

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a **Dios y a mis padres** por darme la vida y con ella, la oportunidad de estar donde estoy.

Al **Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias**, al **Centro de Investigación Regional Noroeste** y al **Campo Experimental Región de Caborca**, por el apoyo económico y las facilidades que siempre me han dado, así como a todo el personal investigador, técnico y administrativo, por las palabras de apoyo y estímulo que siempre han tenido conmigo.

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)**, por todos los recursos con que ha apoyado mi preparación.

Al **Instituto Tecnológico de Sonora (ITSON)**, y a todo su personal, por las facilidades y atenciones que durante estos años me brindaron, vaya para ustedes todo mi agradecimiento.

A todos **mis maestros**, por los valiosos conocimientos y consejos que de ellos me llevo y con quienes algún día espero tener una agradable y fructífera relación profesional.

A mi asesor, **Dr. Jaime Garatuza Payán** por la paciencia mostrada hacia mi persona y por los acertados consejos en la realización de esta investigación así como en el análisis e interpretación de los resultados de la misma.

A mis revisores:

**Dr. Christopher J. Watts**, quien además de formar parte del proyecto en el que trabajé, hizo adecuadas sugerencias para mejorarlo.

**MI. Luis Carlos Valdéz**, por hacerme sentir un amigo y un profesionalista, antes que un alumno y por todas las experiencias aprendidas en cada ocasión que fuimos juntos a capturar datos de la investigación o a alguna inspección en algún cultivo en el valle.

A mis compañeros de grupo:

**Hilda, Sagrario, Maritza, Patricia, Maribel, Ricardo, Juan Carlos, Hector, José Manuel y Ramón**, con quienes pase momentos alegres, tristes, preocupados, etc., pero con quienes a fin de cuentas creo que hicimos un bonito equipo multidisciplinario.

Al **Ing. Fernando Gándara A** por permitirme hacer la investigación en su campo y a la vez aprender algo de lo que ellos hacen.

Al **M.C. Jose de Jesus Martinez Santana (Chuyito) y a Leonila Amparano Campa (Leo)** por brindarme su casa y amistad y hacerme sentir como en familia.

## DEDICATORIA

A mi familia: **Ligia**, mi compañera y amor de toda la vida y a mis hijos **Alvaro Fabián, Ligia Paulina y Aaron Jesús**, por ser todos ellos mi motivo de ser y por aguantar todos los momentos de separación que hemos tenido desde que inicie la maestría.

A **mis padres**: Quienes siempre han hecho todo lo posible por darnos a todos sus hijos, la mejor herencia: La preparación

A mis Hermanos: **Jorge, Martha, Loly, Kity, Enrique, Angel, Maty, Blanca y Leo**, sepan que se logra lo que se quiere si se desea de verdad y se le pone el suficiente tiempo y dedicación, suerte en todo lo que emprendan y cuentan conmigo.

## RESUMEN

En el Valle del Yaqui, Sonora, como en el resto del noroeste del país, es prioritario efectuar una planeación, distribución y aplicación del agua de riego lo mas exacta y eficiente posible, ya que la principal limitante para la producción agrícola en esta región, es el vital liquido, el agua.

Las hortalizas en esta región agrícola son una actividad relevante, debido a que se cultivan en promedio 9500 has anuales, con un valor promedio superior a los 58 millones de pesos. Por otra parte, la poca disponibilidad de agua en todo el noroeste de México, ha propiciado la implementación de programas gubernamentales con la finalidad de hacer un uso mas eficiente del recurso, siendo entre otros: la instalación de riegos presurizados especialmente en frutales y hortalizas, los cuales requieren de programación de riego en periodos cortos de tiempo, generalmente diarios. Pero hoy en día el agua de riego se aplica en la mayoría de los casos de manera empírica tanto en cantidad como en tiempo, aún en las hortalizas con riegos presurizados, por lo que se requiere la identificación de métodos confiables y de fácil implementación para el cálculo de los requerimientos de riego diario. Por ello, el objetivo de esta investigación fue: Determinar uno o varios modelos confiables y de fácil implementación para el cálculo de la evapotranspiración diaria en el cultivo de chile bell, a nivel parcelario en el Valle del Yaqui, Sonora.

Se midió la evapotranspiración real del cultivo de Chile Bell, con la metodología de la Relación de Bowen y con la Ecuación de Balance de Energía, y se compararon los valores diarios obtenidos con datos climatológicos instantáneos (cada 20 minutos), con los valores diarios obtenidos con los datos climatológicos promedio del día. Asimismo se comparo con la evapotranspiración de referencia y la evapotranspiración real estimada con ambos tipo de datos, con los modelos que en el ámbito local, nacional e internacional han sobresalido por ser los mas apropiado para estas condiciones, siendo estos: El modelo de Penman, el modelo

de Penman-Monteith, el modelo de Shuttleworth, el modelo de Priestley-Taylor (original), el modelo Priestley-Taylor (yaqui) de dos parámetros propuesto para el valle del Yaqui y el modelo de Makkink. Además, se determinaron y validaron los coeficientes de desarrollo obtenidos con los datos promedio diario.

De los resultados obtenidos, cabe destacar la atención especial que se requiere para trabajar con técnicas micrometeorológicas como la Relación de Bowen, ya que se debe mantenerse una inspección y supervisión continua para el buen funcionamiento de los sensores y componentes de esta metodología. Asimismo la aplicación de la Ecuación de Balance resultó adecuada para medir la evapotranspiración del cultivo, especialmente con datos instantáneos, ya que con datos promedios diarios se pueden tener diferencias o errores de hasta 12 % diario.

La evapotranspiración de referencia estimada con cada modelo, presenta buena correlación ( $>0.93$ ), con la observada con la Ecuación de Balance tanto con datos instantáneos como con datos promedio diario, sobresaliendo por su estabilidad, los modelos de Priestley-Taylor (original), Priestley-Taylor (yaqui) y Makkink.

Los coeficientes de cultivo obtenidos para el cultivo de Chile Bell, tienen un comportamiento similar a lo que se reporta para chiles sembrados en zonas desérticas con inviernos no muy fríos y bajo condiciones de cultivo extensivo. La validación de dichos coeficientes, indica que la evapotranspiración real estimada con todos los modelos tienen una aproximación con un margen de error menor a 0.4 mm por día, siendo los modelos que arrojan resultados mas estables: Priestley-Taylor (yaqui), Priestley-Taylor (original) y Makkink.

Todos los resultados dejan ver la factibilidad del uso de modelos simples para el cálculo de la evapotranspiración diaria del cultivo de chile bell u otros cultivos, en especial el modelo de Makkink, el cual solo requiere de la medición diaria de la temperatura y de la radiación solar, la cual a la ves puede ser obtenida y/o

estimada fácilmente de varias maneras para su aplicación a nivel parcelario o regional y probablemente en otras zonas agrícolas del país, con características similares de alta luminosidad.

## ÍNDICE

	Pagina
<b>I. INTRODUCCION.....</b>	<b>1</b>
<b>I.1. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN.....</b>	<b>3</b>
<b>I.2. DEFINICION DEL PROBLEMA.....</b>	<b>5</b>
<b>I.3. OBJETIVO.....</b>	<b>5</b>
<b>II. REVISION DE LITERATURA.....</b>	<b>6</b>
<b>II.1. EL CULTIVO DE CHILE.....</b>	<b>6</b>
<b>II.1.1. Clasificación botánica.....</b>	<b>6</b>
<b>II.1.2. Origen.....</b>	<b>7</b>
<b>II.1.3. Descripción botánica.....</b>	<b>7</b>
<b>II.1.3.1. La raíz.....</b>	<b>7</b>
<b>II.1.3.2. El tallo.....</b>	<b>7</b>
<b>II.1.3.3. La hoja.....</b>	<b>8</b>
<b>II.1.3.4. La flor.....</b>	<b>8</b>
<b>II.1.3.5. El fruto.....</b>	<b>8</b>
<b>II.1.3.6. La semilla.....</b>	<b>8</b>
<b>II.1.4. Composición química y valor nutritivo.....</b>	<b>9</b>
<b>II.1.5. Usos.....</b>	<b>9</b>
<b>II.1.6. Importancia económica.....</b>	<b>10</b>
<b>II.1.7. Requerimientos del cultivo.....</b>	<b>11</b>
<b>II.1.7.1. Climáticos.....</b>	<b>11</b>
<b>II.1.7.2. Suelo.....</b>	<b>12</b>
<b>II.1.7.3. Agua.....</b>	<b>12</b>
<b>II.1.7.3.1. Cantidad.....</b>	<b>12</b>

II.1.7.3.2. Calidad.....	12
II.1.7.4. Nutricionales.....	13
<b>II.2. EVAPOTRANSPIRACIÓN (CONCEPTOS Y</b>	
<b>DEFINICIONES.....</b>	<b>14</b>
II.2.1. EVAPORACIÓN.....	14
II.2.2. TRANSPIRACIÓN.....	14
II.2.3. USO CONSUNTIVO.....	15
II.2.4. EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL.....	15
II.2.5. EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO	
DE REFERENCIA.....	15
II.2.6. EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL.....	16
<b>II.3. FACTORES QUE AFECTAN LA</b>	
<b>EVAPOTRANSPIRACIÓN.....</b>	<b>16</b>
II.3.1. CLIMÁTICOS.....	16
II.3.1.1. Temperatura.....	16
II.3.1.2. Humedad relativa.....	16
II.3.1.3. Vientos.....	17
II.3.1.4. Luminosidad.....	17
II.3.1.5. Radiación.....	17
II.3.1.6. Precipitación.....	17
II.3.2. DEL CULTIVO.....	18
II.3.3. DE DISPONIBILIDAD Y CALIDAD DEL	
AGUA.....	18

<b>II.4. METODOS PARA DETERMINAR</b>	
<b>EVAPOTRANSPIRACIÓN.....</b>	<b>19</b>
<b>II.4.1. MÉTODOS DIRECTOS.....</b>	<b>19</b>
<b>II.4.1.1. Método gravimétrico.....</b>	<b>19</b>
<b>II.4.1.2. Lisímetros.....</b>	<b>20</b>
<b>II.4.1.3. Atmómetros.....</b>	<b>20</b>
<b>II.4.1.4. Técnicas fisiológicas.....</b>	<b>20</b>
<b>II.4.1.5. Técnicas micrometeorológicas.....</b>	<b>21</b>
<b>II.4.1.5.1. Método del balance de energía.....</b>	<b>22</b>
<b>II.4.1.5.2. Método de la Relación de Bowen.....</b>	<b>25</b>
<b>II.4.2. MÉTODOS INDIRECTOS.....</b>	<b>26</b>
<b>II.4.2.1. Método de Thornthwaith.....</b>	<b>27</b>
<b>II.4.2.2. Método de Blaney y Criddle.....</b>	<b>27</b>
<b>II.4.2.3. Método de la curva única de Hansen.....</b>	<b>28</b>
<b>II.4.2.4. Método de Christiansen-Grassi.....</b>	<b>28</b>
<b>II.4.2.5. Método del tanque evaporímetro.....</b>	<b>28</b>
<b>II.4.2.6. Método de Penman.....</b>	<b>29</b>
<b>II.4.2.7. Método de Penman-Monteith.....</b>	<b>31</b>
<b>II.4.2.8. Método de Shuttleworth.....</b>	<b>33</b>
<b>II.4.2.9. Método de Priestley-Taylor.....</b>	<b>33</b>
<b>II.4.2.10. Método de Priestley-Taylor-yaqui.....</b>	<b>34</b>
<b>II.4.2.11. Método de Makkink.....</b>	<b>34</b>
<b>III. MATERIALES Y METODOS.....</b>	<b>36</b>
<b>III.1. Ubicación.....</b>	<b>36</b>
<b>III.2. Clima.....</b>	<b>36</b>
<b>III.3. Suelo.....</b>	<b>37</b>

III.4. Instalación del equipo de medición y colecta de datos.....	37
III.5. Tamaño del área de influencia (fetch).....	39
III.6. Establecimiento del cultivo.....	39
III.7. Proceso de la información.....	40
III.8. Medición de la evapotranspiración real del Cultivo.....	40
III.9. Evapotranspiración medida y de referencia Con datos instantáneos y con datos promedio diario.....	40
III.10. Estimación de la evapotranspiración de referencia con modelos sobresalientes.....	41
III.11. Ajustes necesarios a los modelos para estimar $E_t$ .....	41
III.12. Determinación de los coeficientes de cultivo ( $k_c$ ).....	42
III.13. Validación de los coeficientes de cultivo.....	43
<b>IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>44</b>
IV.1. Medición de variables climatológicas y evapotranspiración real del cultivo.....	44
IV.2. Factor de proporcionalidad de la Información.....	46
IV.3. Correlación de la $E_t$ medida, con los componentes de la ecuación de balance y con variables climatológicas.....	48

<b>IV.4. Comparación entre la Etr diaria con datos instantáneos y la Etr diaria con datos promedio.....</b>	<b>48</b>
<b>IV.5. Comparación entre la Et diaria estimada con los modelos con datos instantáneos y la estimada con los modelos con datos promedio.....</b>	<b>53</b>
<b>IV.6. Comparación entre la Etr (Ecuación de Balance) y la Et (modelos).....</b>	<b>60</b>
<b>IV.7. Determinación de los coeficientes de cultivo kc en chile bell.....</b>	<b>72</b>
<b>IV.8. Validación de los coeficientes de cultivo kc en chile bell.....</b>	<b>76</b>
<b>V. CONCLUSIONES.....</b>	<b>81</b>
<b>VI. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>83</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>84</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>89</b>

## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla</b>	<b>Descripción</b>	<b>Pagina</b>
<b>1</b>	<b>Representatividad del área que tienen los datos medidos, a dos alturas de sensor para un fetch de 250 metros.....</b>	<b>48</b>
<b>2</b>	<b>Evapotranspiración diaria en chile bell, medida y estimada con datos climatológicos instantáneos, en el Valle del Yaqui, Sonora.....</b>	<b>52</b>
<b>3</b>	<b>Evapotranspiración diaria en chile bell, medida y estimada con datos climatológicos promedio diario, en el Valle del Yaqui, Sonora.....</b>	<b>52</b>
<b>4</b>	<b>Diferencia promedio diario entre la evapotranspiración obtenida con datos instantáneos y con datos promedios diarios en chile bell en el Valle del Yaqui, Sonora.....</b>	<b>53</b>
<b>5</b>	<b>Error cuadrático medio (RMSE) entre el valor de Etr (medido) y el valor de Et (estimado).....</b>	<b>72</b>
<b>6</b>	<b>Coeficiente de cultivo (kc) decenal para chile bell con varios modelos de evapotranspiración en el Valle del Yaqui, Sonora.....</b>	<b>73</b>
<b>7</b>	<b>Coeficientes de cultivo para chile, reportados en la literatura, con relación al período en que se efectuó la presente investigación.....</b>	<b>78</b>
<b>8</b>	<b>Evapotranspiración real diaria por cada decena del mes observada en chile bell con datos climatológicos instantáneos y evapotranspiración real estimada con varios modelos, con datos climatológicos promedio, en el Valle del Yaqui, Sonora.....</b>	<b>79</b>
<b>9</b>	<b>Diferencia entre la Etr observada en chile bell con datos climatológicos instantáneos y Etr estimada por varios modelos, con datos climatológicos promedios, en el Valle del Yaqui, Sonora.....</b>	<b>80</b>

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura</b>	<b>Descripción</b>	<b>Pagina</b>
1	Evapotranspiración en chile bell, medida mediante la Relación de Bowen en el Valle del Yaqui, Sonora.....	45
2	Representatividad de los datos medidos a dos alturas de sensor y para un fetch de 250 m.....	47
3	Evapotranspiración en chile bell, medida con la ecuación de balance y sus componentes en el Valle del Yaqui, Sonora.....	49
4	Evapotranspiración medida con la ecuación de balance y Radiación solar en el Valle del Yaqui, Sonora.....	50
5	Evapotranspiración diaria medida con la ecuación de balance con datos climatológicos instantáneos y promedios diarios.....	51
6	Evaporación estimada con Priestley-Taylor (original), con datos climatológicos instantáneos y promedios diarios.....	54
7	Evaporación estimada con Priestley-Taylor (yaqui), con datos climatológicos instantáneos y promedios diarios.....	55
8	Evaporación estimada en chile bell con Makkink, con datos climatológicos instantáneos y promedios diarios.....	56
9	Evaporación estimada con Shuttleworth, con datos climatológicos instantáneos y promedios diarios.....	57
10	Evaporación estimada con Penman-Monteith, con datos climatológicos instantáneos y promedios diarios.....	58
11	Evaporación estimada con Penman, con datos climatológicos instantáneos y promedios diarios.....	59
12	Comportamiento diario de la temperatura media y la Temperatura máxima de enero a abril de 1998.....	61
13	Comportamiento decenal de la temperatura media y la temperatura máxima de enero a abril de 1998.....	62
14	Comportamiento diario de la presión de vapor a saturación, obtenida con datos instantáneos y promedios diarios.....	63

15	Comportamiento diario del gradiente de presión de vapor, obtenido con datos instantáneos y promedios diarios.....	64
16	Comportamiento diario de la diferencia de presión de vapor, obtenido con datos instantáneos y promedios diarios.....	65
17	Comparación entre la Etr observada y la Et estimada con Priestley-Taylor (original) en el Valle del Yaqui, Sonora.....	66
18	Comparación entre la Etr observada y la Et estimada con Priestley-Taylor (yaqui) en el Valle del Yaqui, Sonora.....	67
19	Comparación entre la Etr observada y la Et estimada con Penman en el Valle del Yaqui, Sonora.....	68
20	Comparación entre la Etr observada y la Et estimada con Penman-Monteith en el Valle del Yaqui, Sonora.....	69
21	Comparación entre la Etr observada y la Et estimada con Shuttleworth en el Valle del Yaqui, Sonora.....	70
22	Comparación entre la Etr observada y la Et estimada con Makkink en el Valle del Yaqui, Sonora.....	71
23	Coeficiente de cultivo decenal (kc) en chile bell en el Valle del Yaqui, Sonora.....	74
24	Coeficiente de cultivo para chile adaptados de la literatura al tiempo en que se efectuó la investigación.....	75
25	kc para chile (cultivo extensivo) y el obtenido con varios modelos en el valle del Yaqui, Sonora.....	77

## INDICE DE ANEXOS

<b>ANEXO</b>	<b>Descripción</b>	<b>Pagina</b>
<b>A</b>	<b>Requerimiento de agua reportado para algunos cultivos.....</b>	<b>85</b>
<b>B</b>	<b>Composición química y valor nutritivo de los chiles dulces y picantes por 100 g de producto comestible.....</b>	<b>86</b>
<b>C</b>	<b>Necesidades de agua reportadas para el cultivo de chile.....</b>	<b>87</b>
<b>D</b>	<b>Requerimientos de los principales nutrientes para el cultivo de chile.....</b>	<b>88</b>

## I. INTRODUCCION

México cuenta con una superficie aproximada de 200 millones de hectáreas, las cuales de acuerdo al balance hídrico pueden ser divididas en dos grandes zonas: zona árida y semiárida, que comprende aproximadamente el 70 % del territorio y la zona húmeda y semihúmeda, comprende el 30 % restante.

De la superficie total, 320,000 km<sup>2</sup> comprenden áreas laborables. De los cuales 180,000 km<sup>2</sup> han sido abiertos al cultivo, siendo cosechados solo 160,000 km<sup>2</sup>, de estas, 107,000 km<sup>2</sup> comprende la superficie de temporal (50,000 km<sup>2</sup> de buen temporal y 57,000 km<sup>2</sup> de temporal regular o malo) y los 53,000 km<sup>2</sup> restantes son de riego.

De lo anterior, se puede apreciar que uno de los factores limitantes en la producción agrícola de nuestro país es el agua. Aunado a ello, un aumento desmesurado de la población en los últimos años, ha creado la necesidad de incrementar la producción agrícola, siendo necesario alcanzar una mayor eficiencia en el uso y manejo del agua para una producción eficiente y con altos rendimientos en el sector agrícola.

La precipitación, constituye la principal fuente de disponibilidad de agua, pero en aquellos lugares en donde esta es insuficiente para satisfacer la demanda hídrica del cultivo, el riego representa una medida suplementaria, siendo importante para el agricultor conocer la mínima cantidad de agua necesaria para obtener la mayor producción.

Una de las formas de lograr lo anterior, consiste en determinar el requerimiento de agua de los cultivos.

A pesar de las numerosas investigaciones realizadas en lo referente al consumo de agua o evapotranspiración de los cultivos, a la fecha no existe una metodología

que fundamente el uso de una fórmula que pueda ser empleada a nivel general en el cálculo de dicha evapotranspiración.

En la actualidad existe una gran cantidad de métodos indirectos que permiten estimar la evapotranspiración a partir de diversas variables meteorológicas. Dichos métodos involucran el empleo de ecuaciones empíricas las cuales presentan ciertas deficiencias, puesto que la mayoría de ellas no toman en consideración los factores suelo y planta, pero presentan gran facilidad en su manejo y de aquí su frecuente empleo en la agricultura.

De los métodos existentes, la literatura presenta la fórmula de Penman como la más fundamentada por involucrar tanto el término del balance de energía como el término aerodinámico, siendo su principal desventaja la falta de registros del elemento viento que interviene en la ecuación. Por lo anterior en nuestro país es utilizado más comúnmente el método de Blaney-Criddle.

La importancia de conocer la evapotranspiración radica en una adecuada planeación, diseño y operación de los sistemas de distribución y aplicación del agua de riego.

Para lograr lo anterior es importante determinar o medir la evapotranspiración real de un cultivo lo que permitirá establecer una relación con las ecuaciones empíricas que pueden ser empleadas en la estimación de dicha evapotranspiración.

La producción mundial de alimentos está limitada principalmente por la disponibilidad de agua en las diferentes zonas agrícolas. En el noroeste de México, el agua de lluvia es tan escasa y mal distribuida en el tiempo que la agricultura es casi exclusivamente de riego, por lo cual ha sido necesaria la construcción de obras hidroagrícolas de gran magnitud para captar y almacenar las escorrentías provocadas por las precipitaciones (caso Sur de Sonora) y en otras regiones (Hermosillo y Caborca), donde esto no es posible, los agricultores

han tenido que realizar fuertes inversiones en la construcción, equipamiento y operación de pozos profundos para extraer agua de los acuíferos y disponer así de agua de riego en el momento oportuno para los cultivos, por lo que además de escasa, es muy costosa.

Por otra parte, el constante incremento de la población y la necesidad de más y mejores alimentos para su sostenimiento así como de otros satisfactores y la creación de nuevos centros de población, son factores que han generado una mayor demanda de agua y causado una contaminación cada vez mayor de ésta, lo cual limita aun más su disponibilidad para la agricultura. De todo lo antes expuesto, se aprecia que es una prioridad el producir una mayor cantidad de alimentos, utilizando la menor cantidad de agua posible. Por ello, cualquier actividad encaminada al logro de estas prioridades está plenamente justificada, por lo tanto, la búsqueda de practicas o tecnologías para hacer un uso mas eficiente del agua, es una tarea cotidiana de la Comunidad Científica, Dependencias Gubernamentales y Organismos de Agricultores involucrados en la planeación y administración de este recurso. Así, se habla de campañas para concientizar la necesidad de un buen uso del agua, de sistemas de riego mas eficientes, de tecnologías como el uso de antitranspirantes, o el establecimiento de cultivos mas redituables por metro cubico de agua, o de plantas de bajo requerimiento de agua, entre otras.

## **I.1. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACION**

En el Valle del Yaqui, Sonora, la agricultura se realiza mediante el aprovechamiento de un Sistema Presa-Acuífero, con una extracción promedio anual de 2800 hm<sup>3</sup>, de los cuales, aproximadamente 350 hm<sup>3</sup> son de aguas subterráneas, estableciéndose un promedio de 272,825 ha/año lo cual arroja una lámina de riego promedio por hectárea de 1.02 m. esto, en principio refleja la poca eficiencia con que se utiliza el agua de riego, puesto que diversos autores reportan

requerimientos de agua mucho menores para los cultivos representativos del Valle del Yaqui (ANEXO A).

Es obvio que una buena parte de esta baja eficiencia es debida a pérdidas por conducción en la red de canales, pero el resto es provocado por el mal manejo y aplicación del agua en la parcela, pues como asegura Palacios en 1992, aunque se dispone de suficiente tecnología agrícola, la mayor parte de los agricultores no la utiliza bien. En el caso Valle del Yaqui, ésto queda de manifiesto con la lámina antes mencionada y con los grandes volúmenes de agua (alrededor de 500 hm<sup>3</sup>) que anualmente se vierten al ecosistema marino, a través del sistema de drenaje parcelario del Valle del Yaqui (Cámara, 1991).

Respecto a lo anterior, la explicación pudiera estar, en la afirmación que hace De la Peña 1987, de que el agua de riego se aplica en forma empírica, basándose únicamente en la práctica que el propio agricultor ha adquirido a través de los años, pues aunque existen métodos muy precisos para medir (directos) la evapotranspiración (cuánto y cuándo regar), éstos suelen ser o muy laboriosos como el gravimétrico, o muy costosos como los de lisímetro o bien los de técnicas micrometeorológicas que requieren gran cantidad de datos climatológicos, que no están disponibles fácilmente, por ello, quienes llegan a hacer uso de algún método para determinar el momento y la cantidad de agua a aplicar, recurren generalmente a los métodos empíricos (indirectos) para tal efecto, con el consecuente error, ya que éstos son demasiado teóricos pues han sido deducidos bajo condiciones específicas de alguna región, por lo que se requiere de ajustar los parámetros a las condiciones locales de donde se han de emplear, y ésto normalmente no se realiza, ya que se requiere hacer uso de los métodos directos.

Si bien es cierto que el método que mejores resultados ha arrojado para estimar la evapotranspiración bajo las condiciones del Valle del Yaqui, es el de Blannay y Criddle (De la Peña, 1987; Felix, 1996), su aplicación es más adecuada para

planes y programas a nivel distrito, puesto que los datos obtenidos son a intervalos mensuales, sin embargo a nivel parcelario especialmente en el caso de cultivo de hortalizas y mas concretamente en las que se riegan con métodos de riego presurizado, se requiere de programaciones en períodos cortos de tiempo (diario, semanal), para una mejor precisión de la cantidad de agua y el momento oportuno de aplicar el riego.

## **I.2. DEFINICION DEL PROBLEMA**

En el Valle del Yaqui, Sonora, el cultivo de hortalizas, es una actividad relevante, debido a que se cultivan en promedio 9500 has anuales, con un valor promedio superior a los 58 millones de pesos. Por otra parte, la poca disponibilidad de agua en todo el noroeste de México, ha propiciado la implementación de programas gubernamentales con la finalidad de hacer un uso mas eficiente del recurso, siendo entre otros: la instalación de riegos presurizados en los cultivos, especialmente frutales y hortalizas, los cuales requieren de programación de riego en periodos cortos de tiempo, generalmente diarios. Pero hoy en día el agua de riego se aplica en la mayoría de los casos de manera empírica tanto en cantidad como en tiempo, aún en las hortalizas con riegos presurizados, por lo que se requiere de la identificación de métodos confiables y de fácil implementación para el cálculo de los requerimientos de riego diario.

## **I.3. OBJETIVO**

Determinar uno o varios modelos confiables y de fácil implementación para el cálculo de la evapotranspiración diaria en el cultivo de chile bell a nivel parcelario en el Valle del Yaqui, Sonora.

## II. REVISION DE LITERATURA

### II.1. EL CULTIVO DE CHILE

#### II.1.1. Clasificación botánica

Desde el punto de vista Botánico, el Chile, se clasifica de la siguiente manera:

División: *Spermatophyta*  
Línea XIV: *Angiospermae*  
Clase A: *Dicotyledones*  
Rama 2: *Malvales-tubiflorae*  
Orden XXI: *Solanales(Personatae)*  
Familia: *Solanaceae*  
Subfamilia: *Solanoideae*  
Tribu: *Solaneae*  
Género: *Capsicum*  
Especie: *annuum*

La Tribu solaneae contiene alrededor de 1250 especies encuadradas en 18 generos: entre ellos, aparte de *Capsicum* hay otros generos en los que se incluyen especies cultivadas muy importantes como *Solanum*, *Licopersicon*, *Cyphomandra*, *Physalis*, etc. (Hunziker, 1979, citado por Nuñez et al., 1996).

La especie *Capsicum annum* es la mas cultivada en Estados Unidos, aunque también se cultivas los del tipo Tabasco (*C. frutesens* ), los Habanero y Rocotillo (*C. chinense* ), y Peron y Manzano (*C. pubesens* ), (Bosland et al., 1996).

## **II.1.2. Origen**

Varios autores coinciden en señalar que el género *Capsicum* es originario de América del Sur desde el borde más meridional de EE.UU. a la zona templada cálida del sur de Sud América (Heiser, 1976 citado por Nuñez et al., 1996; Laborde y Pozo, 1982; OCEANO, 1999).

## **II.1.3. Descripción botánica**

**II.1.3.1. La raíz.** En esta planta, el sistema radical consta de una raíz pivotante de la que se ramifican un conjunto de raíces laterales, adoptando al principio una forma de punta de flecha triangular, con el ápice en el extremo de crecimiento, para formar posteriormente una densa borla de raíces que profundiza de 30 a 60 cm, mientras que horizontalmente se extiende hasta unos 30 a 50 cm de su eje, con una mayor densidad en la parte superficial (Somos, 1984 citado por Nuñez et al., 1996).

**II.1.3.2. El tallo.** Es de estructura herbácea, subleñoso, generalmente lampiño, su aspecto es erguido y de crecimiento limitado, con altura y forma de desarrollo muy variable en función del cultivar y condiciones de cultivo (Nuñez et al., 1996). El tallo principal se desarrolla a partir de la plúmula del embrión y consta de un eje que presenta en el extremo superior un meristemo apical, a partir del cual se produce el desarrollo de toda la estructura aérea (Esau, 1972 citado por Nuñez et al., 1996). En general, el sistema de ramificación de *Capsicum* se desarrolla como sigue: cuando la plántula alcanza de 15 a 20 cm, aparece la primera flor o vástago floral en el brote principal, entonces emergen nuevos brotes vegetativos de las axilas de las hojas de la cima y uno o más continuarán creciendo acorde a la dominancia apical, después que el crecimiento desarrollado por el brote ha producido un número específico de órganos florales, inicia nuevamente la fase de crecimiento vegetativo, repitiéndose este ciclo a lo largo del periodo de crecimiento (Child, 1979 citado por Nuñez et al., 1996)

**II.1.3.3. La hoja.** Los chiles tienen hojas simples, de forma lanceolada o aovada, formadas por el peciolo, que generalmente es largo y une la hoja con el tallo y por la lámina foliar o limbo, el cual es de borde entero o apenas sinuado en la base (Fahn, 1985; Mauseth, 1988 citados por Nuñez et al., 1996).

**II.1.3.4. La flor.** Es hermafrodita, es decir, la misma flor produce gametos masculinos y femeninos. Generalmente en las formas domesticadas de *C. annum*, *C. frutescens* (tabasco), *C. baseatum* y *C. pubescens* (manzano) las flores aparecen solitarias en cada nudo, aunque en *C. annum* hay poblaciones que producen sus flores en pares o en racimos mas numerosos. En *C. Chinense* (habanero) siempre se presentan dos o mas flores en cada nudo. Las flores están unidas al tallo por el pedúnculo o pedicelo de 10 a 20 mm de longitud, con 5 a 8 costillas, cada flor está constituida por el eje o receptáculo, el caliz, constituido por 5-8 sepalos, la corola, formada por 5-8 petalos, el androceo, con 5-8 estambres y el gineceo, formado por 2-4 carpelos (Nuñez et al., 1996).

**II.1.3.5. El fruto.** Botánicamente el fruto de los chiles es una Baya (Bosland et al., 1996; Nuñez et al 1996), ésta es hueca, llena de aire y en forma de capsula, y debido a esta peculiaridad se debe el nombre científico del Genero *Capsicum* (del griego *kapsakes*, capsulas). La baya está constituida por un pericarpio grueso y jugoso y un tejido placentario al que se unen las semillas. La forma de los chiles pueden ser alargadas, oblongas, redondas, cónicas, acampanadas y rectangulares, mientras que los colores van desde colores palidos (blanco-amarillento, verde claro-amarillento) hasta colores oscuros (verde oscuro-amarillento, verde, verde-azulado, verde-marron) en los frutos inmaduros, mientras que en estado completamente maduro se distinguen dos grupos principalmente (amarillos y rojos) (Nuñez et al., 1996).

**II.1.3.6. La semilla.** Tiene forma aplastada hemidiscoidal (subreniforme), con superficie relativamente lisa, sin aspecto pubescente. Todas las especies de

*Capsicum* tienen las semillas de color amarillento, a excepción de *C. pubescens* que son muy oscuras. El peso y tamaño de la semilla están relacionadas con el tamaño del fruto, así, las variedades del tipo Bell, tienen semillas más grandes que las del tipo Paprinka, y éstas a su vez, mayores que los chiles picantes de fruto pequeño. En general, un gramo de semillas contiene entre 150 y 200 semillas y de forma equivalente, el peso de 1000 semillas oscila entre 5 y 7 gramos (Nuñez et al., 1996).

#### **II.1.4. Composición química y valor nutritivo**

El contenido nutricional del pimiento es alto en comparación con otras hortalizas de amplio consumo como el tomate y básicamente existen diferencias algo marcadas en la composición química y valor nutritivo de los chiles entre los chiles dulces y los picantes (ANEXO B).

#### **II.1.5. Usos**

En una u otra forma, el chile forma parte de la cocina de la mayoría de los países del mundo, teniendo un uso culinario tanto como condimento, como especia, colorante u hortaliza.

Los tipos picantes se usan en fresco (verdes o maduros), encurtidos, secos (enteros o en polvo) o como salsa ya industrializada. Los tipos dulces, no picantes, son más apreciados en las zonas templadas que en los trópicos y son preferentemente utilizados en verde, como una hortaliza, pero también se consumen maduros, frescos, encurtidos, asados y cocinados de múltiples formas, secos, en polvo o en conserva.

### **II.1.6. Importancia económica**

Nuñez et al., 1996, indican que el cultivo del chile o pimiento se ha hecho universal, ya que está presente en la totalidad de las zonas templadas y cálidas del mundo, ocupando dentro de los cultivos hortícolas, el quinto lugar en superficie cultivada (1,131,000 has), y el octavo lugar en producción (9,324,000 ton), después de Tomate, Cebolla, Sandía y Coles, ésto debido a que el pimiento es un cultivo con un contenido de materia seca relativamente alta, comparativamente con las otras hortalizas, cuyo contenido de agua es mayor.

El continente con la mayor extensión de terreno dedicada a este cultivo es Asia (644,000 has), seguido por Africa (311,000 has) y Europa(153,000 has), después Norte y Centro América (99,000 has) y por ultimo Sud América (25,000 has). En América, los principales productores de chiles son México y EE.UU. con 64,000 y 22,000 has y 589,000 y 253,000 ton respectivamente.

En México, se observa una reducción en la superficie cultivada con respecto a los años 80's, sin embargo, los rendimientos han aumentado de 8.7 ton/ha a 10.7 ton/ha, lo cual, Nuñez et al., 1996, atribuyen al incremento de pimientos dulces, en los cuales se incluye entre otros el Morrón o Chile Bell. Por su parte, Laborde y Rendon, 1989 y Pozo et al., 1991, citados por Nuñez et al., 1996, indican que el chile Bell, se produce en México exclusivamente para exportación y su consumo es crudo en ensaladas, teniendo un consumo local limitado.

En el Valle del Yaqui se han cultivado en promedio de 1991 a 1999, 9525 has de hortalizas anualmente, de las cuales el 27 % corresponde a chiles, el ciclo con mayor área de siembra de hortalizas fue 1998-99, con 15000 has (Valenzuela y Guerrero, 2000). El Rendimiento promedio del chile en esta región de 1992 a 97 se reporta en 14.59 ton/ha, lo que ha generado un valor de producción promedio de 58.18 millones de peso anuales (SAGAR, 1998). Por su parte, tanto Valenzuela y Guerrero, 2000 como Ortiz E., 2000, reportan que existen tecnologías

disponibles para producir al menos 50 ton/ha tanto en chile jalapeño como en chile Bell.

### **II.1.7. Requerimientos del cultivo**

**II.1.7.1. Climáticos.** El Chile es un cultivo de clima cálido, que requiere un periodo largo de días libres de helada (Bosland et al., 1994; DeWitt y Bosland, 1996; Matta y Cotter, 1994). Para una buena germinación de la semilla de chile se requieren temperaturas de 24-32 °C durante el día y de 12-16 °C durante la noche (INIFAP, 1997), además, se reporta que temperaturas inferiores a 15 °C retrasan o bloquean el desarrollo (Matta y Cotter, 1994 y Thompson y Kelly, 1957, citados por Nuñez et al., 1996). En estudio realizado por Deli y Tiessen, 1969, encontraron que manteniendo temperatura nocturna de 12 °C, se producen mas flores que a 18 °C, no por aumentar el numero de flores por axila, sino debido a una mayor ramificación. Así mismo, Matta y Cotter, 1994 y Dickerson, 1994, indican que los mas altos rendimientos se obtienen cuando la temperatura diaria del aire se mantiene entre 18.5 y 32.5 °C durante el pegado del fruto, por su parte, Thompson y Kelly, 1957 citados por Nuñez et al., 1996, indican que la temperatura óptima para este cultivo es de 23-25 °C durante el día y de 18-20 durante la noche y que las temperaturas altas, especialmente asociadas con baja humedad ambiental, provocan la caída de flores y frutos recientemente cuajados. Respecto a la coloración de los chiles, DeWitt y Bosland, 1996, indican que la temperatura tiene un gran efecto tanto en la tasa de crecimiento de la planta y del fruto, como del desarrollo y la calidad del pigmento a la maduración del fruto, sea éste rojo o amarillo, siendo las óptimas de 18-24 °C, arriba de este rango, el color rojo se desarrolla amarillento y debajo del mismo rango, el color se desarrollo muy lento, llegando a cesar debajo de 12.5 °C.

Otro factor climático de interés es el viento, el cual en situaciones extremas cuando el chile está en fase de plántula y su sistema radicular no es lo suficientemente extenso para compensar la perdida de agua debida al incremento

de la transpiración, puede provocar la desecación de la plántula, por lo que en estas circunstancias se hace necesario el establecimiento de una barrera rompevientos (Carter, 1994).

**II.1.7.2. Suelo.** El chile, prefiere los suelos profundos, ricos en materia orgánica, sueltos, bien aireados y permeables, donde no exista la posibilidad de estancamientos, adaptándose bien a suelos con pH de 5.5 a 7.0 (Vilmorin, 1977). Un factor común que se encuentra en la literatura, es que los suelos deben tener buen drenaje y con pH, preferentemente tendiendo a neutro (DeWitt y Bosland, 1996; Dickerson, 1994; Matta y Cotter, 1994; OCEANO, 1999), otro factor en común es que se sugiere la rotación con otros cultivos y el uso de compostas para mejorar las condiciones del suelo y disminuir los daños por enfermedades del suelo (Bosland et al., 1996; DeWitt y Bosland, 1996; Dickerson, 1994).

### **II.1.7.3. Agua.**

**II.1.7.3.1. Cantidad.** Se reportan cantidades muy diversas respecto a las necesidades de agua del cultivo de chile variando desde 0.35 a 1.50 m (ANEXO C), ésto es debido a las condiciones prevalecientes en el lugar donde ha sido generada la información. Nuñez et al., 1996, recomiendan efectuar el cálculo de las necesidades de agua del cultivo, mediante uno de los métodos conocidos, y al respecto, Castilla et al 1984 y Castilla, 1990 citados por Nuñez et al., 1996, citan que para el caso de producción de pimientos en invernaderos, los métodos mas precisos se consideran el tanque evaporímetro tipo A, el de Radiación total y el de Priestley- Taylor.

**II.1.7.3.2. Calidad.** El chile, es moderadamente tolerante a la salinidad, siendo menos tolerante que otras hortalizas como tomate, melón, espinaca, pero mas tolerante que papa y berenjena entre otras (Hansen et al., 1980). La máxima conductividad eléctrica en el extracto de saturación del suelo tolerada por el pimiento es de 8.6 dS/m a 25 °C (Ayers y Westcot, 1987 citados por Nuñez et al.,

1996). Se recomienda que la salinidad del suelo previo a la plantación no debe exceder de  $3 \text{ dS m}^{-1}$  (1920 ppm de sales) y que en caso necesario se efectúe la plantación en los costados del surco alto (Carter, 1994). Nuñez et al., 1996 indican que se empieza a causar reducciones en el rendimiento a partir de  $1.5 \text{ dS/m}$  y que se debe considerar una fracción de lavado al programar los riegos de acuerdo a la siguiente expresión:

$$RL = CE_{ar} / (2 * \text{Max } CE_x)$$

Donde: RL = Requerimiento de Lavado para controlar las sales dentro de la tolerancia del cultivo

$CE_{ar}$  = Conductividad eléctrica del agua de riego

$\text{Max } CE_x$  = Máxima conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo tolerable por el cultivo x

Un aspecto importante a tener en cuenta en la calidad del agua, es la temperatura, ya que si ésta es inferior a  $15^\circ\text{C}$ , provoca un retraso en el desarrollo del chile, lo cual se debe en gran medida el contraste entre la temperatura del agua y la del suelo y aire, en condiciones de alta temperatura diurna (Nuñez et al., 1996), todo ello ocasiona retraso en la cosecha y reducción del rendimiento (Ugarchinski, 1964 citado por Nuñez et al., 1996)

**II.1.7.4. Nutricionales.** Existe mucha información respecto a las necesidades nutricionales del cultivo de Chile, y la mayoría coinciden en indicar que los principales nutrientes que el chile necesita son: Nitrógeno, Fósforo, Potasio, Calcio y Magnesio (Arciniega, 1999; Burgueño et al., 1995; Batal y Smittle, 1981; Nuñez et al., 1996). Asimismo hay divergencia en lo que respecta a las cantidades requeridas de dichos nutrientes y es que dicha cantidad depende por un lado de la zona de producción que se trate y la fertilidad de sus suelos, y por otra parte, de la técnica de producción que se utiliza, pudiendo ser esta: de temporal, de riego a cielo abierto (extensiva) o en invernaderos y con lo cual varía también los rendimientos esperados. En general se reportan que por cada tonelada de fruta

fresca, se requieren de 3.5 a 9.0 kg de Nitrógeno, de 0.6 a 2.5 kg de Fósforo, de 4 a 17 kg de Potasio, de 2.7 a 3.5 kg de calcio y de 0.4 a 4.5 kg de magnesio. Un ejemplo de los requerimientos nutricionales dependiendo de la tecnología de producción utilizada se presenta en el ANEXO D.

## **II.2. EVAPOTRANSPIRACIÓN (CONCEPTOS Y DEFINICIONES).**

### **II.2.1. EVAPORACIÓN**

La mayoría de los reportes definen la evaporación como el proceso mediante el cual el agua en estado líquido se convierte en agua en estado gaseoso o vapor de agua (Jensen et al., 1990; Linsley y Franzinni, 1984; Shuttleworth, 1993). La tasa de evaporación es controlada por la energía disponible en la superficie evaporativa y la facilidad con que el vapor de agua puede difundirse a la atmósfera. Son varios los procesos físicos responsables de la difusión, pero los aspectos físicos de la pérdida de vapor de agua desde una superficie libre de agua, o desde el suelo o un cultivo son esencialmente los mismos. (Shuttleworth, 1993).

### **II.2.2. TRANSPIRACIÓN**

Está considerada como la parte del total de la evaporación que entra a la atmósfera desde el suelo a través de las plantas (Linsley y Franzinni, 1984; Shuttleworth, 1993). Las hojas son los principales órganos de la transpiración a través de los estomas, aunque cantidades menores de vapor de agua salen en forma directa a través de la cutícula de las células epidérmicas de las hojas (De la Peña, 1987). La tasa de transpiración es afectada por el tipo de cultivo que se trate y por la disponibilidad de agua del suelo especialmente en casos extremos. Además, cuando la disponibilidad de agua no es limitada, las tasas de evaporación y transpiración se consideran aproximadamente iguales (Linsley y Franzinni, 1984).

### II.2.3. USO CONSUNTIVO

Es uno de los componentes básicos del Ciclo Hidrológico y representa la cantidad de agua que se necesita suministrar a una superficie establecida con plantas, para que sea utilizada en la construcción de los tejidos de las plantas, en la transpiración de las mismas y en la evaporación realizada por el suelo, durante todo el ciclo vegetativo. Y suele llamarse únicamente evapotranspiración por la importancia del consumo de humedad de estos dos conceptos, que es aproximadamente de 99%, en comparación con el utilizado para la formación de los tejidos de las plantas, donde solo se aprovecha del 1 al 2% de la humedad (Aguilera y Martinez, 1996; De la Peña, 1987; Jensen et al, 1990),

### II.2.4. EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL

Es la cantidad de agua evaporada por unidad de área por unidad de tiempo desde una superficie idealizada extensa de agua libre, bajo las condiciones atmosféricas existentes (Shuttleworth, 1993).

### II.2.5. EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO DE REFERENCIA

Shuttleworth, 1993 define este concepto como la tasa de evaporación desde un cultivo idealizado de pasto, con una altura fija de 12 cm, un albedo de 0.23 y una resistencia en la superficie de  $69 \text{ sm}^{-1}$ . En otros términos se refiere a una extensa superficie cubierta por un pasto verde y corto de altura uniforme, creciendo activamente, que sombrea completamente el suelo y que no le falta agua. Esta última definición es la que emplea Penman citado por De la Peña, 1987 para expresar la Evapotranspiración Potencial, lo cual se entiende perfectamente por la explicación de Linsley y Franzinni, 1984, sobre las tasas de evaporación y transpiración bajo condiciones de humedad adecuadas.

## II.2.6. EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL

De la Peña, 1987, afirma que en muy pocas ocasiones, los cultivos se encuentran bajo las condiciones tan favorables que se plantearon anteriormente, y tiene razón, ya que inicialmente los cultivos no cubren totalmente el suelo, hay condiciones no muy favorables de humedad entre riego y riego, entre otras, y es la lámina evaporada bajo estas condiciones reales de manejo del cultivo a lo que se le conoce como evapotranspiración real.

## II.3. FACTORES QUE AFECTAN LA EVAPOTRANSPIRACIÓN

Los principales factores que afectan la evapotranspiración pueden agruparse en tres: Climáticos, del cultivo y de calidad y disponibilidad de agua.

### II.3.1. CLIMÁTICOS

Dentro de los factores climáticos más importantes, están: La temperatura, humedad relativa, vientos, luminosidad, radiación y precipitación.

II.3.1.1. Temperatura del aire: Influye en la velocidad de difusión del vapor de agua en las hojas a través de los estomas, en general, cuando más alta es la temperatura para un gradiente dado, más alta es la velocidad de difusión.

II.3.1.2. Humedad relativa del aire: Si otros factores permanecen constantes, cuando la presión del vapor es mayor, será más lenta la evaporación y transpiración y contrariamente, si la humedad relativa es baja, la evaporación y transpiración se aceleran, por lo que si el porcentaje promedio de la humedad relativa es baja durante el ciclo vegetativo de un cultivo, debe esperarse un valor de evapotranspiración mayor (Grace, 1978, citado por Felix, 1996).

II.3.1.3. Vientos: Mientras más intensos y secos sean los vientos, consume mayor cantidad de agua del suelo, además, un aumento en la velocidad del viento, dentro de ciertos límites, significa una mayor transpiración. Sin embargo, se ha observado un efecto más intenso con una brisa suave que por vientos de gran velocidad, al parecer estos últimos ejercen un efecto retardante sobre la transpiración, probablemente se ocasione por el cierre de estomas bajo estas condiciones. El efecto del viento puede ser indirecto sobre la transpiración, a través de la influencia de éste en la temperatura de las hojas.

II.3.1.4. Luminosidad: Mientras mayor sea la luminosidad o cantidad de horas luz en una zona o estación del año, mayor será la evaporación

II.3.1.5. Radiación: De la Peña (1987), indica que el principal efecto de la radiación solar sobre la transpiración proviene de la influencia de la luz sobre la apertura y cierre de estomas en las hojas.

La principal fuente de energía calorífica disponible es la radiación global, o radiación de onda corta, que comprende radiaciones de longitud de onda de 0.2 a 3  $\mu\text{m}$  (Radiación ultravioleta, visible y parte del infrarrojo). Esta radiación está formada por radiación directa, que es la que alcanza la superficie de la tierra sin ser absorbida o dispersada desde su línea de propagación y por radiación difusa que es la que alcanza la superficie de la tierra después de ser dispersada. La proporción de radiación que alcanza la tierra es de 70 –80 % de la constante solar cuya mas reciente medición alcanza un valor de  $1.367 \text{ kJ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$

II.3.1.6. Precipitación: En áreas con lluvias abundantes bien distribuidas a lo largo del año, todas las plantas transpirarán aproximadamente las mismas velocidades, y las diferencias en total serán producidas por las diferencias en la duración de los ciclos de crecimiento de las diversas especies de plantas (Linsley y Franzinni, 1984).

### II.3.2. DEL CULTIVO

De la Peña (1987), indica que los factores referentes al cultivo más importantes se encuentran en: especie, variedad, ciclo vegetativo y hábitos radiculares. El mismo autor indica que en especies cuyos estomas están cubiertos, la difusión de vapor de agua dependerá de la diferencia entre la presión de vapor de agua en los espacios intercelulares y la presión de vapor en la atmósfera exterior. Respecto al habito de crecimiento radicular, Linsley y Franzinni, 1984 indican que las plantas con raíces profundas transpirarán una cantidad mayor de agua en el transcurso de un año, básicamente por su exploración a capas mas profundas de suelo.

### II.3.3. DE DISPONIBILIDAD Y CALIDAD DE AGUA

Ya se mencionó el efecto de la precipitación como fuente de disponibilidad de agua sobre la tasa de transpiración (Linsley y Franzinni, 1984), ésto es aplicable también a la disponibilidad de agua que se logra mediante el riego.

La humedad aprovechable de un suelo es aquella contenida entre la capacidad de campo y el porcentaje de marchitamiento permanente, es decir, es de donde la planta puede absorber agua para efectuar la transpiración. Cuando un suelo se humedece con un riego pesado, el agua ocupa los poros existentes entre las partículas hasta que llega a la saturación, y en este momento empieza a escurrir debido principalmente a la acción de la gravedad, pero una vez desalojado el exceso, el agua queda retenida debido a dos fuerzas principales; la tensión superficial y las fuerzas de adsorción. A la suma de estas dos fuerzas se les llama "Tensión de Humedad del Suelo" (THS). A medida que el suelo va perdiendo humedad, se incrementa la THS, por lo que es más difícil extraer agua de éste para efectuar transpiración. Si el medio en que se desarrollan las plantas contiene sales, provocan una presión osmótica que junto con las de Tensión de Humedad del Suelo se denominan "Esfuerzo de Humedad del Suelo" dificultando aun más la extracción de agua por las plantas (De la Peña, 1987).

## II.4. MÉTODOS PARA DETERMINAR LA EVAPOTRANSPIRACIÓN

Estos pueden clasificarse en dos tipos: Métodos directos y Métodos indirectos.

### II.4.1. MÉTODOS DIRECTOS

Estos proporcionan directamente el consumo total de agua requerida y utilizan para ello la instalación de aparatos e instrumentos que miden los consumos de evapotranspiración en el campo. Entre estos métodos tenemos: el método gravimétrico, lisímetros, los atmómetros, técnicas fisiológicas y técnicas micrometeorológicas.

II.4.1.1. Método gravimétrico: consiste en llevar un control periódico del abatimiento de humedad del suelo durante todo el ciclo vegetativo de un cultivo, sumándose las laminas consumidas entre riegos durante el período (De la Peña, 1987; Shuttleworth, 1993).

El cálculo se efectúa de la siguiente manera:

$$E = L1 - L2$$

Donde: E es la evapotranspiración de agua entre un muestreo de suelo y otro  
L1 y L2 son la lámina de agua retenida en el suelo a la profundidad radicular en dos muestreos consecutivos y se obtienen mediante la formula:

$$L = (Hs - Hpmp) * Da * Pr \text{ (De la Peña, 1987)}$$

Donde: L es la lamina de agua retenida en el suelo  
Hs es la Humedad del suelo en el momento del muestreo en % y se obtiene de la siguiente manera:

$$Hs = (Psh - Pss) / Pss * 100 \text{ (Hansen et al., 1980; Hanks y Ashcroft 1980 y Marshall y Holmes, 1979)}$$

Donde: Psh es el peso de la muestra de suelo Humedo (al momento del muestreo)

Pss es el peso de la muestra de suelo secada a 105 °C por 24 horas

Hpmp es la humedad del suelo en Punto de Marchitamiento Permanente en %

Da es la densidad aparente del suelo

Pr es la profundidad de las raíces

II.4.1.2. Lisímetros: Es un recipiente cilíndrico de lamina galvanizada de hasta 6 m. de diámetro por 95 cm de alto, en el que se coloca el suelo y el cultivo en estudio. La evapotranspiración se determina pesando periódicamente todo el conjunto, y por diferencias de pesadas se obtiene el consumo de humedad. Este equipo es usado mas frecuentemente para evaluar y calibrar otros procedimientos estimativos de la evapotranspiración (De la Peña, 1987; Jensen et al, 1990; Romo y Arteaga, 1989; Shuttleworth, 1993). Para evitar problemas de advección de las áreas aledañas, el lisimetro debe colocarse al menos a 100 metros de distancia de las orillas del campo (Jensen et al, 1990)

II.4.1.3. Atmómetros: Consta de dos recipientes graduados que contienen agua, los cuales están en contacto con la atmósfera a través de esferas de cerámica porosa con un vástago, una esfera es de color negro y otra de color blanco, la evapotranspiración se obtiene por diferencia de lectura del nivel del agua en ambas esferas (De la Peña, 1987).

II.4.1.4. Técnicas fisiológicas: En condiciones cuando el cultivo tiene un follaje muy denso y solo una pequeña parte de la radiación solar alcanza el suelo, así como en condiciones de clima áridas o semiárido y con cultivos en hileras espaciadas donde la superficie del suelo permanece muy seca, la transpiración representa el 95 % de la evaporación, por lo que la medición directa de la transpiración es una estimación efectiva de la evapotranspiración total. Y puede realizarse mediante la

medición del flujo de savia a través del tejido de la planta, algunos mediante pulsos de calor, otros mediante trazadores, otros mediante la respuesta a una presión y otros mediante absorción de agua por el tejido (Shuttleworth, 1993).

II.4.1.5. Técnicas micrometeorológicas: Estos métodos determinan la evapotranspiración como el flujo de vapor de agua a través del aire desde una superficie libre de agua, vegetación o suelo. Hay dos clases de medición micrometeorológica de la evaporación, una basada en la medición de gradientes y otra en la medición de fluctuaciones, entre estos métodos se encuentran: la correlación de Eddy y el método del balance de energía o de relación de Bowen, entre otros (Shuttleworth, 1993). Debido a que las mediciones se realizan en la atmosfera, **sobre** la superficie del suelo y no en la superficie del suelo, es muy importante tener en cuenta la distancia desde el equipo de medición a la orilla del área o cultivo que se esta midiendo, en especial desde donde vienen los vientos dominantes con el fin de evitar al máximo posible la influencia de factores externos al área en estudio, esto es conocido como “fetch” (Shuttleworth, 1993., CAMPBELL SCIENTIFIC, 1995), y por regla general, se recomienda que la distancia del sensor a la orilla de la superficie a medir, sea al menos de 100 veces la altura del sensor (CAMPBELL SCIENTIFIC, 1995), asimismo, la representatividad del área que tienen los datos medidos puede obtenerse de la siguiente manera (Shuttleworth, 1993).

$$F \approx \exp \left( \left( -6 (z - d) \left\{ \ln \left[ \frac{(z - d)}{z_0} \right] - 1 + \frac{z_0}{(z - d)} \right\} \right) / \left( X_f \left[ 1 - \frac{z_0}{(z - d)} \right] \right) \right)$$

Donde: F es la proporción de evaporación originada del área considerada en el “fetch”

z es la altura de medición

d es igual a 0.67 hc

z<sub>0</sub> es igual a 0.123 hc

hc es la altura promedio del cultivo

$X_f$  es la distancia de los sensores a la orilla del lote a medir, preferentemente en la dirección de donde viene el viento

II.4.1.5.1. Método del balance de energía: La primera ley de la termodinámica indica que la energía no se crea ni se destruye, únicamente se transforma (Houghton, 1977; Hillel, 1972) y se sabe que la principal fuente de energía en la superficie de la tierra es el sol, por lo que para el follaje de un cultivo en un campo, la energía del sol es la fuerza motriz para todas las actividades que en él ocurren (Kizer et al., 1990). En la superficie de la tierra, el balance de energía puede expresarse como:

$$R_n = \lambda E + H + G$$

Donde:  $R_n$  es la radiación neta, que representa la diferencia entre la radiación de onda corta que llega a la superficie y la que es reflejada, mas la diferencia entre la radiación de onda larga que llega a la superficie y la radiación de onda larga que es reflejada

$\lambda E$  es el flujo de calor latente de vaporización ( $\lambda$  es el calor latente de vaporización y  $E$  es la velocidad de evaporación)

$G$  es el calor sensible almacenado en el suelo

$H$  es el calor sensible transferido al aire

En esta ecuación se ignora la energía usada en la fotosíntesis, la energía almacenada en el follaje y el intercambio de energía debida a la actividad metabólica, por ser la suma de ellas demasiado pequeña ( Hanks y Ashcrof, 1980; Hillel, 1972; Jensen et al., 1990; Kizer et al, 1990; Stewart, 1980).

Jensen, et al, 1990, indican que este método puede ser utilizado para mediciones horarias o en períodos cortos de tiempo, midiendo  $R_n$ ,  $G$  y la temperatura del aire, calculando  $H$  mediante alguna de las formulas siguientes:

$$1. H = - \rho_a C_p k_h ( \partial T_z / \partial z ) \quad (\text{Difusividad de Eddy}) \text{ en } \text{kJ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

Donde:  $\rho_a$  es la densidad del aire en  $\text{kg m}^{-3}$

$C_p$  es el calor especifico del aire en  $\text{kJ kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$

$K_h$  es la difusividad de Eddy para el calor en  $\text{m}^{-2} \text{ s}^{-1}$

$\partial T_z$  es el gradiente de la temperatura del aire en  $^\circ\text{C m}^{-1}$  a la misma altura sobre la superficie,  $z$ .

$$2. H = - \rho_a C_p h_h (T_z - T_o)$$

Donde:  $T_z$  es la temperatura a la altura  $z$

$T_o$  es la temperatura de la superficie

$h_h$  es un coeficiente de transporte

$$h_h = k^2 U_z / [ \ln ( ( z - d ) / z_{om} ) * \ln ( ( z - d ) / z_{ov} ) ]$$

Donde:  $k$  es la constante de von Kármán (0.41)

$U_z$  es la velocidad del viento a la altura  $z$

$d$  es el parámetro del plano zero de desplazamiento

$z_{om}$  es el parámetro de rugosidad para el momento

$z_{ov}$  es el parámetro de rugosidad para la transferencia de calor y vapor

Shuttleworth en 1993, indica que una técnica que está ganando aceptación para condiciones semiáridas es el uso de la desviación estándar de la temperatura del aire, medida entre 5 y 10 metros sobre el suelo, para calcular el flujo de calor sensible con la siguiente ecuación:

$$H = \rho C_p [(\sigma_t / 0.92)^3 (0.41 g z / (T + 273.3))]^{1/2}$$

Donde:  $\sigma_t$  es la desviación estándar de la temperatura del aire ( $^{\circ}\text{C}$ ), la cual se obtiene mediante mediciones frecuentes en períodos muy cortos de tiempo, y para lo cual se requiere de equipo especializado de alta sensibilidad y rápida respuesta

$z$  es la altura a que se mide la temperatura

$g$  es la aceleración debida a la gravedad

$\rho$  es la densidad del aire ( $\text{kg /m}^3$ )

Por su parte, DeBruin, 1994, indica que el método de fluctuación de temperatura (conocido como el método de la varianza de la temperatura) es apropiado para determinar la densidad del flujo de calor ( $H$ ) y la velocidad de fricción ( $u^*$ ) pero que bajo condiciones inestables, se requiere resolver las ecuaciones en forma iterativa, lo cual no es muy conveniente, por lo que propone una solución analítica de la siguiente forma:

$$H = \rho C_p \sigma T v^*$$

Donde:  $\rho C_p \sigma T$  igual que lo descrito anteriormente

$$v^* = [ (u_{*n})^p + (U_{fr})^p ]^p / a_T$$

Donde:  $p$  es una constante que depende de la altura de medición de la velocidad del aire ( $z_u$ ), la altura de medición de la temperatura del aire ( $z_T$ ) y la longitud de rugosidad  $z_o$  (deBruin, 1994)

$a_T$  es una constante empírica que vale 2.9

$$u_{*n} = k * u / (LN(z_u / z_o))$$

$$U_{fr} = [ (\sigma k g z_T b_T) / (T a_T) ]^{1/2}$$

$b_T$  es una constante empírica que vale 28.4

II.4.1.5.2. Método de la relación de Bowen: Shuttleworth, 1993, indica que los procesos de difusión turbulenta responsables del transporte de vapor de agua y el calor sensible a través de la atmósfera, son muy similares. Es entonces posible asumir que la resistencia aerodinámica que restringe el flujo de vapor de agua y relaciona la tasa de flujo a la diferencia en presión de vapor ( $\Delta e$ ) entre dos alturas particulares, es numéricamente igual a la resistencia que relaciona el flujo de calor sensible a la diferencia de temperatura ( $\Delta T$ ) entre los dos niveles. La relación de Bowen ( $\beta$ ), que es la tasa de calor sensible ( $H$ ) a calor latente ( $\lambda E$ ) es una relación directa del rango de diferencias en temperatura y humedad medidos entre las dos alturas.

$$\beta = H / \lambda E = \gamma \Delta T / \Delta e$$

Donde:  $\gamma$  es la constante psicrométrica, la cual se hace necesaria para tener en cuenta las unidades.

Ordenando términos en la ecuación de balance tenemos:

$$\lambda E + H = R_n - G$$

Dividiendo entre  $\lambda E$  ambos términos de la ecuación tenemos que

$$(\lambda E / \lambda E) + H / \lambda E = (R_n - G) / \lambda E$$

$$\lambda E (1 + H / \lambda E) = R_n - G$$

$$\lambda E = (R_n - G) / (1 + H / \lambda E)$$

$$\lambda E = (R_n - G) / (1 + \beta)$$

Que es conocido también como el Método de la Relación de Bowen ( Hanks y Ashcrof, 1980; Hillel, 1972; Jensen et al., 1990; Stewart, 1980; Shuttleworth, 1993).

#### II.4.2. MÉTODOS INDIRECTOS

Estos métodos se apoyan en la utilización de fórmulas empíricas para obtener los consumos de agua (potencial o de referencia) a través de todo el ciclo vegetativo de las plantas, la mayor parte de ellos son demasiado teóricos, ya que han sido producidos bajo condiciones definidas entre regiones y su aplicación requiere de una serie de datos que generalmente no se tienen a la disposición. Entre los métodos mas conocidos están: Thornthwait, Blaney y Criddle, método racional utilizando la curva de Hansen, Christiansen-Grassi y evaporímetro tipo "A" (De la Peña, 1987). Sobre el Evaporímetro tipo "A", aunque el dato original que se mide,

es la evaporación en una superficie libre de agua, pudiera pensarse que se trata de un método directo, pero como es necesario efectuar ajustes para estimar la evapotranspiración potencial, se le considera método indirecto (Shuttleworth, 1993; González y Hernández, 1999).

II.4.2.1. Método de Thornthwait: Calcula la evapotranspiración potencial mediante los datos existentes de las temperaturas medias mensuales y corrige por la latitud, que constituye un buen índice de la energía en un lugar específico. Tiene la ventaja de que usa datos climatológicos accesibles, pero solo se obtienen buenos resultados en zonas húmedas con vegetación abundante (Aguilera y Martínez, 1996; De la Peña, 1987).

II.4.2.2. Método de Blaney y Criddle: La fórmula original de este método calcula un factor de uso consuntivo mensual (f), con base en la temperatura media mensual (t) y el porcentaje mensual de horas luz con respecto al total anual (p) y aplica un coeficiente empírico (k) para obtener el requerimiento de consumo de agua en el mes, quedando de la forma:

$$UC = k * f = k(p * t/100) \text{ (Doorenbos and Pruitt, 1984; Jensen et al, 1990)}$$

Dado que el efecto del clima en el requerimiento de agua del cultivo, es insuficientemente definido por la temperatura y la duración del día, para tener buena confiabilidad en el cálculo, el coeficiente k necesitará variar no solo con el cultivo, sino con las condiciones climáticas también (Doorenbos y Pruitt, 1984).

Debido a lo empírico y errático que puede resultar el cálculo de la evapotranspiración con la fórmula original y con la finalidad de eliminar o mitigar esos errores, se han introducido algunas adecuaciones que contemplan la humedad relativa, la nubosidad y el viento (Doorenbos y Pruitt, 1984; Jensen et al, 1990; Shuttleworth, 1993). De la Peña, 1987, indica que esta metodología ha sido

deducida en una región desértica y permite obtener valores muy confiables del uso consuntivo en períodos no menores de 30 días.

II.4.2.3. Método de la curva única de Hansen: En este método se obtiene el factor mensual de consumo de agua (f), por el método de Blaney y Criddle y el coeficiente k se obtiene de la curva única de Hansen, la cual reúne información sobre las exigencias relativas de humedad de un cultivo a través del ciclo vegetativo, solo es necesario definir el punto en la curva hasta donde se limita el desarrollo del cultivo a analizar, se divide en décimas y en el número de meses del ciclo vegetativo el tramo de la curva, con ello se obtienen los k mensuales, que multiplicados por los f mensuales de Blaney y Criddle, nos dan la evapotranspiración. (De la Peña, 1987).

II.4.2.4. Método de Christiansen-Grassi: Es un método muy similar al anterior, dado que se basa también en Blaney y Criddle, obteniendo los f mensuales y con el valor de k propuesto por Blaney y Criddle para distintas zonas, se entra a una tabla de donde se seleccionan y grafican los valores k corregidos para obtener los valores mensuales (De la Peña, 1987).

II.4.2.5. Método del tanque evaporímetro: Grassi citado por De la Peña en 1987, indica que la evaporación medida en un tanque evaporímetro integra los efectos de los diferentes factores que influyen en la evapotranspiración, a la vez, Shuttleworth, 1993 indica que la medición de la evaporación en este tipo de tanque puede diferir significativamente de la evaporación en un lago adyacente o la vegetación alrededor del tanque, por lo que se requiere ajustar mediante coeficientes empíricos, los cuales dependerán de la posición del tanque con respecto a la superficie a medir y de las condiciones climáticas presentes. Existen muchos tipos de Tanques y en realidad casi cualquier tanque o depósito puede servir para estos fines, pero será necesaria su calibración y ajuste (Palacios y Exevio, 1989), El más usual y recomendado es el tanque tipo "A" del U. S. Weather Bureau, consistente en un recipiente o depósito de lámina galvanizada de

1.22 m de diámetro y 26 cm de alto, el tanque se coloca sobre una tarima o base de madera que permita la circulación del aire. Para medir la evaporación, se debe añadir agua hasta 5 cm del nivel superior del recipiente, la medida de la evaporación se obtiene por diferencia diaria en la lectura del nivel de agua, la cual se realiza con un tornillo en una escala graduada. Esta lectura debe corregirse por el coeficiente cuyo valor depende de la humedad relativa, la velocidad del viento y de la posición del tanque, para obtener la evapotranspiración potencial (Aguilera y Martinez, 1996; De la Peña, 1987; Doorenbos and Pruitt, 1984; Shuttleworth, 1993).

II.4.2.6. Método de Penman: Se basa en el conocimiento de los conceptos físicos de la evaporación, y hace la determinación de ésta a partir de la radiación, la temperatura y la velocidad del viento. La ecuación original se conforma de dos términos, el término de la energía necesaria para sostener evaporación y el término aerodinámico que describe el mecanismo de difusión por el cual la energía es removida desde una superficie como vapor de agua. La ecuación original de Penman es:

$$E = (\Delta/\Delta+\gamma) (R_n - G) + (\gamma/\Delta+\gamma)E_a \quad (\text{Allen, R. 1986, Jensen et al 1990})$$

Donde:  $E_a$  representa el término aerodinámico del transporte de vapor y la forma general es:

$E_a = f(u)(e_s - e)$ , considerando unidades se tiene:

$$\lambda E = (\Delta/\Delta+\gamma) (R_n - G) + (\gamma/\Delta+\gamma)6.43(1+0.53 U_2)^*D, \text{ en MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$$

Donde:  $R_n$  y  $G$ , son Radiación neta y flujo de calor del suelo en  $\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$

$U_2$  es la velocidad del viento medida a 2 metros de altura en  $\text{m s}^{-1}$

D es el déficit de presión de vapor  $e_s - e$  en kPa

$\Delta$  es el gradiente de presión de vapor a saturación y se obtiene de la siguiente forma:

$$\Delta = (4089 e_s) / (273.3 + T) \text{ en kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$$

Donde:  $e_s$  es la presión de vapor a saturación

$$e_s = 0.618 \exp (17.27 T / (273.3+T))$$

T es la temperatura ( $^\circ\text{C}$ )

$\gamma$  es la constante psicrométrica, que se calcula como:

$$\gamma = (C_p P) / \varepsilon \lambda * 10^{-3} = 0.0016286 P / \lambda \text{ en kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$$

Donde:  $C_p$  es el calor específico del aire húmedo ( $1.013 \text{ kJ kg}^{-1} ^\circ\text{C}^{-1}$ )

P es la presión atmosférica en kPa

$\varepsilon$  es la relación de peso molecular de vapor de agua por masa de aire seco (0.622)

$\lambda$  es el calor latente de vaporización y está dado por:

$$\lambda = 2.501 - 0.002361 T$$

Este método ha sido considerado por mucho tiempo como uno de los que mejor explican el proceso de evaporación, por ello ha sido considerado como la base en

la búsqueda de métodos simplificados que han surgido posteriormente, de entre los que se pueden mencionar: Penman-Monteith, Priestley-Taylor, el método de la FAO (Doorenbos y Pruitt, 1984; Jensen et al., 1990; Shuttleworth, 1993), y las simplificaciones que emplea De la Peña, 1987. Para ampliar la información al respecto se puede consultar Jensen et al., 1990; Leue, 1998.

II.4.2.7. Método de Penman-Monteith: La formula de Penman, no contempla una función para la resistencia de la superficie a la transferencia del vapor de agua. Monteith, 1965, citado por Allen, 1986; Jensen et al 1990; Suttleworth 1993, contemplo además de las variables meteorológicas, las resistencias relativas a las características estomáticas y aerodinámicas de los cultivos, tomando la siguiente forma:

$$E = ((\Delta^* (R_n - G)) + (\rho C_p D / r_a)) / (\Delta + \gamma (1 + (r_c / r_a)))$$

Donde:  $r_c$  es la resistencia superficial del cultivo:

$$r_c = 100 / 0.5 \text{ LAI}$$

LAI es el índice de área foliar

$$\text{LAI} = 24 \text{ hc para pasto corto (} < 15 \text{ cm)}$$

$$\text{LAI} = 5.5 + 1.5 \ln (\text{hc}) \text{ para alfalfa (} 0.10 < \text{hc} < 0.50 \text{ m), Allen, et al 1989; Suttleworth, 1993.}$$

$r_a$  es la resistencia aerodinámica a la transferencia de vapor y calor sensible y esta dado por:

$$r_a = (\ln [(z_u - d) / z_{om}] \ln [(z_e - d) / z_{ov}]) / k^2 u_z \quad \text{en } \text{sm}^{-1}$$

Donde:  $z_u$  y  $z_e$  son la altura a que se mide la velocidad del viento y humedad respectivamente

$d$  es el plano zero de desplazamiento del aire y equivale a:

$$d = 0.67 hc$$

$$z_{om} = 0.123 hc$$

$$z_{ov} = 0.0123 hc$$

$k = 0.41$  (constante de von karman para difusión turbulenta)

$u_z$  es la velocidad del aire a la altura  $z$

$hc$  es la altura media del cultivo

La aplicación de esta metodología ha demostrado que se obtienen valores de evapotranspiración muy similares a lo medido en campo en lisímetros, con menos de 2% de error (Jensen et al 1990), por lo que se ha sugerido su uso general a nivel internacional (Smith, 1990, citado por Garatuza et al, 1998)

Suttleworth, 1993, considerando una altura del cultivo de 12 cm y para mediciones de temperatura y humedad a una altura de 2 m, menciona que la resistencia aerodinámica para un cultivo de referencia esta dada por:

$$r_{arc} = 208 / U_2$$

donde:  $U_2$  es la velocidad del viento en  $m s^{-1}$  medida a 2 m

Sobre este mismo aspecto, Unland et al., 1996 indican que el factor es 209 para alturas de 2 metros y de 240 para alturas de 3 metros.

II.4.2.8. Método de Shuttleworth: Shuttleworth, 1993, trabajando con el modelo de Penman-Monteith, pero con términos y parámetros apropiados a un cultivo de referencia, propuso el siguiente Modelo:

$$E_{rc} = (\Delta (R_n - G) / (\Delta + \gamma^*)) + (\gamma / (\Delta + \gamma^*)) * (900 / (T + 273)) * U_2 * D$$

Donde: Rn y G están dadas en mm d<sup>-1</sup>

T es la Temperatura del aire en °C

U<sub>2</sub> es la velocidad del viento a 2 m de altura en ms<sup>-1</sup>

D es el déficit de presión de vapor en kPa

$$\gamma^* = \gamma (1 + 0.33 U_2)$$

II.4.2.9. Método de Priestley-Taylor: Numerosas observaciones micrometeorológicas sobre cultivos bien regados revelaron que su evapotranspiración depende grandemente de la Radiación neta y que el segundo término de la ecuación de Penman y/o Penman-Monteith, que es la función de viento, generalmente representa solo una cuarta parte del primer término (término de energía), de lo cual se obtiene la simplificación a la fórmula de Penman, propuesta por Priestley-Taylor (Priestley-Taylor, 1972, citado por deBruin, 1987 y por Shuttleworth, 1993) y que queda representada así:

$$\lambda E = \alpha (\Delta / (\Delta + \gamma)) (R_n - G)$$

Donde: α es un coeficiente con valor de 1.2 a 1.3

Rn, G están dados en W m<sup>-2</sup> o su equivalente en mm de agua

Suttleworth, 1993, al revisar los trabajos realizados por Jensen et al, 1990, indica que un valor de  $\alpha = 1.26$  es adecuado para aplicarse en climas húmedos, pero dicho valor debe incrementarse a 1.74 para climas áridos.

II.4.2.10. Método de Priestley-Taylor-yaqui: Investigaciones realizadas en el Valle del Yaqui, concluyen que es posible estimar la evapotranspiración mediante la ecuación de Priestley-Taylor en un modelo de dos parámetros de la siguiente forma:

$$\lambda E = \alpha (\Delta/\Delta+\gamma) (R_n - G) + \beta , \text{ con las mismas unidades del modelo anterior}$$

Donde:  $\alpha = 1.25$  y  $\beta = 11.72$ , (Cervera y Garatuza, 1993)

II.4.2.11. Método de Makkink: La formula de Makkink nace del hecho de que el valor del Flujo de calor de Suelo (G) toma valores positivos y negativos durante el día y el promedio diario es usualmente muy pequeño (Watts C. J. et al., 1999), por lo que puede ser ignorado, y por otra parte, la Radiación neta (Rn) es solo una parte de la Radiación solar (Rs) (deBruin, 1987), por lo que la evapotranspiración de un área bien regada puede ser obtenida simplificando la formula de Penman de la siguiente manera:

$$\lambda E = C1 (\Delta/\Delta+\gamma) R_s + C2 \text{ (Makkink, 1957 y Makkink 1961 , citados por deBruin, 1987)}$$

Posteriormente el parámetro C2 fue ignorado, para quedar de la siguiente manera:

$$\lambda E = C (\Delta/\Delta+\gamma) R_s, \text{ (deBruin, 1987)}$$

Donde:  $R_s$  = Radiación solar que esta dada en  $W m^{-2}$  o su equivalente en mm de agua

C = constante que depende de la relación  $R_n / R_s$   
deBruin, 1987 indica que esta relación es de 0.5, y que  $\alpha = 1.2-1.3$ , por lo que al multiplicarlos se tiene un valor aproximado de  $C = 0.65$ , y la ecuación toma la siguiente forma:

$$\lambda E = 0.65 (\Delta / \Delta + \gamma) R_s \text{ (deBruin, 1987)}$$

El valor de  $C = 0.65$  ha sido corroborado en investigaciones realizadas en el Valle del Yaqui, mostrando que este modelo simplificado arroja resultados de evapotranspiración muy aceptables (Moene y Garatuza, 1992 y Garatuza, et al 1992, citados por Garatuza et al., 1998). Al respecto, Watts et al, 1999 en un estudio de 4 años en una estación del Valle del Yaqui, indica que la relación  $R_n/R_s$  no siempre es igual a 0.5, variando de 0.5 en el invierno a 0.64 en el verano, con un promedio anual de 0.56, lo que arroja un valor de  $C = 0.73$

La gran ventaja de este modelo es que solo requiere la medición de la Radiación solar y la temperatura del aire o bien mediante estimación de la  $R_s$  con base a las horas de brillo solar en el día y auxiliado con tablas y mapas, que son ya conocidos en algunas regiones (Doorenbos y Pruitt, 1984). Mas aún es posible la determinación de la Radiación solar por medio de imágenes de satélite, lo cual le da una aplicabilidad tanto parcelaria como a nivel regional (Garatuza y van den Berg, 1993; Garatuza, et al 1999; Ruelas,M., 2000; Stewart et al, 1999).

### III. MATERIALES Y METODOS

#### III.1. Ubicación

El Valle del Yaqui, en Sonora, se localiza entre los paralelos 27° 00' y 27° 40' latitud norte y entre los meridianos 109° 45' y 110° 20' de longitud oeste del meridiano de Greenwich y es considerado uno de los mas grandes y productivos del país, tiene una superficie total de 450,000 has de las cuales 225,000 has corresponden al **Distrito de Riego 041** y son terrenos que se consideran agrícolas y se encuentran bajo riego. El agua de riego proviene de un sistema de tres presas, conformado por la presa Lázaro Cárdenas “La Angostura” con capacidad de 921.2 millones de m<sup>3</sup>; la presa Plutarco Elias Calles “El Novillo” con capacidad de 3020 millones de m<sup>3</sup>; y la presa Alvaro Obregón “Oviachic”, que tiene una capacidad de 3226.7 millones de m<sup>3</sup>.

El presente trabajo de investigación se llevó a cabo en el Campo de AGRICOLA GANDARA ubicado en el block 2414 del Valle del Yaqui en un área de 30 hectáreas sembradas durante el ciclo Otoño-Invierno 1997-1998.

#### III.2. Clima

El clima predominante en la región, de acuerdo a las modificaciones realizadas por E. García en 1981 a la clasificación de Köppen, corresponde a un Bw(h')w y BW(h')(x')(e), que se define como muy cálido y desértico, con un rango de temperatura anual de 23 a 27 °C y con una máxima de 43 a 48 °C durante Junio, Julio y Agosto, y mínimas de 3.5 a 4.0 °C en Diciembre y Enero. El régimen de lluvias de verano es de 279 a 436 mm con una media anual de 350 mm y el porcentaje de lluvia invernal es de 5 a 10 %.

El rango de humedad relativa promedio diario varia de 70 % en las dos estaciones húmedas hasta 50 % en los meses de Mayo y Junio, llegando a ser en el día de

25 % o menos (Stewart et al., 1994 citado por Garatuza et al., 1998). La evaporación media anual alcanza los 2,600 mm

### **III.3. Suelo**

Según la información de Dabdoub en 1980, citado por Higuera en 1996, casi la totalidad de las 450,000 has del Valle del Yaqui, son de regular calidad, dada su formación arcillo-limosa, muy pobre en humus y deficiente en nitrógeno, con reacción ligeramente alcalina. Los mejores terrenos son los que se encuentran situados a la vega del Río Yaqui. En base a los tipos de suelos, el Valle se ha dividido en cinco agrohabitats: aluvión ligero, aluvión pesado, barrial profundo, barrial compactado y barrial pedregoso.

El block 2414, se encuentra a escasos 5 km del litoral y a 7 km de la desembocadura del arroyo Cocoraque. En este block se tiene una gama muy amplia de texturas, siendo estas: franco, franco-arcilloso, franco-arcillo-limoso, franco-arcillo-arenoso, arcillo-limoso, arcilloso y franco-arenoso y específicamente el campo de Agrícola Gándara presenta texturas del tipo franco-arcilloso y franco-arcillo-arenoso.

### **III.4. Instalación del equipo de medición y colecta de datos**

Para medir las variables climatológicas se instalaron dos estaciones, conteniendo éstas el siguiente equipo y sensores:

Estación I:

1. Equipo para medir la Relación de Bowen, consistente en:
  - 2 termopares (cromo-constantan) para medir temperatura y diferencial de temperatura a dos alturas (1.02 y 3.58 m)
  - Un higrómetro de espejo frío para punto de rocío modelo Dew-10 (General Eastern Corp.)
  - Una bomba de succión

- 2 tomas de aire, las cuales se protegen con filtros de 1  $\mu\text{m}$  de tamaño de poro para evitar contaminación por polvo y prevenir la entrada de líquidos al sistema.
- 2 contenedores de 2 lt de capacidad para estabilizar y homogenizar el aire a medir.
- 2 solenoides que controlan las válvulas de entrada (superior o inferior) de aire al higrómetro
- 2 medidores de flujo

La resolución para la Temperatura del Punto de Rocío es de  $\pm 0.003$  °C sobre  $\pm 35$ °C y la limitante es la estabilidad del Dew-10, aproximadamente 0.05 °C, rindiendo tanto como  $\pm 0.01$  kPa de resolución en la Presión de Vapor sobre la mayoría de los ambientes (Campbell Scientific,1995).

Cada dos minutos el aire es jalado a través del higrómetro cambiando de una a la otra de las alturas. Cuarenta segundos son empleados en estabilizar el espejo en la nueva temperatura del punto de rocío y un minuto 20 segundos en valorar la medición para una altura,.

2. Un Anemómetro y Veleta a 3.58 metros de altura, para medir velocidad y dirección del viento
3. Un Pluviómetro, para medir precipitación
4. Un tripié de instalación y soporte
5. Un panel solar grande, convertidor de corriente y acumulador de energía
6. Un Dataloger 21-X
7. Caja de fibra de vidrio (para protección de equipo)

Estación II: Equipo para medir el Balance de Energía

1. 2 Radiómetros Netos Q-6 (Rn)
2. Un Radiómetro Total (Rs)

3. 3 Placas de Flujo de Calor de Suelo (G) colocadas aproximadamente a 8 cm de profundidad.
4. 3 Reflectómetros de dominio de tiempo para medir Humedad del suelo (TDR)
5. Una torre de instalación y soporte
6. Un panel solar chico
7. Un datalogger CR-10
8. Una caja de fibra de vidrio (para protección de equipo)

Adicionalmente se instaló un equipo (pararrayos) para proteger de las tormentas eléctricas a ambas estaciones.

A cada datalogger se le instaló un programa que efectúa una toma de datos cada dos minutos, integrando un promedio cada 20 minutos, que es el dato que se almacena en memoria, por lo que bajo condiciones óptimas de operación del equipo y los sensores, se tienen 72 datos diarios de cada sensor. Una a dos veces por semana se recuperan los datos almacenados en la memoria del datalogger, aprovechando para dar servicio a la estación y verificar su funcionamiento.

### **III.5. Tamaño del área de influencia (Fetch)**

La colocación de la estación dentro del lote de 30 has, se realizó de tal manera que quedaran al menos 250 m de distancia entre la estación y cualquiera de las orillas del lote, especialmente en la dirección de los vientos dominantes.

### **III.6. Establecimiento del cultivo**

El establecimiento del cultivo se realizó con planta proveniente de invernadero, el transplante del chile bell se realizó del 3 al 10 de noviembre de 1997 en una superficie de 30 has. El sistema de transplante es en surcos o camas a 1.6 m de separación con dos hileras de plantas por cama, separadas 40 cm una de la otra. Además, el suelo se encuentra cubierto con acolchado color negro humo y como

el campo en su totalidad se utiliza para la producción de Tomate y Pepino de vara, el campo se conserva con la vara colocada en el terreno todo el tiempo, aún en el cultivo de Chile. La plantación es irrigada mediante un sistema de riego por goteo y el campo en su totalidad es asesorado por un especialista en Irrigación, por lo que se considera que el cultivo se mantiene bajo óptimas condiciones de humedad. El agua de riego proviene de un canal de riego del Distrito de Riego 041 del Valle del Yaqui (DR41).

### **III.7. Proceso de la información**

La información de campo se extractó semanalmente de los dataloger de las estaciones mediante una laptop y se exportaron a una hoja de cálculo electrónica (Quattro Pro) para efectuar los cálculos de los parámetros requeridos por los modelos a evaluar, así mismo se efectuaron también en la hoja de cálculo, los concentrados diarios, mensuales, correlaciones y gráficas necesarias.

### **III.8. Medición de la evapotranspiración real del cultivo**

La medición de la evapotranspiración real del cultivo se realizó, mediante la aplicación de la relación de Bowen, pero por lo poco confiable que resultaron los datos obtenidos, fue necesario aplicar la metodología de la ecuación de balance de energía (Ec. Bal.), para obtener la evapotranspiración real del cultivo, aplicando la solución analítica que propone DeBruin, 1994, para calcular el calor sensible (H).

### **III.9. Evapotranspiración medida y de referencia con datos instantáneos y con datos promedio diario**

Para obtener la evapotranspiración diaria se siguieron dos rutas:

Ruta 1. Con los datos climatológicos instantáneos, cada 20 minutos iniciando a las 7:00 y finalizando a las 18:00 horas (7:00, 7:20, 7:40, 8:00, .....,17:40, 18:00), se calcularon los parámetros necesarios para obtener la evapotranspiración medida y la estimada con cada uno de los modelos, teniendo un total de 34 valores diarios de evapotranspiración (eventualmente se tienen menos de 34 valores, por falta de datos en ciertas horas en algún día) y obteniendo al final un promedio diario.

Ruta 2. Con los 34 valores diarios de cada una de las variables climatológicas, se obtuvo un valor medio diario para cada una de las variables climatológicas y con ellos se calcularon los parámetros necesarios para obtener la evapotranspiración medida y la estimada con cada uno de los modelos

### **III.10. Estimación de la evapotranspiración de referencia con modelos sobresalientes**

En consideración a la literatura consultada se estimó la evapotranspiración de referencia con los modelos que se consideran los más apropiados para este fin, siendo éstos: el de Penman (P), el de Priestley-Taylor (P T orig.), el de Priestley-Taylor de dos parámetros ajustado para el Valle del Yaqui (P T yaq.) , el de Penman-Monteith (P-M) como  $E_t$  de referencia, el de Shuttleworth (Sh), y el de Makkink (M).

### **III.11. Ajustes necesarios a los modelos para estimar $E_t$**

El modelo de Penman, como se presenta en la revisión de literatura, arroja un valor de  $\lambda E$  en  $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$  y la constante 6.43 del término aerodinámico del modelo, es la que se hace necesaria para la conversión de velocidad en  $\text{ms}^{-1}$  y la presión de vapor en kPa a  $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ , por lo que para poder utilizar unidades energéticas en  $\text{W m}^{-2}$ , la constante (6.43) se multiplicó por un factor de 11.57 ( $\text{W m}^{-2} / \text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ), por lo que la fórmula empleada queda de la siguiente forma:

$$\lambda E = (\Delta / \Delta + \gamma) (R_n - G) + (\gamma / \Delta + \gamma) (6.43 \times 11.57) (1 + 0.535 U_2) D$$

Asimismo, al trabajar el Modelo de Shuttleworth, se encontró que este requiere unidades de  $R_n$  y  $G$  en  $\text{mm d}^{-1}$ , por lo que para poder trabajar el modelo en unidades energéticas de  $\text{W m}^{-2}$ , la constante 900 que uniformiza las unidades del segundo término a  $\text{mm d}^{-1}$  se multiplicó por 28.6 ( $\text{W m}^{-2} / \text{mm d}^{-1}$ ), lo cual no coincide con lo realizado por Leue, 1998, quien aplicó un factor de  $1.5 \times 10^{-3}$  para convertir  $\text{W m}^{-2}$  a  $\text{mm d}^{-1}$  cuando en realidad el inverso de 28.6 es  $3.5 \times 10^{-2}$ , de esta manera, la fórmula empleada para el modelo de Shuttleworth toma la siguiente forma:

$$\lambda E = (\Delta (R_n - G) / (\Delta + \gamma^*) + (\gamma / \Delta + \gamma^*) ((900 \times 28.6) / (T + 275))) U_2 D$$

### III.12. Determinación de los coeficientes de cultivo (kc)

Considerando que la evapotranspiración real del cultivo está dada por un lado por las demandas y facilidades o restricciones que presente el ambiente, lo cual representa a la evapotranspiración Potencial o de referencia, y por otro lado por las necesidades y facilidades o restricciones respectivas al tipo de cultivo y edad o etapa de desarrollo del mismo y a la humedad del suelo y que se representa como un factor o coeficiente de desarrollo  $k_c$ , el cálculo de la evapotranspiración real del cultivo a partir de estos conceptos sería:

$$E_{tr} = k_c E_t$$

Donde:  $E_{tr}$  es la evapotranspiración real del cultivo

$K_c$  es el coeficiente de desarrollo del cultivo

$E_t$  es la evapotranspiración potencial o de referencia

Por lo que conociendo la evapotranspiración real del cultivo por alguno de los métodos de medición, y conociendo la evapotranspiración potencial o de referencia, mediante alguno de los métodos de estimación, es posible encontrar el coeficiente de desarrollo Kc de la siguiente manera:

$$k_c = E_{tr} / E_t$$

Este calculo se efectuó en forma diaria, obteniendo posteriormente un valor promedio para cada decena del mes.

### **III.13. Validación de los coeficientes de cultivo (kc).**

Se validaron los coeficientes de desarrollo obtenidos para el cultivo de chile bell con los datos climatológicos promedio, para lo cual se comparó la **evapotranspiración real observada** (con datos climatológicos instantáneos) en cada decena del mes, con la **evapotranspiración real estimada** en cada decena del mes, la cual se obtuvo de multiplicar la Evapotranspiración estimada con los modelos con datos climatológicos promedio, por los kc obtenidos con los datos climatológicos promedio.

## IV. RESULTADOS Y DISCUSION

### IV.1. Medición de variables climatológicas y evapotranspiración real del cultivo

El equipo de medición de las variables climatológicas se instaló prácticamente desde el momento del trasplante del cultivo es decir desde la segunda semana de Noviembre de 1997, pero sobre la marcha se fueron realizando ajustes al programa instalado en el datalogger por lo que fue hasta mediados de Enero de 1998 que se inició la captura de datos bajo el supuesto de que el equipo trabajaba correctamente y los datos medidos en el área en estudio eran confiables.

Al finalizar la captura de datos y analizar los valores de evapotranspiración ( $\lambda E$ ) obtenidos con la metodología de la Relación de Bowen, se encontró que se tenían valores irreales, por lo que se intentó, primeramente eliminando los días que tenían valores únicamente en la noche, después eliminando todos los valores de noche y efectuando el cálculo con los datos exclusivamente de día (7:00 a 18:00 horas), esto es posible ya que como la relación de Bowen nace del balance de energía, los componentes de esta metodología están expresadas en términos de energía, y durante la noche, cuando la radiación neta y el Flujo de calor de suelo son negativos, los resultados aparecen como una evapotranspiración negativa, lo cual no es cierto totalmente, ya que realmente representa una escasa o nula demanda evaporativa de la atmósfera. Aun así, eliminando los datos nocturnos, los valores que se obtuvieron con Bowen, no fueron confiables, ya que en varios días se tuvieron valores diarios negativos de  $\lambda E$  y con cambios muy bruscos en su comportamiento de un día a otro (Figura 1), además, su correlación con la  $E_t$  estimada con los modelos evaluados fue muy baja (varió de 0.19 con Penman-Monteith a 0.36 con Makkink), incluso con la Ecuación de Balance la correlación apenas fue de 0.35. Por ello, se tomó la decisión de obtener la evapotranspiración del cultivo ( $E_{tr}$ ) con la Ecuación de Balance (dato medido) y con datos



exclusivamente de día. Otra anomalía que se detectó una vez capturados los datos, fue que el sensor de Radiación Solar instalado en el campo de estudio en ningún momento funcionó adecuadamente, por lo que el valor de esta variable se tomó para las mismas fechas, de la estación instalada en el block 910.

Aparentemente, trabajar con micrometeorología reviste un especial cuidado y atención, ya que fácilmente pueden presentarse fallas en los equipos y/o sensores, pues como en la presente investigación, otros autores han tenido dificultades de este tipo, al grado de tener incluso que cambiar la metodología utilizada (Higuera, 1996; Garatuza Payan et al., 1998; Leue, 1998).

## **IV.2. Factor de proporcionalidad de la información**

Para obtener la Etr con la Ecuación de Balance teniendo Radiación neta ( $R_n$ ) y el flujo de calor de suelo ( $G$ ) solo se requiere calcular primeramente el flujo de calor sensible ( $H$ ) con la ecuación siguiente:

$$H = \rho C_p \sigma t v^* \text{ (deBruin, 1994)}$$

Como en este caso particular se tenían dos juegos de valores medidos de Temperatura y  $\sigma t$  a diferente altura, se aplicó la fórmula de proporcionalidad o representatividad ( $F$ ), para el tamaño de fetch empleado (250 m), las dos alturas de sensor (1.02 y 3.58 m) y la altura del cultivo a través de su desarrollo (30 - 60 cm), encontrando que en la mejor de las circunstancias, efectuar los cálculos con los valores obtenidos de la altura superior, nos da una representatividad del área medida de solo 0.81, mientras que efectuar los cálculos con los valores obtenidos de la altura inferior nos da una representatividad del área de entre 0.96 y 0.98 (Tabla 1 y Figura 2) motivo por el cual se tomó la decisión de utilizar los valores medidos a 1.02 m de altura.



Tabla 1. Representatividad del área que tienen los datos medidos a dos alturas de sensor para un fetch de 250 metros.

Altura del cultivo (cm)	Altura del sensor (m)	
	1.02	3.58
30	0.96	0.75
40	0.97	0.77
45	0.97	0.78
50	0.98	0.79
55	0.98	0.80
60	0.98	0.81

#### **IV.3. Correlación de la Et medida con los componentes de la ecuación de balance y con variables climatológicas**

Al Analizar la información obtenida con la Ecuación de Balance también se observan cambios bruscos en el comportamiento día a día, pero al correr la correlación entre el valor medido y los componentes de la ecuación de balance, se obtuvo una correlación de 0.96 para la Radiación neta, de -0.75 para el Flujo de Calor del Suelo y de 0.48 para el Flujo de Calor Sensible, esto es posible apreciarlo en la Figura 3. Por otra parte la correlación con Radiación solar fue de 0.91 (Figura 4). Otra correlación considerable fue: 0.74 con la temperatura del aire.

#### **IV.4. Comparación entre la Etr diaria con datos instantánea y la Etr diaria con datos promedio**

Al comparar la evapotranspiración real diaria para cada mes, obtenida como promedio de los valores instantáneos, con el valor diario obtenido con el promedio diario de las variables climatológicas, se encontraron diferencias considerables en algunos meses (>5%) entre ambas formas de obtener el valor diario, llegando eventualmente en algunos días a valores de 12% (Figura 5, Tablas 2,3 y 4).







Tabla 2. Evapotranspiración diaria en chile bell, medida y estimada con datos climatológicos instantáneos, en el Valle del Yaqui, Sonora.

Período (# días)	Evapotranspiración promedio diaria ( $W\ m^{-2}$ )						
	Ec. Bal.	P	P T orig.	P T yaq.	P-M	Sh	M
Enero (12)	97.2	210.4	155.4	165.9	179.4	180.4	144.3
Febrero (23)	146.2	245.3	201.3	211.4	190.7	191.7	188.4
Marzo (21)	227.2	331.7	283.0	292.5	271.4	272.8	232.4
Abril (14)	293.6	413.0	360.2	369.1	331.0	332.8	287.9
Total (70)	191.6	298.7	249.7	259.5	241.0	242.3	231.9

Tabla 3. Evapotranspiración diaria en chile bell, medida y estimada con datos climatológicos promedio diario , en el Valle del Yaqui, Sonora.

Período (# días)	Evapotranspiración promedio diaria ( $W\ m^{-2}$ )						
	Ec. Bal.	P	P T orig.	P T yaq.	P-M	Sh	M
Enero (12)	106.1	199.5	149.5	160.0	171.1	171.8	139.0
Febrero (23)	154.9	259.5	205.2	215.3	212.7	213.6	192.6
Marzo (21)	234.9	320.4	275.7	285.3	262.2	263.3	226.5
Abril (14)	300.1	402.3	353.8	362.7	321.5	323.1	282.5
Total (70)	199.6	296.0	246.5	256.3	242.2	243.2	211.6

Tabla 4. Diferencia promedio diario entre la evapotranspiración obtenida con datos instantáneos y con datos promedio diario en chile bell, en el Valle del Yaqui, Sonora.

Período (# de días)	(Et (promedio)-Et (instantáneo)) / Et (instantáneo) x 100 (W m <sup>-2</sup> )						
	Ec. Bal.	P	P T orig	P T yaq.	P-M	Sh	M
Enero (12)	9.3	-5.2	-3.9	-3.6	-4.7	-4.8	-3.7
Febrero (23)	6.1	6.1	2.0	1.9	11.8	11.7	2.3
Marzo (21)	3.5	-3.4	-2.6	-2.5	-3.4	-3.5	-2.5
Abril (14)	2.2	-2.6	-1.8	-1.7	-2.9	-2.9	-1.9
Total (70)	5.1	-0.4	-1.2	-1.1	1.5	1.4	-1.0
Máxima *	12.5	14.5	2.9	2.7	22.8	22.7	4.0
Mínima *	1.0	-7.1	-5.1	-4.7	-7.8	-7.9	-4.7

\* Máxima y Mínima diferencia que se presentó durante todo el período

#### IV.5. Comparación entre la Et diaria estimada con los modelos con datos instantáneos y la estimada con los modelos con datos promedio

Se comparó la Et diaria estimada con los modelos en estudio en la misma forma que la Etr, encontrando que los modelos que presentan la menor variación promedio diaria entre ambas formas de obtener la evapotranspiración diaria fueron: Priestley-Taylor (original y Yaqui) y Makkink, con diferencias menores a 4 % entre ambas formas de estimar la Et (Tablas 2, 3 y 4, Figuras 6-8). Indistintamente en todos los modelos durante el mes de Febrero, el valor estimado con los datos promedios diarios es mayor al estimado con los datos instantáneos (Tablas 2,3 y 4, Figuras 6-11), siendo en este mes en el que tanto el modelo de Shuttleworth como el de Penman-Monteith presentan las mayores diferencias, entre el valor estimado con datos instantáneos y el estimado con datos promedio diario con 11.7 y 11.8 % respectivamente, aunque eventualmente alcanzaron valores superiores a 20 %. (Tablas 2,3 y 4, Figuras 9 y 10). La explicación que se encontró al respecto y acorde con Shuttleworth, 1992 quien indica que













preferentemente el valor de déficit de presión de vapor debe obtenerse mediante el promedio de varias observaciones en el día, de otra manera pueden tenerse errores en dicho valor de hasta 30 %, especialmente en regiones de medio ambiente árido donde el ciclo diario de temperatura es muy amplio. En el presente estudio, la temperatura promedio y la temperatura máxima durante el mes de Febrero fue generalmente menor (Figura 12 y 13) y ello afectó fuertemente en la obtención tanto de la presión de vapor a saturación, como del gradiente de presión de vapor y de la diferencia de presión de vapor (Figuras 14-16).

Acorde con Shuttleworth, 1992, y considerando que el valor diario obtenido mediante el promedio de varias observaciones durante el día, es el valor más real para ese día, es posible y adecuado el uso de los modelos de Priestley-Taylor (original y yaqui) y el de Makkink, con valores promedio diario, ya que presentan mínimas diferencias con respecto al valor obtenido como promedio diario de varias observaciones en el día, y resulta más fácil y práctico su uso, ya que requieren de menos variables climatológicas a medir y parámetros a calcular en el día y especialmente para el modelo de Makkink, donde la Radiación solar puede obtenerse mediante información vía satélite acorde a lo realizado por Garatuza y van den Gerg, 1993 y Garatuza et al, 1999. Además de que recientemente Ruelas, 2000, ha calibrado el algoritmo para el uso de Radiación solar vía satélite para el cálculo de evapotranspiración con el modelo de Makkink en el Valle del Yaqui.

#### **IV.6. Comparación entre la Etr (Ecuación de Balance) y la Et (modelos)**

La comparación de la Etr (medida) con la Et (estimada), indica que la mayor correlación la alcanzan los modelos de Priestley-Taylor (original y yaqui), con 0.99 (Figuras 17 y 18), siguiendo en orden descendente, Penman, Penman-Monteith y Shuttleworth, con 0.94 y Makkink con 0.93 respectivamente (Figuras 19-22). Para corroborar la semejanza de los valores medidos con los estimados, se calculó el error cuadrático medio (RMSE) entre el valor medido y el estimado con























cada uno de los modelos, encontrando que el modelo de Makkink es el que menor valor de RMSE presente, con  $36.7 \text{ W m}^{-2}$ , siguiendo, Penman-Monteith, Shuttleworth, Priestley-Taylor (original) y Priestley-Taylor (yaqui), con 56.4, 57.4, 57.8 y  $67.3 \text{ W m}^{-2}$  respectivamente y el que mayor RMSE tiene es el modelo de Penman con  $109.1 \text{ W m}^{-2}$  (Tabla 5).

Tabla 5. Error cuadrático medio (RMSE) entre el valor de Etr (medido) y el valor de Et (estimado).

Forma de estimar Et	RMSE entre Etr y Et ( $\text{Wm}^{-2}$ )					
	Penman	PT-orig	PT-yaqui	Pen-mont	Shuttlew	Makkink
Instantaneo	110.4	59.3	68.9	55.4	56.5	36.4
Diario	107.9	56.3	65.8	57.5	58.4	36.9
Promedio	109.1	57.8	67.3	56.4	57.4	36.7

Observando las figuras 17 a la 22, puede apreciarse que todos los modelos excepto Makkink, sobreestiman el valor de Etr, mientras que este modelo, aunque con cierta dispersión, en todo momento presenta valores mas cercanos o alrededor de la Etr.

Algo que vale la pena destacar, es la gran similitud en el comportamiento de los modelos de Penman-Monteith y el de Shuttleworth (Tablas 2-5, Figuras 9 y 10 y Figuras 20 y 21), tienen la misma correlación con la Etr medida y el RMSE es muy parecido, lo cual es obvio, ya que el modelo de Shuttleworth, como se explicó en capítulo anterior, nace del modelo de Penman-Monteith, pero con parámetros adecuados a un cultivo de referencia. Y en la presente investigación el modelo de Penman-Monteith se aplicó para un cultivo de referencia.

#### **IV.7. Determinación de los coeficientes de cultivo Kc en chile bell**

Conociendo la Etr medida con la Ecuación de Balance con los datos climatológicos promedio diario, y con las estimaciones de Et efectuadas con cada

uno de los modelos de la misma manera, se obtuvieron los coeficientes de cultivo kc diario para el cultivo de chile bell, cabe aclarar que con el valor diario, resulta muy difícil apreciar una tendencia, por lo que posteriormente se calculó un kc para cada decena del mes (Tabla 6, Figura 23).

Tabla 6. Coeficiente de cultivo (kc) decenal para chile bell con varios modelos de evapotranspiración en el Valle del Yaqui, Sonora.

Decena	Coeficiente de desarrollo (kc)					
	Penman	PT-orig	PT-yaqui	Pen-mont	Shuttlew	Makkink
2ª Ene	0.58	0.71	0.66	0.67	0.67	0.75
3ª Ene	0.53	0.70	0.66	0.62	0.61	0.77
1ª Feb	0.60	0.78	0.74	0.71	0.71	0.86
2ª Feb	0.61	0.76	0.72	0.74	0.74	0.79
3ª Feb	0.59	0.74	0.71	0.73	0.72	0.79
1ª Mar	0.70	0.84	0.81	0.86	0.86	0.97
2ª Mar	0.77	0.86	0.84	0.94	0.94	1.09
3ª Mar	0.72	0.89	0.87	0.86	0.86	1.19
1ª Abr	0.74	0.84	0.82	0.93	0.93	1.04
2ª Abr	0.77	0.87	0.85	0.95	0.94	1.11

Cuando se inició la captura de datos (19 Enero de 1998), el cultivo se encontraba en etapa de floración y amarre y crecimiento de frutos y al suspenderse la captura de información (14 de Abril de 1998), el cultivo se encontraba en plena producción y cosecha y apenas iniciaba la maduración, ya que generalmente el corte de chile se efectuó antes de iniciar la maduración (sin color) y solo uno o dos cortes se habían efectuado con chile de color en las últimas dos semanas. Con la finalidad de efectuar un comparativo entre los coeficientes de desarrollo para chile que se reportan en la literatura y los obtenidos en esta investigación, se realizó una adecuación a dichos reportes (Figura 24, Tabla 7) donde Castilla et al., 1984 citado por Nuñez et al., 1996, trabajando con dos variedades de Chile cultivados





en invernadero y la propuesta que hace Doorenbos y Pruitt, 1986 citado por Nuñez et al., 1996 y Doorenbos y Pruitt, 1984 para chiles en condiciones extensivas de cultivo. En todos los kc reportados es posible apreciar un comportamiento típico del kc, con una sección de subida o incremento del valor, una sección estabilizada con el máximo valor de kc y una sección de decremento del kc. Comparativamente en la presente investigación en todos los modelos de evapotranspiración se aprecia también una sección de incremento del kc, una sección aunque algo irregular que puede considerarse de estabilidad (2<sup>da</sup> decena de marzo en adelante), pero no se aprecia la sección de decremento (Tabla 6 y Figura 23). Esto se debe a que la captura de información se suspendió la segunda decena de Abril y acorde con las adecuaciones realizadas en esta investigación a la información que reportan Doorenbos y Pruitt, 1986, citado por Nuñez et al., 1996 y con Doorenbos y Pruitt, 1984, aun se encontraba en el período de estabilidad del kc que corresponde a la etapa de máximo crecimiento de fruto y previo a la maduración, donde se alcanza el máximo valor de kc y es posible que dicho período de estabilidad se haya retrasado, como resultado de haber estado efectuando la cosecha de chile en verde casi en todo momento.

Comparativamente, los kc obtenidos con los modelos en esta investigación tienen más semejanza a los reportados en la literatura para condiciones extensivas de cultivo, y únicamente los kc obtenidos con los modelos de Makkink, Penman-Monteith y Shuttleworth, alcanzan en la etapa de estabilidad a los reportados para esas condiciones de cultivo (Figura 25)

#### **IV.8. Validación de los coeficientes de cultivo kc en Chile Bell.**

Con la finalidad de validar los coeficientes de desarrollo obtenidos, se comparó la suma decenal de la Etr observada con los datos climatológicos instantáneos con la Etr estimada al multiplicar la suma decenal de la Et estimada con los modelos con datos climatológicos promedio por el kc decenal obtenido también con los datos climatológicos promedio, encontrando que con todos los modelos se obtienen



estimaciones muy precisas de la evapotranspiración real del cultivo, obteniendo diferencias promedio menores a  $10 \text{ W m}^{-2}$ , lo cual representa menos de  $0.4 \text{ mm d}^{-1}$  (Tablas 8 y 9), destacan los modelos de Priestley-Taylor (original y yaqui) y Makkink con menos de  $0.1 \text{ mm d}^{-1}$ .

Tabla 7. Coeficientes de cultivo (kc) para Chile, reportados en la literatura, con relación a las fechas en que se efectuó la presente investigación.

Edad del cultivo (ddt)	Decena	Invernadero (Bellamy) <sup>2</sup>	Invernadero (Lamuyo) <sup>2</sup>	Cultivo extensivo <sup>3</sup>	
				Mínimo <sup>1</sup>	Máximo <sup>1</sup>
62-71	2ª Ene	0.81	0.70	0.88	1.03
72-82	3ª Ene	0.95	0.79	0.95	1.10
83-92	1ª Feb	1.05	0.99	0.95	1.10
93-102	2ª Feb	1.10	1.10	0.95	1.10
103-110	3ª Feb	1.10	1.10	0.95	1.10
111-120	1ª Mar	1.10	1.10	0.95	1.10
121-130	2ª Mar	1.10	1.06	0.95	1.10
131-141	3ª Mar	1.05	0.95	0.88	1.00
142-151	1ª Abr	1.00	0.90	0.74	0.82
152-161	2ª Abr	1.00	0.80	0.66	0.71

<sup>1</sup> Dependiendo de las condiciones de velocidad del viento y humedad relativa

<sup>2</sup> Castilla et al., 1984; <sup>3</sup> Doorenbos y Pruitt, 1986, citado por Nuñez et al 1996.

Tabla 8. Evapotranspiración real diaria observada en Chile Bell con datos climatológicos instantáneos y evapotranspiración real estimada con varios modelos, con datos climatológicos promedio, en el valle del Yaqui, Sonora.

Decena	Evapotranspiración real $W m^{-2}$						
	Ec. Bal.	P	P T orig	P T yaq.	P-M	Sh	M
2ª Enero	90.4	98.9	93.2	93.3	92.5	92.4	92.9
3ª Enero	98.6	108.1	100.4	100.5	101.5	101.5	101.6
1ª Febrero	142.2	151.4	148.3	148.0	153.8	153.7	149.8
2ª Febrero	131.8	141.9	139.2	137.9	144.9	144.9	137.9
3ª Febrero	166.8	174.8	171.9	171.7	180.8	180.7	172.3
1ª Marzo	202.0	210.3	203.3	203.1	202.2	202.1	203.7
2ª Marzo	244.9	254.6	246.5	246.6	247.1	247.0	247.1
3ª Marzo	301.4	307.7	300.8	300.9	300.9	300.7	300.4
1ª Abril	284.9	293.0	285.5	285.6	284.9	284.9	285.4
2ª Abril	315.5	320.8	315.6	315.7	313.5	313.4	315.6

Tabla 9. Diferencia entre la Etr observada en Chile Bell con datos climatológicos instantáneos y la Etr estimada con varios modelos con datos climatológicos promedio, en el Valle del Yaqui, Sonora.

Decena	Etr (i) observada – Etr estimada					
	Penman	PT-orig	PT-yaqui	Pen-mont	Shuttlew	Makkink
2ª Ene	-8.5	-2.8	-2.9	-2.1	-2.1	-2.5
3ª Ene	-9.5	-1.8	-1.9	-2.9	-2.9	-3.1
1ª Feb	-9.2	-6.1	-5.7	-11.6	-11.5	-7.6
2ª Feb	-10.2	-7.4	-6.1	-13.1	-13.1	-6.1
3ª Feb	-8.0	-5.1	-5.0	-14.0	-13.9	-5.5
1ª Mar	-8.3	-1.3	-1.1	-0.2	-0.1	-1.7
2ª Mar	-9.7	-1.7	-1.7	-2.2	-2.2	-2.2
3ª Mar	-6.3	0.6	0.4	0.5	0.7	1.0
1ª Abr	-8.1	-0.6	-0.7	-0.1	0.0	-0.6
2ª Abr	-5.3	-0.1	-0.2	2.0	2.1	-0.2
Promedio	-8.3	-2.6	-2.5	-4.4	-4.3	-2.8

Doorembos y Pruitt, 1984, analizando los modelos de Blaney-Criddle, Radiación (Makkink), Penman y Tanque evaporímetro, propone el uso de un solo coeficiente de desarrollo indistintamente del método de evapotranspiración empleado y dicho coeficiente varía solo en función de la velocidad del viento y de la humedad relativa. En la presente investigación y con los resultados obtenidos en la validación de los  $k_c$ , queda de manifiesto y acorde con Garatuza et al., 1998, que deben emplearse los  $k_c$  adecuados al modelo de evapotranspiración que se prefiera utilizar.

## V. CONCLUSIONES

1. Con base en los resultados obtenidos en esta investigación, se concluye que tanto el modelo de Priestley-Taylor (original y yaqui) como el modelo de Makkink, además de confiables para determinar la evapotranspiración diaria en chile bell, son modelos de fácil implementación, debido a que requieren de poca información. Especialmente el modelo de Makkink, ya que solo requiere la temperatura promedio diaria y la radiación solar, con la ventaja de que puede ser obtenida de varias formas por lo que sería fácil su implementación a nivel parcelario y regional en el Valle del Yaqui y probablemente otras zonas agrícolas del país, con características similares de alta luminosidad.
2. Con base en las experiencias tenidas en el presente trabajo de investigación así como en los anteriores, al trabajar con micrometeorología, se concluye que debe tenerse especial atención en el aspecto de supervisión e inspección del buen funcionamiento de todos y cada uno de los sensores y componentes de la(s) estación(es) con las que se está trabajando para evitar fallas, pérdida de datos, errores y contratiempos.
3. Dadas las altas correlaciones obtenidas con las principales variables climatológicas, al aplicar la Ecuación de Balance, se concluye que esta metodología es adecuada para medir la evapotranspiración diaria en chile bell en el valle del Yaqui, Sonora, exclusivamente con datos instantáneos, ya que con datos promedio diario puede tenerse diferencias o errores de hasta 12 % durante el día.
4. Todos los modelos comparados en esta investigación para estimar la evapotranspiración potencial o de referencia diaria, presentaron una buena correlación (0.95 - 0.99) con la evapotranspiración real diaria observada y

resultaron confiables para estimar la evapotranspiración real diaria en el cultivo de chile bell en el valle del Yaqui, Sonora.

5. Con base en la diferencia porcentual entre la evapotranspiración real con datos instantáneos y la evapotranspiración estimada con los modelos con datos promedio diario, se concluye que los modelos que presentan mayor estabilidad para obtener la evapotranspiración potencial o de referencia con datos climatológicos promedio diario, son: Priestley-Taylor (original), Priestley-Taylor (yaqui) y Makkink.
6. Comparativamente, la evapotranspiración potencial o de referencia estimada con datos instantáneos y con datos promedio diario, con los modelos de Penman, Penman-Monteith y Shuttleworth, presenta variaciones diarias muy fuertes, debido a la forma de obtener el valor diario del déficit de presión de vapor (D).
7. Los coeficientes de cultivo ( $k_c$ ) obtenidos en esta investigación para chile bell, tienen un comportamiento muy similar en forma a los propuestos por Doorenbos y Pruitt, 1984 y Doorenbos y Pruitt, 1986 para chiles cultivados en forma extensiva, siendo los  $k_c$  obtenidos con los modelos de Makkink, Penman-Monteith y Shuttleworth, los que presentan valores más semejantes a los propuestos.
8. De la validación de los coeficientes propuestos como resultado de esta investigación, se concluye que todos los modelos tienen una aproximación tal que el error es menos de 0.4mm diarios para estimar la evapotranspiración real en el cultivo de chile bell, siendo los mas aproximados: Priestley-Taylor (yaqui), Priestley-Taylor (original) y Makkink con menos de  $0.1 \text{ mm d}^{-1}$ .

## VI. RECOMENDACIONES

1. Se recomienda para futuras investigaciones con este tipo de metodologías, contar con alguna metodología alternativa para implementar en caso de que falle la de mayor interés.
2. Indistintamente del modelo que se prefiera aplicar para estimar la evapotranspiración real, se recomienda que los coeficientes de desarrollo que se utilicen deben de ser los adecuados para dicho modelo.

## **ANEXOS**

## ANEXO A

Requerimiento de agua reportado para algunos cultivos.

Cultivo	Lámina (cm)	Autor
Trigo	30-45	Doorenbos y Pruitt, 1984
	36-45	De la Peña, 1987
	42-44	Palacios V. y Exevio, 1989
Maíz	40-75	Doorenbos y Pruitt, 1984
	30-45	Felix, 1996
	26-44	Palacios V. E. 1992
Algodón	55-95	Doorenbos y Pruitt, 1984
Sorgo	30-65	Doorenbos y Pruitt, 1984
Semillas Oleaginosas	30-60	Doorenbos y Pruitt, 1984
Tomate	30-60	Doorenbos y Pruitt, 1984
Vegetales	25-50	Doorenbos y Pruitt, 1984

## ANEXO B

Composición química y valor nutritivo de los chiles dulces y picantes por 100 gr de producto comestible.

Composición	Chiles dulces <sup>1 y 2</sup>	Chiles picantes <sup>1</sup>
Agua (%)	92-94	
Materia seca (%)	6-8	34.6
Energía (kcal)	22-26	116.0
Proteína (gr)	1.3	6.3
Fibra (gr)	1.4	15.0
Calcio (mg)	9-12	86.0
Hierro (mg)	0.7-0.9	3.6
Carotenos (mg)	1.8	6.6
Tiamina (mg)	0.07-0.08	0.37
Riboflavina (mg)	0.08	0.51
Niacina (mg)	0.5-0.8	2.5
Vitamina C (mg)	103-128	96.0
Valor nutritivo medio (ANV)	6.61	27.92
ANV por 100 gr de materia seca	82.6	80.7

Fuentes: <sup>1</sup> Grubben 1977. Citado por Nuñez et al., 1996; <sup>2</sup> OCEANO, 1999.

## ANEXO C

Necesidades de agua reportadas para el cultivo de chile

Autor	Requerimiento de agua (m)	Observaciones
Nuñez et al 1996	0.8-1.0	Invernadero
Bosland et al 1994	1.20- 1.50	
Matta and Cotter 1994	0.60-0.75	6-12 riegos, en surco
Batal and Smittle 1981	0.36-0.4	Aspersión
Jimenez V. 1999	0.46	Goteo
Potizek et al 1999	0.83-1.04	Cintilla
Gómez et al 1998	0.7	10 riegos livianos

## ANEXO D

Requerimientos de los principales nutrientes para el cultivo de Chile

Tecnología de Producción	Requerimiento (kg / ha)		
	Nitrógeno	Fósforo	Potasio
Temporal	40-80	40-80	80-160
Riego (extensivo)	80-160	80-160	160-320
Invernadero	180-300	160-220	200-400

Fuente: Enciclopedia Práctica de la Agricultura y la Ganadería. 1999. Editorial OCEANO.

## BIBLIOGRAFÍA

Aguilera, C. M. y Martínez E.R. 1996. Relaciones Agua Suelo Planta Atmósfera. Cuarta Edición. Universidad Autónoma de Chapingo. Chapingo, México.

Allen, R. G. 1986. A Penman for all Season. J. Irrig. Drain. Eng., Am. Soc. Civ. Eng. 112 (4): 348-368.

Allen, R. G., Jensen, M. E., Wright, L. and Burman, R. D. 1989. Operational Estimates of Reference Evapotranspiration. Agron. J., 81, 650-662.

Arciniega, R. J. 1999. Nutrición vegetal. En: memorias del II Curso Nacional de Fertirrigación. Campo Experimental Valle de Culiacán. Culiacán, Sinaloa 18-20 de Febrero.

Batal, K. M. and Smittle, D. A. 1981. Response of Bell Pepper to Irrigation, Nitrogen, and Plant Population. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 106(3): 259-262.

Bosland, P. W., Bailey, A. L. and Iglesias-Olivas J. 1996. *Capsicum* Pepper Varieties and Calsification. Coperative Extension Service, Circular 530, College of Agriculture and Home Economics, New Mexico State University.

Bosland, P. W., Bailey, A. L. and Cotter D. J. 1994. Growing Chiles in New Mexico. Coperative Extension Service, Guide H-230, New Mexico State University.

Burgueño, H., Gomez, R. J. y Montoya, M. I. 1995. La fertigación en Cultivos Hortícolas con Acolchado Plástico. Vol. 2. BURSAG.

Cámara, D. O. A. 1991. El Agua Residual y su Aprovechamiento en el Riego Agrícola en el Valle del Yaqui, Sonora. ITSON-DIEP. vol. (1):41-51.

CAMPBELL SCIENTIFIC. 1995. Bowen Ratio Instrumentation, Instruction Manual. Logan, Utah, USA.

Carter, A. K. 1994. Stand Establishment of Chile. Cooperative Extension Service, Guide H-238, College of Agriculture and Home Economics, New Mexico State University.

Cervera, L. E. y Garatuza, P. J. 1993. Ecuación de Priestley y Taylor Para Calcular Evapotranspiración en el Valle del Yaqui. ITSON-DIEP. vol. 1(4):32-43.

Dabdoub, C. 1980. Breve historia del Valle del Yaqui. Editorial Edomex. México

DeBruin, H. A. R. 1987. From Penman to Makkink, In: Evaporation and Weather, Proceeding and information, No. 39. TNO Committee on Hydrological Research, pp5-33.

DeBruin, H. A. R. 1994. Analytic solution of the equations governing the temperature fluctuation method. Boundary-Layer Meteorology 68: 427-432.

De la Peña, I. 1987. Manual del Uso y Manejo del Agua de Riego, Distrito de Riego 148, Cajeme, Patronato Para la Producción y Extensión Agrícola y Ganadera, Cd. Obregón, Sonora.

Deli, J. And Tiessen, H. 1969. Interacction of Temperature and Ligth Intensity On Flowering of *Capsicum frutescens* var *grossum* cv. 'California Wonder'. J. Amer. Coc. Hort. Sci. 94(4): 349-351.

DeWitt, D. and Bosland, P. W. 1996. Peppers of the World—an Identification Guide. Ten Speed Press, Berkeley, CA.

Dickerson, G. W. 1994. Growing Peppers in New Mexico Gardens. Cooperative Extension Service, Guide H-240, College of Agriculture and Home Economics, New Mexico State University.

Doorenbos, J. and Pruitt, W. O. 1984. "Crop Water Requirements" Irrigation and drainage Paper, 24, FAO, Rome.

Felix, S. J. A. 1996. Estimación de la Evapotranspiración en Maíz (Sea mayz, L.) y Predicción del Rendimiento en el Valle del Yaqui, Sonora. tesis de Maestría, Instituto Tecnológico de Sonora. Cd. Obregón, Sonora.

Garatuza, P. J., Watts, C. J. y Cervera, L. E. 1992. Estimación de evapotranspiración potencial en el Valle del Yaqui. (Potential Evapotranspiration Estimates in the Yaqui Valley). XII Congreso de Hidraulica. Puerto Vallarta, México.

Garatuza, P. J. y van den Berg, A. R. 1993. Estimación de Radiación solar con imágenes de satélite. Memoria del VI Simposio Latinoamericano de Percepción Remota. Colombia. SELPER.

Garatuza, P. J., Shuttleworth, W. J., Encinas, D., Mcneil, D. D., Stewart, J. B., deBruin, H. and Watts, C. J. 1998. Measurement and modeling evaporation for irrigated crops in north-west Mexico. *Hidrol. Process.* 12, 1397-1418.

Garatuza, P. J., Stewart, J. B., deBruin, H., Watts, C. J. y Rodríguez, J. 1999. Estimación de Evaporación y Radiación solar en el Valle del Yaqui, Sonora, Usando datos de Satélite. *Revista Interdisciplinaria de Ciencia y Tecnología del Agua.*

Garcia, E. 1981. Modificaciones al sistema de clasificación de Koppen. Offset Larios, S.A. México, D.F.

Gómez, G. S., Mercado, G. J., Díaz, O. B. E., Guevara, L. J., Valenzuela, S. C., Chávez, D. J. A., Pijoan, A. P. y Sepulveda, B. J. I. 1998. Paquetes Tecnológicos Para el Area de Influencia del Campo Experimental "Costa de Ensenada". INIFAP-SAGAR-CIRNO- Campo Experimental "Costa de Ensenada", pp. 19.

González, M. A. y Hernández, L. B. A. 1999. Evapotranspiración. En: Memoria del II Curso Nacional de Fertirrigación. INIFAP-FUNDACION PRODUCE Sinaloa, Campo Experimental Valle de Culiacán del 18 al 20 de febrero.

Grace, J. 1978. Plant response to wind. Academic press, New york.

Grubben, G. J. H. 1977. Tropical Vegetables and Their Genetics Resources. IBPGR. Rome.

Hanks, R. J. and Ashcroft, G. L. 1980. Applied Soil Physics. Soil Water and Temperature Applicationes. Springer-Verlag ed. Berlin-New York.

Hansen, V. E., Israelssen, O. W. and Stringham, G. L. 1980. Irrigation Principles and Practices, Fourth Edition. Johon Wiley & Sons. New York-Chichester-Brisbane-Toronto.

Higuera, S. V. M. 1996. Determinación de la evapotranspiración real del Maíz (Zea mays) por medio de la relación de Bowen, en el Valle del Yaqui, Ciclo Otoño-Invierno 1995-1996. Tesis de Licenciatura. Instituto Tecnológico de Sonora. Cd. Obregón, Sonora.

Hillel, D. 1972. Soil and Water, Physical Principles and Processes. Academic Press.

Houghton, J. T. 1977. The physics of atmospheres. Cambridge University Press. Cambridge-London-New York-Melbourne.

INIFAP. 1997. Producción de Plantula de Chile Jalapeño Bajo Invernadero. En: Tecnologías Llave en Mano, División Agrícola, Tomo I. INIFAP-SAGAR (Eds.)

Jensen, M. E., Burman, R. D. and Allen, R. G. 1990. Evapotranspiration and Irrigation Water requirements. ASCE. Manual and reports on Engineering Practis No. 70.

Jimenez, V. J. L. 1999. Evaluación de variedades de Chile bajo condiciones de fertirrigación en la Mixteca Oaxaqueña. En: IX Congreso Nacional de Irrigación, Simposio 1, Ingeniería de Riego. ANEI. Culiacán, Sinaloa, 27-29 de Octubre.

Kizer, M. A., Eliot, R. L. and Stone, J. F. 1990. Hourly ET Model Calibration with Eddy Flux and Energy Balance Data. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 116(1), 172-181

Leue, L. J. C. E. 1998. Medición de la evapotranspiración real en trigo (*triticum durum*) y evaluación de trece métodos de estimación bajo las condiciones agroecológicas del Valle del Yaqui, Sonora. Tesis de Licenciatura. Instituto Tecnológico de Sonora. Cd. Obregón, Sonora.

Linsley, R. K. y Franzinni, J. B. 1984. Ingeniería de los Recursos Hidráulicos. CECSA.

Marshall, T. J., Holmes, J. W. 1979. Soil physics. Cambridge University Press. Cambridge- London-New York-Melbourne.

Matta, F. B. and Cotter, D. J. 1994. Chile Production in North-Central New Mexico. Cooperative Extension Service, Guide H-225, College of Agriculture and Home Economics, New Mexico State University.

Möene, A. F. y Garatuza, P. J. 1992. Oportunidades para el uso de fórmulas de evapotranspiración simplificadas en el Valle del Yaqui, México. Memorias Técnicas, 3a. Conferencia Regional Panamericana. Tomo II, Vol. II, Mazatlán, Sin. México.

Núñez, V. F., Gil, O. R. y Costa, G. J. 1996. El Cultivo de Pimientos, Chiles y Ajies. Editorial Mundi-Prensa.

OCEANO. 1999. Enciclopedia Práctica de la Agricultura y la Ganadería. pp 627-629.

Ortiz, E. J. E. 2000. Manejo de la fertirrigación en cultivos anuales y hortícolas. Publicación Especial No. 7, Campo Experimental Valle del Yaqui. INIFAP PRODUCE-SAGAR.

Palacios, V. E. y Exevio, G. A. (1989) Introducción a la Teoría de la Operación de Distritos y Sistemas de Riego. Colegio de Postgraduados. Montecillos Edo. de México.

Palacios, V. E. (1992) ¿Porque, Cuando y Cuanto Regar? Para Lograr Mejores Cosechas. Manual Para Usuarios y Técnicos del Agua. En: Diplomado en el Uso Eficiente del Agua en Unidades de Riego Para el Desarrollo Rural. Centro de Hidrociencias, Colegio de Postgraduados, Montecillos, México. 20 de abril al 22 de mayo.

Potisek, T. M. C., Mendoza, M. S. M. y González, B. J. L. 1999. Producción de Chile jalapeño bajo riego por cintilla subsuperficial, en dos regímenes de humedad

y acolchado plástico. En: IX Congreso Nacional de Irrigación, Simposio 1, Ingeniería de Riego. ANEI. Culiacán, Sinaloa, 27-29 de Octubre.

Romo, G. J. R. y Arteaga, R. 1989. Meteorología Agrícola. Departamento de Irrigación, Universidad Autónoma de Chapingo. Chapingo, México.

Ruelas, V. M. A. 2000. Estimación del consumo de agua, en Trigo a nivel parcelario para dos módulos del valle del Yaqui. Tesis de Maestría en Ingeniería en Administración de Recursos Hidráulicos. Instituto Tecnológico de Sonora

SAGAR. 1998. Estadística de Producción del Cultivo de Chile. DDR No. 148 CAJEME.

Shuttleworth, W. J. 1993. Evaporation. En: Handbook of Hydrology. Editor, David R. Maidment. Editorial McGraw-Hill.

Smith, M. 1990. Draft Report of the expert Consultation on Revision of FAO Methodologies for Crop Water Requirements. FAO, Rome, pp. 45.

Stewart, J. B., deBruin, H. A. R., Garatuza-Payan, J., van den Berg, A. R., Cervera-Gomez, L., Domitsu-Kono, M., Osuna-Chavez, J. G. and Watts, C. J. 1994. 'PC based system to estimate hydrological variables in northwest Mexico using satellite data'. Institute of Hydrology, Wallingford.

Stewart, J. B., Watts, C. J., Rodriguez, J. C., De Bruin, H., van den Berg, A. R. and Garatuza, P. J. 1999. Use of satellite data to estimate radiation and evaporation for northwest Mexico. Agricultural Water Management, vol. 38: 181-193.

Stewart, M. G. 1980. Evapotranspiration From Vegetative Surfaces in Maine. Life Sciences and Agriculture Experiment Station and Land and Water Resource Center. University of Maine at Toronto. Boletín Técnico 97.

Unland, H. E., Ojeda, B. W. y Lemus, R. O. 1996. Calculo de la Evapotranspiración de Referencia Usando la Ecuación de Penman-Monteith. Comunicación Interna No 1. Coordinación de Tecnología de Riego y Drenaje. IMTA.

Valenzuela, V. J. M. y Guerrero, H. M. 2000. Tecnología de producción para hortalizas en el Valle del Yaqui, Sonora. Publicación Especial No. 7, Campo Experimental Valle del Yaqui. INIFAP PRODUCE-SAGAR.

Vilmorin, D. E. 1977. El cultivo del pimiento dulce tipo Bell. Editorial Diana. México.

Watts, C. J., Rodriguez, J. C., Garatuza, P. J., De Bruin, H. y Stewart, J. 1999. Estimación de evaporación y radiación solar en el valle del Yaqui, Sonora, usando datos de satélite. Ingeniería Hidráulica en México. Vol. XIV, Num. 3, Pags 45-53.

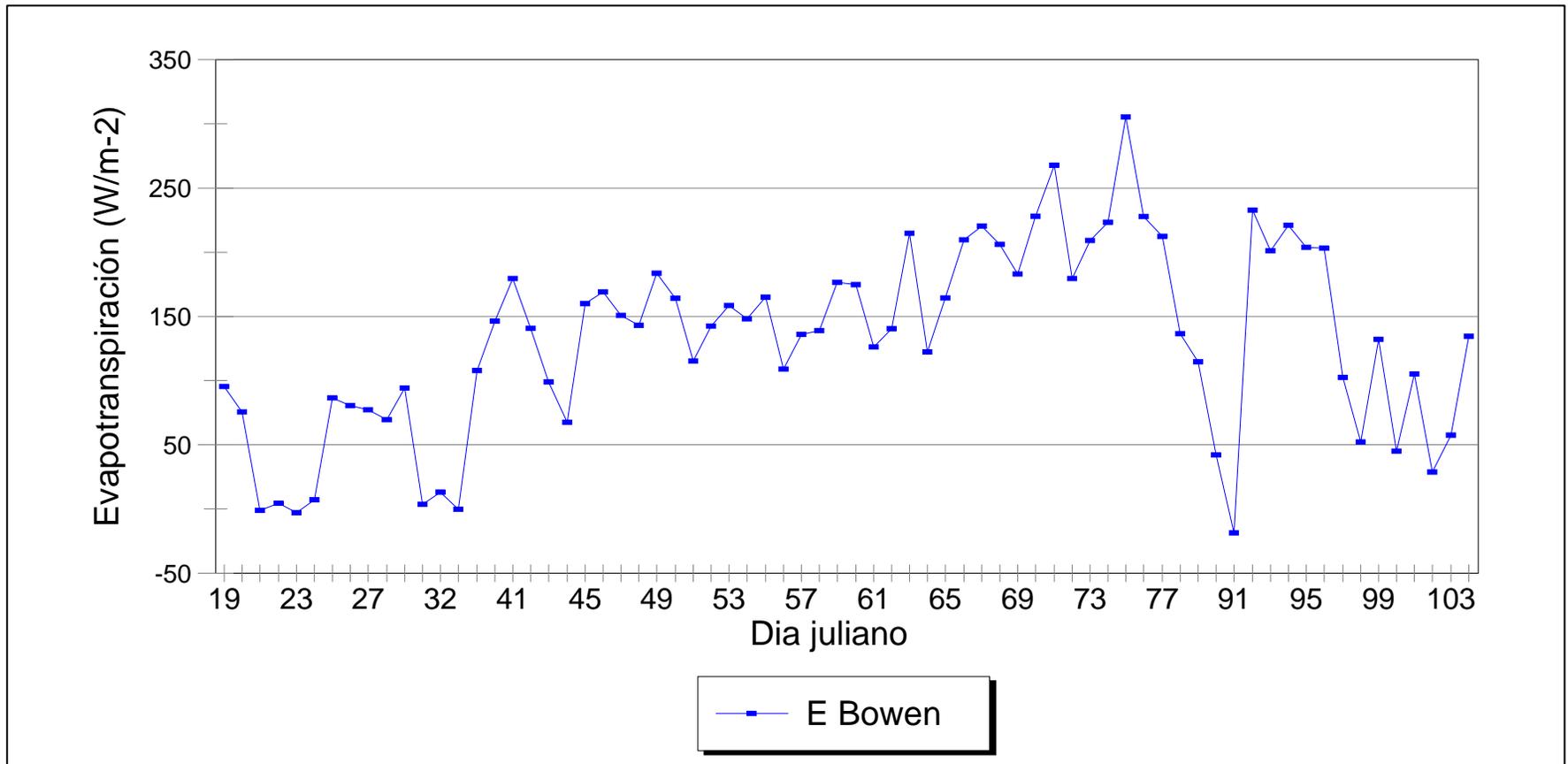


Figura 1. Evapotranspiración en chile bell, medida mediante la relación de Bowen, en el valle del Yaqui, Sonora,

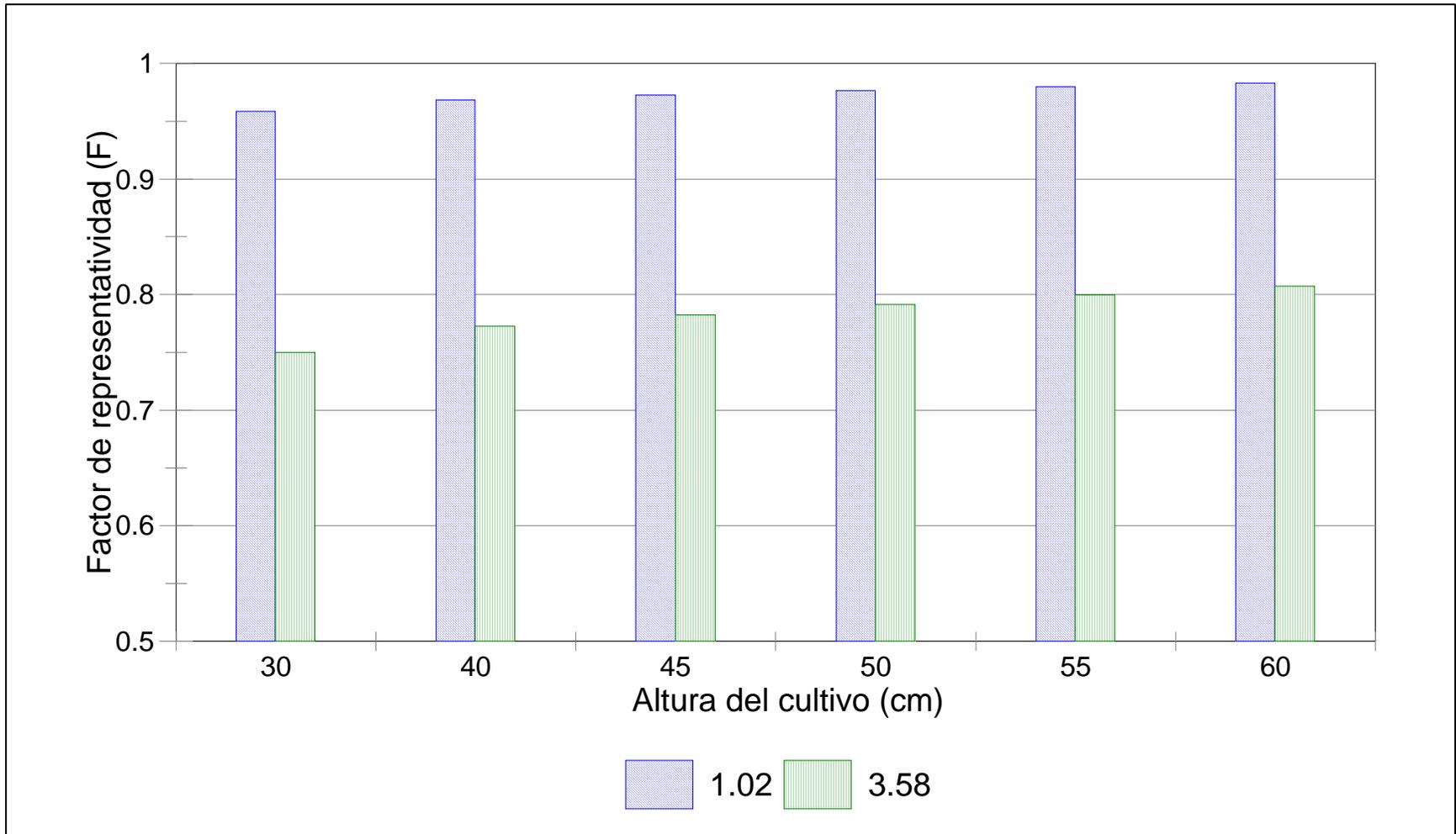


Figura 2. Representatividad de los datos medidos a dos alturas de sensor y para un fetch de 250 metros.

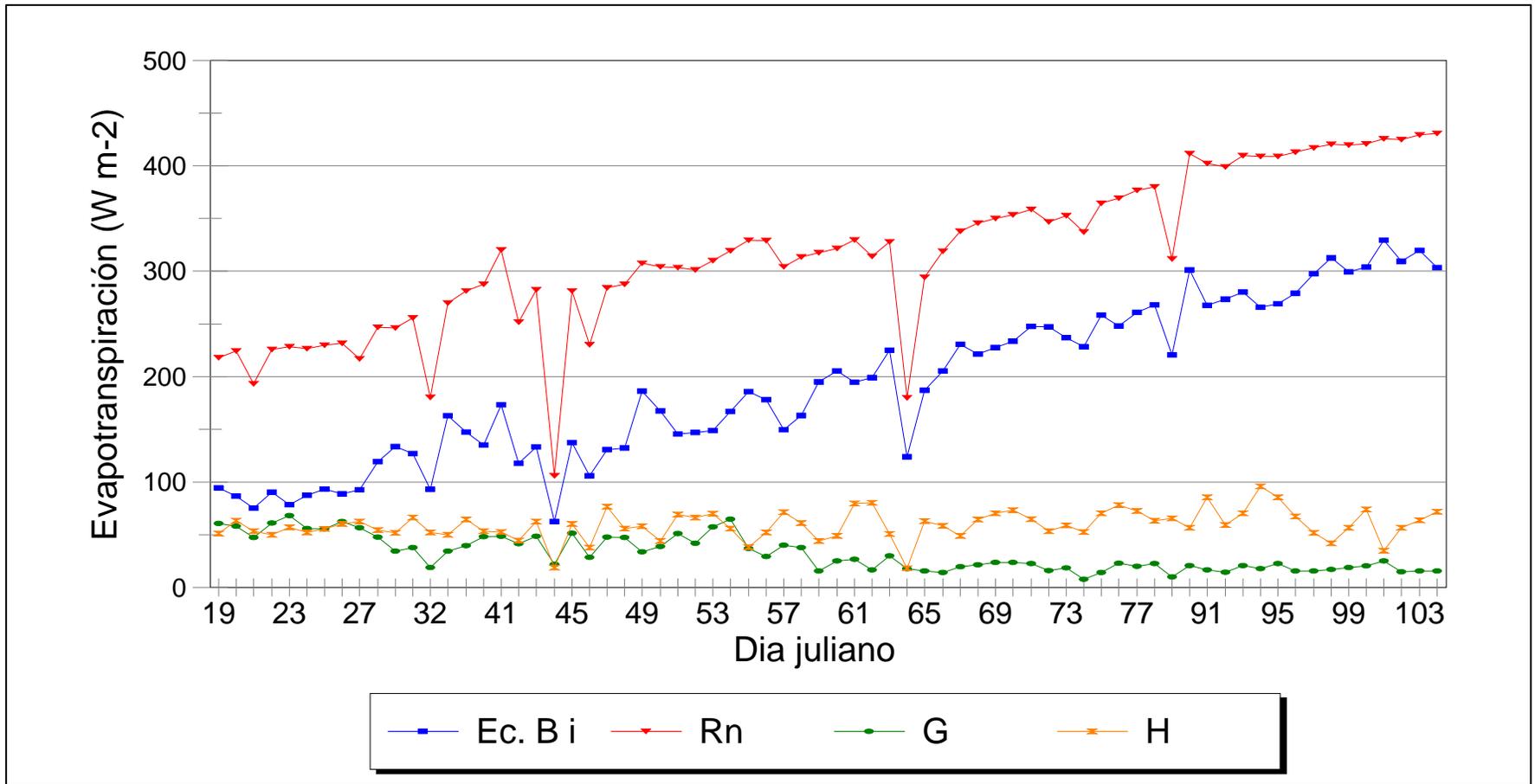


Figura 3. Evapotranspiración en Chile Bell medida con la ecuación de balance y sus componentes en el valle del Yaqui, Sonora.

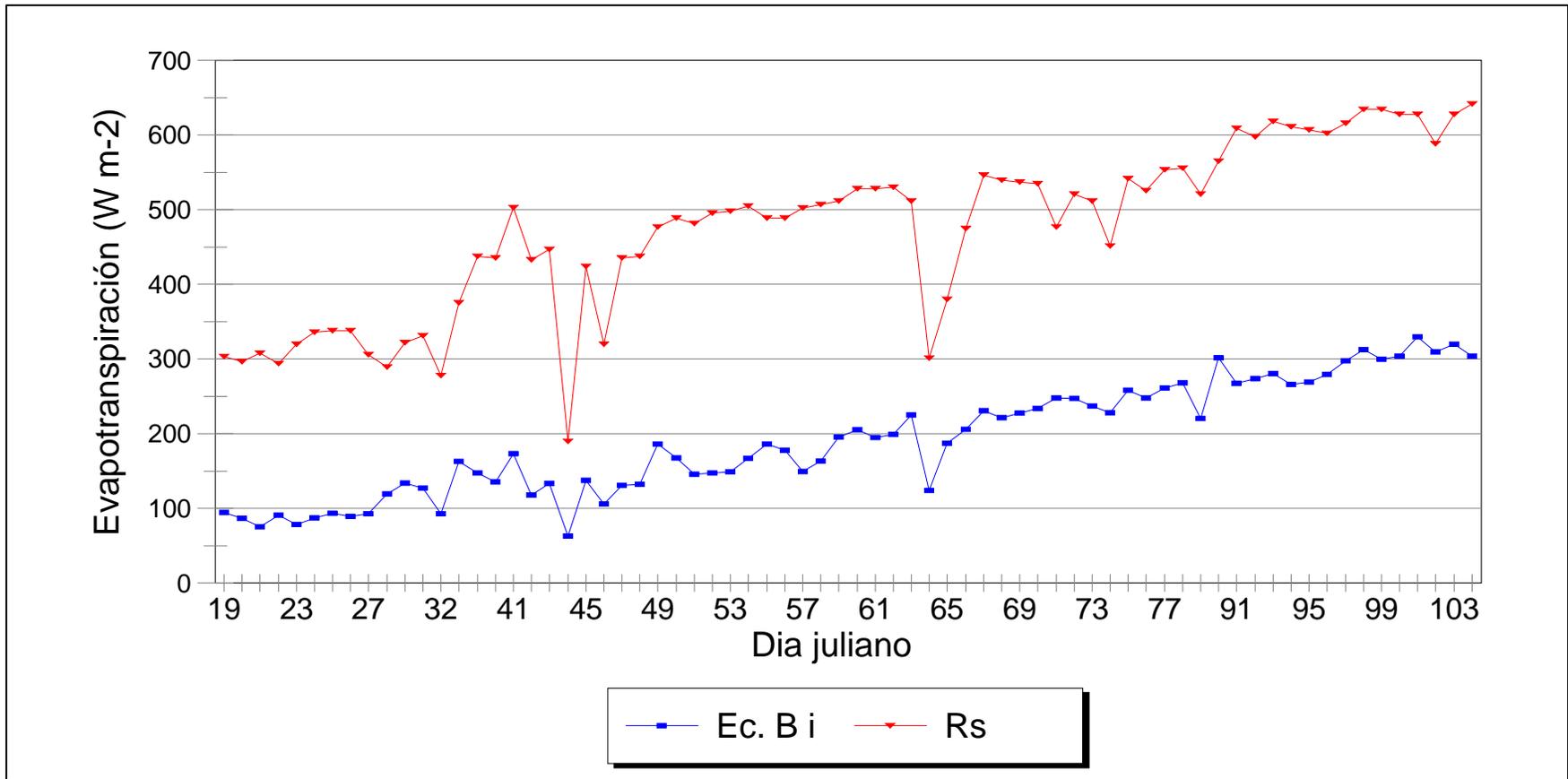


Figura 4. Evapotranspiración en chile bell medida con la ecuación de balance y radiación solar en el valle del Yaqui, Sonora.

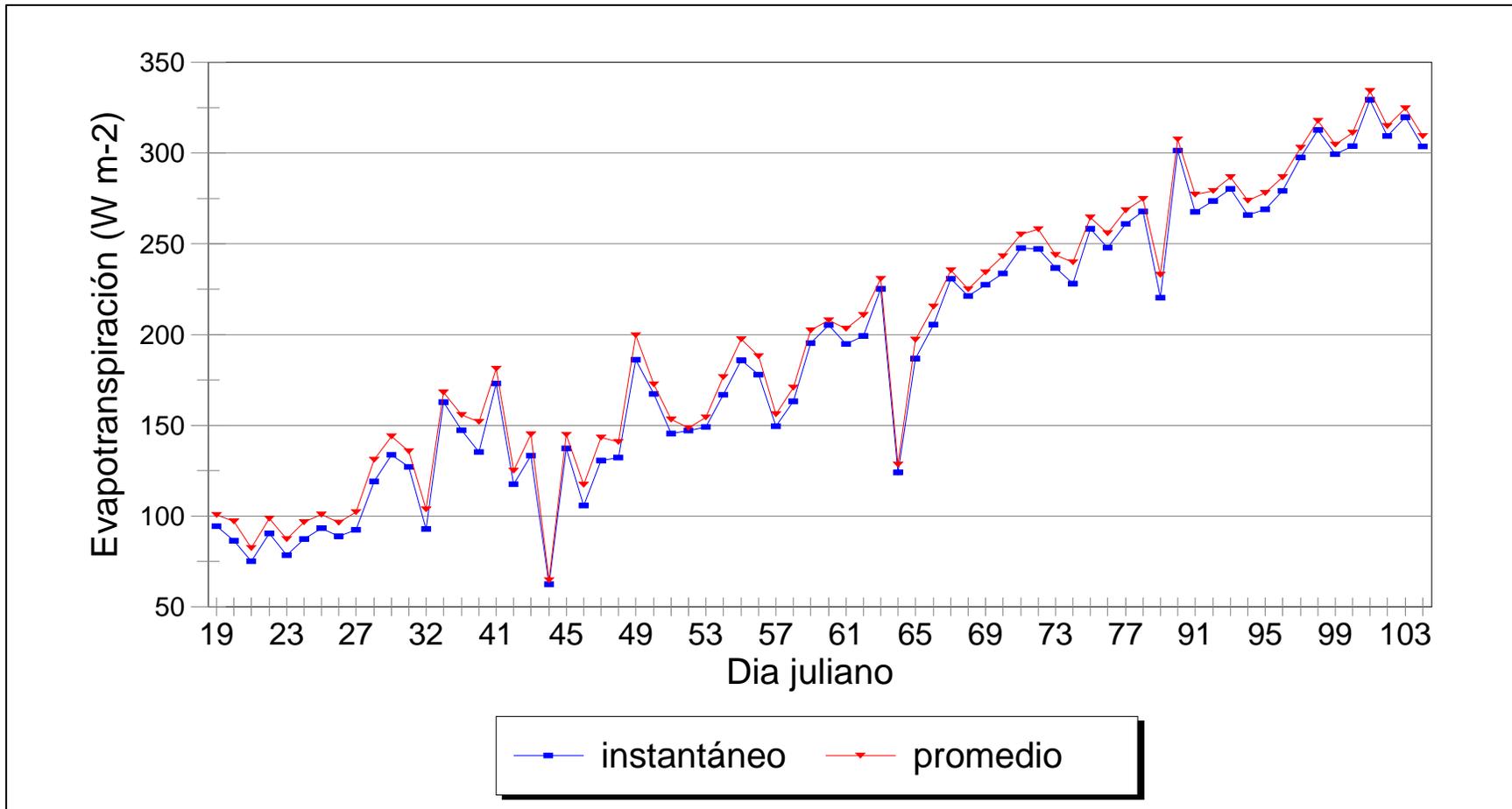


Figura 5. Evapotranspiración diaria medida con la ecuación de balance, con datos climatológicos instantáneos y promedios diarios.

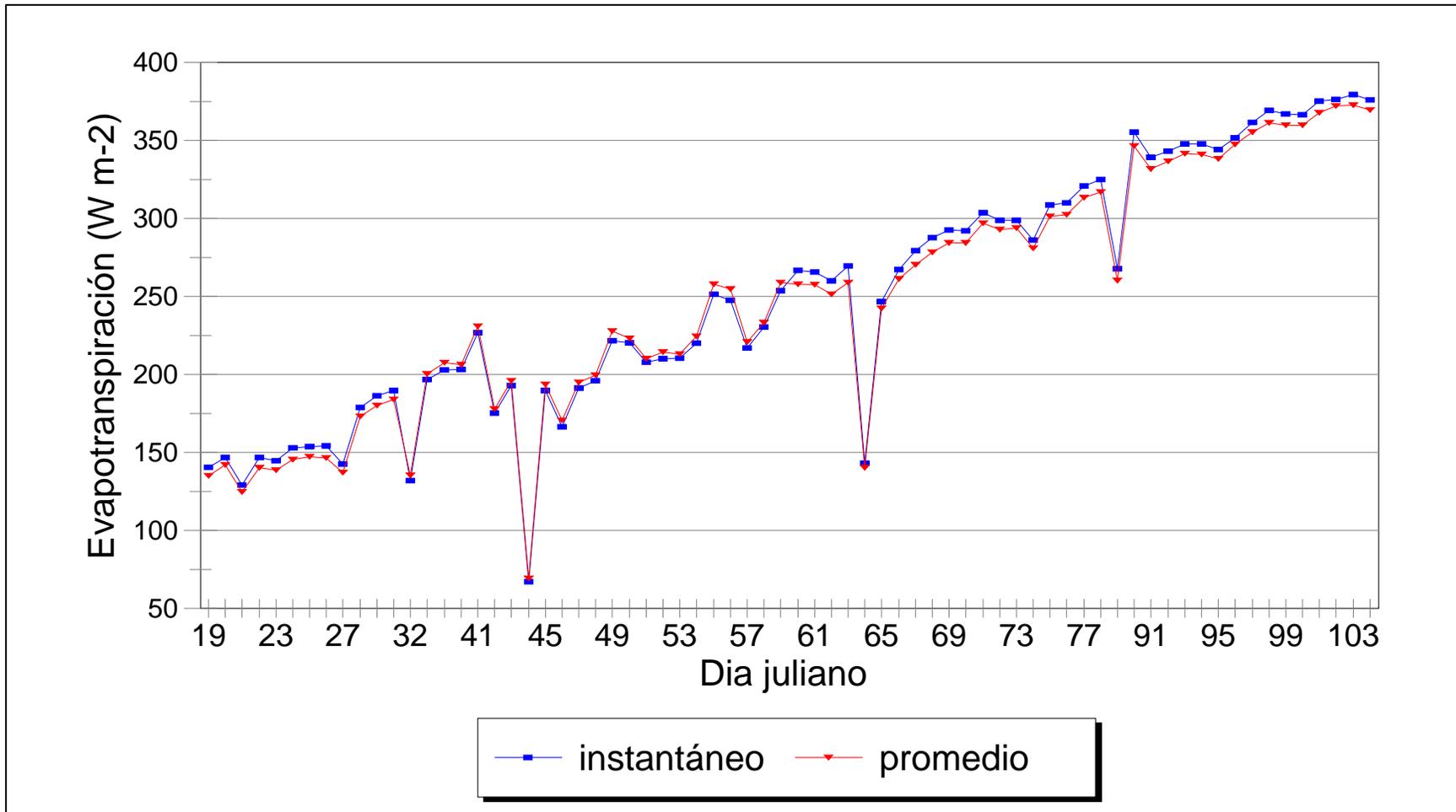


Figura 6. Evapotranspiración estimada con Priestley-Taylor (original), con datos climatológicos instantáneos y promedio diario.

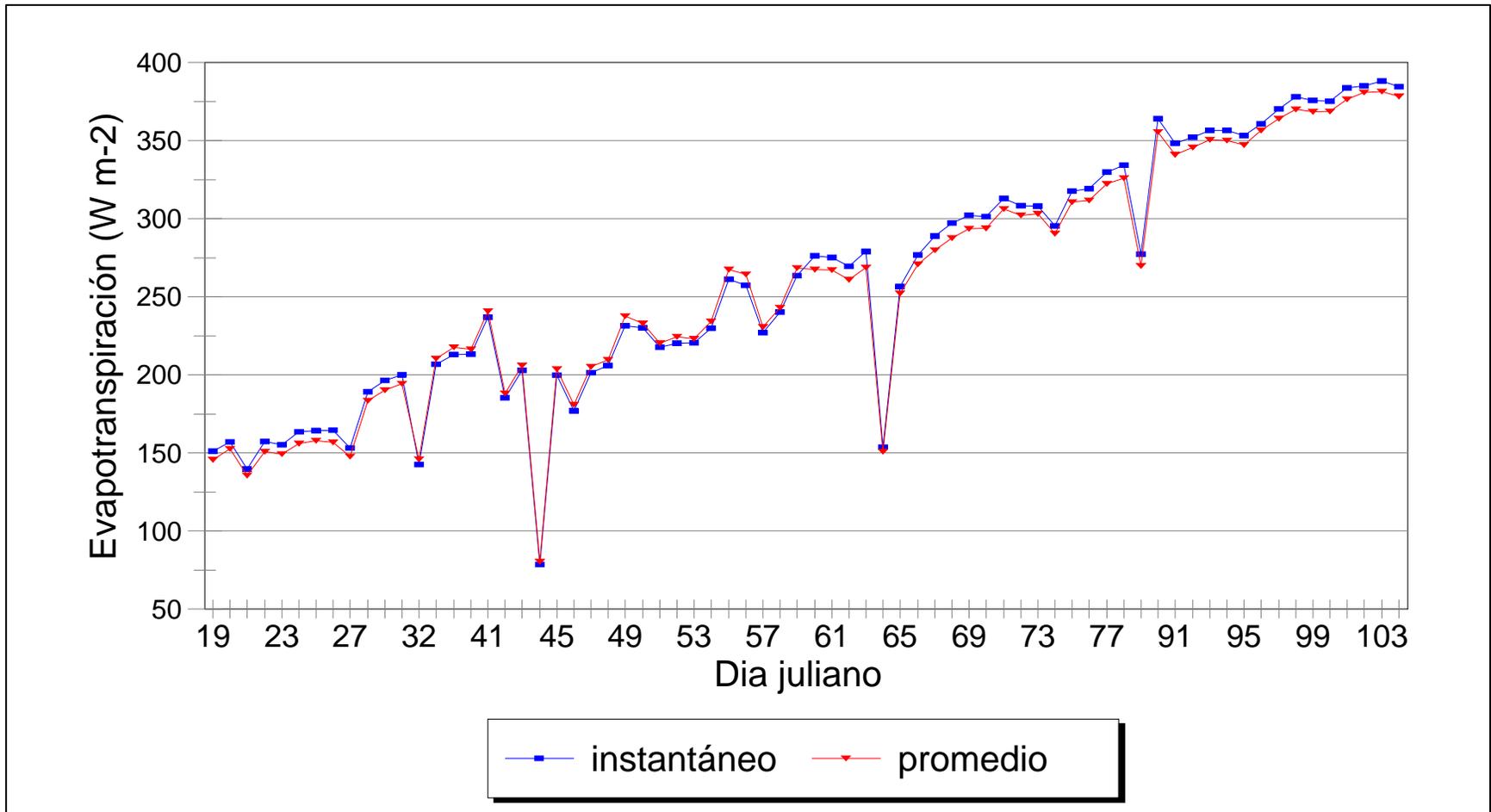


Figura 7. Evapotranspiración estimada con Priestley-Taylor (yaqui), con datos climatológicos instantáneos y promedio diario.

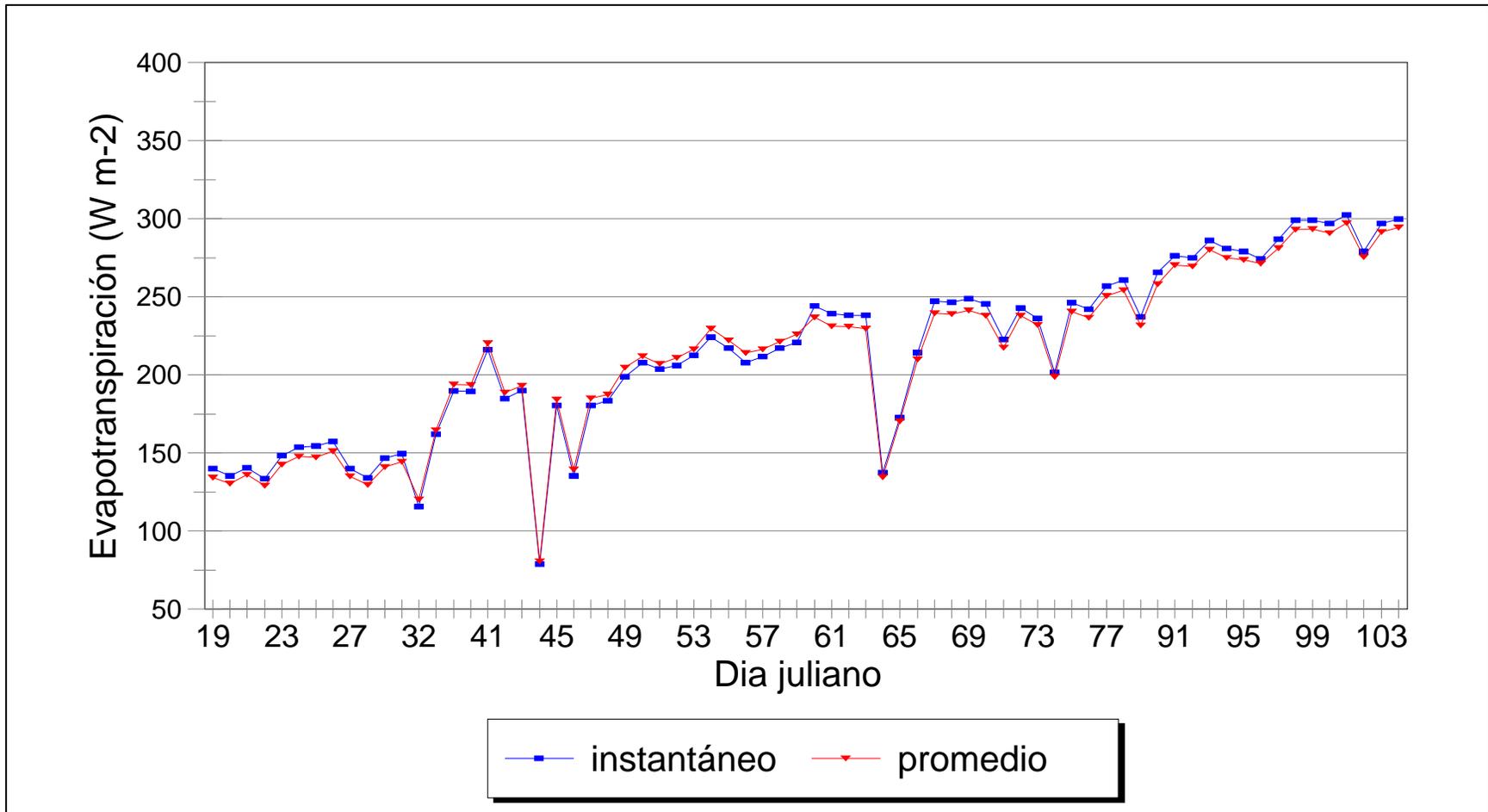


Figura 8. Evapotranspiración diaria estimada con Makkink, con datos climatológicos instantáneos y promedio diario.

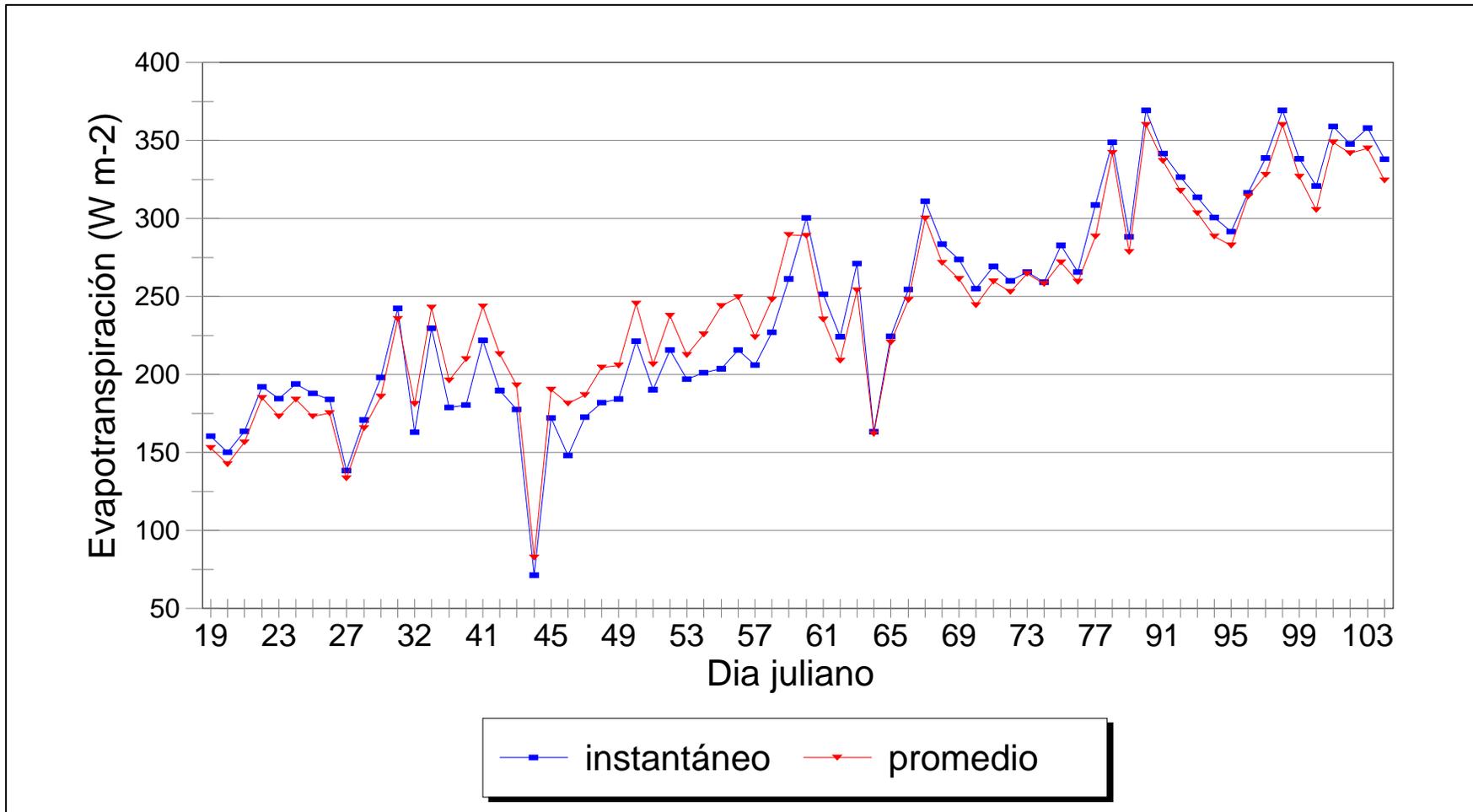


Figura 9. Evapotranspiración diaria estimada con Shuttleworth, con datos climatológicos instantáneos y promedio diario.

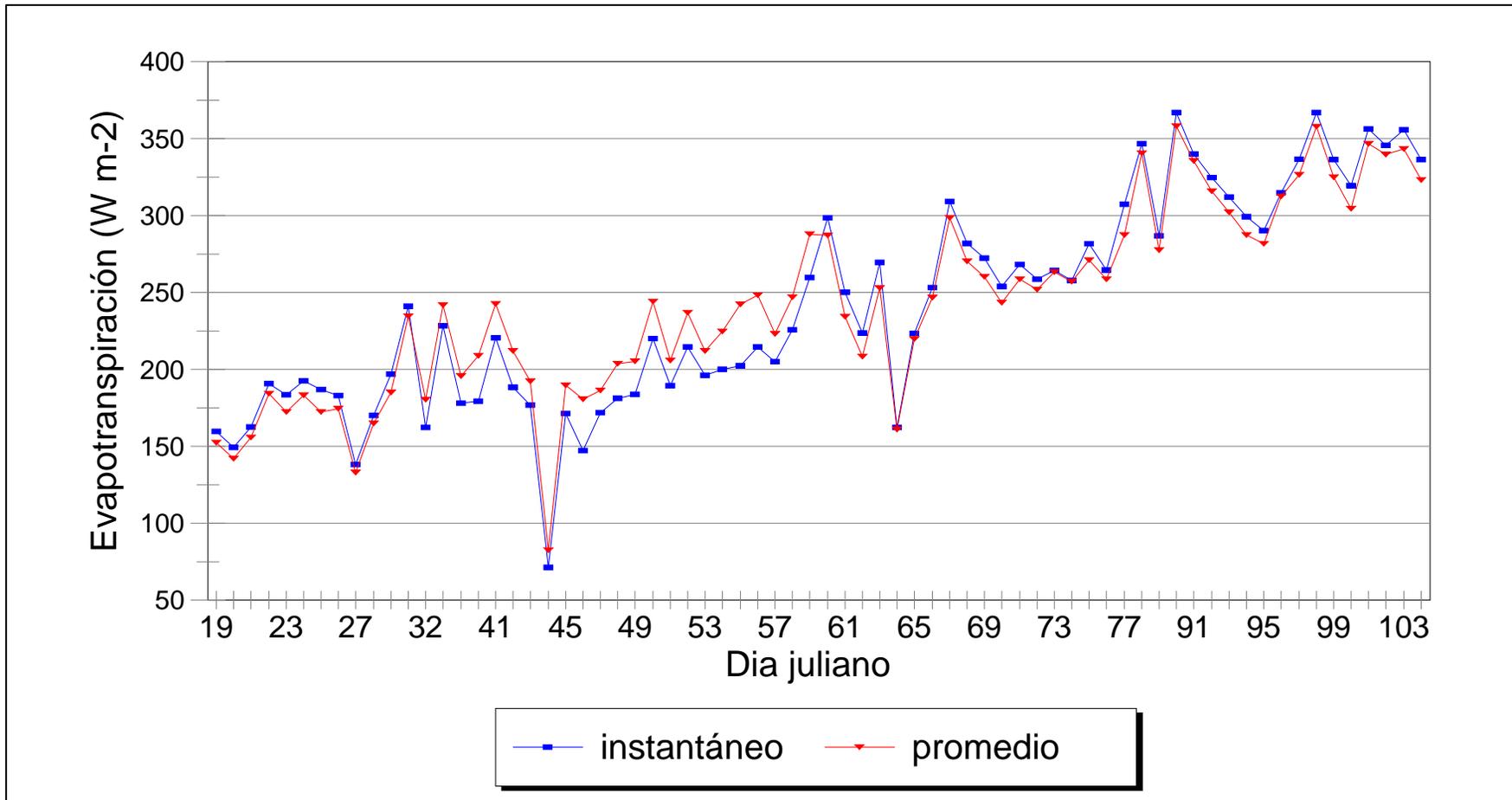


Figura 10. Evapotranspiración diaria estimada con Penman-Monteith, con datos climatológicos instantáneos y promedio diario.

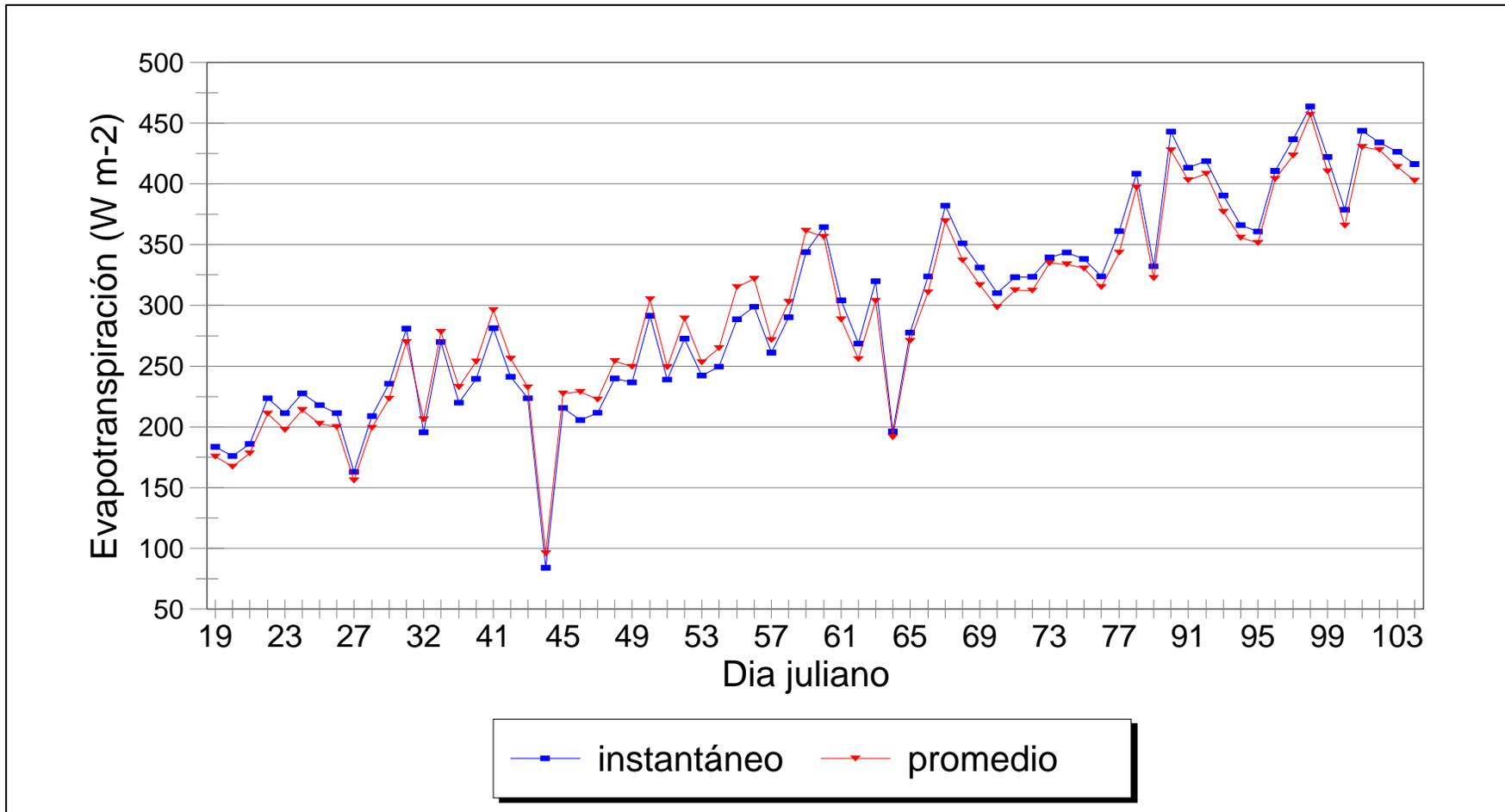


Figura 11. Evapotranspiración diaria estimada con Penman, con datos climatológicos instantáneos y promedio diario.

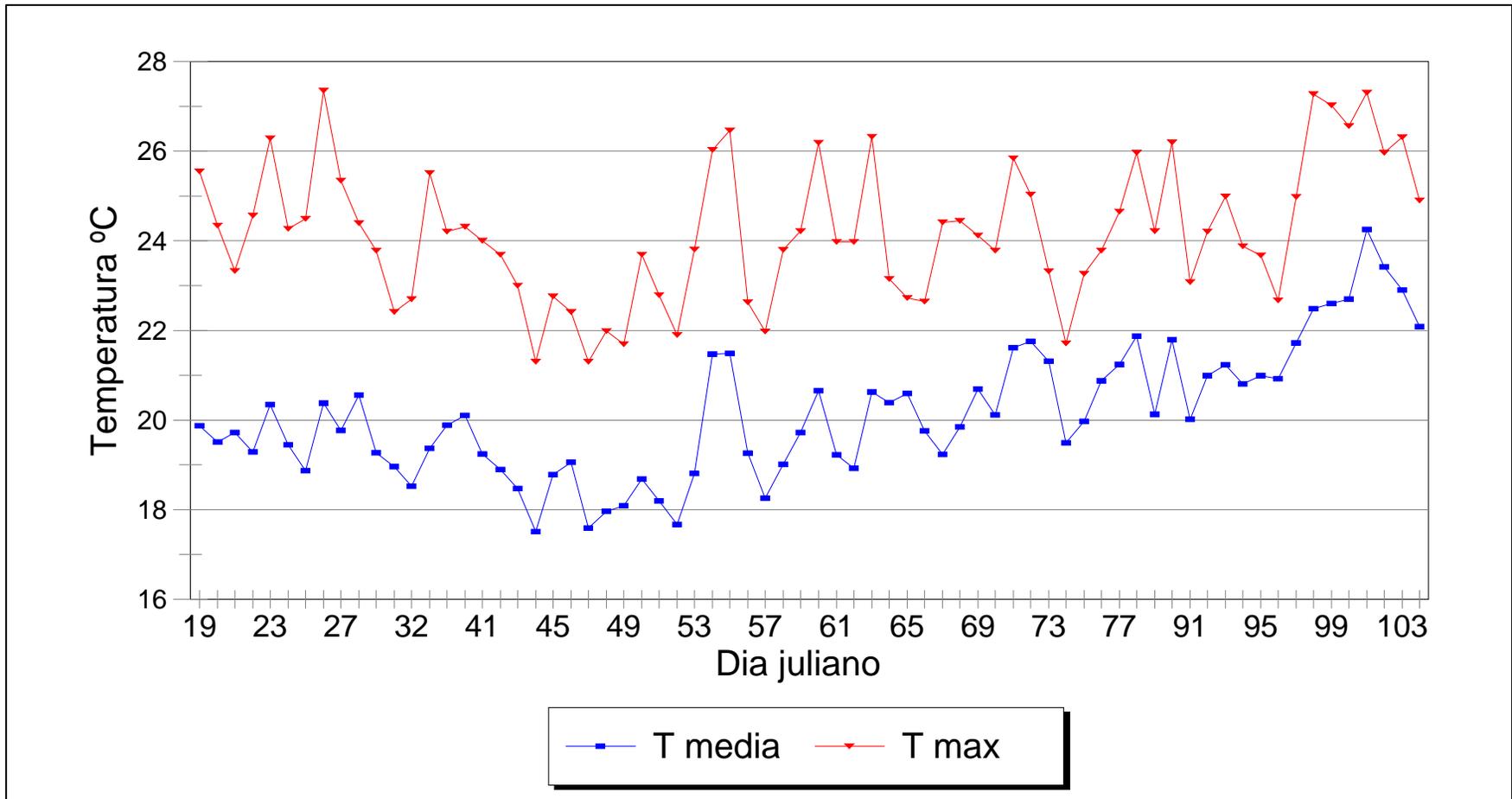


Figura 12. Comportamiento diario de la temperatura media y la temperatura máxima durante el período de enero a abril de 1998.

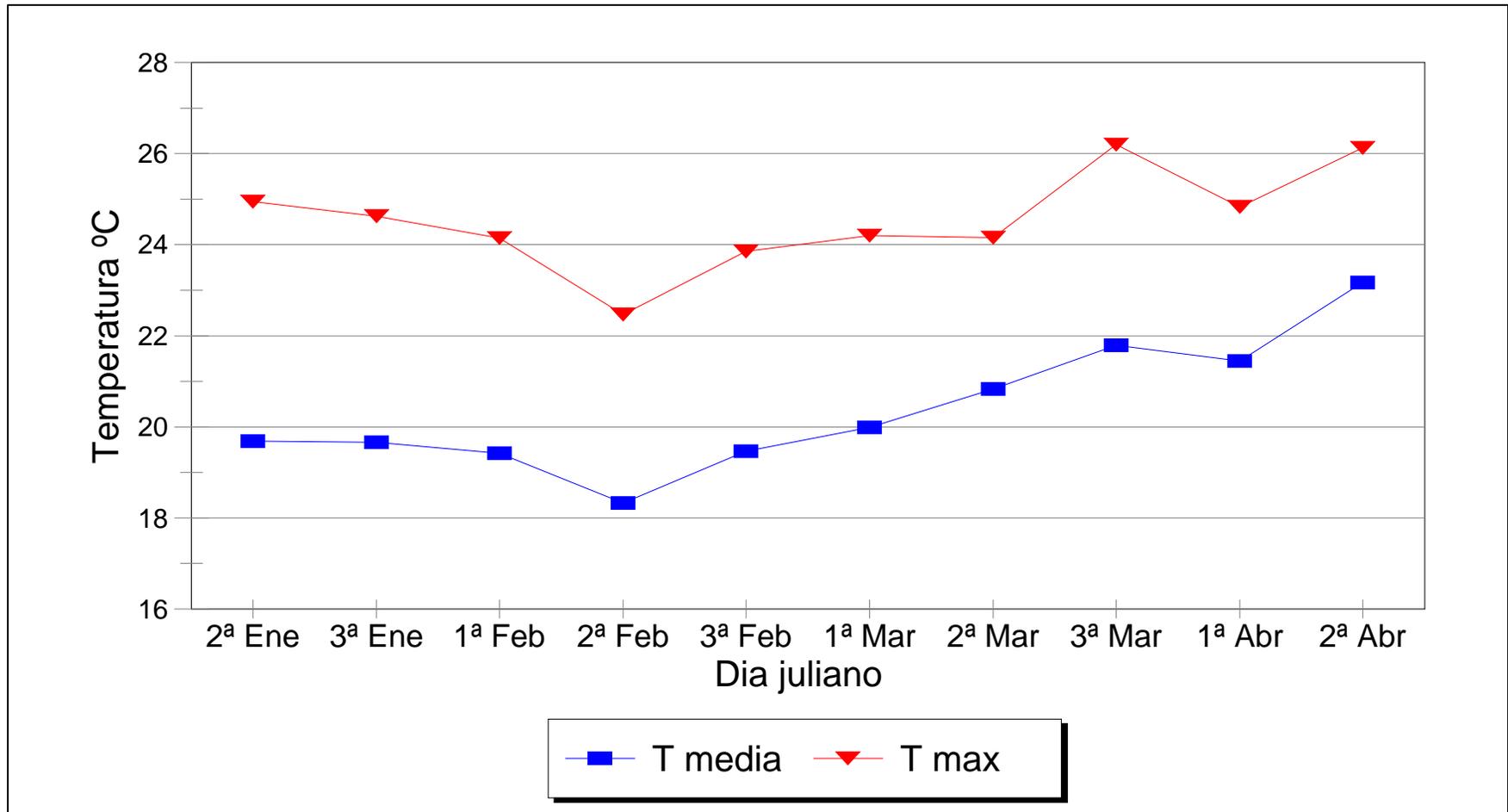


Figura 13. Comportamiento decenal de la temperatura media y la temperatura máxima durante el período de enero a abril de 1998.

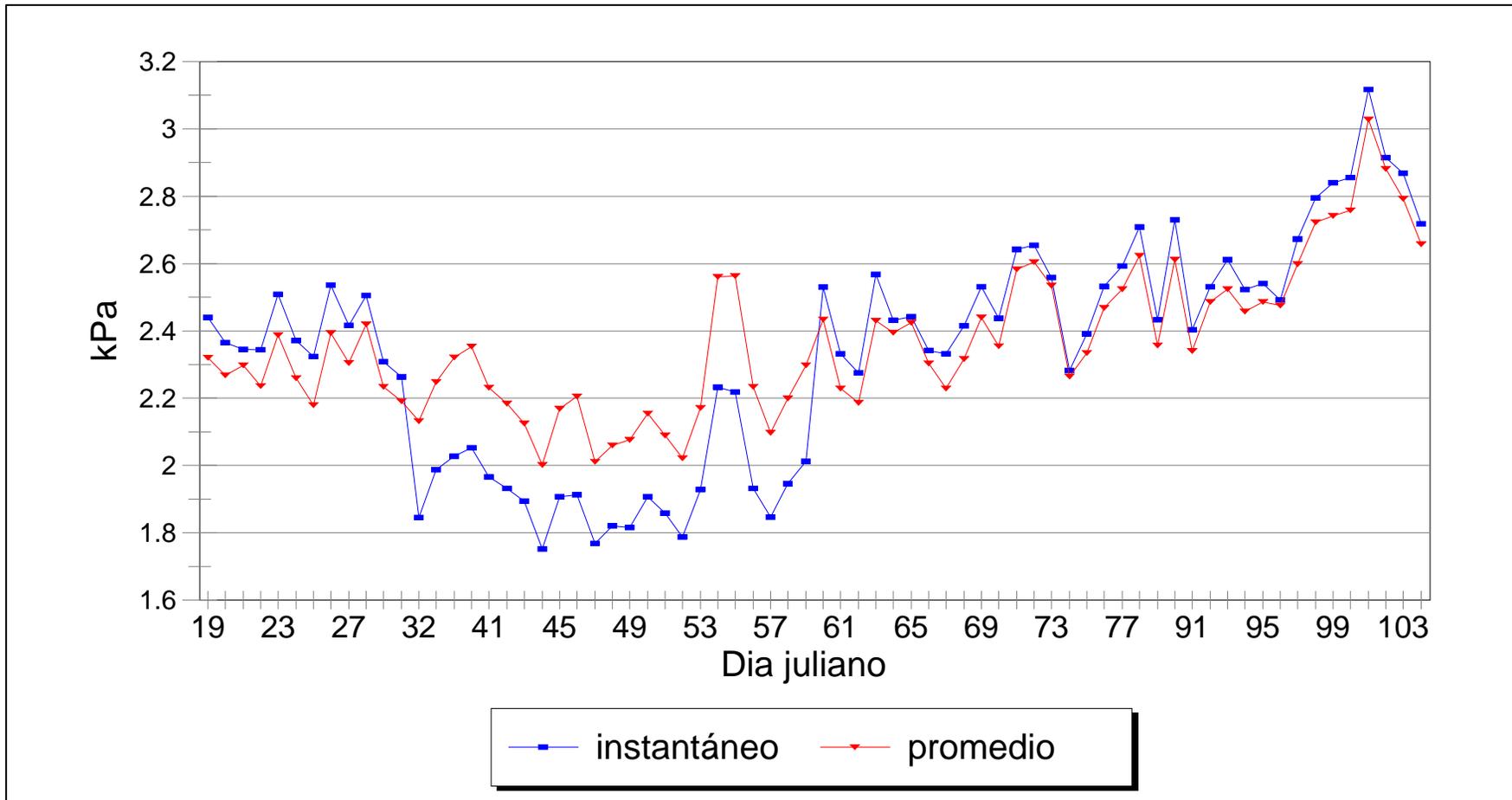


Figura 14. Comportamiento diario de la presión de vapor a saturación, obtenida con datos instantáneos y promedios diarios.

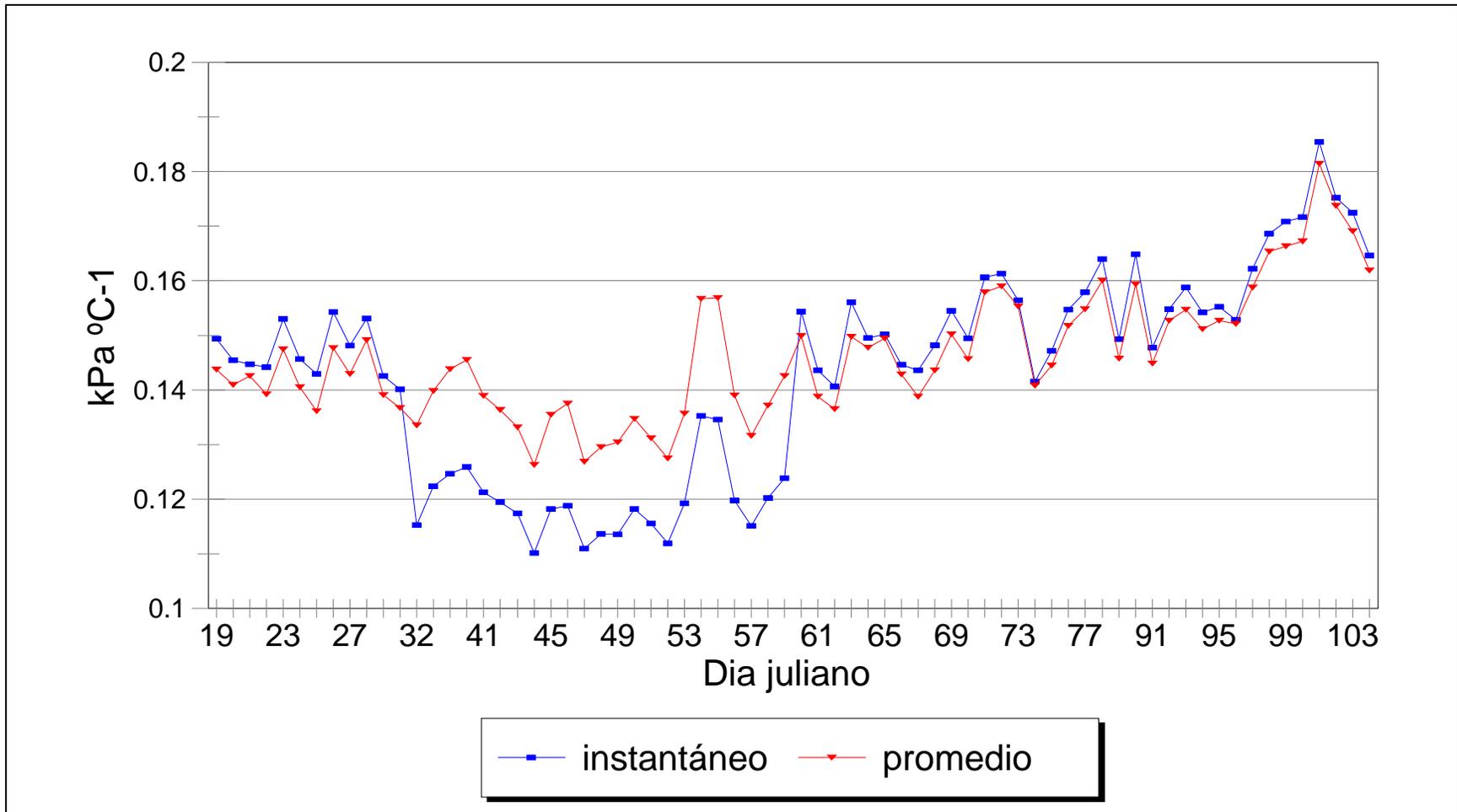


Figura 15. Comportamiento diario del gradiente de presión de vapor, obtenido con datos instantáneos y promedios diarios.

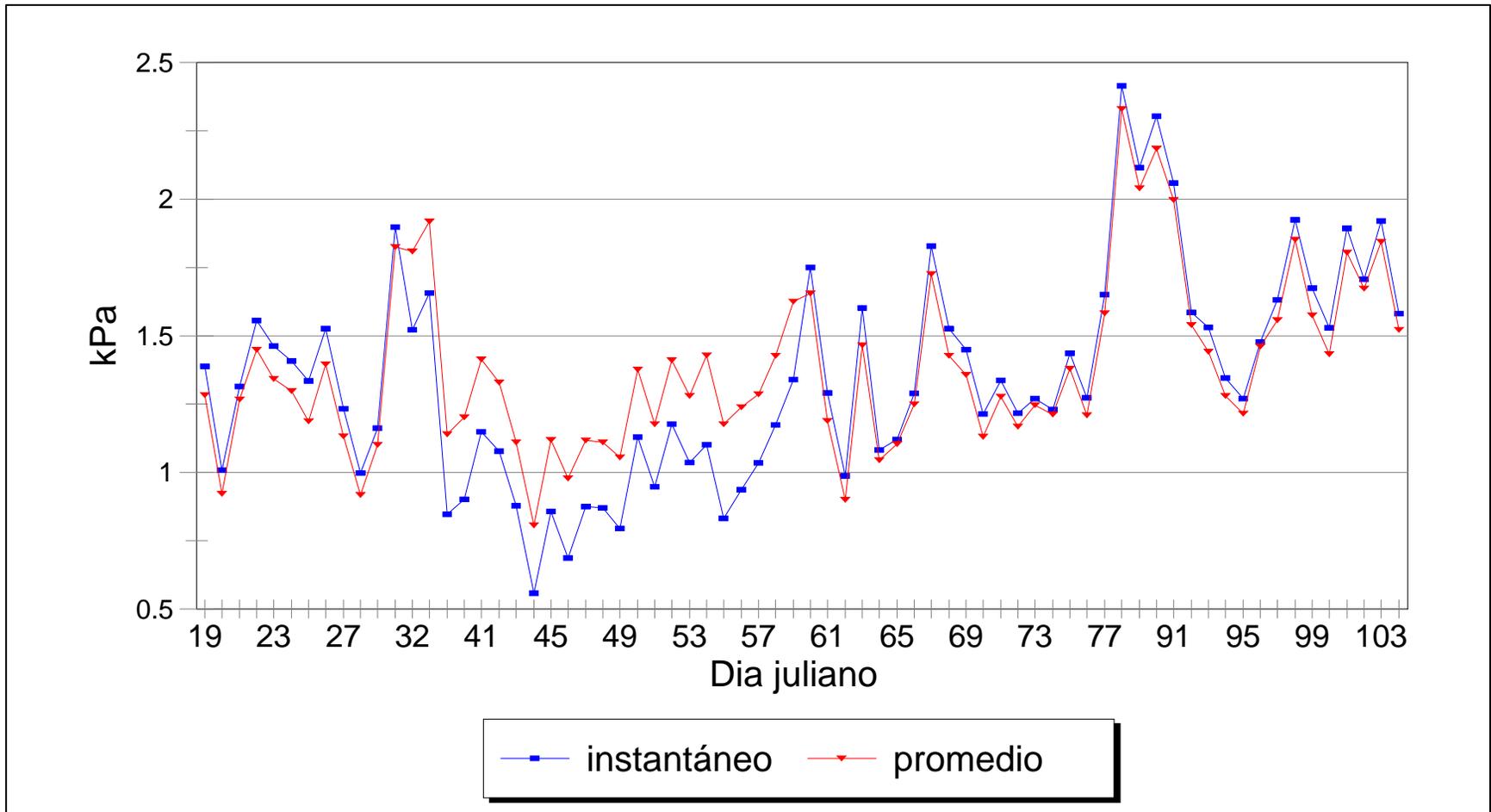


Figura 16. Comportamiento diario de la diferencia de presión de vapor, obtenida con datos instantáneos y promedios diarios.

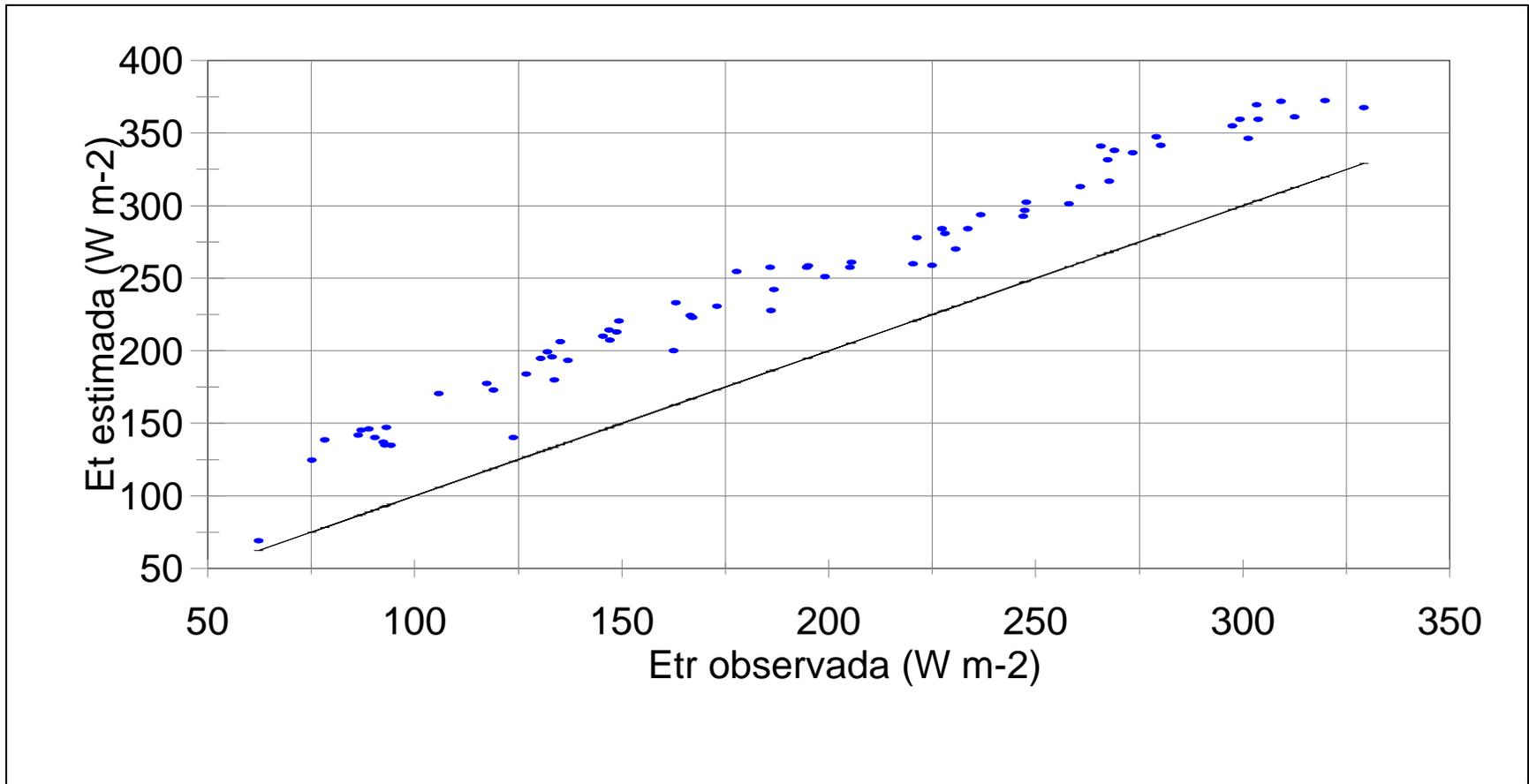


Figura 17. Comparación entre la etr observada y la Et estimada con Priestley-Taylor (original) en el valle del Yaqui, Sonora.

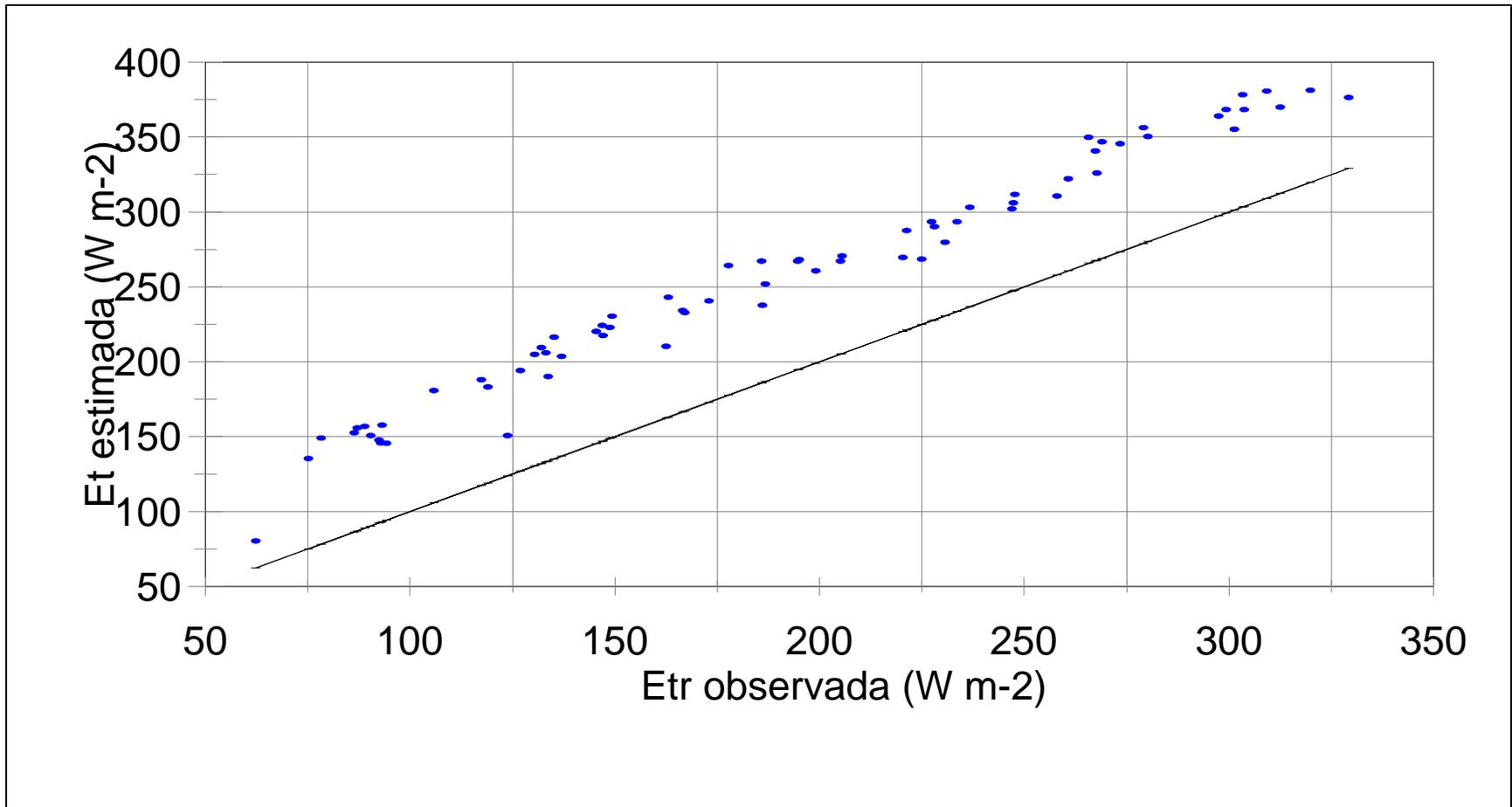


Figura 18. Comparación entre la etr observada y la et estimada con priestley-Taylor (yaqui) en el valle del Yaqui, Sonora.

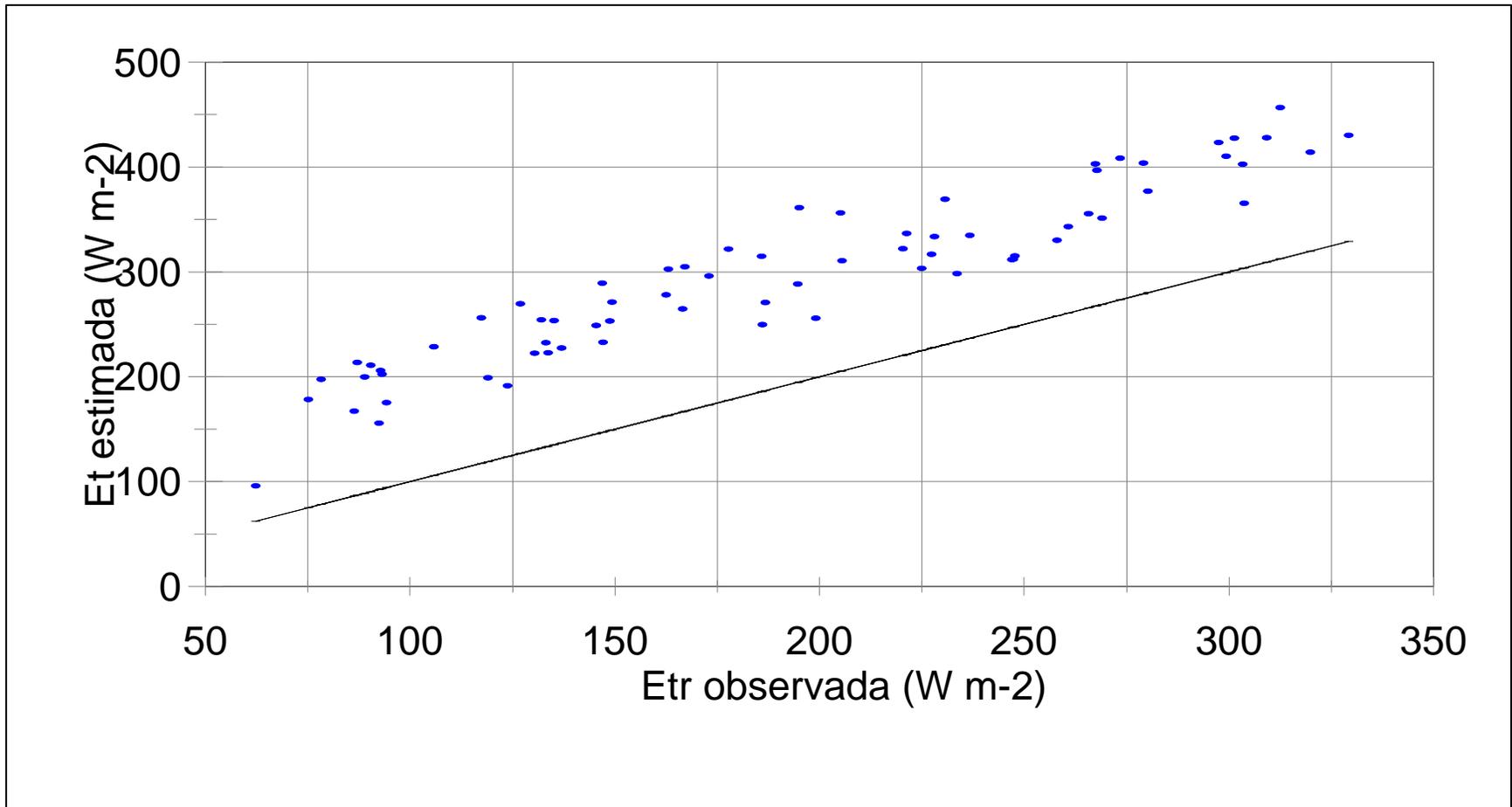


Figura 19. Comparación entre la Etr observada y la Et estimada con Penman en el valle del Yaqui, Sonora.

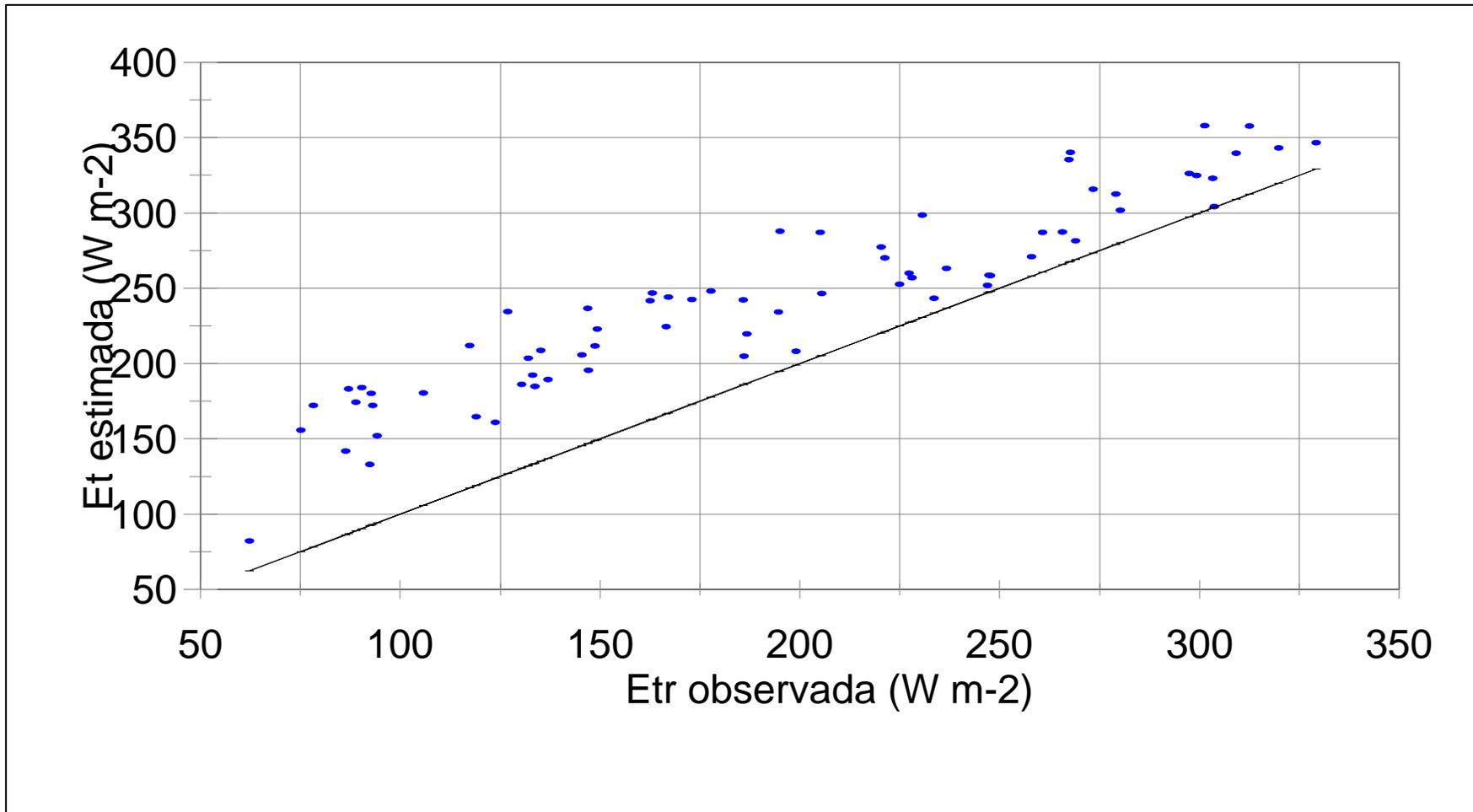


Figura 20. Comparación entre la etr observada y la Et estimada con Penman-Monteith en el valle del Yaqui, Sonora.

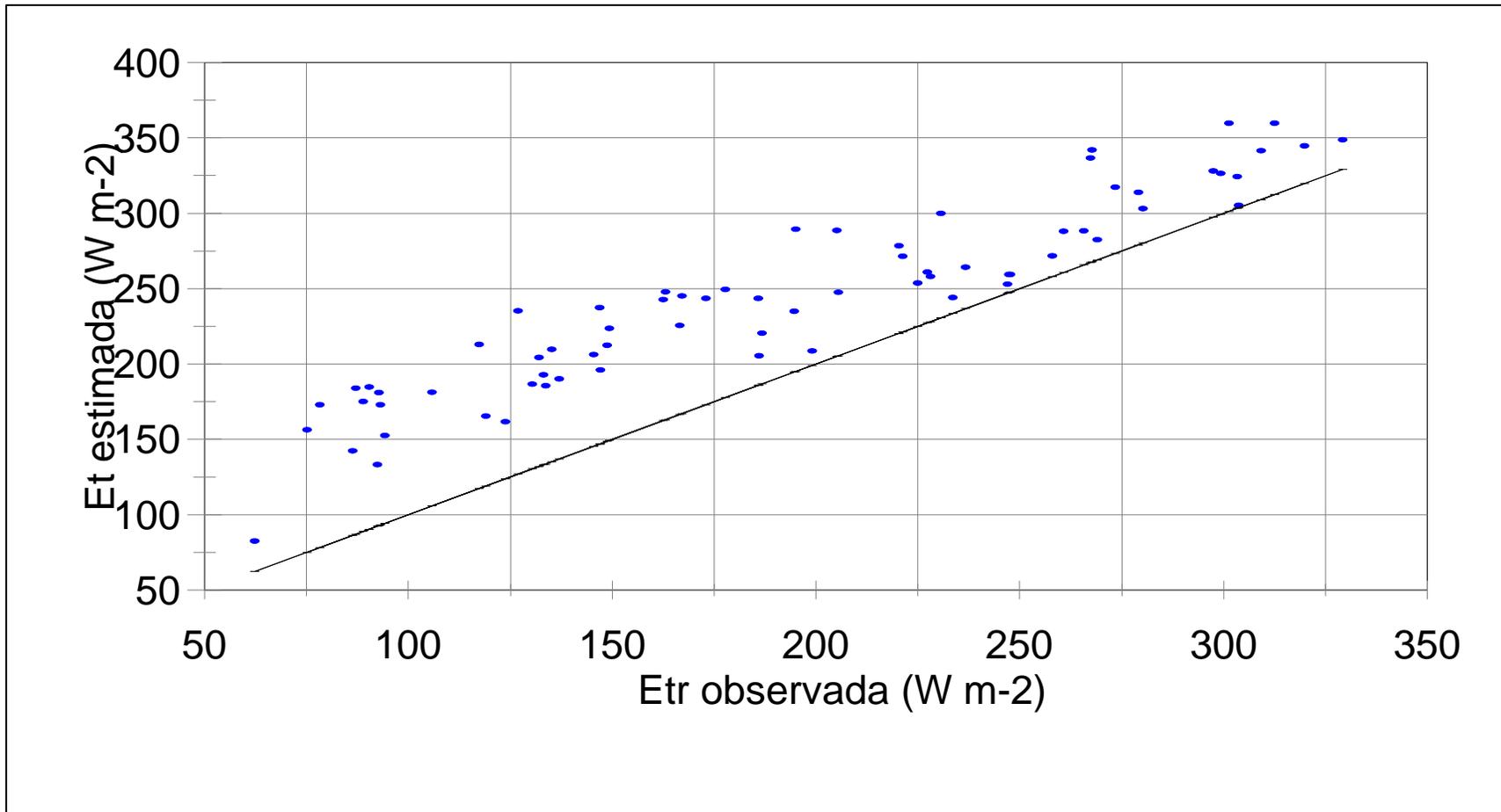


Figura 21. Comparación entre la Etr observada y la et estimada con Shuttleworth en el valle del Yaqui, Sonora.

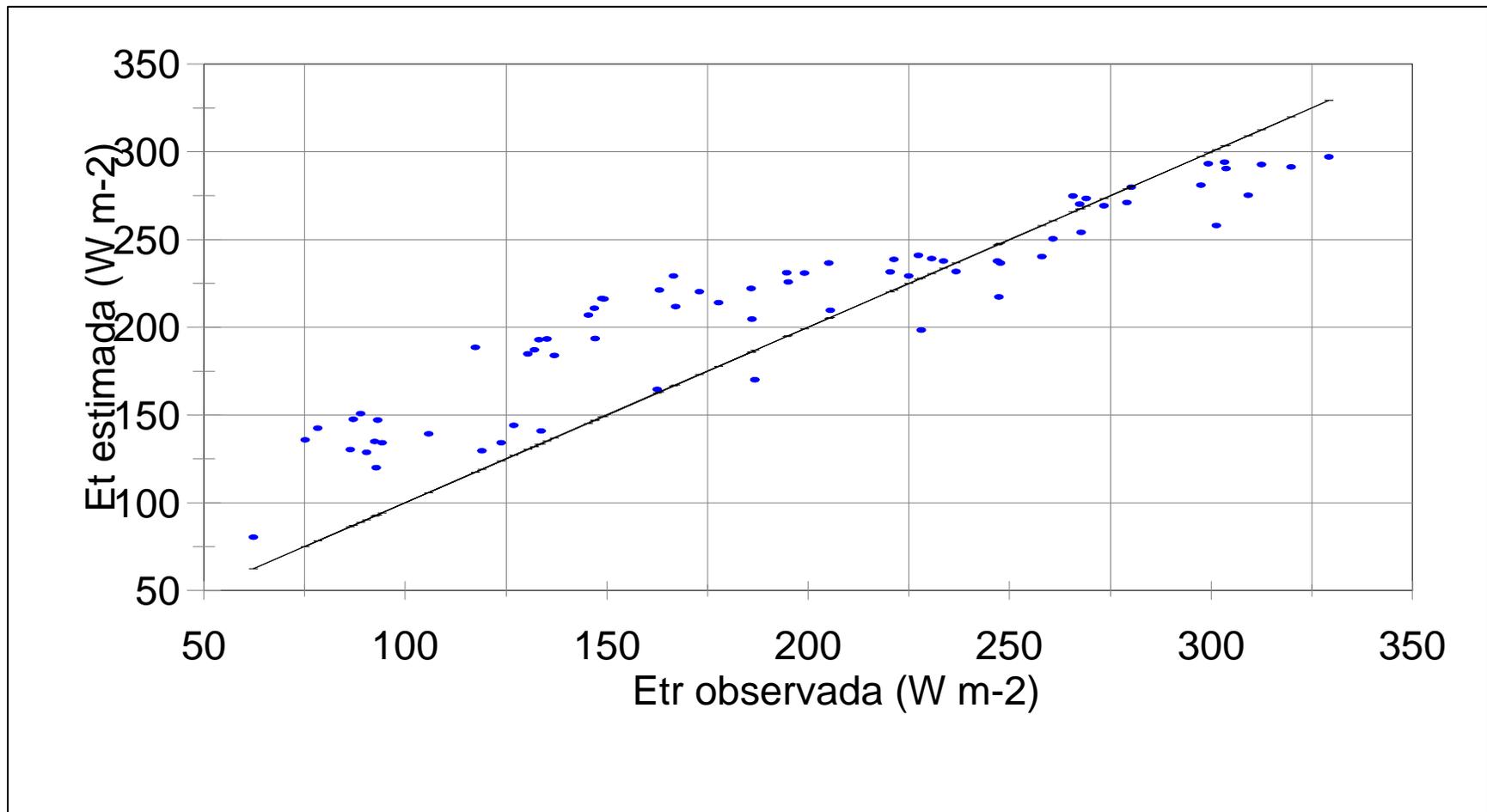


Figura 22. Comparación entre la Etr observada y la et estimada con Makkink en el valle del Yaqui, Sonora.

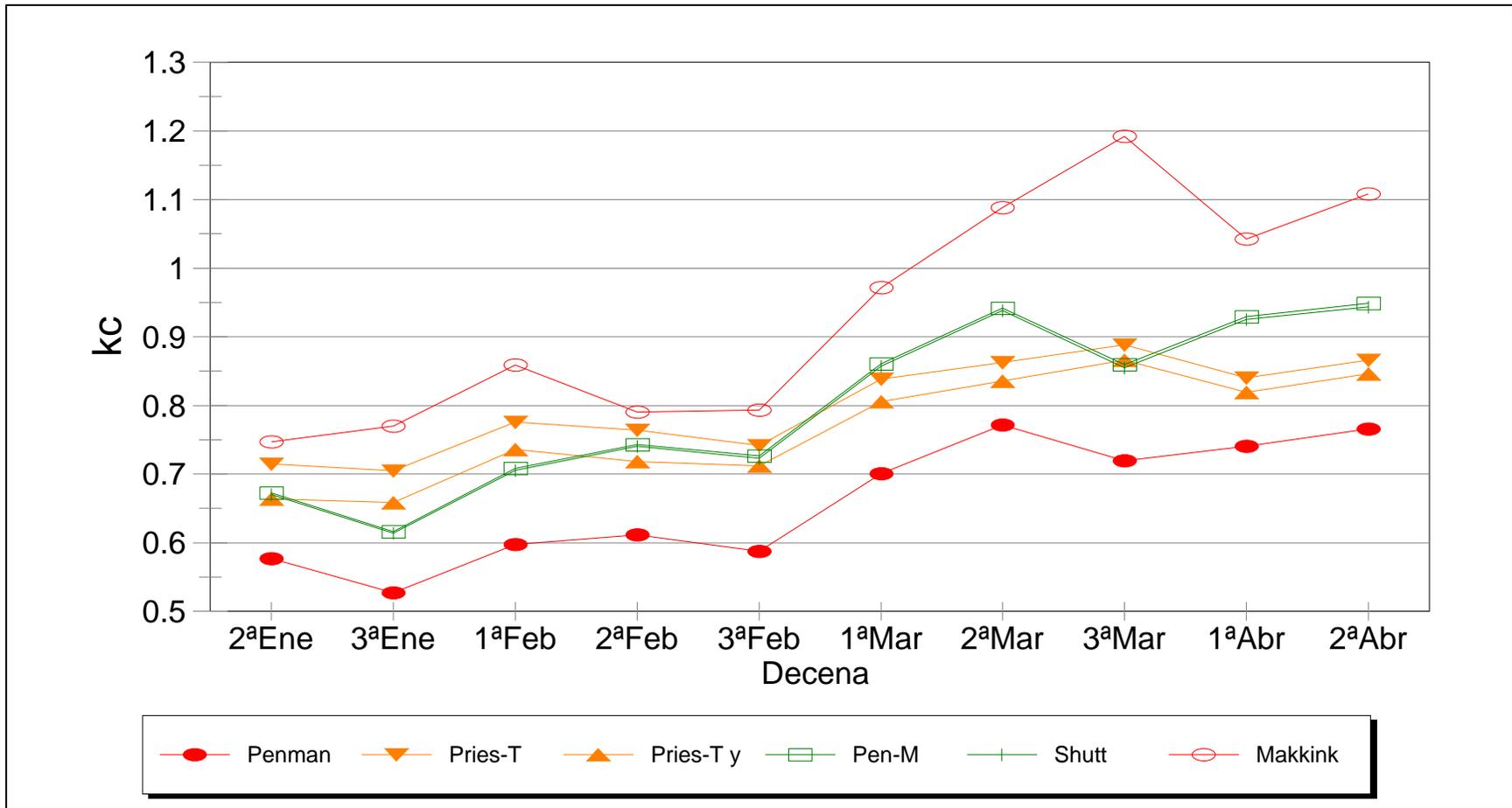


Figura 23. Coeficiente de cultivo decenal (kc) en chile bell con varios modelos de Et, en el valle del Yaqui, Sonora.

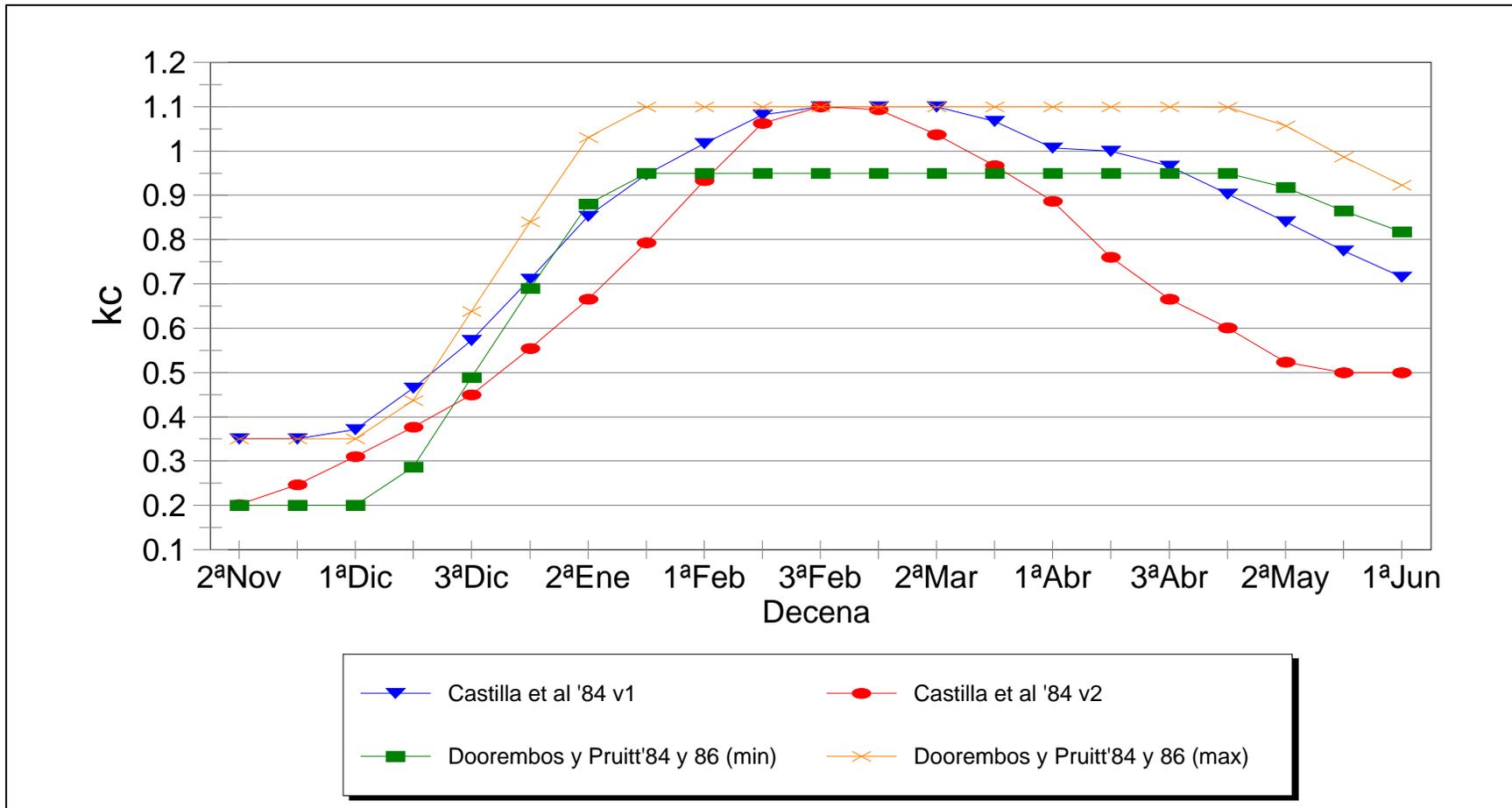


Figura 24. Coeficiente  $k_c$  para Chile adaptados de la literatura al ciclo del cultivo en el que se efectuó la investigación.

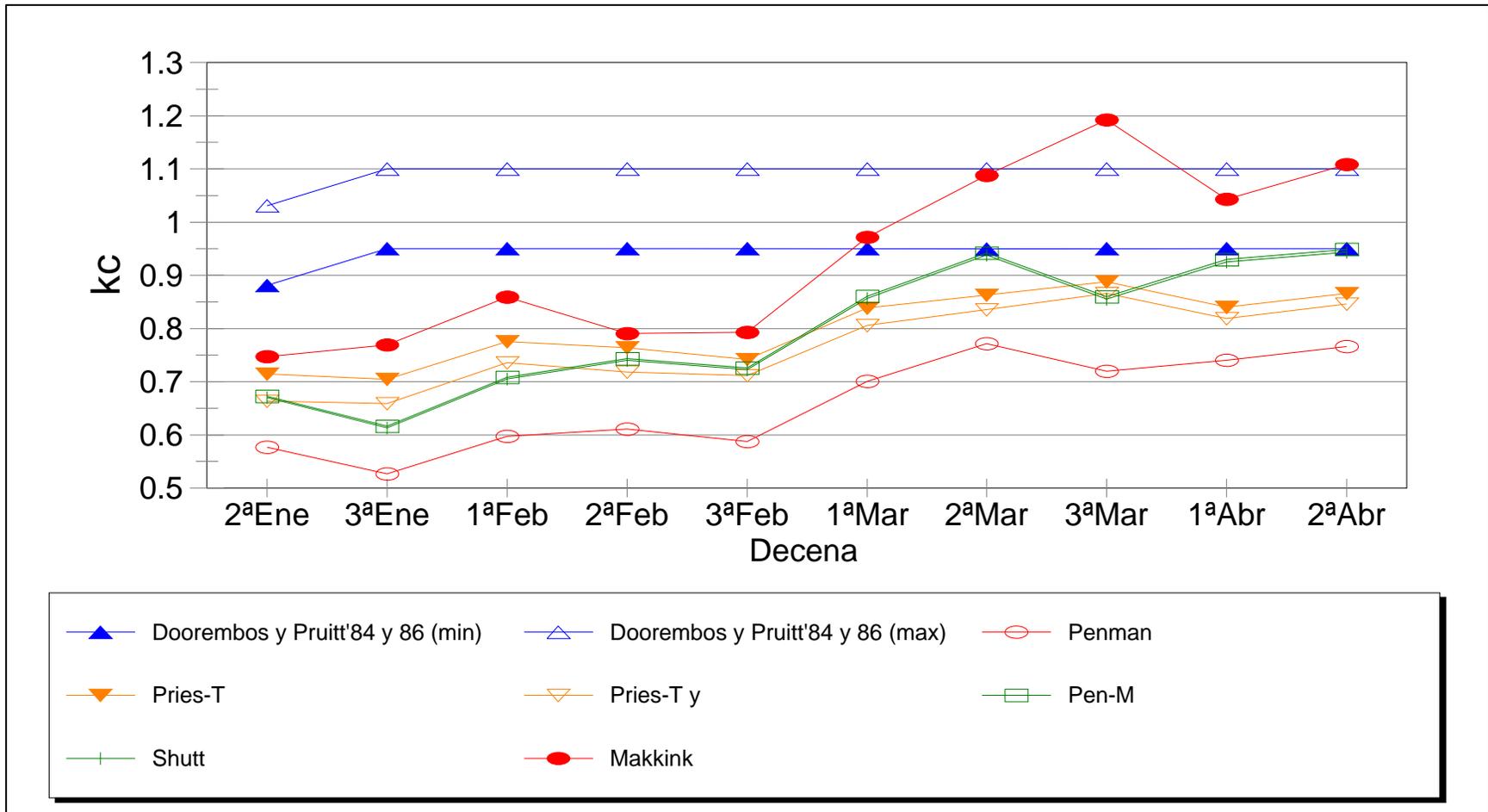


Figura 25. Kc para Chile (cultivo extensivo) y el obtenido con varios modelos en el valle del Yaqui, Sonora.



