJ/m ² /día	mm/día
Enero	3.8	12.2	76	548	6.9	17.6	2.64
Febrero	3.8	13.3	66	505	6.6	18.3	3.26
Marzo	4.6	14.5	62	417	6.4	19.1	3.61
Abril	5.1	14.9	71	317	5.5	18.0	3.21
Mayo	5.8	14.2	79	356	4.5	16.1	2.74
Junio	5.8	13.3	88	459	4.5	15.8	2.26
Julio	5.1	11.7	88	563	3.3	14.2	1.96
Agosto	5.1	12.3	87	498	3.9	15.2	2.14
Septiembre	5.5	13.1	86	449	4.5	16.1	2.33
Octubre	5.4	13.2	88	380	4.3	15.2	2.19
Noviembre	4.9	12.6	90	457	4.5	14.5	1.93
Diciembre	4.2	12.1	83	541	6.7	16.9	2.27
Promedio	4.9	13.1	80	458	5.1	16.4	2.55



Figura 54. ETo para la estación ubicada en el Volcán Irazú, nombre de la estación Irazú.

Anexo 6. Ubicación de los cilindros infiltrómetros en la Finca 1 para determinar Infiltración básica.



Anexo 7. Cultivos de fresa y flores ornamentales ubicados en la Finca 2, método de riego localizado por goteo.



Anexo 8. Ubicación de los cilindros infiltrómetros en la Finca 2 para determinar Infiltración básica.



Anexo 9. Ubicación de los cilindros infiltrómetros en la Finca 4 para determinar Infiltración básica.



Anexo 10. Procesamiento de Datos para conocer la infiltración básica.

Cuadro 42. Datos obtenidos y procesamiento para conocer la Infiltración básica Finca 1.

Tiempo		Intervalo	Tiempo Acumulado	<i>Tiempo promedio</i>	Lamina infiltrada	Lamina acumulada	Infiltración Insatantanea	Infiltración Promedio	Icum Kostiakov	li Kostiakov
min	seg		horas	<i>Acumulado</i>			<i>li</i>	<i>lp</i>	475,38t ^{0,851}	416,08t ^{0,139}
			horas	horas	mm	mm	mm/h	mm/h	mm	mm/h
				(2/2)+3		(5+6)	(5/2)	(6/3)	relación 3y6	relación 3y7
3	43	0.0619	0.06	0.0310	50	50	807.17	807.17	44.53	612.48
5	22	0.0894	0.15	0.1067	50	100	559.01	660.55	95.35	540.93
6	9	0.1025	0.25	0.2026	50	150	487.80	590.81	147.98	503.42
6	47	0.1131	0.37	0.3104	50	200	442.26	545.04	202.48	478.30
6	51	0.1142	0.48	0.4240	50	250	437.96	519.63	255.00	460.62
7	16	0.1211	0.60	0.5417	50	300	412.84	498.15	308.71	446.47
7	25	0.1236	0.73	0.6640	50	350	404.49	482.20	361.89	435.03
7	34	0.1261	0.85	0.7889	50	400	396.48	469.51	414.76	425.45
7	35	0.1264	0.98	0.9151	50	450	395.60	459.97	466.60	417.35
7	41	0.1281	1.11	1.0424	50	500	390.46	451.92	518.11	410.27
7	42	0.1283	1.23	1.1706	50	550	389.61	445.44	568.84	404.06
7	43	0.1286	1.36	1.2990	50	600	388.77	440.10	618.91	398.54
7	46	0.1294	1.49	1.4281	50	650	386.27	435.43	668.59	393.54
7	49	0.1303	1.62	1.5579	50	700	383.80	431.29	717.96	388.99
7	54	0.1317	1.75	1.6889	50	750	379.75	427.42	767.25	384.80
8	10	0.1361	1.89	1.8228	50	800	367.35	423.09	817.63	380.82
8	10	0.1361	2.03	1.9589	50	850	367.35	419.35	867.47	377.16
8	12	0.1367	2.16	2.0953	50	900	365.85	415.97	917.02	373.75
8	12	0.1367	2.30	2.2319	50	950	365.85	412.99	966.11	370.59
8	15	0.1375	2.44	2.3690	50	1000	363.64	410.21	1015.05	367.61
8	16	0.1378	2.58	2.5067	50	1050	362.90	407.68	1063.69	364.81
8	20	0.1389	2.71	2.6450	50	1100	360.00	405.24	1112.33	362.16
8	25	0.1403	2.85	2.7846	50	1150	356.44	402.84	1161.08	359.63
8	25	0.1403	3.00	2.9249	50	1200	356.44	400.67	1209.48	357.24
8	26	0.1406	3.14	3.0653	50	1250	355.73	398.65	1257.63	354.97
8	30	0.1417	3.28	3.2064	50	1300	352.94	396.68	1305.84	352.79
8	30	0.1417	3.42	3.3481	50	1350	352.94	394.87	1353.75	350.73
8	35	0.1431	3.56	3.4904	50	1400	349.51	393.04	1401.82	348.73
8	35	0.1431	3.71	3.6335	50	1450	349.51	391.36	1449.61	346.83
8	35	0.1431	3.85	3.7765	50	1500	349.51	389.81	1497.12	345.01
8	43	0.1453	3.99	3.9207	50	1550	344.17	388.15	1545.10	343.23
8	43	0.1453	4.14	4.0660	50	1600	344.17	386.60	1592.83	341.53
8	47	0.1464	4.29	4.2118	50	1650	341.56	385.06	1640.67	339.89
8	53	0.1481	4.43	4.3590	50	1700	337.71	383.48	1688.80	338.29
8	58	0.1494	4.58	4.5078	50	1750	334.57	381.89	1737.15	336.73
8	58	0.1494	4.73	4.6572	50	1800	334.57	380.39	1785.26	335.23
8	58	0.1494	4.88	4.8067	50	1850	334.57	378.99	1833.15	333.79
8	58	0.1494	5.03	4.9561	50	1900	334.57	377.67	1880.82	332.39
8	59	0.1497	5.18	5.1057	50	1950	333.95	376.41	1928.37	331.04
8	59	0.1497	5.33	5.2554	50	2000	333.95	375.21	1975.71	329.73
9	0	0.1500	5.48	5.4053	50	2050	333.33	374.07	2022.94	328.46
9	0	0.1500	5.63	5.5553	50	2100	333.33	372.98	2069.98	327.23
9	0	0.1500	5.78	5.7053	50	2150	333.33	371.95	2116.84	326.04
9	3	0.1508	5.93	5.8557	50	2200	331.49	370.93	2163.77	324.87
9	3	0.1508	6.08	6.0065	50	2250	331.49	369.95	2210.53	323.74
9	3	0.1508	6.23	6.1574	50	2300	331.49	369.02	2257.11	322.64
9	3	0.1508	6.38	6.3082	50	2350	331.49	368.13	2303.53	321.57
9	3	0.1508	6.53	6.4590	50	2400	331.49	367.28	2349.78	320.53
9	3	0.1508	6.69	6.6099	50	2450	331.49	366.48	2395.88	319.51
9	3	0.1508	6.84	6.7607	50	2500	331.49	365.70	2441.82	318.52
9	3	0.1508	6.99	6.9115	50	2550	331.49	364.97	2487.61	317.56
9	3	0.1508	7.14	7.0624	50	2600	331.49	364.26	2533.26	316.62
							lb infiltración básica			

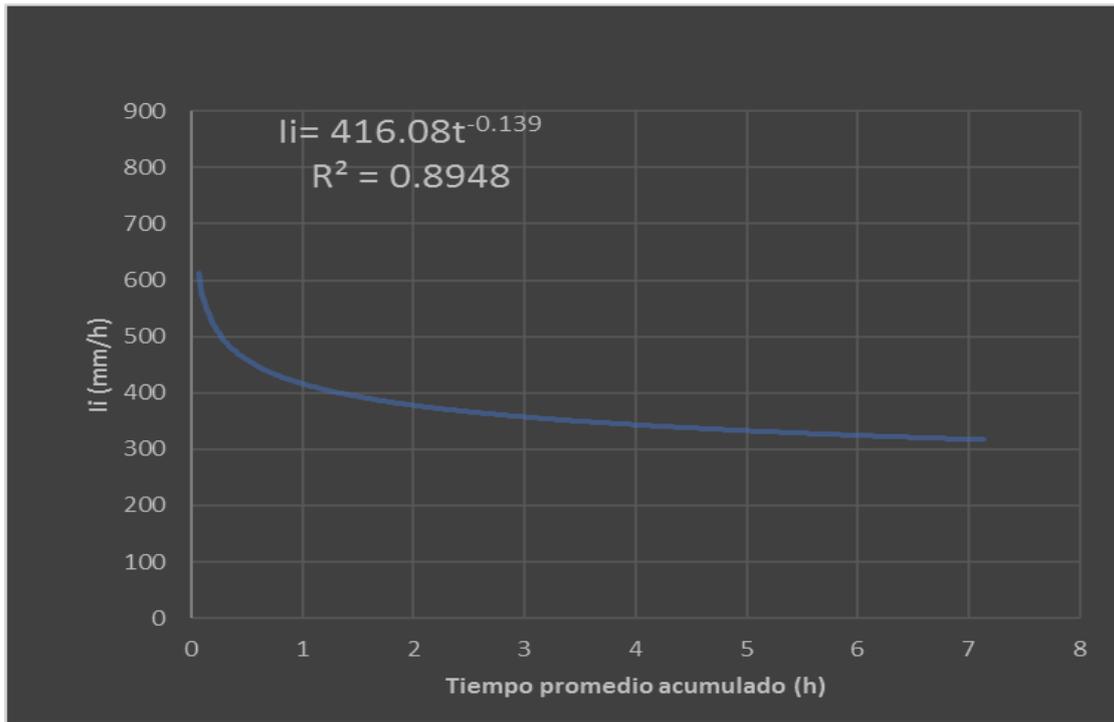


Figura 55. Velocidad de infiltración instantánea Finca 1

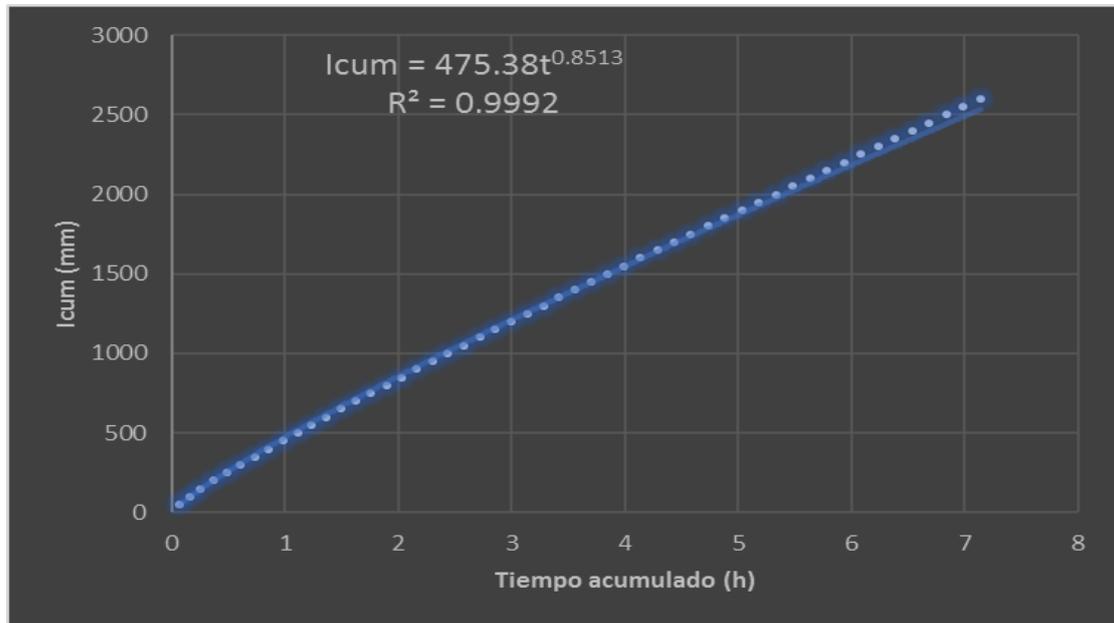


Figura 56. Infiltración acumulada (I_{cum}) finca 1

Cuadro 43. Datos obtenidos y procesamiento para conocer la Infiltración básica Finca 2.

Tiempo		Intervalo	Tiempo Acumulado	Tiempo promedio	Lamina infiltrada	Lamina acumulada	Infiltración Instantánea	Infiltración Promedio	Icum	li	
min	seg	horas	horas	Acumulado	mm	mm	mm/h	mm/h	mm	mm/h	
				(2/2)+3	(5+6)	(5/2)	(6/3)	1077.71 ^{0,77}	831.01 ^{0,236}	relación 3y6	relación 3y7
4	20	0.0722	0.07	0.0361	100	100	1384.62	1384.62	110.05	1545.11	
5	0	0.0833	0.16	0.1139	100	200	1200.00	1285.71	208.42	1289.20	
5	15	0.0875	0.24	0.1993	100	300	1142.86	1234.29	302.17	1160.33	
5	48	0.0967	0.34	0.2914	100	400	1034.48	1177.43	399.28	1072.16	
6	10	0.1028	0.44	0.3911	100	500	972.97	1129.94	497.53	1007.33	
6	10	0.1028	0.55	0.4939	100	600	972.97	1100.36	591.98	958.88	
6	23	0.1064	0.65	0.5985	100	700	939.95	1074.17	686.65	919.38	
6	56	0.1156	0.77	0.7094	100	800	865.38	1042.72	786.58	884.64	
7	7	0.1186	0.89	0.8265	100	900	843.09	1015.99	886.55	855.13	
7	12	0.1200	1.01	0.9458	100	1000	833.33	994.20	985.43	829.87	
7	8	0.1189	1.12	1.0653	100	1100	841.12	978.02	1081.45	808.28	
7	18	0.1217	1.25	1.1856	100	1200	821.92	962.78	1177.97	788.92	
7	19	0.1219	1.37	1.3074	100	1300	820.05	950.06	1273.14	771.73	
7	27	0.1242	1.49	1.4304	100	1400	805.37	938.02	1368.59	756.07	
7	40	0.1278	1.62	1.5564	100	1500	782.61	925.77	1465.43	741.55	
7	43	0.1286	1.75	1.6846	100	1600	777.54	914.87	1561.61	728.31	
7	54	0.1317	1.88	1.8147	100	1700	759.49	903.99	1658.87	715.94	
8	0	0.1333	2.01	1.9472	100	1800	750.00	893.79	1756.19	704.46	
8	13	0.1369	2.15	2.0824	100	1900	730.22	883.38	1855.03	693.60	
8	17	0.1381	2.29	2.2199	100	2000	724.35	873.79	1953.61	683.49	
8	18	0.1383	2.43	2.3581	100	2100	722.89	865.19	2051.40	674.09	
8	23	0.1397	2.57	2.4971	100	2200	715.71	857.05	2149.22	665.25	
8	33	0.1425	2.71	2.6382	100	2300	701.75	848.88	2248.07	656.82	
8	51	0.1475	2.86	2.7832	100	2400	677.97	840.06	2349.47	648.65	
9	5	0.1514	3.01	2.9326	100	2500	660.55	831.02	2452.64	640.80	
9	7	0.1519	3.16	3.0843	100	2600	658.14	822.71	2555.31	633.39	
9	11	0.1531	3.31	3.2368	100	2700	653.36	814.89	2657.91	626.36	
9	12	0.1533	3.47	3.3900	100	2800	652.17	807.69	2759.89	619.71	
9	20	0.1556	3.62	3.5444	100	2900	642.86	800.61	2862.58	613.32	
9	39	0.1608	3.78	3.7026	100	3000	621.76	793.01	2967.98	607.07	
9	36	0.1600	3.94	3.8631	100	3100	625.00	786.19	3072.09	601.16	
10	4	0.1678	4.11	4.0269	100	3200	596.03	778.43	3180.51	595.28	
10	33	0.1758	4.29	4.1988	100	3300	568.72	769.83	3293.34	589.42	
10	56	0.1822	4.47	4.3778	100	3400	548.78	760.82	3409.45	583.66	
11	3	0.1842	4.65	4.5610	100	3500	542.99	752.19	3525.99	578.12	
11	15	0.1875	4.84	4.7468	100	3600	533.33	743.72	3643.86	572.76	
11	35	0.1931	5.03	4.9371	100	3700	517.99	735.06	3764.41	567.50	
11	36	0.1933	5.23	5.1303	100	3800	517.24	727.00	3884.37	562.47	
11	37	0.1936	5.42	5.3238	100	3900	516.50	719.48	4003.76	557.66	
11	39	0.1942	5.61	5.5176	100	4000	515.02	712.41	4122.77	553.05	
11	39	0.1942	5.81	5.7118	100	4100	515.02	705.81	4241.09	548.63	
11	40	0.1944	6.00	5.9061	100	4200	514.29	699.61	4358.92	544.38	
11	40	0.1944	6.20	6.1006	100	4300	514.29	693.80	4476.11	540.30	
11	40	0.1944	6.39	6.2950	100	4400	514.29	688.34	4592.69	536.38	
11	40	0.1944	6.59	6.4894	100	4500	514.29	683.20	4708.67	532.60	
11	40	0.1944	6.78	6.6839	100	4600	514.29	678.35	4824.08	528.96	
							ib infiltración básica				

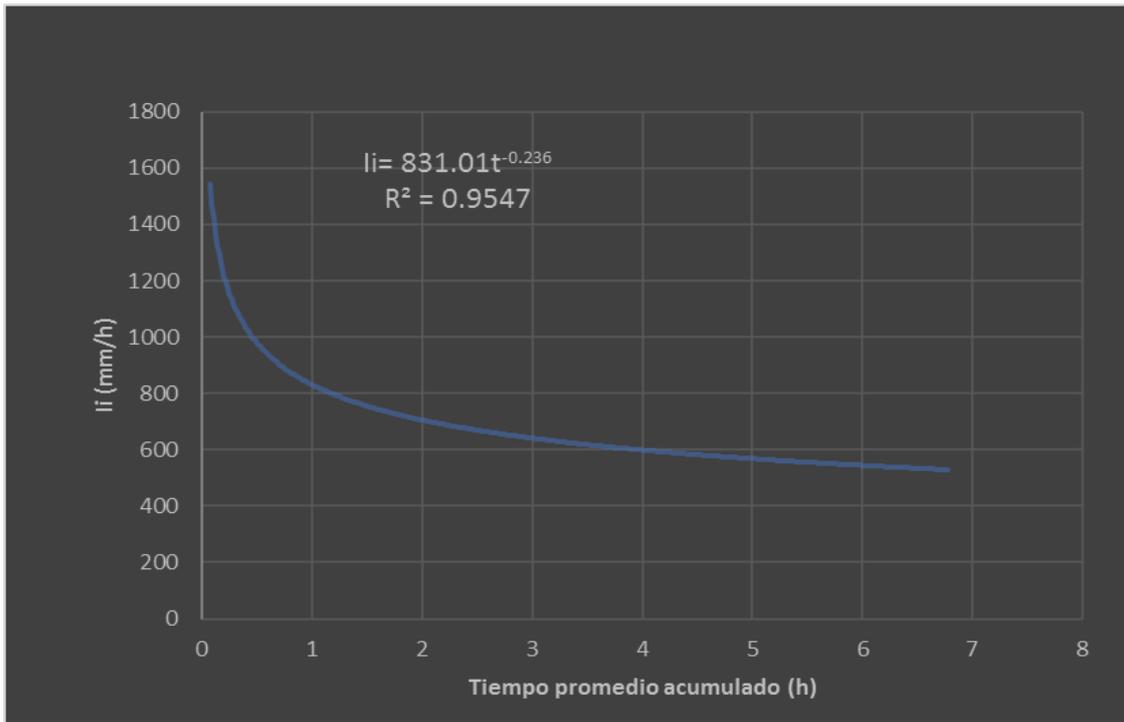


Figura 57. Velocidad de infiltración instantánea Finca 2.

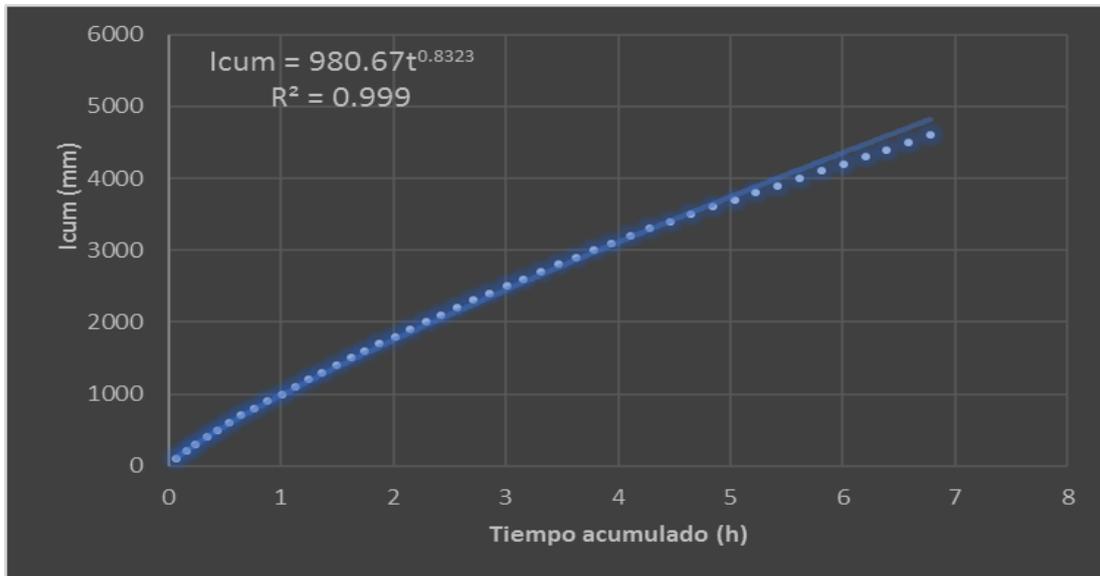


Figura 58. Infiltración acumulada (I_{cum}) Finca 2.

Cuadro 44. Datos obtenidos y procesamiento para conocer la Infiltración básica Finca 4.

Tiempo		Intervalo		Tiempo Acumulado	Tiempo promedio	Lamina infiltrada	Lamina acumulada	Infiltración Insatantanea	Infiltración Promedio	Icum	li
min	seg	horas	horas	horas	horas	mm	mm	mm/h	mm/h	mm	mm/h
					$(2/2)+3$		$(5+6)$	$(5/2)$	$(6/3)$	$217.81t^{0,7884}$	$183.57t^{-0,241}$
										relación 3y6	relación 3y7
8	57	0.15	0.15	0.0746	50	50	335.20	335.20	48.60	290.37	
13	39	0.23	0.38	0.2629	50	100	219.78	265.49	100.87	232.27	
15	11	0.25	0.63	0.5032	50	150	197.59	238.20	151.26	205.21	
16	44	0.28	0.91	0.7692	50	200	179.28	220.12	201.96	187.86	
17	3	0.28	1.19	1.0507	50	250	175.95	209.59	250.29	175.93	
18	31	0.31	1.50	1.3471	50	300	162.02	199.81	300.07	166.44	
20	8	0.34	1.84	1.6692	50	350	149.01	190.53	351.80	158.55	
21	25	0.36	2.19	2.0154	50	400	140.08	182.32	404.66	151.90	
21	25	0.36	2.55	2.3724	50	450	140.08	176.41	455.73	146.48	
21	40	0.36	2.91	2.7314	50	500	138.46	171.71	505.87	141.88	
21	40	0.36	3.27	3.0925	50	550	138.46	168.04	554.71	137.94	
21	40	0.36	3.63	3.4536	50	600	138.46	165.10	602.42	134.51	
22	15	0.37	4.01	3.8196	50	650	134.83	162.30	650.38	131.39	
22	19	0.37	4.38	4.1910	50	700	134.43	159.93	697.55	128.61	
23	0	0.38	4.76	4.5686	50	750	130.43	157.55	745.29	126.04	
23	50	0.40	5.16	4.9589	50	800	125.87	155.11	793.90	123.62	
24	50	0.41	5.57	5.3644	50	850	120.81	152.57	843.71	121.35	
24	50	0.41	5.99	5.7783	50	900	120.81	150.37	892.75	119.27	
24	50	0.41	6.40	6.1922	50	950	120.81	148.46	941.08	117.36	
24	50	0.41	6.81	6.6061	50	1000	120.81	146.78	988.75	115.60	
								ib infiltración básica			

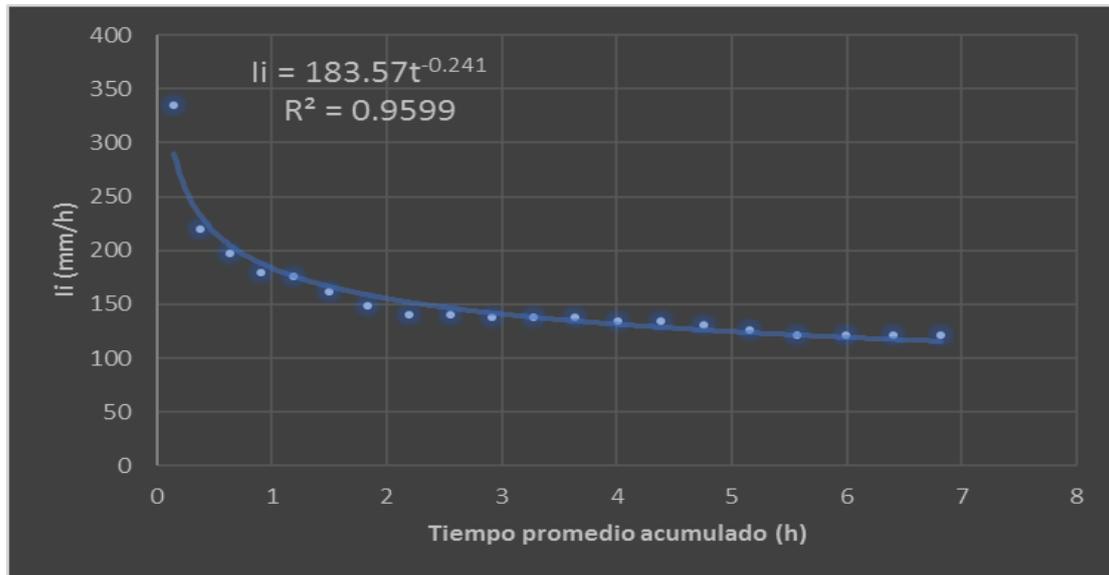


Figura 59. Velocidad de infiltración instantánea Finca 4.



Figura 60. Infiltración acumulada (Icum) Finca 2.

Anexo 11. Comparación de la ETo por los métodos FAO Penman-Monteith vs Hargreaves para los datos meteorológicos de la estación la Piñera en Buenos Aires de Puntarenas.

Cuadro 45. Evapotranspiración de referencia mensual por el método FAO Penman-Monteith para la estación ubicada en Buenos Aires de Puntarenas, nombre de la estación La Piñera.

País		Estación					
CR Zona Sur-Buenos A		LA-PINERA					
Altitud	350 m.	Latitud	9.18 N				
		Longitud	83.33 W				
Mes	Temp Min	Temp Max	Humedad	Viento	Insolación	Rad	ETo
	°C	°C	%	km/día	horas	MJ/m ² /día	mm/día
Enero	19.0	32.9	86	69	6.8	17.7	3.61
Febrero	18.9	34.0	83	78	7.5	19.9	4.18
Marzo	19.9	34.1	82	78	6.9	19.9	4.31
Abril	20.7	33.0	85	61	6.0	18.8	4.04
Mayo	20.7	31.7	89	52	4.9	16.6	3.54
Junio	20.5	31.0	91	52	3.8	14.8	3.14
Julio	20.3	30.9	92	52	4.3	15.6	3.26
Agosto	20.1	30.7	92	52	4.5	16.2	3.35
Septiembre	20.0	30.4	94	52	4.1	15.6	3.21
Octubre	20.2	30.2	94	52	4.3	15.2	3.08
Noviembre	20.4	30.4	90	52	4.4	14.5	2.94
Diciembre	19.7	31.2	86	52	5.5	15.4	3.11
Promedio	20.0	31.7	89	58	5.3	16.7	3.48

Cuadro 46. Evapotranspiración de referencia mensual por el método Hargreaves para la estación ubicada en Buenos Aires de Puntarenas, nombre de la estación La Piñera.

Mes	Ra (mm/día)	T min (°C)	T max (°C)	T media (°C)	Eto (mm/día)
Enero	13.17	19	32.9	25.95	4.94
Febrero	14.19	18.9	34	26.45	5.61
Marzo	15.14	19.9	34.1	27	5.88
Abril	15.46	20.7	33	26.85	5.57
Mayo	15.22	20.7	31.7	26.2	5.11
Junio	14.97	20.5	31	25.75	4.86
Julio	15.04	20.3	30.9	25.6	4.89
Agosto	15.27	20.1	30.7	25.4	4.94
Septiembre	15.13	20	30.4	25.2	4.83
Octubre	14.37	20.2	30.2	25.2	4.49
Noviembre	13.35	20.4	30.4	25.4	4.20
Diciembre	12.81	19.7	31.2	25.45	4.32
Promedio	14.51	20.03	31.71	25.87	4.97

Anexo 12. Estado de Concesiones para las SUA's pertenecientes a la zona norte de Cartago.

1. SUA Quebrada Parcela Sanatorio Durán: Expediente administrativo de concesión N° 9480-A Expediente administrativo de inscripción N° 297-S Caudal otorgado: 9.50 L/s Fuente: Río Retes Estado: Otorgado	9. SUA San Blas: Expediente administrativo de concesión N° 2169-A Expediente administrativo de inscripción N° 713-S Caudal : 3 L/s Fuente: Río Toyogres Estado: Cancelado (Retomar el expediente administrativo)
2. SUA Proyecto Río Reventado: Expediente administrativo de concesión N° 4646-A Expediente administrativo de inscripción N° 66-S Caudal otorgado: 35 L/s Fuente: Río Reventado Estado: Otorgado	10. SUA Quebrada Arriáz y Taras. Expediente administrativo de inscripción N° 699-S Solicitar tramite de concesión
3. SUA Quebrada Pavas Llano Grande: Expediente administrativo de concesión N° 9494-A Expediente administrativo de inscripción N° 378-S Caudal otorgado: 10.65 L/s Fuente: Quebrada Pavas y Fuente Sin Nombre Estado: Otorgado	11. SUA Quebrada Fierro: Expediente administrativo de inscripción N° 698-S Solicitar tramite de concesión
4. SUA El Rodeo de Tierra Blanca: Expediente administrativo de concesión N° 7668-A Expediente administrativo de inscripción N° 79-S Caudal otorgado: 15.6 L/s Fuente: Río Reventado Estado: Otorgado	12. SUA Del Río Tiribí: Expediente administrativo de inscripción N° 706-S Solicitar tramite de concesión
5. SUA Barrio Los Ángeles Llano Grande: <input checked="" type="checkbox"/> Expediente administrativo de concesión N° 9880-A <input checked="" type="checkbox"/> Expediente administrativo de inscripción N° 118-S <input checked="" type="checkbox"/> Caudal otorgado: 8.95 L/s <input checked="" type="checkbox"/> Fuente: Río Retes Estado: Otorgado	13. SUA El Portón del Rodeo: Expediente administrativo de inscripción N° 710-S Solicitar tramite de concesión
6. SUA La Cañada: Expediente administrativo de concesión N° 4863-A Expediente administrativo de inscripción N° 18-S Caudal otorgado: 13 L/s Fuente: Quebrada la Yerbabuena Estado: Otorgado	
7. SUA Llano Grande de Cartago: Expediente administrativo de concesión N° 8479-A Expediente administrativo de inscripción N° 207-S Caudal otorgado: 3 L/s Fuente: Quebrada Potrerillos y Aguacate Estado: Otorgado SUA APROFLOR DE Llano Grande: Expediente administrativo de concesión N° 4922-A Expediente administrativo de inscripción N° 636-S Caudal otorgado: 22.47 L/s Fuente: Quebrada Santa Rosa Estado: Otorgado	

Fuente: DA, 2017

Anexo 13. Reporte contables SUA Quebrada Pavas.

ESTADO CUENTA DE CONCESIONES																
REPORTO CONTABLE																
Expediente: 9794 A (AGUAS SUPERFICIALES)																
Concesionario: 3107278420 S.U.A QUEBRADA PAVAS LLANO GRANDE																
ESTADO: OTORGADO																
Fecha Vencimiento del Exp: 27/07/2025 TRAMITE: ARCHIVO																
Fecha Emisión	Tipo	Folio	Folio	Doc#	Mes	Tiempo	Es	Ajuste	Adeudo	Pendiente	Recargo	Canon	TOTAL PAGAR	DEBITO (ajuste +recargo + canon)	CREDITO (Total a Pagar + Adeslto)	TOTAL
0	P	F	O						lento				A			
11/01/08	FA	95143	31/03/08	09/10/08	2008	1	PAGA	0.00	0.00	13,539.29	.00	13,539.29	27,078.58	13,539.29	27,078.58	0.00
21/04/08	FA	99778	30/06/08	09/02/09	2008	2	Pagx	0.00	0.00	27,078.58	.00	13,539.29	42,617.87	13,539.29	.00	13,539.29
08/07/08	FA	104223	30/09/08	08/02/09	2008	3	Pagx	0.00	0.00	40,617.87	.00	13,539.29	54,157.16	13,539.29	.00	27,078.58
13/10/08	FA	108590	31/12/08	09/02/09	2008	4	PAGA	0.00	0.00	27,078.58	.00	21,662.87	48,741.45	21,662.87	.00	0.00
14/01/09	FA	112769	31/03/09	30/09/09	2009	1	Pagx	0.00	0.00	46,741.45	3,394.82	21,662.87	73,789.14	25,047.69	.00	25,047.69
13/04/09	FA	117057	30/06/09	30/09/09	2009	2	Pagx	0.00	0.00	25,047.69	.00	21,662.87	46,710.56	21,662.87	.00	46,710.56
06/07/09	FA	121168	30/09/09	30/09/09	2009	3	PAGA	0.00	0.00	46,710.56	5,415.72	21,662.87	73,789.15	27,078.58	.00	73,789.15
07/10/09	FA	125109	31/12/09	18/01/10	2009	4	PAGA	0.00	0.00	.00	.00	29,786.45	29,786.45	29,786.45	.00	29,786.45
22/01/10	FA	129070	31/03/10	01/07/10	2010	1	Pagx	0.00	0.00	.00	.00	29,786.45	29,786.45	29,786.45	.00	29,786.45
19/04/10	FA	133101	30/06/10	01/07/10	2010	2	PAGA	0.00	0.00	29,786.45	.00	29,786.45	59,572.90	29,786.45	.00	59,572.90
13/07/10	FA	136946	30/09/10	27/11/10	2010	3	Pagx	0.00	0.00	.00	.00	29,786.45	29,786.45	29,786.45	.00	29,786.45
02/11/10	FA	140781	31/12/10	27/11/10	2010	4	PAGA	5,415.72	0.00	29,786.45	.00	37,910.02	73,112.18	43,325.74	.00	73,112.18
27/01/11	FA	144535	31/03/11	07/05/11	2011	1	Pagx	0.00	0.00	.00	.00	37,910.02	37,910.02	37,910.02	.00	37,910.02
26/04/11	FA	148308	30/06/11	07/05/11	2011	2	PAGA	0.00	0.00	37,910.02	.00	37,910.02	75,820.04	37,910.02	.00	75,820.04
15/07/11	FA	152071	30/09/11	07/10/11	2011	3	PAGA	0.00	0.00	.00	.00	37,910.02	37,910.02	37,910.02	.00	37,910.02
04/11/11	FA	156899	31/12/11	28/12/11	2011	4	PAGA	5,415.72	0.00	.00	.00	37,910.02	51,448.31	51,448.31	.00	51,448.31
29/01/12	FA	159674	31/03/12	02/01/13	2012	1	Pagx	0.00	0.00	.00	.00	46,033.59	46,033.59	46,033.59	.00	46,033.59
19/04/12	FA	163228	30/06/12	02/01/13	2012	2	PAGA	0.00	0.00	46,033.59	.00	46,033.59	92,067.18	46,033.59	.00	92,067.18
22/10/15	FA	221972	31/12/15	06/09/16	2015	4	Pagx	0.00	0.00	.00	.00	78,708.42	78,708.42	78,708.42	.00	78,708.42
29/01/16	FA	226699	31/03/16	06/09/16	2016	1	Pagx	0.00	0.00	78,708.42	.00	78,708.42	157,416.84	78,708.42	.00	157,416.84
02/05/16	FA	231318	30/06/16	06/09/16	2016	2	Pagx	0.00	0.00	157,416.84	39,354.27	78,708.42	275,479.47	118,082.93	.00	275,479.47

LEYENDA: B - Pago X Internet Banking g - Generada automáticamente G - Generada manualmente M - Modificada manualmente
 26/04/2017 MINAE DIRECCION DE AGUA Página 2 de 3

Fuente: DA, 2017