

Universidad Central Marta Abreu de Las Villas
Facultad de Ciencias Agropecuarias



Tesis en opción al Grado Académico de Master en Agricultura Sostenible

Caracterización de la evapotranspiración de referencia estimada y
predicha para su inserción en la programación de riego

Autor: Ing. Yeniel Machado Rodríguez
Tutor (es): Dr. C. Ahmed Chacón Iznaga
MSc. Isabel María Domínguez Hurtado

Santa Clara, 2016

Resumen

En Cuba se evidencia una disminución de los volúmenes medios históricos de lluvia que constituye una alerta para la irrigación de las áreas agrícolas, por la consecuente disminución de la disponibilidad hídrica. Atendiendo a la necesidad de una planificación adecuada del riego, se caracterizó la evapotranspiración de referencia histórica, y la estimada y predicha mediante el empleo de un modelo numérico global, para su inserción en la programación de riego de la región central del país. Para ello se analizó la calidad de series históricas de observaciones meteorológicas diarias, concernientes al período (1993-2013), registrados en las bases de datos de las estaciones del territorio. Para el cálculo de la precipitación efectiva y la evapotranspiración de referencia se empleó el método propuesto por FAO, *Soil Conservation Service* y Penman-Monteith respectivamente, contenidos en el programa Cropwat versión 8.0 sobre plataforma Windows. La estimación y predicción agrometeorológica de esta variable se determinó a partir de la combinación entre el *Global Forecast System* y los valores extremos de temperatura del aire de las estaciones de superficie, mediante el programa Evapotranspiración. A consecuencia del procesamiento se obtuvo que para la región central los porcentos de precipitación efectiva en los meses de enero y febrero alcanzan más de 95.0 % y el menor se registra en septiembre con 67.4 %. Los valores de evapotranspiración de referencia predichos no presentan diferencias significativas con los valores medios históricos de esta variable, los cuales, oscilan entre 1.9 mm d^{-1} en Cayo Coco y 5.2 mm d^{-1} en Santo Domingo y Aguada de Pasajeros, y pueden incluirse en los balances agrometeorológicos de las empresas agrícolas de este territorio, a través de los mecanismos para el servicio de alerta al regante.

Palabras Claves: modelos numéricos globales, evapotranspiración, predicción agrometeorológica.

Índice

1. Introducción	1
2. Revisión bibliográfica	4
Generalidades	4
2.1. Ahorro y disponibilidad de agua en la agricultura	4
2.2. Evapotranspiración. Conceptos y definiciones	5
2.3. Métodos para estimar la evapotranspiración	7
2.3.1. Balance de agua en el suelo	8
2.3.2. Lisímetros	9
2.3.3. Métodos de balance de energía y microclimáticos	10
2.3.4. Métodos empíricos o combinados	10
Método FAO Penman-Monteith	11
Método del tanque de evaporación. Evaporímetro Clase A	12
2.4. Teledetección y Sistemas de Información Geográfica (SIG) aplicados al riego	13
2.5. Programación y pronóstico de riego	15
2.6. Modelos de predicción numérica del tiempo (NWP)	16
2.6.1. Alcance de los Numerical Weather Prediction (NWP). Parametrizaciones y ensembles	17
2.6.2. Pronósticos operacionales. Modelos globales y regionales	20
2.6.3. Modelo numérico global (GFS) Global Forecast System	21
3. Materiales y métodos	22
3.1. Determinación de la evapotranspiración de referencia y las precipitaciones históricas en el área de estudio	22
3.1.1. Tratamiento de los datos de inicialización	22
3.1.2. Marcha de la evapotranspiración de referencia y las precipitaciones en el área de estudio	23
3.2. Evaluación de la estimación y pronóstico de la Eto mediante un modelo numérico global. ...	24
3.2.1. Validación del método de estimación y pronóstico de la evapotranspiración de referencia	28
3.3. Esquema para la inserción de la predicción agrometeorológica en la programación de riego	28
4. Resultados y discusión	29
4.1. Determinación de la evapotranspiración de referencia y las precipitaciones históricas en el área de estudio	29
4.1.1. Tratamiento de los datos de inicialización	29
4.1.2. Marcha de la evapotranspiración de referencia y las precipitaciones en el área de estudio	36
Marcha de la precipitación efectiva	40
Determinación de los coeficientes de aprovechamiento (Kp)	42
4.2. Evaluación de la estimación y pronóstico de la Eto mediante un modelo numérico global. ...	44
4.2.1. Estimación y pronóstico agrometeorológico de la evapotranspiración de referencia	44
4.2.2. Validación del método de estimación y pronóstico de la evapotranspiración de referencia	47
4.3. Esquema para la inserción de la predicción agrometeorológica en la programación de riego	49
5- Conclusiones	54
6- Recomendaciones	55
Bibliografía	56
Anexos	64

1. Introducción

Uno de los aspectos fundamentales para el diseño y operación de un sistema de riego parcelario, lo constituye el conocimiento de las necesidades hídricas de los cultivos. Los sistemas de irrigación se diseñan y construyen para satisfacer dichos requerimientos durante los periodos de ausencia de precipitación, y con el objetivo de mantener la reserva de agua del suelo, dentro de los límites previstos en la programación de riego, sin que existan afectaciones en los rendimientos y el medio ambiente. Las demandas de agua de cualquier cultivo para un intervalo de tiempo determinado, se corresponde con las pérdidas ocurridas de este recurso, a través de las plantas por transpiración, y la evaporación directa desde la superficie del suelo, englobándose bajo el concepto de evapotranspiración. Las predicciones de esta variable son escasamente tratadas en las empresas agrícolas de nuestro país cuando se elabora el régimen de riego de proyecto, y es un elemento poco considerado tanto en el diseño de nuevas obras, como en las ya existentes. Sin tener en cuenta la reducción de los volúmenes medios de lluvia y su bajo aprovechamiento en las zonas regables (Faci, 2003).

La agricultura es una actividad económica con gran dependencia de múltiples factores químicos, físicos, fisiológicos tanto de la planta como del suelo, y del microclima donde se desarrolla el cultivo. Por lo que las estrategias de desarrollo agropecuario deben estar respaldadas por un profundo conocimiento de las características agrometeorológicas de las áreas seleccionadas, lo que constituye un factor determinante debido a la vinculación que el propio proceso productivo tiene con las mismas (Domínguez *et al.*, 2012). No obstante, a pesar de los avances alcanzados, cuando se emplea información agrometeorológica en la determinación de la evapotranspiración, se ha podido advertir que en muchas localidades existen inconvenientes como la falta de datos, inadecuada distribución espacial, baja calidad de los registros, y una carencia de criterios unificados para la selección de estaciones y estimación de variables climáticas (Chipana y Osorio, 2007). En este sentido la disponibilidad y desarrollo de tecnologías modernas ha propiciado mayor uso de programas computacionales dirigidos a diagnosticar y

pronosticar con un elevado grado de exactitud los elementos del clima, a través del empleo de modelos numéricos globales que han aumentado sus prestaciones y potencialidad para el análisis de datos, a la vez que ofrecen nuevas herramientas que acompañan, potencian y enriquecen los procesos llevados a cabo. Actualmente se muestran como una herramienta alternativa y complementaria a las técnicas tradicionales para estimar la evapotranspiración o consumo del agua. Además la mayoría de los métodos tradicionales sólo pueden proveer estimaciones puntuales de la evapotranspiración, lo cual muchas veces no es suficiente para capturar la variación espacial en grandes áreas (García y Llellish, 2011).

Las complejas relaciones que intervienen en el proceso de programación del riego, evidencian la necesidad de abordar este tema, considerado punto de partida para determinar normas óptimas, que se correspondan con un adecuado nivel productivo y con el empleo de nuevas tecnologías de monitoreo e interpretación de las diferentes variables. De acuerdo con Dueñas (2006), y Méndez *et al.* (2014) requieren de un adecuado nivel interpretativo para obtener un grado de aproximación aceptable a la realidad; sobre todo en Cuba, donde los datos de evapotranspiración son limitados y la explotación óptima de los recursos hídricos constituye uno de los objetivos fundamentales para los responsables del manejo del agua de riego.

Problema científico:

La incertidumbre en la estimación y predicción de la distribución espacial de la evapotranspiración de referencia, disminuye la fiabilidad de los valores obtenidos para determinar normas óptimas dentro de la programación de riego.

Hipótesis:

Los valores estimados y predichos de evapotranspiración de referencia con el empleo de un modelo numérico global y el análisis de datos meteorológicos históricos, permitirán disminuir la incertidumbre en el cálculo de esta variable y su inserción exitosa en la programación de riegos.

Objetivo general:

Caracterizar la evapotranspiración de referencia histórica, y la estimada y predicha por un modelo numérico global, para su inserción en la programación de riego.

Objetivos específicos:

1. Determinar la marcha histórica de la evapotranspiración de referencia y las precipitaciones para la zona de estudio.
2. Evaluar las salidas estimadas y predichas de evapotranspiración de referencia mediante un modelo numérico global.
3. Proponer un esquema que permita la inserción de la predicción agrometeorológica en la programación de riego.

2. Revisión bibliográfica

Generalidades.

La agricultura es sin duda el usuario más importante de los recursos de aguas, suelos y biodiversidad del mundo. Hoy se encuentra en el centro del debate sobre cómo conservar los recursos naturales. El 70% de la extracción total de agua del planeta es usado en agricultura, con un porcentaje cercano al 85% cuando se consideran solamente los países en desarrollo. A medida que mejora el bienestar global, se incrementa la demanda de agua por parte de otros subsectores. El suministro doméstico de agua, la industria y el propio medio ambiente, están ahora en competencia directa con el sector agropecuario por recursos hídricos cada vez más escasos.

2.1. Ahorro y disponibilidad de agua en la agricultura.

La escasez de agua constituye una importante limitación para el desarrollo agrícola en las regiones áridas y semiáridas. La comunidad internacional está insistentemente analizando y siguiendo los modelos de consumo del agua en la agricultura y su correspondiente asignación y eficiencia en el uso. Los aproximadamente 1 260 millones de ha bajo agricultura de secano (correspondientes a un 80% del total de la tierra cultivada del mundo) suministran el 60% de la alimentación del mundo mientras que los 277 millones de hectáreas bajo riego (el restante 20% de tierra cultivada) contribuye con el otro 40% de los suministros de alimentos. En promedio, los rendimientos por unidad de superficie cultivada son 2.3 veces más altos en el área regada que en las áreas de secano. Estas cifras demuestran la importancia de la agricultura de regadío en la producción mundial de alimentos y la necesidad de introducir mejoras en los sistemas para un mejor aprovechamiento del agua (Garcés *et al.*, 2008).

Generalmente en la agricultura se tienen altos consumos de agua causados por la sobreirrigación, lo cual no sólo genera un derroche de agua, sino que dicha ineficiencia en la aplicación del agua de riego finalmente conlleva a pérdidas de fertilizantes nitrogenados y posterior contaminación de los acuíferos subterráneos por lixiviación de estos. Además la alta variabilidad espacial en las condiciones físicas del suelo se traducen en un reparto desigual de agua de riego aplicada en

el predio, problema que generalmente no es considerado tanto para el diseño de nuevas obras de riego (aspersión, goteo, y riego superficial) como en las ya existentes (Castro *et al.*, 2008). En Cuba las principales causas que originan estas situaciones se relacionan según Cisneros *et al.* (2011), con la mecanización masiva del riego, mediante la extensión de las máquinas de pivote central y otras, que aunque logran elevadas productividades de áreas regadas por hombre, muestran signos de poca efectividad agrícola y baja eficiencia en el uso del agua, relacionada esto a su vez, con un empleo incorrecto y el desconocimiento del modo de operar estas tecnologías. Varios autores como Santos *et al.* (2010), y Pacheco *et al.* (2012), resaltan la importancia de la correcta determinación de las necesidades de agua de los cultivos con el empleo de las nuevas tecnologías de la información, por el ahorro de agua que presuponen, y plantean que para lograr que la agricultura bajo riego contribuya al uso sostenible del agua será necesario reducir los volúmenes aplicados a los cultivos, basados en los métodos de programación de riego, término que usualmente se emplea para describir el procedimiento mediante el cual se determina la frecuencia y dosis de agua a aplicar en cada riego, teniendo en cuenta las condiciones edáficas existentes, el tipo de cultivo y su estado fisiológico así como el clima predominante. El fin perseguido es, además de incrementar los niveles de producción, propiciar un ahorro del agua empleada en cada riego, con el mínimo riesgo de contaminación al ambiente.

2.2. Evapotranspiración. Conceptos y definiciones.

Desde hace mucho tiempo, el llegar a conocer los consumos de agua por parte de los cultivos, y muy especialmente los requerimientos hídricos netos y brutos de riego, es una preocupación de los ingenieros, proyectistas, gestores y agricultores. Los consumos de agua de un cultivo, o necesidades hídricas, se corresponden con su evapotranspiración (ET) en un determinado ambiente y bajo un manejo concreto del mismo (Santos *et al.*, 2010).

Uno de los primeros intentos para definir el término derivado de estos procesos fue descrito por H.F. Blaney y W.D. Criddle en 1952, quienes definieron “*uso consuntivo o evapotranspiración*” como, “*la suma de los volúmenes de agua*

usados por el crecimiento vegetativo de una cierta área, por conceptos de transpiración y formación de tejidos vegetales y evaporada desde el suelo adyacente, proveniente de la nieve o precipitación interceptada en el área en cualquier tiempo dado, dividido por la superficie del área” (Martínez y Fernández, 2010).

Estudios de Allen *et al.* (2006) reconocen como evapotranspiración la combinación de dos procesos separados en los que el agua se pierde, a través de la superficie del suelo por evaporación y mediante la transpiración del cultivo. En la naturaleza, la evaporación desde el suelo y la transpiración desde la planta ocurren simultáneamente, sin que existan métodos sencillos de distinguir entre ambas. Por ello se engloban bajo el término de evapotranspiración.

Al respecto, en la literatura referente al tema se encuentra consenso entre los diferentes autores en cuanto a este concepto, pero difieren las formas de expresar el mismo, bajo determinadas nomenclaturas según las regiones del mundo donde haya tenido lugar la investigación, de acuerdo con las diferentes definiciones que incluye este proceso de pérdida de agua, lo que complejiza la lectura, interpretación y replicación de varias de estas tesis por el lector. Precisamente en el Estudio FAO Riego y Drenaje No. 56 de 2006 no se recomienda el uso de otras denominaciones como ET potencial, debido a las ambigüedades que se encuentran en su definición.

En el estudio anterior el concepto incluye tres diferentes definiciones: evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o), evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET_{ce}), y evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar (ET_{caj}). Por la incidencia del primero en esta tesis, haremos referencia únicamente a él.

A la tasa de evapotranspiración que ocurre sobre una superficie de referencia, sin restricciones de agua, y que corresponde a un cultivo hipotético de pasto con características específicas se conoce como evapotranspiración del cultivo de referencia, y se denomina ET_o. La cual tiene entre sus características una altura de 0.12 m, una superficie de resistencia constante de $70 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$ y un albedo de 0.23. Este es un parámetro relacionado con el clima que expresa el poder

evaporante de la atmósfera, independientemente del tipo y desarrollo del cultivo, y de las prácticas de manejo, con el objetivo de poder calcular una ET, que multiplicada por un coeficiente de cultivo K_c pueda servir para estimar la evapotranspiración de los cultivos, definida esta relación por la siguiente ecuación (1):

$$E_{tc} = E_{to} \cdot K_c \quad (1)$$

Donde:

E_{tc} – Evapotranspiración del cultivo ($mm\ d^{-1}$)

E_{to} – Evapotranspiración de referencia ($mm\ d^{-1}$)

K_c – Coeficiente biológico del cultivo.

Debido a que hay una abundante disponibilidad de agua en la superficie antes mencionada, los factores del suelo no tienen ningún efecto sobre la evapotranspiración. El relacionar la ET a una superficie específica permite contar con una referencia a la cual se puede relacionar la ET de otras superficies. Además, se elimina la necesidad de definir un nivel de ET para cada cultivo y periodo de crecimiento. Se pueden comparar valores medidos o estimados de E_{to} en diferentes localidades o en diferentes épocas del año, debido a que se hace referencia a ET bajo la misma superficie de referencia (Allen *et al.*, 2006; Santos *et al.*, 2010).

2.3. Métodos para estimar la evapotranspiración.

La ET puede medirse directamente con lisímetros, e indirectamente, con métodos micrometeorológicos, pero puede estimarse mediante diferentes modelos, más o menos empíricos, a partir de registros periódicos de distintas variables climáticas. Aunque las dos primeras posibilidades son más propias del campo de la investigación, la tercera alternativa es la más extendida en la práctica del riego. Esta se expresa normalmente en milímetros por unidad de tiempo ($mm\ h^{-1}$; $mm\ día^{-1}$; $mm\ mes^{-1}$), donde se enuncia la cantidad de agua perdida de una superficie cultivada en unidades de altura de agua.

La determinación experimental requiere aparatos específicos y mediciones precisas de varios parámetros físicos. Los métodos experimentales de campo, son en general caros, exigiendo precisión en las mediciones, y pueden ser completamente realizados y analizados apropiadamente sólo por personal de

investigación suficientemente preparado. A pesar de que estos procedimientos no son apropiados para mediciones de rutina, siguen siendo importantes para la evaluación de las estimaciones de ET obtenidas con otros métodos indirectos. (Allen *et al*, 2011).

De acuerdo con Ahmad *et al.* (2005), los métodos pueden ser agrupados en cuatro categorías, hidrológicos (balance de agua), mediciones directas (lisímetros), métodos micrometeorológicos (balance de energía) y métodos empíricos o métodos combinados, basados en el balance de energía o factores climáticos.

2.3.1 Balance de agua en el suelo.

El método basado en medir varios componentes del balance de agua en el suelo, consiste en evaluar los flujos de agua que entran y salen de la zona radical del cultivo dentro de un determinado periodo de tiempo. El riego (R) y la precipitación (P) proporcionan agua a la zona radicular. Parte de estos ingresos pueden perderse por escurrimiento superficial (ES), y percolación profunda (D) la cual eventualmente recargará la capa freática. El agua también puede ser transportada hacia la superficie mediante capilaridad (C) desde la capa freática sub-superficial hacia la zona de raíces, o ser incluso, transferida horizontalmente por flujo sub-superficial hacia dentro (FSin) o fuera (FSout) de la zona radicular (ΔFS). Sin embargo, excepto bajo condiciones de pendientes pronunciadas, normalmente los valores de FSin y FSout son mínimos y pueden no ser considerados. Para las condiciones de Cuba según Pacheco *et al.* (1995), este aporte de agua no es frecuente. Únicamente cuando la capa de aguas freáticas está a menos de 3.0 m de la superficie del suelo, puede ascender hasta la zona radical una cierta cantidad de agua por capilaridad; y en último caso es de importancia revisar la calidad del agua freática en lo relativo a la presencia o no de sales.

En cualquier caso el cálculo teórico de este ingreso de agua a través de los poros capilares es bastante inexacto y se calcula como por ciento de la evapotranspiración.

Si todos los otros flujos aparte de la evapotranspiración pueden ser evaluados, esta se puede deducir a partir del cambio en el contenido de agua en el suelo (ΔSW) a lo largo de un periodo de tiempo:

$$ET = R + P - ES - D + C \pm \Delta FS \pm \Delta SW \quad (2)$$

Donde:

ET – Evapotranspiración ($mm\ d^{-1}$)

R – Aporte de agua por riego (mm)

P – Precipitación (mm)

ES – Escurrimiento superficial (mm)

D – Percolación profunda (mm)

C – Capilaridad (*duda*)

ΔSW – Variación de la zona radical (cm)

ΔFS – Variación en el contenido de agua en el suelo (mm)

Como se ha planteado anteriormente el flujo sub-superficial, la percolación profunda y la capilaridad desde la capa freática son difíciles de medir, y pueden no considerarse en periodos cortos de tiempo. Por lo que solo se puede dar estimaciones de ET para periodos largos de tiempo del orden de una semana o diez días (Allen *et al.*, 2006).

2.3.2. Lisímetros

Si se aísla la zona radical del cultivo y se controlan los procesos que son difíciles de medir, los diversos términos en la ecuación del balance de agua en el suelo se pueden determinar con apreciable exactitud. Esto se hace en lisímetros que son tanques aislados llenados con suelo disturbado o no disturbado en los que el cultivo crece y se desarrolla. En lisímetros de pesaje de precisión, la evapotranspiración se puede obtener con una exactitud de centésimos de milímetro, donde la pérdida de agua es medida directamente por el cambio de masa y períodos pequeños tales como una hora pueden ser considerados. En lisímetros de drenaje, la evapotranspiración es medida por un período dado, restando la cantidad de agua de drenaje, recogida en el fondo de los lisímetros, de la cantidad total de agua ingresada. Un requerimiento de los lisímetros es que la vegetación dentro e inmediatamente fuera del lisímetro sea idéntica (la misma altura e índice de área foliar). Este requisito no se ha respetado normalmente en muchos estudios de lisimetría y ha dado lugar a datos seriamente desviados y poco representativos de ETc y Kc. Como los lisímetros son difíciles de manejar y caros de construir y además su operación y mantenimiento requieren de especial

cuidado, su uso se restringe normalmente a trabajos investigativos. (Martínez, 2010).

2.3.3. Métodos de balance de energía y microclimáticos.

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

$$R_n - G - \lambda ET - H = 0 \quad (3)$$

Donde:

R_n – Radiación neta ($W m^{-2}$)

H – Flujo de calor sensible ($W m^{-2}$)

G – Flujo de calor del suelo ($W m^{-2}$)

λET – Flujo de calor latente ($W m^{-2}$)

Los distintos términos pueden ser positivos o negativos. Cuando R_n es positivo, proporciona energía a la superficie y cuando G , λET y H son positivos retiran energía de la superficie (Allen *et al.*, 2010).

Estos métodos y otros como el de la covarianza de remolinos, que de acuerdo con lo planteado por Warland y Taillon (2002), es el método micrometeorológico de mayor precisión para determinar la ET de diferentes condiciones y tipo de vegetación, requieren medidas precisas de la presión de vapor, y de la temperatura del aire, o velocidad del viento, a diferentes niveles sobre la superficie, por lo tanto su aplicación se restringe principalmente a situaciones de investigación.

2.3.4. Métodos empíricos o combinados.

Varios investigadores han estudiado la influencia que tienen algunos parámetros climáticos sobre la evapotranspiración, y estudiando los mismos conjuntamente

con determinaciones directas de la evapotranspiración en diferentes cultivos, han encontrado fórmulas en las que intervienen esos elementos del clima, lo que permite que conociendo los mismos, y algunos datos referentes al cultivo (especie, fase de desarrollo) pueda calcularse indirectamente la Eto como elemento importante para decidir el momento del riego. La ventaja de este método respecto a los directos es su rapidez. Los métodos agrometeorológicos tienen la ventaja de predecir la evapotranspiración para grandes áreas de cultivo en poco tiempo y con bastante precisión para ser tenidos en cuenta en la programación de los riegos.

Método FAO Penman-Monteith.

En 1948, Penman combinó el balance energético con el método de la transferencia de masa y derivó una ecuación para calcular la evaporación de una superficie abierta de agua a partir de datos climáticos estándar de horas sol, temperatura, humedad atmosférica y velocidad de viento. Este método conocido como combinado fue desarrollado posteriormente por muchos investigadores y ampliado a las superficies cultivadas por medio de la introducción de factores de resistencia. La ecuación combinada de Penman - Monteith es:

$$\lambda ET = \frac{\Delta(Rn - G) + \rho a + c_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma \left[1 + \frac{r_s}{r_a} \right]} \quad (4)$$

Donde:

Rn - Radiación neta (MJ m⁻² día⁻¹)

G - Flujo del calor en el suelo (MJ m⁻² día⁻¹)

(e_s – e_a) - representa el déficit de presión de vapor del aire (k Pa)

ρ_a - Densidad media del aire a presión constante (kg m⁻³)

C_p - Calor específico del aire. (MJ kg⁻¹ °C⁻¹)

Δ - Pendiente de la curva de presión de vapor de saturación (k Pa °C⁻¹)

γ - Constante psicrométrica) (k Pa °C⁻¹)

(r_s y r_a) - Resistencias superficial (total) y aerodinámica. (s m⁻¹)

Según lo formulado arriba, el enfoque de Penman-Monteith incluye todos los parámetros que gobiernan el intercambio de energía y el flujo de calor (evapotranspiración) de grandes extensiones uniformes de vegetación. La mayoría de los parámetros son medidos o pueden calcularse fácilmente de datos meteorológicos. La ecuación se puede utilizar para el cálculo directo de la

evapotranspiración de cualquier cultivo pues las resistencias superficial y aerodinámica son específicas para cada cultivo. (Allen *et al.*, 2011).

Tiempo después la colaboración entre la Comisión Internacional para Riego y Drenaje y la Organización Meteorológica Mundial, convocada por la FAO para revisar las metodologías previamente propuestas, y elaborar recomendaciones a este respecto, es que declara como nuevo método estandarizado el de FAO Penman-Monteith, el cual reduce las imprecisiones del método anterior de FAO Penman y produce globalmente valores más consistentes con datos reales de uso de agua de diversos cultivos.

Con este método se obtienen valores más consistentes del consumo de agua de los cultivos, esto debido a que toma en cuenta un mayor número de variables climáticas en comparación con otros métodos. Finalmente la ecuación queda así:

$$E_{to} = \frac{0.408\Delta(Rn-G) + \gamma \frac{900}{T+273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (5)$$

Donde:

E_{To} - Evapotranspiración de referencia (mm día^{-1})

R_n - Radiación neta en la superficie del cultivo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$)

G - Flujo del calor de suelo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$)

T - Temperatura media del aire a 2 m de altura ($^{\circ}\text{C}$)

U_2 - Velocidad del viento a 2 m de altura (m s^{-1})

e_s - Presión de vapor de saturación (k Pa)

e_a - Presión real de vapor (k Pa)

$(e_s - e_a)$ - Déficit de presión de vapor (k Pa)

Δ - Pendiente de la curva de presión de vapor ($\text{k Pa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$)

γ - Constante psicrométrica ($\text{k Pa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$)

Método del tanque de evaporación. Evaporímetro Clase A

La evaporación de una superficie libre de agua, proporciona un índice del efecto integrado de la radiación, la temperatura del aire, la humedad del aire y del viento en la evapotranspiración. Sin embargo, diferencias entre la superficie de agua y las superficies cultivadas producen diferencias significativas entre la pérdida de agua de una superficie libre de agua y una superficie cultivada. El tanque ha probado su valor práctico y ha sido utilizado con éxito para estimar la evapotranspiración de referencia, observando la pérdida por evaporación de una superficie de agua y aplicando coeficientes empíricos para relacionar la

evaporación del tanque con ETo. La evaporación se calcula como la diferencia entre dos lecturas diarias consecutivas, haciéndose ajustes por cualquier precipitación medida en un pluviómetro adyacente. (Herrera *et al.*, 2013).

El método del evaporímetro clase A para estimar la evapotranspiración de los cultivos se basa en el criterio de que sobre la lámina de agua de un evaporímetro influye todo el complejo de elementos climáticos que condicionan la evapotranspiración del agua por las plantas como fenómeno físico, por lo que el método del evaporímetro integra todos los métodos anteriores. Sin embargo, diversos factores pueden tener influencia en inexactitudes del evaporímetro para estimar la evapotranspiración, tales como: la reflexión que se origina en una superficie de agua es de 5 a 8% en relación con la radiación solar recibida, mientras que para la mayoría de las cubiertas vegetales es de 20 a 25%; el calor almacenado en el tanque durante el día puede dar lugar a valores de evaporación nocturna relativamente altos que no se corresponden con la evapotranspiración de los cultivos por las noches (Allen *et al.*, 2001).

2.4. Teledetección y Sistemas de Información Geográfica (SIG) aplicados al riego.

La consolidación de la agricultura de riego como se ha visto, es un aspecto prioritario, tanto para países desarrollados como en vías de desarrollo, pero su crecimiento sostenible se ve limitado por la escasez de agua y de tierras regables. Sin embargo, existe la posibilidad de incrementar en forma importante la producción agrícola si se utilizan eficientemente el agua y la infraestructura disponibles, mediante un mejor manejo de los sistemas de conducción (incluyendo la operación), modernización de la infraestructura, un mejor mantenimiento y prácticas agrícolas más adecuadas.

En este sentido según Mena *et al.* (2007), los programas de computación disponibles cada vez son más utilizados, van aumentando sus prestaciones y potencialidad para el análisis de datos, a la vez que son más amigables para el usuario. La disponibilidad de tecnología e informática ofrecen nuevas herramientas que acompañan, potencian y enriquecen los procesos llevados a cabo. Específicamente la geomática, a través de los Sistemas de Información Geográfica, la teledetección y el Sistema de Posicionamiento Global (GPS), están

tomando un rol preponderante en el manejo de los recursos hídricos, al conjugar la dimensión espacial y temática en la representación precisa de los componentes territoriales (Bastiaanssen *et al.*, 2005), elementos claves al momento de configurar un escenario ajustado a la realidad, en donde cada componente presenta características propias que pueden y deben ser analizadas conjuntamente. Otros autores como Martínez (2010), refieren que dentro de la agricultura, la de regadío es una de las más interesadas en este tipo de información, por el uso del agua como recurso productivo estratégico cada vez más escaso, el cual es motivo de preocupación, y se requieren nuevas estrategias que permitan una optimización de la gestión de esta. Así mismo el empleo de la teledetección en la gestión y manejo del regadío ha probado hoy día mejorar el diagnóstico del cultivo, optimizar la eficiencia en la utilización de insumos, mejorar la gestión del riego, agilizar la toma de decisiones, reducir los impactos ambientales y mejorar la conservación de los recursos naturales.

Es evidente que las imágenes satelitales y las fotografías aéreas son de mucha utilidad si podemos leer lo que ellas expresan con las variaciones de colores que reflejan. Ellas en combinación con información meteorológica y los modelos de balance de energía en superficie, se muestran actualmente como una herramienta alternativa y complementaria a las técnicas tradicionales para estimar la evapotranspiración o consumo del agua. Temática sobre la cual, en las últimas décadas se han hecho muchos estudios por parte de investigadores de diferentes regiones del mundo (Kustas, 1990; Bastiaanssen, 2000; Girolimetto y Venturini, 2013; Ocampo *et al.*, 2013; Gordillo *et al.*, 2014), con el objetivo de estimar los flujos de energía y los intercambios que ocurren en superficies con vegetación y sin vegetación, en diversas cubiertas de suelo como campos agrícolas, usando modelos basados en sensores remotos. Debido a que con estas técnicas se obtiene un mejor entendimiento de la distribución espacial y en diferentes escalas de la ET. Además la mayoría de los métodos tradicionales sólo pueden proveer estimaciones puntuales de la evapotranspiración, lo cual muchas veces no es suficiente para capturar la variación espacial en grandes áreas (García y Llellish 2011).

2.5. Programación y pronóstico de riego.

La programación de riego es una metodología que permite determinar el nivel óptimo de agua a aplicar en cada período fenológico del cultivo, de acuerdo a las interacciones específicas de suelo, planta y clima; las cuales actualmente son integradas a través de modelos biomatemáticos. La optimización de esta programación puede hacerse con criterios agronómicos muy diferentes, dependiendo, en primera instancia, del nivel al que se analiza el problema. Atendiendo a los objetivos perseguidos ésta puede llevarse a cabo con fines puramente técnicos, económicos o, también con fines ambientales. Según Tarjuelo (2005) lo más frecuente, dentro del marco y concepto de la Agricultura Sostenible, es que se combinen los tres criterios. Para programar el riego es esencial estimar tanto la evapotranspiración real del cultivo, como la cantidad de agua que puede almacenar el suelo en la zona de raíces. Es entonces este, un procedimiento que permite establecer el momento oportuno del riego y la cantidad exacta de agua a aplicar en cada período fenológico. Sin embargo, esta técnica requiere de la calibración local de algunos parámetros incorporados en el modelo matemático tales como coeficiente de cultivo, criterio de riego y componentes del balance de energía. A nivel mundial, esta tecnología iniciada en los años ochenta ha tenido un gran impacto económico en el sector agrícola, pues ha permitido mejorar significativamente la eficiencia del uso del agua y ha contribuido a incrementar la calidad y rendimiento de los productos agrícolas de exportación. Existen modelos de programación de riego que incluyen en su desarrollo modelos empíricos para determinar la evolución, en profundidad, del sistema radicular, la escorrentía, la percolación profunda y la precipitación efectiva. La mayoría de los métodos que se aplican en la práctica ordinaria de la programación de riego corresponde a los distintos modelos de balance de agua en el suelo. Uno de los más extendidos es el balance hídrico, que implica la determinación de todas las entradas (riegos y lluvia) y salidas del agua en el suelo, debiéndose conocer en todo momento el agua que queda en el suelo a disposición del cultivo para que no descienda por debajo de un umbral de humedad prefijado en función del objetivo perseguido con la programación (SEPOR, 2007)

En la mayoría de las empresas agrícolas de nuestro país, la aplicación del riego se realiza a partir de decisiones que parten muchas veces, del criterio de directivos, y se caracteriza por la carencia en el uso de métodos apropiados de programación para decidir valores de normas totales netas. Obviando pasos que son determinantes como el diseño agronómico dentro del riego de proyecto, el cual a su vez, presenta ciertas dificultades, tanto de tipo conceptual como de cuantificación de ciertos parámetros, por el gran número de condicionantes que han de tenerse en cuenta (suelo, clima, cultivo, parcelación) así, podríamos afirmar que este abarca desde la estimación de agua de los cultivos, pasando por la determinación de los parámetros de riego, hasta la disposición de los emisores en el campo.

2.6. Modelos de predicción numérica del tiempo (NWP).

La predicción del tiempo ha sido el motor fundamental del desarrollo de la meteorología moderna. Desde la invención de los ordenadores en los años cuarenta, los modelos numéricos de predicción del tiempo se han convertido en la herramienta fundamental del proceso de predicción del tiempo. Al mismo tiempo, los modelos numéricos se usan como herramienta de investigación de los procesos atmosféricos. Los modelos numéricos realizan una predicción objetiva del futuro estado de la atmósfera resolviendo un sistema de ecuaciones matemáticas para calcular, a partir de un instante inicial, la evolución temporal de la temperatura, el viento, la humedad y la presión en cualquier punto de la atmósfera. Estas ecuaciones expresan principios y leyes de la Física como la segunda ley de Newton, el primer principio de la Termodinámica, el principio de conservación de la masa de aire y del agua (vapor-líquido-sólido) en la atmósfera y la ecuación hidrostática y la ecuación de estado del aire. Como el complejo sistema de ecuaciones diferenciales no tiene solución analítica, hay que aplicar métodos numéricos aproximados para resolverlo. (García, 2013).

Vilhelm Bjerkness fue el primero en reconocer que la predicción numérica del tiempo era posible, en principio, y propuso que esencialmente el pronóstico del tiempo se puede considerar como un problema matemático de condiciones iniciales. Es decir que dado un conjunto de ecuaciones que gobiernan el cambio

de las variables meteorológicas con el tiempo, y conociendo la condición inicial de la atmósfera, se puede resolver las ecuaciones para obtener nuevos valores para esas variables en un momento posterior, generando así un pronóstico.

Las ecuaciones del modelo se resuelven aplicando esquemas numéricos, para lo cual es preciso dividir el espacio ocupado por la atmósfera mediante una malla de celdillas tridimensionales. Al iniciar la simulación, se asigna el valor de las variables atmosféricas en cada celdilla del modelo, que se deduce de las numerosas observaciones disponibles en ese momento a lo largo de todo el planeta. Dentro de los componentes fundamentales de un modelo se encuentran los esquemas numéricos y las parametrizaciones físicas

A partir de dicho instante inicial, resolviendo las ecuaciones se calcula en cada celdilla cuanto va cambiando el valor de cada variable atmosférica en intervalos de tiempo regulares (pocos minutos). Y así se continúa hasta que se completa el periodo de simulación (3 - 10 días). Con los esquemas numéricos solo se puede simular la evolución de los procesos atmosféricos cuyo tamaño sea mayor que el de las celdillas de la malla del modelo. Pero hay muchos otros procesos físicos con menor tamaño que producen importantes efectos en el estado y evolución de la atmósfera. Para tenerlos en cuenta, se resuelven centenares de ecuaciones que relacionan los valores de las variables calculados por los esquemas numéricos con los efectos de los procesos físicos de pequeño tamaño. Entre ellos se incluyen, por ejemplo, la absorción de radiación solar, la absorción y emisión de radiación, entre otros (Kelnay, 2003).

2.6.1. Alcance de los Numerical Weather Prediction (NWP). Parametrizaciones y ensembles.

Cuando se plantea el diseño de un modelo numérico hay que empezar por plantear claramente cuáles son las limitaciones y las prioridades. La limitación más importante es el tiempo máximo que debe mediar entre el comienzo y el final de la predicción que queremos hacer, de manera que si estamos diseñando un modelo operativo dicho tiempo debe ser menor que del 1% del tiempo de predicción (media hora para 48 horas de predicción). Naturalmente y dependiendo de la potencia de cálculo del ordenador del que disponemos, esto limita la cantidad de

puntos de rejilla que puede incluir nuestro área de integración y, por tanto, la resolución espacial de nuestro modelo. En cuanto a las prioridades debemos fijar nuestro horizonte de predicción, es decir, si vamos a hacer predicciones a escala global o en un área limitada y si van a ser a corto plazo (48 horas), medio plazo (hasta 10 días), estacionales (hasta seis meses) o climáticas (más de 10 años). Ambos aspectos no son independientes sino que están relacionados entre sí.

Por otro lado los modelos de clima tienen típicamente una resolución horizontal del orden de varios cientos de kilómetros, los modelos de pronósticos globales tienen resoluciones de 50 - 100 km, y los modelos regionales de mesoescala tienen resoluciones de 10 - 50 km. En la dirección vertical, la resolución y la extensión vertical ha sido incrementada sustancialmente en los modelos actuales teniendo entre 10 y 50 niveles verticales, extendiendo desde la superficie hasta la estratósfera e inclusive la mesósfera (Collard *et al.*, 2011).

A pesar del continuo incremento de la resolución, hay muchos procesos importantes y escalas de movimientos en la atmósfera que no pueden ser explícitamente resueltos con los modelos actuales, como se había visto con anterioridad. Esto incluye desde movimientos turbulentos con escalas de centímetros hasta la escala de la grilla del modelo, así como también procesos que ocurren a nivel de escala molecular, como condensación, evaporación, y fricción. Se suele referir a todos los procesos que no pueden resolverse explícitamente como procesos a escala de sub-grilla.

Un ejemplo de un proceso importante que se da a escala de sub-grilla es el mezclado turbulento en la capa límite planetaria. Durante el día, el calor del sol que llega a la tierra no sólo calienta el suelo, sino que también hace que las plantas transpiren y la humedad del suelo se evapore. Estos procesos transportan humedad hacia la atmósfera.

El calentamiento de la superficie conduce a movimientos turbulentos que se producen en escalas de unos pocos metros a unos pocos cientos de kilómetros. Con un tamaño de grilla horizontal de entre 10 - 100 km, los modelos no pueden resolver estos movimientos.

Aunque estos procesos ocurren a pequeña escala, ellos dependen y a su vez afectan los campos a gran escala y a los procesos que son explícitamente resueltos por los modelos numéricos. Por ejemplo, la condensación de vapor de agua a escala de sub-grilla ocurre si el campo de humedad es suficientemente alto, y a la vez, la condensación libera calor latente que calienta el campo de temperatura de sub - grilla. Por esta razón, no se pueden ignorar los efectos de los procesos de sub - grilla sobre los campos de escala resoluble sin degradar la calidad del pronóstico.

Para reproducir la interacción de los procesos de la sub-grilla y la grilla, los fenómenos a escala de sub - grilla son parametrizados, es decir su efecto es formulado en términos de los campos resolubles (Richardson, 2011).

Los detalles de las parametrizaciones tienen profundos efectos en los modelos de pronóstico, principalmente a escalas de tiempos grandes, y son el motivo de muchas y continuas investigaciones.

Jule Charney demostró que debido sólo a un error de redondeo de diferencia, entre dos simulaciones, después de un par de semanas, ambas soluciones diferían una de otra como si fueran dos trayectorias aleatorias del modelo.

Esta alta sensibilidad al cambio en la condición inicial generó un dilema para los pronosticadores, ya que no existe un único pronóstico correcto. En este sentido se desarrolló el concepto de pronóstico de ensembles que se utiliza para generar una solución representativa de posibles estados futuros de la atmósfera. El ensemble considera predicciones numéricas múltiples que se dan a partir de leves diferencias en las condiciones iniciales plausibles dadas por un conjunto de mediciones u observaciones. A veces el ensemble puede provenir de diferentes modelos o por diferentes formulaciones de un mismo modelo. Esta forma de pronóstico es utilizada en la actualidad por la mayoría de los centros operacionales de pronóstico (Wang *et al.*, 2003).

2.6.2. Pronósticos operacionales. Modelos globales y regionales.

En la mayoría de los centros se utiliza una combinación de modelos globales y locales. Los modelos globales son generalmente usados en pronósticos de rango medio (dos días o más) y debido a que ellos tienen un dominio horizontal global, que incluye toda la tierra, estos modelos no pueden correr con una alta resolución. Para un pronóstico más detallado es necesario aumentar la resolución, es aquí donde se utilizan los denominados modelos regionales, o Modelos de Área Limitada (LAMs) en la región de interés. Gracias a su alta resolución los LAMs tienen la ventaja de ser más precisos en la reproducción de fenómenos a pequeña escala tales como frentes, squall lines, y un mejor forzado orográfico que los modelos globales.

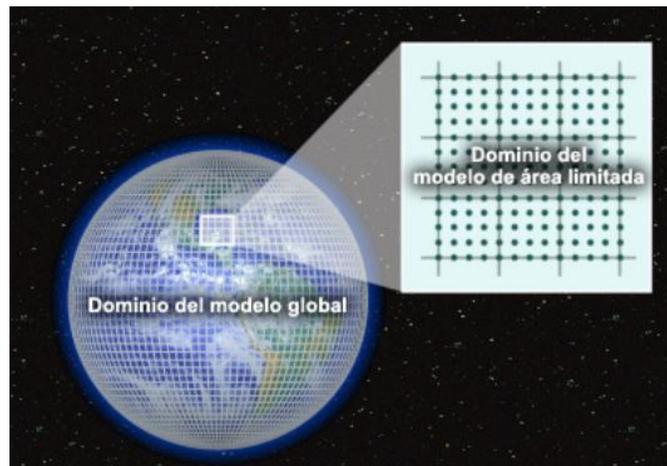


Figura 1. Representación gráfica de un modelo regional anidado en un modelo global.

Por otro lado, los LAMs tienen la desventaja de que, a diferencia de los modelos globales, éstos no son autocontenidos ya que requieren de condiciones de contorno tan precisas como sea posible, de no ser así la solución interior de los LAMs se deteriora rápidamente.

Por lo tanto es habitual anidar los LAMs dentro de otro modelo de menor resolución, cuyo pronóstico le provee las condiciones de contorno. Esta es la razón por la cual los LAMs son usados sólo para pronósticos de corto plazo. (Belda, 2014).

2.6.3. Modelo numérico global (GFS) Global Forecast System.

El *Global Forecast System* desarrollado por *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP) USA, es un sistema global de predicción numérica del tiempo que corre cuatro veces al día y produce pronósticos de hasta 16 días.

Básicamente el modelo corre en dos partes. La primera de ellas tiene alta resolución y pronostica 192 horas (ocho días), mientras que la segunda parte corre desde la hora 192 hasta la 384 (16 días) en baja resolución. La resolución del modelo varía en cada parte del modelo: horizontalmente la resolución varía desde 35 a 70 km, verticalmente divide la atmósfera en 64 capas y temporalmente produce pronósticos cada tres horas en las primeras 192 horas y cada 12 horas hasta las 384 horas. El GFS es un modelo acoplado compuesto por cuatro modelos separados, un modelo de atmósfera, un modelo de océano, un modelo de tierra/suelo y un modelo de hielo marino. Estos cuatro modelos trabajan juntos para proveer mayor precisión en la representación de las condiciones climáticas.

Para inicializar los pronósticos (Análisis) el GFS utiliza información que proviene del *Global Data Assimilation System* (GDAS). El GDAS es el componente operativo del *Gridpoint Statistical Interpolation* (GSI) el cual es un sistema de asimilación de datos variacional tridimensional (3D_VAR). El modelo global GFS es el único que tiene sus datos de salida disponibles libremente en un dominio público en internet (a través de servidores NOMADS).

3. Materiales y métodos

El marco geográfico seleccionado para el estudio se corresponde con la región central de Cuba, la cual abarca las provincias de Cienfuegos (4186,60 km²), Villa Clara (8413,13 km²), Sancti Spíritus (6779,81 km²) y Ciego de Ávila (6946,90 km²) (Cuba. Oficina Nacional de Estadísticas e Información, ONE, 2011).

3.1 Determinación de la evapotranspiración de referencia y las precipitaciones históricas en el área de estudio

Como paso previo a la caracterización de las zonas escogidas para la investigación, se realizó un tratamiento a los datos iniciales de entrada de las variables climáticas seleccionadas. (Tabla 1).

3.1.1. Tratamiento de los datos de inicialización.

Se analizaron los datos provenientes de 14 estaciones meteorológicas ubicadas en las provincias del territorio, pertenecientes a la Red Nacional de Estaciones Meteorológicas del Instituto de Meteorología (INSMET) (Figura 2).

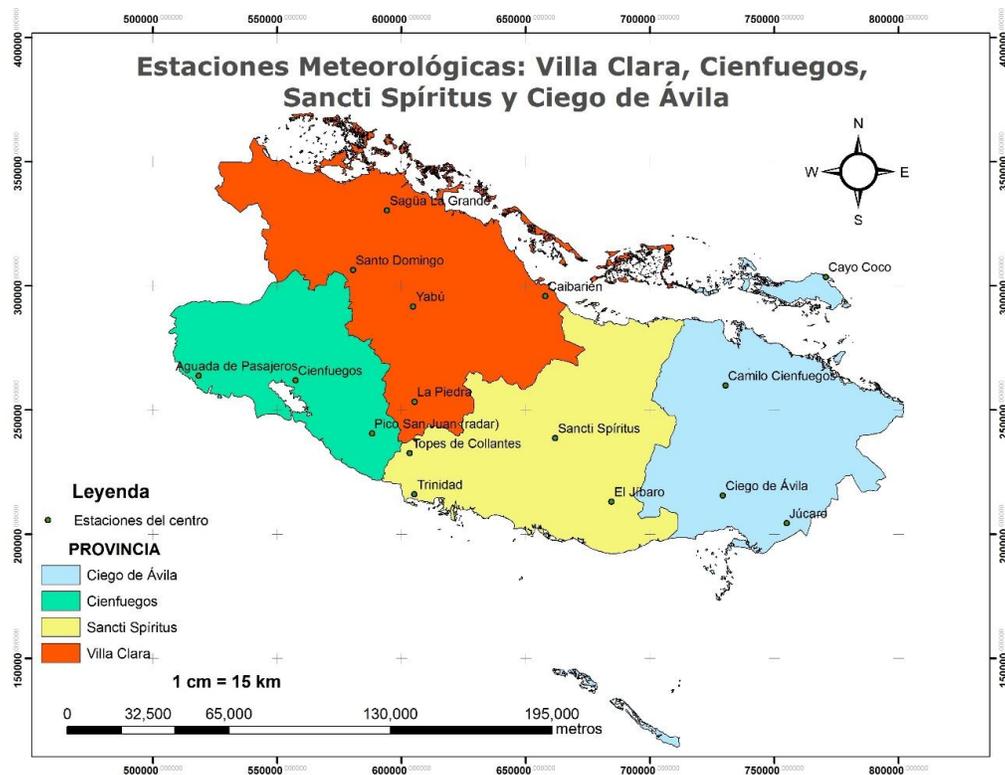


Figura 2. Ubicación geográfica de las estaciones agrometeorológicas del centro del país.

Se analizaron los registros diarios de las bases de datos de nueve variables climáticas en una serie de 21 años concernientes al periodo 1993-2013.

Tabla 1. Variables climáticas empleadas en la investigación.

Variable	Unidad
Temperatura mínima del aire	°C
Temperatura media del aire	°C
Temperatura máxima del aire	°C
Tensión de vapor de agua	mm
Nubosidad	Octavos de cielo cubierto
Acumulado de precipitaciones	mm
Insolación (Duración de la radiación solar)	h
Humedad relativa del aire	%
Velocidad del viento	m/s

Se determinaron los datos faltantes de la serie para cada una de las variables en estudio, con la utilización del paquete estadístico SPSS versión 13.0 para Windows y, se determinó el porcentaje que representaban los casos válidos entre los posibles con ayuda del procesador Microsoft Office Excel 2010.

Se efectuaron diversas comprobaciones para el control de la calidad de los datos de acuerdo con las recomendaciones dadas por (Plummer *et al.*, 2007), las cuales se ejecutaron simultáneamente al completado de las series. Para completar los datos faltantes se trabajó con el método de las medias aritméticas para inferir la variable correspondiente de acuerdo con la precisión requerida en el trabajo.

3.1.2. Marcha de la evapotranspiración de referencia y las precipitaciones en el área de estudio

Con las series completas, homogéneas y corregidas en cada una de las estaciones, se empleó el programa CROPWAT 8.0 para la estimación de la evapotranspiración de referencia a partir de los valores extremos de temperatura del aire (Swennenhuis *et al.*, 2014). El método adoptado en este caso fue el de Penman – Monteith, recomendado por la FAO.

En el caso de las precipitaciones se procedió a estimar los valores de precipitación efectiva, mediante la aplicación anterior, con el Método del *USDA Soil Conservation Service*, desarrollada por el USCS, por medio de la cual esta puede ser calculada de acuerdo a:

Para los valores mensuales de precipitación:

$$P_{ef} = \frac{P_{mensual} * (125 - 0.2 * P_{mensual})}{125} \therefore P_{mensual} \leq 250mm \quad (6)$$

$$P_{ef} = 125 + 0.1 * P_{mensual} \text{ tal que } P_{mensual} > 250mm \quad (7)$$

Se calculó el coeficiente de aprovechamiento de la lluvia de acuerdo a lo descrito por Pacheco *et al.* (1995) mediante la fórmula:

$$Kp = \frac{Pa}{Pc} \times 100 \quad (8)$$

Donde:

Kp: Coeficiente de aprovechamiento (%)

Pa: Precipitación aprovechada (mm)

Pc: Precipitación caída (mm)

3.2. Evaluación de la estimación y pronóstico de la Eto mediante un modelo numérico global.

Para la estimación y predicción de la Eto se propuso el empleo combinado de herramientas informáticas a partir de información agrometeorológica a corto plazo, con el propósito de fusionar las salidas predichas, con los mecanismos actuales de programación de riegos de las empresas agrícolas del territorio.

3.2.1. Estimación y pronóstico agrometeorológico de la evapotranspiración de referencia.

Para la obtención de valores de evapotranspiración de referencia estimados y predichos que posteriormente se pudieran incluir en los cálculos del balance hídrico agrometeorológico e insertarlos en los modelos de programación de riego, se procedió de la forma siguiente.

Se utilizó el programa Evapotranspiración propuesto por (Domínguez *et al.*, 2007) y modificado por (Domínguez *et al.*, 2008), el cual se encuentra en la plataforma web del Centro Meteorológico Provincial de Villa Clara (CMPVC), pero ahora con las salidas de evapotranspiración calculadas a partir de las temperaturas extremo del aire.

Se emplearon tres fuentes básicas de datos de entrada: (i) Observaciones trihorarias procedentes de la red de estaciones meteorológicas del Centro de Instrumentos y Métodos de Observación (CIMO), perteneciente al Instituto de Meteorología de la República de Cuba, (ii) Observaciones provenientes de la red informativa del Instituto de Recursos Hidráulicos y (iii) Datos de las salidas de un modelo numérico dinámico de dominio público.

El modelo sinóptico al cual se hace alusión es el GFS (*Global Forecast System*) (*Environmental Modeling Center*, 2013). Este es un modelo espectral con un horizonte espectral de resolución triangular de 254 (T254), una malla de 768x384 puntos, que aproximadamente es de 0.5° x 0.5° (55 km). En vertical tiene 64 niveles sigma desigualmente espaciados, con mejor resolución cerca de la parte inferior y de la parte superior.

Las variables meteorológicas utilizadas fueron predichas/obtenidas a partir del modelo de pronóstico MEC – PT (Mesoescala de Cuba – Pronóstico del Tiempo), para la red de estaciones meteorológicas de Cuba (Moya y Estrada, 2007). Básicamente el algoritmo de trabajo se propuso para dos casos: diagnóstico y pronóstico. Se asumen el diagnóstico como la variante de predicción agrometeorológica sin predicción meteorológica; mientras que el pronóstico incluye la marcha futura de las variables.

Los valores de temperatura extrema del aire se redujeron al nivel medio del mar con el empleo de la ecuación de estática, modificada sobre la base de la ecuación del estado para el aire no saturado (9):

$$T_0 = -0.06815 \bullet \left(\left[\frac{h_{est}}{\ln\left(\frac{P_1}{P_0}\right)} + 14.6730T_{est} \right] \right) \quad (9)$$

Donde:

T_0 - Temperatura reducida al nivel medio del mar, K.

T_{est} - Temperatura en el nivel de la estación, K.

h_{est} - Altura en el nivel de la estación, m.

P_i, P_0 - Presión al nivel de la estación y reducida al nivel del mar respectivamente, hPa.

En el caso de los datos de la presión atmosférica, estos fueron adquiridos en el sitio http://nomad6.ncep.noaa.gov/ncep_data/index.html, (última actualización del 1 de septiembre de 2006) y comprendieron desde los 12.5° hasta los 32.5° de latitud norte, 70° a 90° longitud oeste; mientras que la salida final se enmarcó entre los 19.74° y 23.43° latitud norte y los 73.86° y 85.06° longitud oeste.

Obtenido el valor de la temperatura del aire al nivel medio del mar para cada estación de la red nacional, se conformó una malla irregular de puntos (fig. 3) al combinarse con los valores tomados de la salida numérica del modelo GFS.

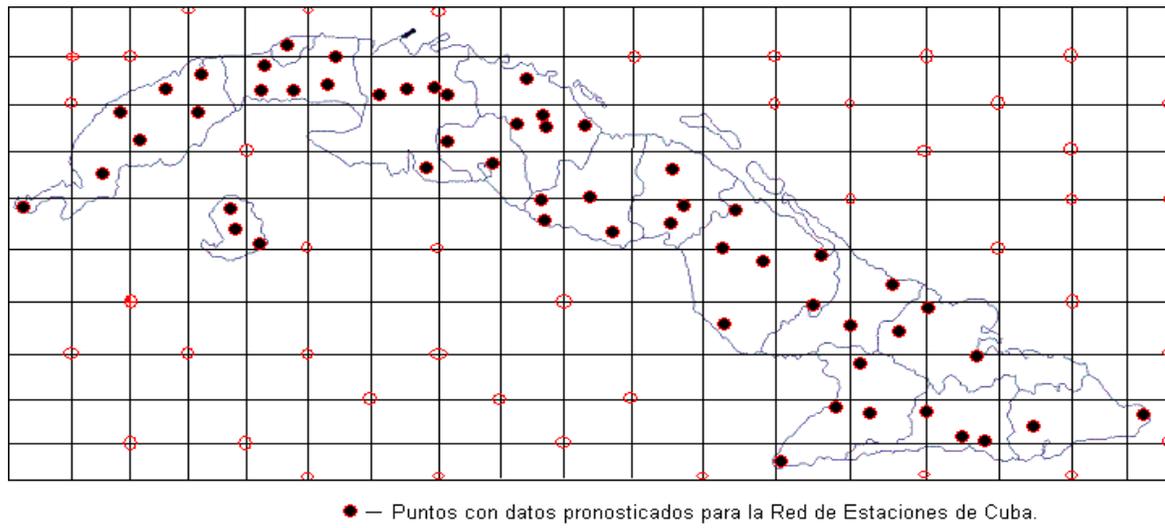


Figura 3. Malla irregular construida a partir de los valores de la humedad específica reducida al nivel medio del mar.

Para convertir la malla mostrada en la figura 3 en una malla regular de puntos se procedió a aplicar un método de análisis matemático (Press *et al.*, 2007). El escogido fue el método de *Shepard* y consiste en la definición de una función de interpolación $f(x)$ ponderada por sus ordenadas f_i (valores de las variables en los puntos dispersos):

$$f(x) = \sum_{i=1}^N \omega_i(x) f_i \quad (10)$$

$f(x)$ - Función de interpolación que arroja como resultado los valores de la variable en los nuevos puntos como resultado de la interpolación.

N - Cantidad de puntos dispersos.

$f_i = f(x_i)$ Valores en los puntos dispersos

$$\omega_i(x) = \frac{\sigma_i(x)}{\sum_{j=1}^N \sigma_j} \quad (11)$$

Función que define los pesos en el proceso de ponderación de los puntos para realizar la interpolación.

$$\sigma_i(x) = \frac{1}{d_i(x)^{\mu_i}} = \frac{1}{[(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2]^{\frac{\mu_i}{2}}} \quad \mu_i \in \mathfrak{R}^+ - \quad (12)$$

Es una potencia (μ_i) del inverso de la distancia euclidiana ($d_i(x)$).

Este es un tipo de método de inverso de distancia ponderada, es decir, que entre más grande sea la distancia entre x y x_i , es menor la influencia que tiene f_i sobre el valor de f en el punto x .

Al finalizar la interpolación se obtuvo una nueva malla con una distribución uniforme de los puntos, dispuestos a una distancia de 10 km tanto en el eje X como en el eje Y (fig. 4).

Posteriormente se calcularon los valores de la temperatura del aire a la altura sobre el nivel del mar de los nodos de la nueva malla regular, invirtiendo los términos de la fórmula 9.

La altura sobre el nivel del mar de cada nodo de la malla regular a una resolución de 10 km fue determinada previamente con ayuda del sistema *MapInfo Professional* versión 7.5 y del Atlas Nacional de Cuba (Ibarra *et al.*, 1978).

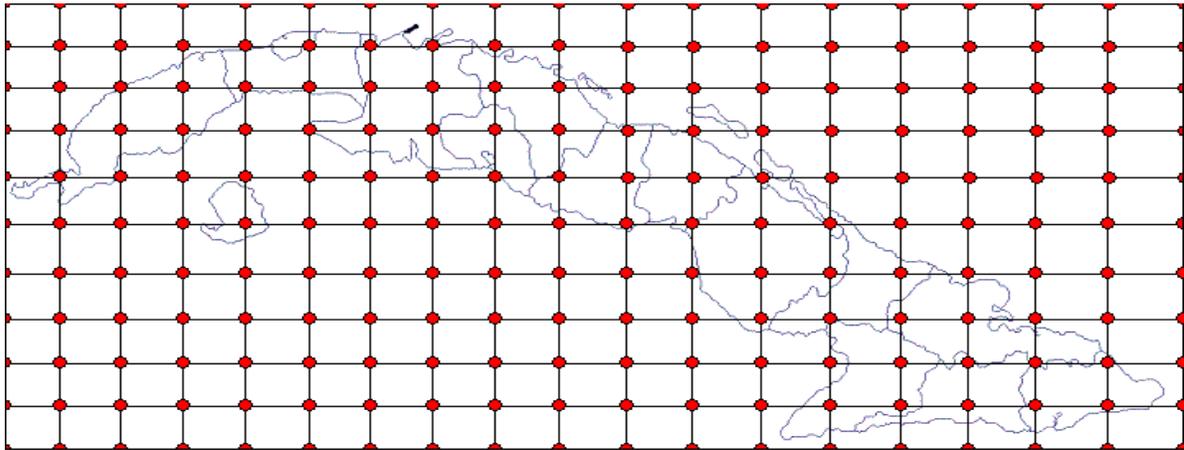


Figura 4. Malla regular obtenida con ayuda del método de análisis matemático objetivo de Shepard.

La aplicación se desarrolló sobre lenguaje de programación JAVA, en la plataforma de desarrollo o entorno de desarrollo integrado Eclipse versión 3.3.

Una vez obtenidos los datos se tomaron para el presente estudio, aquellos correspondientes a la región central.

3.2.2. Validación del método de estimación y pronóstico de la evapotranspiración de referencia.

Se compararon los diferentes métodos para determinar las posibles asociaciones que pudieran existir entre ellos, para lo cual, se aplicó un análisis de estadísticos descriptivos, utilizando el paquete estadístico SPSS versión 21.0, en este caso, tablas de contingencia y Prueba Chi², tal que:

H₀: Constatar independencia entre los métodos.

H₁: Supone la dependencia entre métodos.

Para ello se tomó al azar una muestra de valores de Eto estimados en la estación Yabú (78343), los cuáles fueron obtenidos a partir del ajuste para Cuba de Solano *et al.*, (2003b) del procedimiento de Penman–Monteith modificado (Monteith, 1991), por ser este el método que se emplea en las estaciones meteorológicas del país. Estos datos se compararon con los valores medios históricos hallados para la variable en esta zona, evaluados a partir de los datos de temperaturas extremas del aire con el uso del Cropwat 8.0, y por último, con las salidas predichas obtenidas.

3.3 Esquema para la inserción de la predicción agrometeorológica en la programación de riego.

A partir de la información obtenida de estimación y predicción de la Eto, se modificó el esquema de trabajo propuesto por Pacheco *et al.* (2008). Se le dio continuidad y vigencia a varios mecanismos creados con anterioridad por el proyecto conjunto entre la facultad de Ciencias Agropecuarias y el CMPVC, de Servicio de Asesoramiento al Regante en la provincia Villa Clara, mediante el análisis del modelo utilizado por Pacheco y Pérez (2010) y modificado por Pacheco *et al.*, (2012b), y bajo las premisas propuestas para el SAR (Junta de Andalucía, 2001).

4. Resultados y discusión

4.1. Determinación de la evapotranspiración de referencia y las precipitaciones históricas en el área de estudio

Los estudios realizados a partir de información básica como puede ser; el valor de las observaciones diarias de diferentes variables meteorológicas, acumuladas a través de los años formando series largas de registro de estos datos, requieren de una revisión previa, al establecimiento de los diferentes niveles de análisis, para evitar sesgos en la comprensión, y reproducción de los resultados alcanzados.

4.1.1. Tratamiento de los datos de inicialización.

A propósito la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 1992) sugiere que los datos meteorológicos deben pasar por varias etapas de control de calidad como son: la verificación de errores groseros, la verificación de la coherencia interna, de la coherencia temporal, y la verificación de la coherencia espacio-temporal. Cada uno de estos pasos es imprescindible para determinar el número de datos faltantes, registros cortos de información, y evaluar la calidad de las bases de datos empleadas, en las cuales, se recoge información clave para detectar, y monitorear la variabilidad en el clima.

En el caso de este trabajo, se analizaron series de 21 años de duración, comprendidas en el periodo 1993-2013, las cuales se clasifican de buenas, de acuerdo con el índice de calidad para el largo de las series (ILARGO), hallado por Álvarez *et al.* (2012) donde reciben esta denominación series entre 15 y 24 años. En la figura 4 se muestran resultados para diferentes etapas de la información contenida en las estaciones meteorológicas de la región central del país, donde se evidencia una mengua escalonada del porcentaje de observaciones válidas, hacia la parte final de las series. El análisis realizado para evaluar el estado de las series de registros de datos empleadas en este estudio, mostró porcentajes altos de observaciones válidas con respecto al total posible. Lo anterior resulta de gran importancia para establecer el alcance de las valoraciones, y los estudios que pueden emprenderse, a partir de la calidad y confiabilidad de los datos de inicialización de las series con que se cuenta.

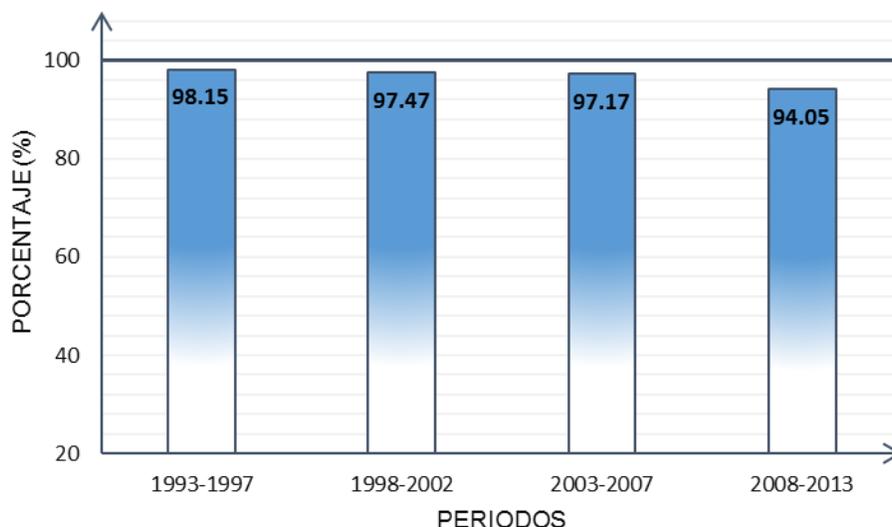


Figura 5. Porcentaje de observaciones válidas con respecto a las posibles, para diferentes periodos de la información contenida en las bases de datos de las estaciones de la región central de Cuba en el periodo (1993-2013).

Este resultado indica además, que no se requiere de complejos cálculos para la inferencia de los valores no medidos, dado que los porcentajes de completamiento de la información no excede el 6%, ni en el periodo 2008-2013, considerado aquí, como el de mayor dificultad. Con sencillos cálculos de completamiento; incluso con valores medidos de la variable en otros años, en la misma estación, se puede lograr mayor homogeneidad en las series, y que éstas sean al final, representativas de la población que describe el parámetro de análisis.

Según Infante *et al.* (2008) la disponibilidad, confiabilidad, y homogeneidad de una base de datos, puede resultar de mucha ayuda a los entes gubernamentales que toman decisiones; especialmente pueden ser utilizadas para predecir desastres en aquellas zonas vulnerables donde las precipitaciones afectan negativamente a la vida de los habitantes, o donde los periodos largos de sequías impactan en el desarrollo agrícola esencial para la subsistencia. El estudio de los fenómenos meteorológicos presenta marcada importancia por la incidencia que estos pueden tener sobre las personas y los intereses socioeconómicos de un país.

Si se hace un análisis similar, para valorar la calidad de la información por variables, en cada una de las provincias que conforman la región central, se puede apreciar que Ciego de Ávila, registra una cantidad de datos faltantes de 12398, lo

que constituye el mayor valor entre todas las provincias. Este elevado número está influido fundamentalmente, porque en la estación 78339 Cayo Coco, desde el año 1996 no se registran valores de insolación hasta el año 2013, sesgo que representa el 80% del total faltante en la estación, y el 53.33% del total faltante de la provincia, lo cual hace evidente que sea ésta, la estación más crítica. Es importante señalar que este problema únicamente se presentó en dicha estación ya que el resto de las estaciones de la provincia presentaron sus registros de insolación completos.

Las mayores dificultades de Villa Clara se concentraron también en la variable insolación, con 10936 observaciones inexistentes, que representa a su vez, el mayor porcentaje con 35,64% entre las nueve variables analizadas. En la estación 78338 Sagua la Grande, no se tienen registros de esta variable y en la 78348 Caibarién faltan, 7419 observaciones, que influyen directamente en el total de la provincia. Sin estas afectaciones la cantidad faltante disminuiría considerablemente a 592, y constituiría la provincia con los registros más completos entre las cuatro estudiadas. Sin embargo, en el caso de Cienfuegos y Sancti Spíritus se tienen registros completos de esta variable, lo cual sirve como referente para la estimación de estos sesgos con los datos obtenidos a partir de estaciones cercanas a estas provincias.

Tabla 2. Resumen de los datos faltantes por provincias en el periodo (1993-2013), de las variables en estudio y sus porcentajes de acuerdo al total posible.

VARIABLES	PROVINCIAS (REGIÓN CENTRAL DE CUBA)							
	Villa Clara		Cienfuegos		Sancti Spiritus		Ciego de Avila	
	Faltantes	% respecto al total posible	Faltantes	% respecto al total posible	Faltantes	% respecto al total posible	Faltantes	% respecto al total posible
Temperatura mínima del aire (°C)	62	0,20	983	6.41	444	1.45	886	2.89
Temperatura media del aire (°C)	86	0,28	884	5.76	376	1.22	692	2.25
Temperatura máxima del aire (°C)	29	0,09	1182	7.70	444	1.45	798	2.60
Humedad relativa (%)	87	0,28	886	5.77	430	1.40	696	2.27
Tensión de vapor de agua (mm)	87	0,28	886	5.77	430	1.40	696	2.27
Lluvia (mm)	79	0,25	0	0	884	2.88	737	2.40
Nubosidad (Octavos de cielo cubierto)	81	0,26	50	0.32	905	2.95	662	2.16
Velocidad del viento (m/s)	82	0,26	34	0.22	284	0.92	619	2.02
Insolación (h)	10936	35,64	0	0	0	0	6612	21.55
TOTAL	11529	4,17	4905	3.55	4197	1.52	12398	4.50

En la provincia Villa Clara se trabajó con cuatro de las cinco estaciones que tiene en servicio el Instituto de Meteorología. En el caso de la estación 78338 Sagua la Grande, no se tuvo en cuenta el periodo comprendido entre 1993 y el 14 de mayo de 2004, porque en estos años dicha estación tenía otra ubicación, y no fue hasta el 15 de mayo de ese año que volvió a entrar en funcionamiento. Esta provincia muestra los segundos mayores valores de datos faltantes con 11528, debido principalmente, a las observaciones que no se efectuaron nunca de insolación en Sagua y 7418 veces que se dejaron de hacer en Caibarién. La situación más compleja se presentó precisamente en las estaciones anteriormente mencionadas con 3517 y 7419 datos faltantes. El resto de las variables estudiadas presentan los valores más bajos, en cuanto a la ausencia de datos se refiere, de todos los analizados.

Cienfuegos muestra valores considerables de observaciones inexistentes, si se compara con Sancti Spíritus, donde se reportaron cifras similares aunque; hay que considerar que Cienfuegos solo tiene dos estaciones entre las cuales existe un faltante que asciende hasta los 4905, y que equivale a un 3.55% con respecto al total posible. Los principales problemas se concentran en cinco de las nueve variables en estudio; temperatura mínima del aire, media y máxima, humedad relativa y tensión de vapor de agua, donde el valor más crítico se alcanza en los registros de temperatura máxima del aire con 1182 datos faltantes de un total posible de 15340, que representa un 7.70%. Así mismo, la temperatura mínima del aire es la otra variable que le sigue con la inexistencia de 983 datos que representan el 6.41%. En el caso de la humedad relativa y tensión de vapor de agua los datos en ambos casos son de 886 y superan por amplio margen los referidos para la provincia de Sancti Spíritus.

La estación 78344 del propio municipio Cienfuegos, es la de peores resultados en este sentido con 2521 datos no encontrados, cifra que supera en 137 al de la estación 78335 Aguada de Pasajeros, y representa el 51.39% de la cantidad total faltante. Este dato es superior al registrado en la provincia de Sancti Spíritus en sus cuatro estaciones, lo que demuestra ineficiencia en la obtención de las diferentes variables al comparar una provincia con otra, como habíamos señalado anteriormente.

La mayor cifra de datos faltantes se recoge en la estación 78344 Cienfuegos, también para el caso de la temperatura máxima del aire, con 633 y un 8.25%, y los problemas en esta variable fundamentalmente radican en que, a partir del 6 de julio

de 2005, hasta febrero de 2006, no aparecen registros de estas temperaturas; e igualmente sucede en el año 2008 donde no existen datos, desde el día 8 de septiembre, hasta el 16 de junio de 2009, aunque todavía no se registran datos de temperatura máxima del aire hasta el 14 de octubre, que ya comienzan a tomarse ambas.

Es importante señalar que la lluvia presenta registros completos en ambas estaciones, al igual que la insolación como ya habíamos visto. La nubosidad y la velocidad del viento tampoco representan casos críticos ya que el porcentaje de datos faltantes no supera en ningún caso el 1%, y a diferencia de las otras variables descritas anteriormente, éstas tienen menor cantidad de datos inexistentes, con cifras que no llegan nunca a los cuatro datos faltantes en la estación 78344.

En la provincia de Sancti Spíritus se presentan situaciones similares, y entre las estaciones monitoreadas, de acuerdo al estudio realizado, existe un total de 4197 datos faltantes de 276 120 casos posibles, lo que representa el 1.52%. La estación de Júcaro en Sancti Spíritus también presentó un número elevado de datos faltantes con 2233, los cuales se repartieron indistintamente por cada una de las variables, y solo sobresale la temperatura mínima del aire con 437. Los principales problemas se localizaron en que desde el 7 de enero de 2000 y hasta el 10 de septiembre de ese mismo año, no hubo datos medidos de esta variable. Hubo otras incidencias en el año 2013 donde se dejaron de registrar estos valores entre los meses de febrero, abril, septiembre, noviembre y diciembre. La estación 78342 Topes de Collantes fue la más crítica de la provincia con 1463 datos inexistentes de las nueve variables que se estudiaron, lo que representa el 19.06%, seguido de la estación 78341 Jíbaro que registró 1310 datos faltantes para un 17.08%. Por otra parte, la de menos problema en este sentido fue la estación 78349 del propio municipio Sancti Spíritus, con solamente 227 datos faltantes, lo que representa únicamente el 2.96% con respecto al total de casos posibles.

Las variables meteorológicas que mayor cantidad de datos faltantes mostraron fueron: la nubosidad con un total de 905 y la lluvia con 884, a éstas les siguieron por ese orden las temperaturas máximas y mínimas con 444 cada una, sin embargo, en la estación más crítica antes mencionada (Topes), estas variables no tuvieron los peores registros con 90 y 93 datos faltantes respectivamente y, solo superada por la estación del municipio Sancti Spíritus que reportó los mejores registros con 0 para la temperatura mínima y 14 para la máxima. Los principales problemas en estas

variables se presentaron en las estaciones de Trinidad y el Jíbaro, esta última que muestra los peores registros en ambas variables con 198 y 184 datos inexistentes. Con base en los estudios recientes de (Álvarez *et al.*, 2014) quiénes analizaron la calidad de series largas de registros de código de estado de tiempo presente para las estaciones de Cuba, y clasificaron las mismas, de acuerdo al largo de la serie (ILargo), porcentaje de información útil (IU), sesgo mensual (Sm), y el sesgo horario (Sh); y la calidad general de la serie (ICALI), definida por el promedio de los cuatro índices mencionados; las estaciones que se relacionan en este estudio presentan resultados alentadores, si a la hora de evaluar las conclusiones derivadas del empleo de sus datos se trata, puesto que todas se clasifican entre bien y excelente en el índice (ICALI); con la estación de Topes de Collantes (B) e INIVIT (E) y el resto MB. La ausencia de información útil incide directamente en la veracidad de los fenómenos que se desean tratar y hace necesario determinar las horas de máxima ocurrencia de cada uno con vistas a evaluar la pertinencia de utilizar o no los datos. Es válido destacar que la mayoría de los registros perdidos o no medidos se corresponden a intervalos de tiempo específicos, donde la ocurrencia de fenómenos adversos pudo ser la causal de tales desaciertos, y que en los años anteriores a 2000, muchas estaciones tenían regímenes de observación que solo abarcaban el horario diurno.

Hasta el momento se ha visto el comportamiento de la información válida para las nueve variables estudiadas a través del tiempo, y a nivel de provincia, pero se precisa para una visión clara, la presentación de estas en el periodo analizado.

De las explicaciones hechas con anterioridad se derivan varias respuestas que ayudan a entender los resultados que se exponen en la figura 2, sobre todo los casos puntuales de las estaciones 78338 y 78348 de Villa Clara, y 78339 de Ciego de Ávila donde se detectaron sesgos que incluían parcial o totalmente los años de la serie, en la variable insolación.

En cierta medida se puede trabajar con los datos de Sancti Spíritus donde la insolación, fue la única variable que se midió diariamente durante los 21 años ininterrumpidamente en las cuatro estaciones. La velocidad del viento también se midió con bastante regularidad, con solo unos 284 datos faltantes que representan menos del 1% con respecto al total de casos posibles.

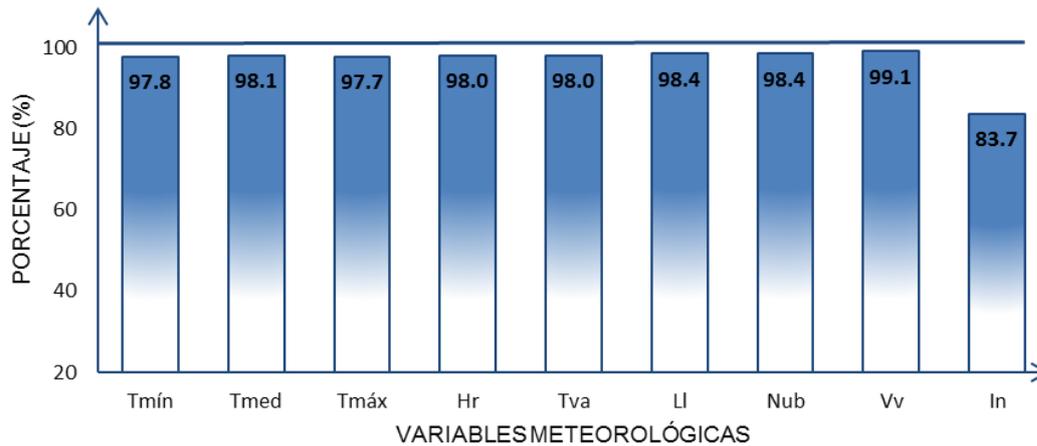


Figura 6. Porcentaje de observaciones válidas con respecto a las posibles en el periodo (1993-2013), para la región central de Cuba.

Leyenda: (Tmín): Temperatura mínima del aire; (Tmed): Temperatura media del aire; (Tmáx): Temperatura máxima del aire; (Hr): Humedad relativa; (Ll): Lluvia; (Nub): Nubosidad; (Vv): Velocidad del viento; (In): Insolación

En la figura 6 se advierten porcentajes igualmente altos de información válida para cada una de las variables, lo cual aporta cierto grado de confiabilidad en el uso de los datos con que cuentan las estaciones de la región central del país. La insolación mostró un resultado por debajo del resto como era de esperar luego de los análisis referidos anteriormente, pero con posibilidades de ser estimados sin dificultad y trabajar con series completas que permitan mayor exactitud.

4.1.2. Marcha de la evapotranspiración de referencia y las precipitaciones en el área de estudio.

La necesidad de establecer criterios certeros o al menos cercanos, sobre la fluctuación del agua en el suelo para determinados intervalos de tiempo, como puede ser el ciclo completo de los cultivos, monitorear los principales egresos e ingresos de la misma para una zona considerada; y contabilizarlos en el marco de los objetivos perseguidos en la programación de riego, marca la ineludible carestía del hombre en buscar a través de su quehacer científico las formas para obtener cifras cercanas a la realidades concretas de las localidades donde hoy se cultiva.

El poseer los valores de consumo de agua de las plantas y los posibles ingresos para un año en su zona, provee al productor de una información valiosa para planificar los riegos con una mayor medida y ahorrar este recurso sin que se eleve el costo de sus producciones. Por otro lado según Zamora y Chaterlán, (2001) se hace necesario encontrar las relaciones que definan las características esenciales de la

evapotranspiración de referencia en Cuba, definida como aquella que expresa el poder evaporante de la atmósfera sobre la base de una superficie uniforme (de referencia) que puede ser comparable en diferentes lugares e independiente del tipo de suelo o características de la agricultura, para aplicarlos a los estudios ambientales, especialmente los relacionados con sequía, desertificación y a las prácticas del riego y el drenaje.

Los resultados de esta investigación mostraron que la curva descrita por la marcha de la evapotranspiración media mensual (Fig.7), correspondiente a la región central de Cuba, sigue un patrón similar de tendencia, comenzando con valores que desde enero van aumentando, y alcanzan el máximo en abril, mayo, y julio, etapa esta del año, que junto con el mes de agosto presenta, la Eto más alta, para luego descender en octubre hasta cifras muy similares a las que comienza el año. Abril es un mes de tránsito entre los periodos lluviosos y poco lluviosos que se suceden en Cuba, por lo cual, cabe esperar que sea este el punto de inflexión donde los valores se elevan, dado que las lluvias que comienzan a mediados y finales del mismo, unido a la baja humedad de los suelos, propicia que una parte considerable, sino toda el agua que infiltra en la rizosfera de la planta, se aproveche, y por ende, aumenten las tasas de transpiración de las plantas.

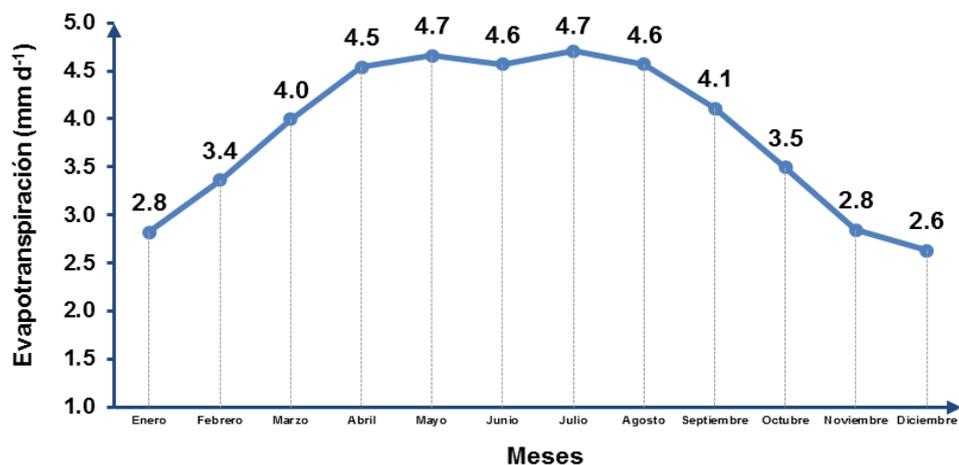


Figura 7. Marcha de la evapotranspiración de referencia media histórica de la región central de Cuba.

Recuérdese que a partir de este mes, comienza el periodo lluvioso en el cual se registran los mayores valores de temperatura media del aire, y existe humedad en los suelos producto de las precipitaciones frecuentes, factores que se combinan para propiciar condiciones favorables para los procesos de evaporación y transpiración de

las plantas, combinación de egresos del agua a partir del suelo y las plantas respectivamente, que conforman el concepto de evapotranspiración.

Los meses comprendidos entre noviembre y enero muestran sin lugar a dudas los valores más bajos. Ellos coinciden con el inicio y mitad del periodo poco lluvioso del año (noviembre-febrero), siendo diciembre el mes más crítico en este sentido con valores próximos a 5.7% de la tasa anual.

Según Solano *et al.* (2003a), en este mes la posición del sol alcanza la máxima declinación al sur, lo que determina la ocurrencia de magnitudes más bajas de la radiación solar incidente y por tanto, una disminución de la tasa diaria de evapotranspiración de referencia. Este mismo autor plantea que el periodo de ocurrencia de los valores medios más altos de la suma de la evapotranspiración de referencia transcurre de abril a agosto (parte final del periodo poco lluvioso-inicio y mediados del periodo lluvioso), con un mínimo estival en el mes de junio, relacionado con el inicio del periodo lluvioso, debido principalmente al aumento de la nubosidad y a un descenso en la rapidez de los vientos. En este periodo hay una marcada influencia del Anticiclón del Atlántico sobre Cuba. El sol se encuentra próximo al cenit, y son más altas las temperaturas.

De la descripción de la figura 8 se puede deducir como varían los valores de Eto entre los meses extremos de ocurrencia de esta variable en la región central de Cuba. Es evidente el salto que ocurre entre diciembre y mayo cuando se ilustran ambos a través de una interpolación con valores cercanos.

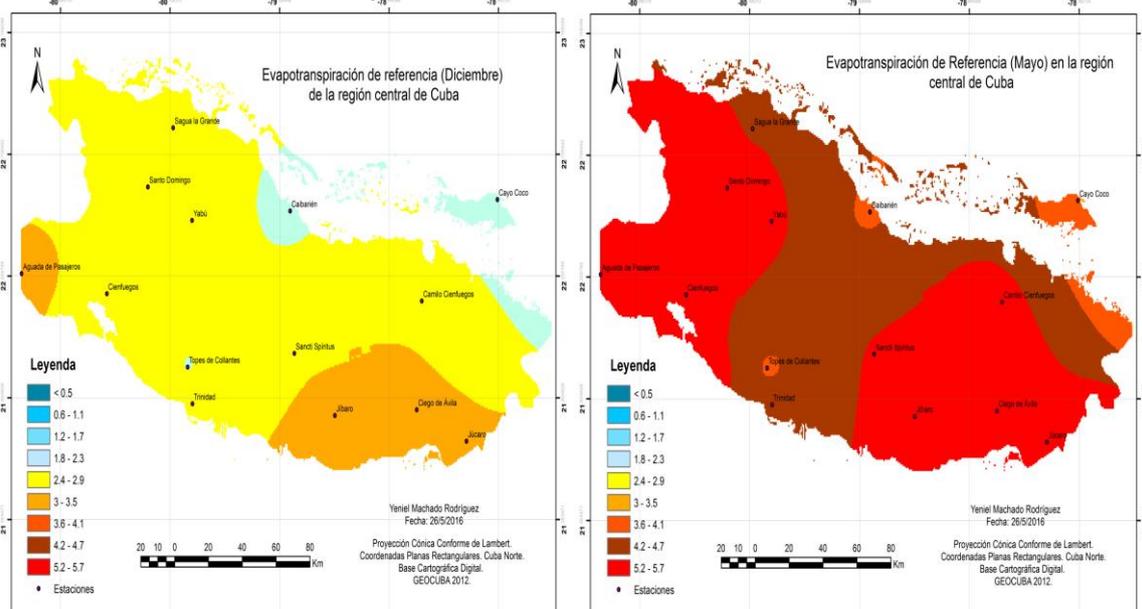


Figura 8. Distribución temporal de la evapotranspiración de referencia media histórica en los meses de diciembre y mayo para la región central de Cuba.

La Eto así representada contribuye a disminuir las incertidumbres que existen en la determinación de esta variable en nuestro país que de acuerdo con Méndez *et al.* (2008) al estudiar la variabilidad espacial de la misma, el coeficiente de variación encontrado en la estimación osciló desde un 5% hasta un 35% en un rango de 0.32-1.47 mm d⁻¹, informando, que el 81.76 % de las áreas tenían un coeficiente de variación de un 30 %, equivalente a sesgos de 0.44 mm d⁻¹, considerados significativos por el porcentaje de áreas que abarcan.

Estos mismos autores aseveraron zonas de incertidumbre, donde la red meteorológica de Cuba no es lo suficientemente densa que posibilite hacer interpolaciones espaciales confiables, requerida para la planificación de los regadíos. Si bien es conocido que las formas más efectivas para determinar los egresos del agua desde el suelo, es a través de mediciones directas y que cuando se emplea indirectamente otros procedimientos es siempre factible hacer confirmaciones de los resultados obtenidos; la factibilidad de tener un dato por el cual guiarse se muestra como una herramienta de apoyo a todos los procesos que se desarrollan en el riego de proyecto.

Debido a las complejas relaciones que intervienen en el proceso de estimación y pronóstico de los requerimientos hídricos de las plantas, se evidencia la necesidad de abordar este tema, a través del empleo de nuevas tecnologías de monitoreo e interpretación de las diferentes variables, que de acuerdo con (Dueñas, 2006), y (Méndez *et al.*, 2012) requieren de un adecuado nivel interpretativo para obtener un grado de aproximación aceptable a la realidad; sobre todo en Cuba, donde los datos de evapotranspiración son limitados y la explotación óptima de los recursos hídricos constituye uno de los objetivos fundamentales para los responsables del manejo del agua de riego.

Este tipo de análisis se puede desglosar de una forma sintética, si se hace a partir de los valores medios calculados, para cada una de las estaciones del centro del país. Así se puede observar en la tabla 3 cómo; el valor mínimo puntual de la evapotranspiración de referencia se alcanza en la estación 78339 Cayo Coco, en Ciego de Ávila de 1.9 mm d⁻¹, la cual, se encuentra a 3.40 m.s.n.m. y los valores medios mayores se registran en mayo y julio en la estación 78326 de Santo Domingo en Villa Clara y 78335 Aguada de Pasajeros en Cienfuegos con 5.2 mm d⁻¹.

Tabla 3. Distribución temporal de la evapotranspiración de referencia media mensual para las estaciones de la región central de Cuba.

Estad. descrip.	Evapotranspiración de referencia (mm d ⁻¹)														
	Villa Clara				Cienfuegos				Sancti Spiritus				Ciego de Ávila		
	326	338	343	348	335	344	349	342	341	337	339	345	347	346	
Media	4.3	3.8	4.0	3.3	4.3	4.0	4.0	3.2	4.2	3.8	2.9	4.2	4.1	4.2	
Error típico	.256	.235	.251	.226	.246	.227	.225	.207	.234	.189	.210	.217	.253	.233	
Mínimo	2.9	2.6	2.7	2.1	3.0	2.8	2.8	2.1	3.1	2.8	1.9	3.0	2.8	3.0	
Máximo	5.2	4.6	4.9	4.2	5.2	4.9	4.8	4.0	5.1	4.6	3.7	5.1	5.1	5.1	
Rango	2.3	2.0	2.2	2.1	2.2	2.1	2.0	1.9	2.0	1.8	1.8	2.1	2.3	2.1	
Varianza	.784	.644	.744	.604	.715	.624	.602	.517	.651	.441	.528	.565	.754	.633	
Desv. típ	.885	.802	.862	.777	.845	.790	.776	.719	.806	.664	.726	.751	.868	.795	

La marcha de esta variable agroclimática es similar a la descrita anteriormente, con un periodo de marzo a septiembre que presenta valores iguales y superiores a 3.3 mm d⁻¹ llegando hasta el mencionado máximo puntual. Los meses de mayo y julio registraron las tazas de evapotranspiración más altas, lo que supone una mayor pérdida de agua, producto de las altas temperaturas registradas y mayor radiación solar directa, por lo que constituye una alerta para las áreas bajo riego, y los decisores del mismo, dado que se consumirá en menor tiempo la reserva de agua presente en los suelos, y se acortarían los intervalos de riego con énfasis en los cultivos que se desarrollan en los meses con mayor demanda evaporante de la atmósfera.

Los resultados anteriormente descritos coinciden con los reportados por Solano *et al.* (2003a), quienes encontraron mínimos diarios de esta variable de 1.9 mm d⁻¹ en el mes de diciembre y de 1.8 mm d⁻¹ para la tercera decena de este propio mes, e igualmente ocurre con los valores diarios mayores, aunque estos autores solo refieren el mes de julio y en este estudio hay que señalar a mayo también.

Marcha de la precipitación efectiva

Uno de los factores que constituye una limitante para el proceso de evapotranspiración y del cual se hizo alusión anteriormente, es el contenido de humedad en el suelo y está en estrecha vinculación con el volumen de precipitaciones areales ocurridas en el periodo que se analice.

El agricultor necesita conocer el consumo de agua de sus cultivos si quiere proyectar su estrategia con una mayor seguridad en cuanto a clima se refiere. En la figura 9 se

presenta la altura de la lámina de lluvia acumulada promedio para la región central del país, con sus correspondientes valores de precipitación efectiva, y la diferencia mensual entre estas.

Se puede observar que esta variable para la parte central de Cuba presenta un carácter bimodal dentro del año, definido por dos máximos en junio y septiembre de 200 y 208.4 mm y un mínimo relativo entre ellos correspondiente a julio y agosto. Existe correspondencia entre los valores de precipitación caída y los aprovechados calculados a partir del método empleado. Precisamente en estos meses se alcanzan las mayores diferencias, producto de mayores valores aprovechables en estos meses. En los meses iniciales y finales del año las diferencias son pequeñas evidenciando mayores valores de precipitación efectiva.

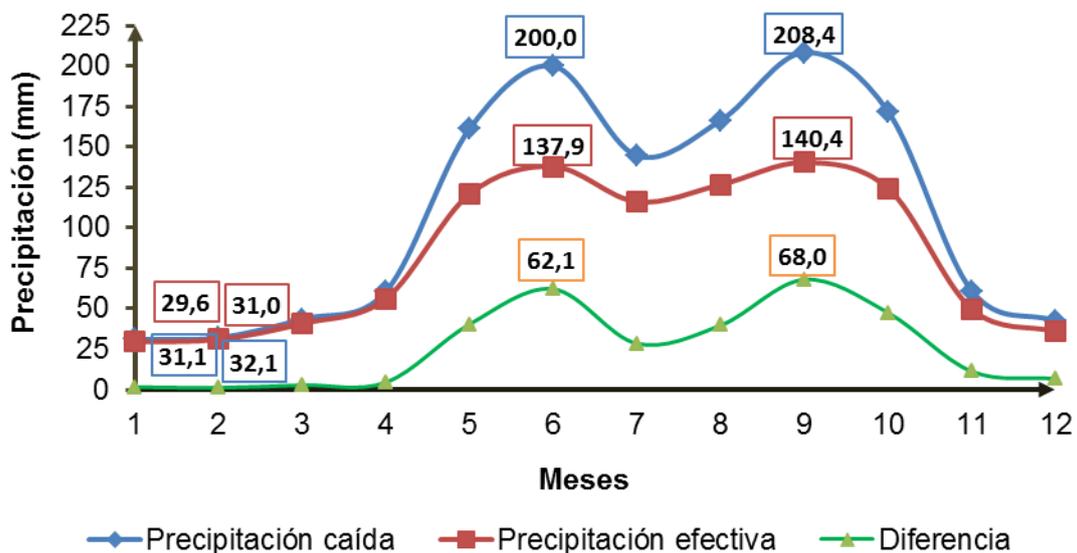


Figura 9. Acumulados de precipitación caída y efectiva en la región central de Cuba.

Según criterios de (Solano *et al.*, 2003 b) existen varias conjeturas de porque ocurre este mínimo relativo dentro de los acumulados de lluvia del país para el periodo lluvioso, denominado en la literatura científica como Canícula o Veranillo. Entre ellas se encuentra la relación con la evapotranspiración de referencia, el análisis frecuencial y cadenas de Markov. De acuerdo con Guzmán (1989), en algunos trabajos se relaciona con situaciones sinópticas reforzadas por efectos locales. En Cuba, ocurre por una penetración más profunda de las corrientes del Este producidas por la influencia del Anticiclón del Atlántico Lapinel, (1988).

En Cuba, la lluvia es el elemento del balance hídrico de mayor variabilidad cuando se analizan largas series cronológicas, y a partir de los años setentas del siglo xx se

sabe que, el fenómeno conocido como cambio climático, ha contribuido a la aparición de años con características extremas para la mayoría de las variables meteorológicas de interés agrícola. En este sentido, se destacan años marcadamente secos que hacen dificultoso el cultivo de especies vegetales sin regadío y, a la vez, se incrementa la temperatura media del aire provocando un mayor consumo de agua por las plantas. Pacheco *et al*, (2006).

Determinación de los coeficientes de aprovechamiento (Kp)

El ingreso de humedad por lluvias se pone de manifiesto cuando una parte de ésta queda almacenada en la zona radical del cultivo, esa fracción de la lluvia se conoce como precipitación efectiva o aprovechada. La relación entre la precipitación caída y la fracción que queda retenida por la planta da lugar al coeficiente de aprovechamiento de las precipitaciones.

Los valores calculados de Kp a partir de la precipitación efectiva determinada con el método *USDA Soil Conservation Service*, muestra porcentajes altos en cada uno de los periodos que se analizó este elemento para la región central del país. En los meses del periodo poco lluvioso se aprovechan mayores cantidades de agua principalmente porque los volúmenes precipitados dentro de los meses son bajos, al igual que su frecuencia de ocurrencia. Esta situación unida al bajo contenido de agua en el suelo pues justifica estos mayores coeficientes. Resultados similares fueron descritos por Machado *et al.*, (2016) en la caracterización de las precipitaciones efectivas en el municipio Santa Clara.

Tabla 4. Coeficientes de aprovechamiento para el periodo poco lluvioso en la región central de Cuba

Meses	Precipitación caída (mm)	Precipitación efectiva (mm)	Kp (%)
Noviembre	61.0	49,8	81.6
Diciembre	42.5	35,8	84.2
Enero	31,1	29,6	95.1
Febrero	32,1	31,0	96.5
Marzo	43,6	40,8	93.5
Abril	60,7	56,3	92.7
Promedio	45.1	40.5	89.8

Aunque resulta difícil evaluar la cantidad de agua que puede ser utilizada por la vegetación y la que puede ser esperada en un periodo determinado, sumado a que las comprobaciones para determinar la cantidad de agua retenida por el suelo, quedan en el marco de mediciones directas *in situ*, dependiendo del tipo de suelo y la profundidad radical del cultivo, se considera en este estudio que los valores

estimados con este método al parecer sobreestiman los reales. No obstante, enero y febrero mostraron los mayores valores en este sentido con más de 95.0 % y noviembre el más bajo dentro del periodo poco lluvioso con 81.6 %.

Los resultados alcanzados en esta investigación coinciden con SHN (2006) y Acosta y Paretas (2011), quienes plantean que las precipitaciones en Cuba pese a su variabilidad espacio-temporal, presentan una distribución estacional de 70-80 % en los meses de mayo-octubre y solo de 20-25 % desde noviembre hasta abril. En el estudio se encontró que para la región central en el periodo poco lluvioso cae el 20.5 % y en el lluvioso el 79.5 % del total de precipitaciones anuales, con una media mensual de 110.3 mm.

En el periodo lluvioso los valores de Kp descienden hasta el orden de 70 % aproximadamente con un mínimo puntual en el mes de septiembre (Tabla 7), debido a la alta humedad residual del suelo y a las cantidades precipitadas como promedio dentro del mes. Este resultado supone presencia de láminas temporales de agua sobre el suelo y la creación de condiciones adversas para el desarrollo de algunos cultivos con sensibilidad a la humedad. Sin embargo estos valores son indicativos y útiles en la programación y planificación de las actividades de la agricultura.

Históricamente el clima de Cuba determina que su agricultura sea de regadío, porque durante la mitad del año, desde noviembre hasta abril, las condiciones climáticas son favorables para el desarrollo de los cultivos, con excepción de la lluvia, que en ese periodo registra sus valores medios históricos más bajos. (Centella *et al.* 2006). Los cultivos anuales tienen necesidades de agua que varían en el curso de su ciclo de desarrollo. Ciertas fases son en particular más sensibles que otras a la falta de agua en el suelo, una falta de agua prolongada en estas fases puede provocar una disminución importante en el rendimiento y a veces la pérdida total de las cosechas.

Tabla 5. Coeficientes de aprovechamiento para el periodo lluvioso en la provincia Villa Clara

Meses	Precipitación caída (mm)	Precipitación efectiva (mm)	Kp (%)
Mayo	161,3	120,9	75,0
Junio	200,0	137,9	68,9
Julio	144,6	116,2	80,3
Agosto	166,4	126,7	76,1
Septiembre	208,4	140,4	67,4
Octubre	171,9	124,4	72,4
Promedio	175.5	127.8	72.8

Estos resultados coinciden con Pérez *et al.*, (2004) quienes refieren a junio y septiembre como los de mayor pluviosidad dentro del año en Cuba.

4.2. Evaluación de la estimación y pronóstico de la Eto mediante un modelo numérico global.

4.2.1. Estimación y pronóstico agrometeorológico de la evapotranspiración de referencia.

La predicción del consumo de agua por los cultivos para cada una de sus fases fenológicas, a lo largo de su ciclo vegetativo en consonancia con las condiciones edafoclimáticas de la región donde se cultivan, constituye el mayor reto de los especialistas de riego, por considerarse este como el punto de partida, en la estimación de los valores netos y brutos de las normas totales de riego de los cultivos. De esta forma, se han desarrollado y actualizado varios métodos indirectos, para apoyar la gestión del agua en la agricultura, que con mayor o menor ajuste, tratan de adaptarse a las condiciones concretas de la región donde se aplican, y buscan una aproximación lo más real posible de los cálculos efectuados a partir de esas condiciones. Como ejemplo de las salidas gráficas obtenidas a consecuencia del procesamiento (fig 10), se observa un ejemplo de predicción de la evapotranspiración de referencia a partir de los parámetros seleccionados.

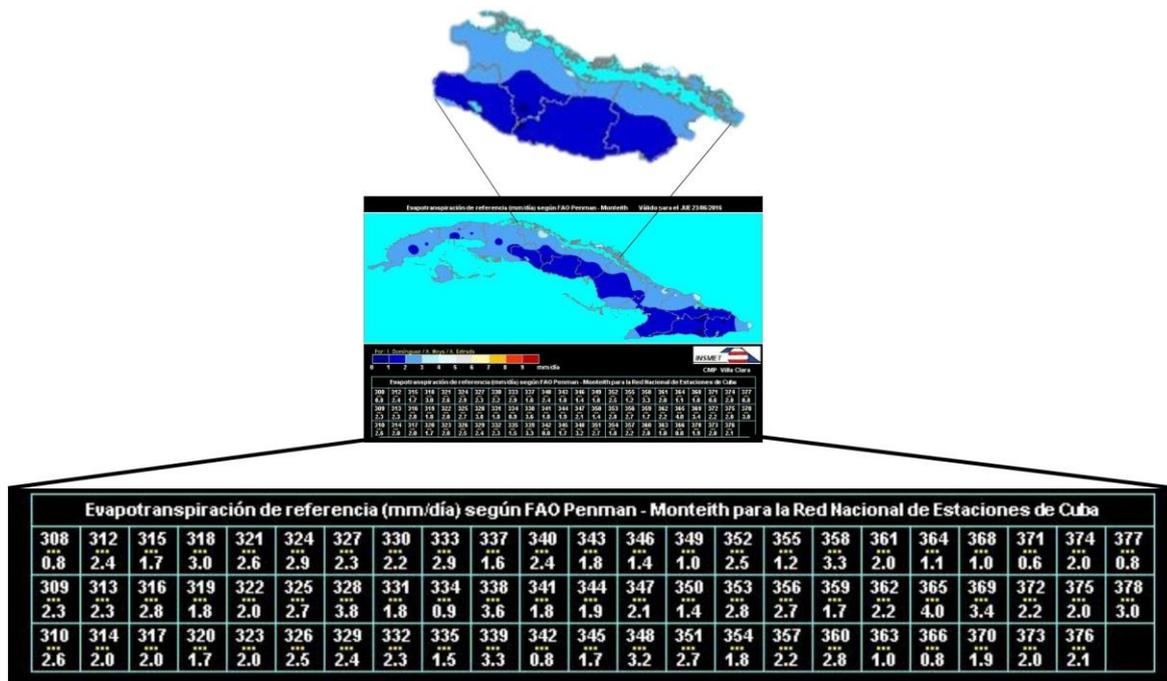


Figura 10. Ejemplo de salida del modelo Evapotranspiración.

El valor de la marcha diaria de esta variable agroclimática para todo el territorio nacional, se encuentra expresado a través de una escala de colores que indica las variaciones de la misma con respecto al tiempo. Se presenta el pronóstico extendido de Eto hasta cinco días, y a modo de ejemplo de acuerdo con la figura, se deduce que la demanda evapotranspirativa de la atmósfera será baja, y permitirá que la humedad presente en el suelo, quede retenida allí, para su uso por las plantas por un lapso mayor de tiempo, con lo cual existe mayor oportunidad de incrementar el uso de la misma. Esta sería una posible interpretación para su aplicación en las actividades agrícolas, y se obtiene una visión más clara a partir de que se analice el panel integrado que ofrece la salida del software en el anexo 1.

Esta información aunque basada sobre el supuesto de un pronóstico con cierto grado de certeza, obtenido sobre la base de los factores que lo condicionaron en un periodo pasado, y que se debe observar como un proceso casual, consecuencia de varios procesos también casuales, representa una ventaja para el manejo del agua dentro del predio, dado que permite definir volúmenes acorde a las necesidades reales de la áreas irrigadas, concebir determinadas labores agrotécnicas en los momentos, donde las condiciones de suelo son las óptimas, para el mejor desarrollo de las mismas, y evitar así la compactación y degradación de los suelos, con las afectaciones que esto conllevaría para los rendimientos de la especie en cuestión. Varios autores como Santos *et al.*, (2010) y Pacheco *et al.*, (2012), resaltan la importancia de la correcta determinación de las necesidades de agua de los cultivos con el empleo de las nuevas tecnologías de la información, por el ahorro de agua que presuponen, y plantean que para lograr que la agricultura bajo riego, contribuya al uso sostenible del agua, será necesario reducir los volúmenes aplicados a los cultivos, basados en los métodos de programación de riego.

Que los regadores y decisores de esta importante actividad agrícola, cuenten con información actualizada y pronósticos válidos, aunque con atenuantes en las limitaciones que un pronóstico puede ofrecer; siempre será un dato valioso, dentro de la planificación necesaria en los proyectos de riego, que se efectúan a cualquier escala y que, hoy no se tienen del todo en cuenta en la proyección de obras para riego ni en las ya existentes.

En la mayoría de los casos, estas demandas son elaboradas por los diferentes usuarios del agua, sin tener en cuenta una medida justa de los requerimientos para cada año, y obviando la idea de Herrera y González (2015) cuando expresan que, la

demanda de agua por los cultivos depende de varios factores: bióticos, climáticos y agrotécnicos, todos ellos muy estrechamente relacionados y casi todos con similar importancia relativa, donde se precisa de una revisión periódica de las normas de consumo, toda vez que la alteración de alguno de ellos, puede ocasionar un cambio en la cantidad de agua demandada.

Otra de las oportunidades que ofrecen las salidas gráficas así obtenidas, es su fácil interpretación por parte de sus empleadores. La tabla incluida inmediatamente debajo del mapa, ofrece la media diaria de la evapotranspiración de referencia, registradas en las 69 estaciones de la red nacional y que se identifican por el código de cada estación. La interpretación de estos valores y las posibilidades que ofrecen para el sector agrícola pasan por la suspicacia y habilidades del cliente, y pueden emplearse no solo para el riego, sino que tienen una amplia gama de usos en el sector agropecuario.

A decir de Girolimetto y Venturini (2013), la necesidad de monitorear grandes regiones, ha motivado el desarrollo de métodos para el cálculo de la evapotranspiración (ET) sobre la base de datos provenientes de sensores remotos. La tecnología satelital ha generado un punto de inflexión en estos desarrollos científicos al proporcionar información con resoluciones espacio-temporal muy fino comparado con la densidad de información de campo.

La efectividad es otro aspecto que debe considerarse en el momento de elaborar y difundir los servicios agrometeorológicos, específicamente cuando se trata de pronósticos, pues la verificación de una predicción es muy compleja y está sujeta a diversas y variadas dificultades. La atmósfera es un sistema caótico, sensible a las condiciones iniciales y que los errores desde el punto de partida se amplifican en los pronósticos; parte del detalle que se puede proporcionar en un pronóstico decrece con el tiempo (Belda, 2013). Debe considerarse que los datos iniciales Las “clásicas” predicciones del tiempo atmosférico cuentan con mecanismos para verificar el grado de cumplimiento, mediante la comparación más o menos compleja con los valores reales ocurridos.

En el caso de la meteorología agrícola, no resulta suficiente con extrapolar dicha variante, ya que se obviaría el componente agropecuario que integra la salida. Esta consideración, complejiza la evaluación ya que debe tenerse en cuenta las medidas adoptadas por los productores a partir de la información recibida. Es importante considerar que la incorporación de las salidas de los modelos numéricos

básicamente para la predicción conlleva a que el tratamiento de la incertidumbre debe ser manejada cuidadosamente, ya que a la habilidad del o los modelos se le suma aquella propia de los índices agrometeorológicos seleccionados.

Otro aspecto a considerar es la predicción operativa, la que considera la interpretación (humana) de las salidas (entiéndase mapas en este caso). Brizuela y Espoz (1986) señalan que en algunos casos, los mapas deben ser complementados por un analista quien incorpora los aspectos físicos no considerados.

Al respecto, en estudios realizados sobre la aplicación del GFS/NECP para la estimación de la evapotranspiración de referencia desarrollados por Oliveira (2007), este autor señala que el desempeño del modelo para el pronóstico de las variables meteorológicas fue bastante heterogéneo, tanto para las variables en si como para los periodos. Apunta que la temperatura y el déficit de tensión de vapor de agua tienen mejor desempeño durante el periodo seco.

Las deficiencias de precisión de la predicción agrometeorológica dependen: a) de la fidelidad con que las observaciones iniciales representan las condiciones regionales; b) del grado de homogeneidad de las condiciones regionales (clima, características del suelo, etc.); c) de la precisión de las mismas observaciones; d) de la sensibilidad del modelo ante las fluctuaciones de la variable agrometeorológica que se trata de predecir.

4.2.2. Validación del método de estimación y pronóstico de la evapotranspiración de referencia

Debido a que este trabajo tiene como objetivo principal proponer un modelo integrado para optimizar la gestión del agua de riego a diferentes niveles, a través de la inserción de las salidas estimadas y predichas de la evapotranspiración de referencia mediante la implementación de un modelo numérico global de predicción del tiempo, es importante conocer si los resultados que arroja el mismo tienen concordancia con la realidad del escenario en estudio.

La idea de validación de estas salidas consiste en comparar los valores estimados y predichos de Eto obtenidos, con los calculados en la estación 78343 Yabú en años anteriores por el método clásico de Penman- Montheit, el cual es el que se utiliza en toda la red de estaciones de Cuba, de los cuales se tiene informes que han sido utilizados en las investigaciones de (Pacheco y Pérez, 2010), Pacheco *et al.*, (2010), Machado *et al.*, (2014), sobre programación de riego del cultivo de la papa usando

balances agrometeorológicos, y se ha probado su validez en el cálculo de normas parciales que compensen las necesidades hídricas de este cultivo. Además se compararon estos valores con la media histórica de esta variable en la zona objeto de análisis.

Para el caso de los valores de media histórica respecto al método de la estación, y el predicho por el modelo, el nivel de significación que en este caso es de 0.220 (Tabla 7). Este nivel indica la probabilidad de aceptar la hipótesis nula de independencia siendo cierta. Si esta probabilidad es mayor que 0,05 se acepta la hipótesis nula y en consecuencia diremos que las variables son independientes entre sí. En el caso, el nivel de significación es mayor que 0.05, por lo que se acepta la hipótesis nula y se admite que las variables sean independientes entre sí, o que no guardan una relación de dependencia. Debe considerarse que la Chi cuadrado está muy influenciada por el tamaño muestral. De modo que cuando se analizan muestras grandes la Chi crece y es más fácil rechazar la hipótesis nula de independencia.

Tabla 7. Análisis estadístico Pruebas de Chi cuadrado.

Estad. descriptivos	Valor	gl	Significación asintótica (bilateral)
Chi-cuadrado de Pearson	20.000 ^a	16	.220
Razón de verosimilitudes	16.094	16	.446
Asociación lineal por lineal	.003	1	.960

a. 25 casillas (100%) tienen una frecuencia esperada inferior a 5. La frecuencia mínima esperada es .20.

El valor de la evapotranspiración de referencia no importa con que método se calcule, los valores no se relacionan entre sí, es decir, que pueden ser estimados indistintamente por cualquiera de los métodos que fueron objeto de estudio.

Tabla 8. Análisis de contingencia (Media histórica vs media Penman - Monteith estación vs Eto predicha).

		Medidas simétricas			
		Valor	Error típ. Asint. ^a	T aproximada ^b	Sig. aproximada
Nominal por nominal	Coefficiente contingencia	.894			.220
Intervalo por intervalo	R de Pearson	.025	.456	.044	.968 ^o
Ordinal por ordinal	Correlación de Spearman	.100	.622	.174	.873 ^o
N de casos válidos		5			

a. Asumiendo la hipótesis alternativa.

b. Empleando el error típico asintótico basado en la hipótesis nula.

c. Basada en la aproximación normal.

De este modo las salidas generadas cumplen las exigencias requeridas para su implementación en la práctica del riego, y se considera un producto listo para insertarse en los modelos de programación de riego de nuestras empresas agrícolas como el dato base a partir del cual se derivan los restantes, teniendo un nuevo enfoque y factibilidad basado en la premura con que se obtienen los resultados y el anticipo de los mismos. Además combina la posibilidad de utilizarlo para la investigación tanto como para generar pronósticos operativos. Esa flexibilidad permite la interacción entre un centro operativo y una institución académica, siendo el rol de esta última la de investigar y asesorar sobre los últimos avances y mejoras del modelo. El rol del centro operativo es poner al servicio los últimos avances y generar nuevas problemáticas a solucionar.

Si el análisis que se acaba de hacer presupone la independencia entre los métodos para hallar la Eto, cabe preguntarse entonces. ¿Por qué cambiar, y no seguir con el de las estaciones, el cual se encuentra ampliamente difundido en el país?

La respuesta se basa en las ventajas que ofrece esta nueva variante al pronosticar la variable para cinco días, situación que los otros métodos no pueden resolver, y por otro lado, se encuentra el hecho de que el modelo está diseñado de tal forma que se constituyó una malla regular de nodos, a una distancia de 10 km entre ellos, para lo cual el resultado de interpolación que se obtiene en el mapa es más real, ya que los mapas que se obtienen por la interpolación de los resultados calculados con el Cropwat, por datos históricos, y el de las estaciones, solo abarcan 14 puntos en toda la región, correspondientes a las estaciones meteorológicas del territorio, arrojando una mayor incertidumbre en la veracidad del dato obtenido. Otro de los argumentos para utilizar las salidas generadas por el modelo sobre los otros métodos probados, es que la red nacional de estaciones meteorológicas de Cuba está diseñada para responder a estudios sinópticos y no biológicos, o agrícolas, por lo cual, la interpolación realizada con el modelo para una mayor densidad de puntos, tiene ventaja en cuanto a la veracidad de los datos.

4.3 Esquema para la inserción de la predicción agrometeorológica en la programación de riego.

A partir de la información obtenida de estimación y predicción de la Eto, se modificó el esquema de trabajo propuesto por Pacheco *et al.* (2008) (Fig. 11), donde se señalan las posibilidades de inserción de las estimaciones de la evapotranspiración

de referencia, para el cálculo de las necesidades hídricas de los cultivos a través de la vinculación de instituciones académicas y centros operativos con entidades agropecuarias de base.

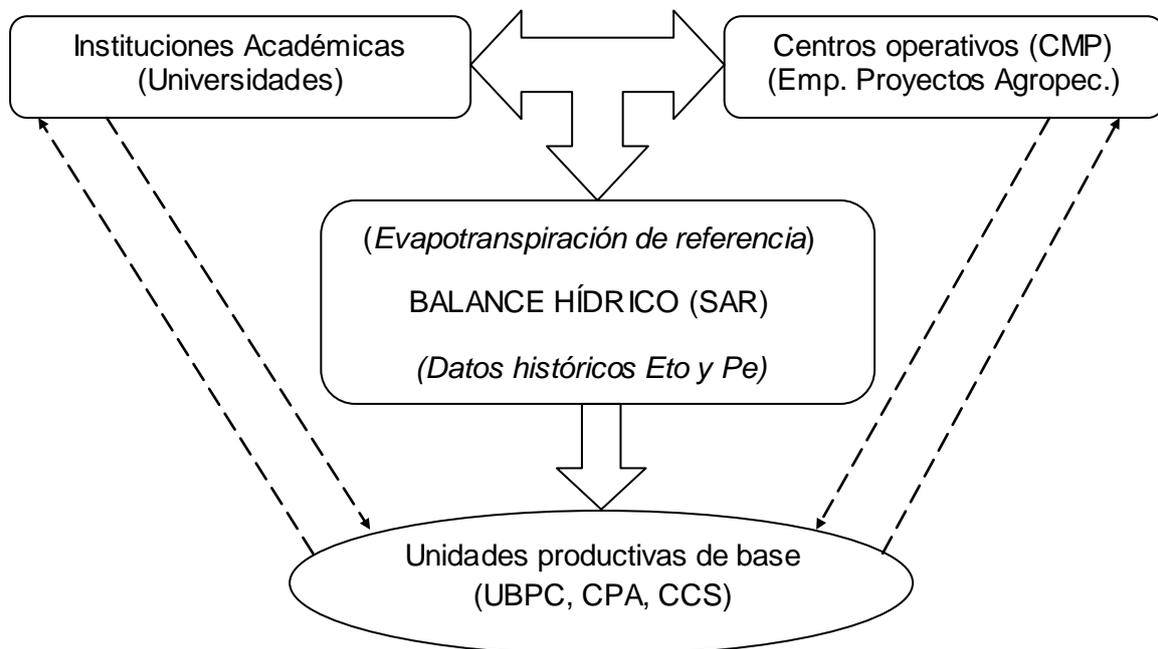


Figura 11. Esquema de inserción de los resultados en el sistema de asesoramiento al regante (SAR)

En este sentido se le dio continuidad y vigencia a varios mecanismos creados con anterioridad por el proyecto conjunto entre la facultad de Ciencias Agropecuarias y el CMPVC, de Servicio de Asesoramiento al Regante en la provincia Villa Clara, que de acuerdo a Pacheco, (2008) este, constituyó una de las vías que permitió introducir de manera rápida y confiable, los resultados alcanzados en los temas relacionados con la información y el conocimiento para el manejo del agua en los sistemas de riego; programación de riego, evaluación de la uniformidad de la tecnología empleada, y necesidades de agua de los cultivos en las entidades agrícolas del territorio. Significó una manera eficaz para que los mismos tuvieran un impacto visible a corto plazo, en la producción de las diferentes entidades agropecuarias de la provincia Villa Clara y para que las autoridades de las entidades estatales, adaptasen los resultados y los aplicaran, sobre todo en el cultivo de la papa regada con máquinas de pivote central eléctricas.

De acuerdo con el esquema propuesto se pone operativa una vía más, para tratar de minimizar los costos en las áreas regables que de acuerdo con Pérez *et al.*, (2010) requieren el uso adecuado de modelos que ayuden al productor en la toma de decisiones sobre cuándo y cuánta agua regar, por constituir este como todos

sabemos, un recurso finito para la humanidad, sobre todo en Cuba que se considera un país que enfrenta situaciones de *stress* en cuanto se refiere al suministro de recursos hídricos para uso humano, dado que se dispone de menos de 5 000 m³ de agua per cápita, y donde las frecuentes anomalías climáticas registradas durante las tres últimas décadas, han tenido un efecto apreciable sobre un amplio espectro de actividades socioeconómicas (Cabrera *et al.*, 2003).

Se obtuvo como resultado un nuevo enfoque integrado sobre la base de las facilidades que pueden ofrecer las herramientas informáticas, en la estimación y pronósticos fiables de procesos complejos como el consumo de agua de las plantas, de acuerdo a las condiciones climáticas predominantes. Este diseño prevé la ineludible unión entre los encargados de generar productos de ciencia e innovación y aquellos con facilidades para desarrollarlos y llevarlos a feliz término, con vistas a introducir cambios en los procesos productivos de nuestro país marcando diferencias positivas en el transcurso de los mismos.

La agricultura necesita cada vez mas de métodos precisos para evaluar el consumo de agua de las plantas en condiciones de regadío o de secano, y al mismo tiempo, caracterizar el clima en función de conocer los valores de ganancia y pérdida del agua por cada zona climática. Hasta el momento, para conocer la reserva presente de agua en el suelo para el día siguiente, de acuerdo con las metodologías propuestas para analizar el balance diario del agua en el suelo, se debe esperar al cierre parcial en las estaciones meteorológicas a las 10:00 pm, para saber el valor de la evapotranspiración de referencia, y luego, multiplicarlo por un coeficiente biológico decenal del cultivo, que se corresponde con la fase vegetativa del cultivo en cuestión, para entonces conocer el consumo de agua de la planta, y así, en función del déficit hídrico permisible, calcular las normas parciales netas y brutas a regar, definido por la diferencia entre las reservas máximas y mínimas del agua en el suelo.

Con esta nueva variante de la evapotranspiración de referencia pronosticada, se puede optimizar y desagregar mejor los recursos destinados a cumplir con la tarea del riego y el drenaje, modelando el consumo esperado de agua por parte de los cultivos, hasta con cinco días de antelación, que en muchos casos es un lapso de tiempo que concuerda con los intervalos de riego de varios cultivos de interés agrícola, lo cual permite garantizar una planificación adecuada a las condiciones reales de explotación, a través de su inserción en un modelo agrometeorológico.

Se considera en este estudio que el modelo utilizado por Pacheco y Pérez (2010) y modificado por Pacheco *et al.*, (2012b) (Tabla 6), puede aplicarse para dirigir el riego en las unidades productivas de base de la región indistintamente del sistema que se empleé para el mismo. Es necesario señalar que conocidas la reserva presente y mínima del agua en el suelo, la parte efectiva de las precipitaciones y las normas de entrega, a través del cálculo del pronóstico de riego, se puede tener una aproximación más o menos exacta del momento óptimo de riego, conociendo aproximadamente el ritmo de la evapotranspiración, al menos de los últimos cinco días. Este procedimiento se realiza en el marco del método analítico para el cálculo del régimen de riego y presenta una frecuencia decenal Pacheco *et al.*, (1995). Ahora, de igual forma este proceder requiere del conocimiento previo de una cantidad de datos que pudieran ser limitantes.

Tabla 6: Modelo de balance hídrico agrometeorológico propuesto por Pacheco y Pérez (2010)

MODELO DE BALANCE HÍDRICO DIARIO													
Mes:													
Entidad administrativa:					Capacidad de campo (cc):								
Cultivo:					Densidad aparente del suelo (Da)								
Variedad:					Límite mínimo de humedad (% cc)								
Fecha de siembra o plantación:					Eficiencia de riego del sistema (%)								
Nombre del campo:													
CÁLCULOS													
Wpn= Wpn-1+Pa+R-Etc (mm)							Wmáx= 10*H*Da*cc (mm)						
Dónde:							Dónde:						
Wpn: Reserva de agua presente día n (mm)							H: Capa activa (m)						
Wpn-1: Ídem día n-1 (mm)							Da: Densidad aparente del suelo (g cm ³)						
R: Lámina de riego neta aplicada (mm)							cc: Capacidad de campo (% bss)						
Pa: Precipitación aprovechada													
Etc: Evapotranspiración del cultivo (mm)													
EJEMPLO DE APLICACIÓN													
Día	Eto	Kc	Etc	H	Wm	Wp	Pc	Pa	Pna	Dfp	Dfm	Fr	Mpn
1	(mm)		(mm)	(m)				(mm)				XX	(mm)

Leyenda: Eto: *Evapotranspiración de referencia*; Kc: *Coeficiente biológico del cultivo*; Pc: *Precipitación caída*; Pna: *Precipitación no aprovechada*; Dfp: *Déficit hídrico permisible*; Dfm: *Déficit hídrico máximo*; Fr: *Fecha de riego*; Mpn: *Norma parcial neta*

Por otra parte los diferentes métodos indirectos empleados para la estimación de las necesidades hídricas de los cultivos, a partir de información meteorológica, presentan un grupo de inconvenientes a los cuales se hizo alusión anteriormente, entre los que se encuentran el elevado número de variables meteorológicas que se

emplean en las fórmulas. Pero esta situación queda parcialmente resuelta al solo emplear los datos de temperaturas extremo del aire, las cuales pueden ser obtenidas a través de varias vías y son un elemento de poca variación en el trópico dentro de periodos cortos como las decenas en que se dividen los meses (Junta de Andalucía, 2001).

5- Conclusiones

1. Los valores medios más altos de evapotranspiración de referencia en la región central se registran en mayo y julio con 5.2 mm d^{-1} en Santo Domingo y Aguada de Pasajeros respectivamente, mientras que el menor se registró en diciembre con 1.9 mm d^{-1} en Cayo Coco.
2. Los mayores porcentajes de Pe en la región central se alcanzan en los meses de enero y febrero con más de 95.0 % y el menor en septiembre con 67.4 % dentro del periodo poco lluvioso.
3. Los valores de evapotranspiración de referencia predichos no presentan diferencias significativas con los valores históricos de esta variable en la región central y pueden ser utilizados en los balances agrometeorológicos de las empresas agrícolas del territorio.
4. Se obtuvo un esquema de trabajo que integra la estimación y predicción de la evapotranspiración de referencia con un nuevo enfoque, y que contribuye optimizar el uso del agua de riego en las unidades productivas de base.

6- Recomendaciones

1-Validar la inserción de las predicciones de la evapotranspiración de referencia obtenidas en este estudio en el marco de la programación de riego en condiciones de campo.

2- Evaluar la eficiencia del esquema propuesto para diferentes tipos de cultivos, suelos y unidades productivas de diferente ubicación geográfica.

Bibliografía

- Acosta, R. & Paretas, J. J., 2011. *Incendios forestales*. La Habana: Editorial Científico - Técnica.
- Ahmad, M., Thulani, M., Love, D., Kongo, V., Mul, M., Kinoti, M y J. (2005) Estimating actual evapotranspiration through remote sensing techniques to improve agricultural water management: a case study in the transboundary Olifants catchment in the Limpopo basin, South Africa. 6th WaterNet/WARFSA/GWP Annual Symposium, 1-4 November 2005, Ezulwini Swaziland.
- Allen, R. G.; Pereira L.; Raes, D.; Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos, 298pp., Estudio FAO Riego y Drenaje No. 56 (Segunda edición). Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma.
- Allen, R. G.;Pereira, L.S.; Howell, T.A.; and Jensen, M.E. 2011. Evapotranspiration information reporting: Factors governing measurement accuracy. *Journal of Agricultural Water Management*, 98: 899-920.
- Allen, R.G., Bastiaanssen, W.G.M., Tasumi, M. y Morse, A. (2001) Evapotranspiration on the watershed scale using the SEBAL model and Landsat Images. Paper # 01-2224, ASAE, Annual. International Meeting; Sacramento, CA.
- Álvarez Escudero, L., Borrajero Montejo, I. & Bárcenas, M., 2014. Análisis de la calidad de series largas de registro de código de estado de tiempo presente para las estaciones de Cuba. *Revista Cubana de Meteorología*, ene - jun, 20(1), pp. 3-9.
- Álvarez Escudero, Lourdes; Borrajero, I.; Álvarez R.; Aenlle Ferro Laura; Rivero Llerena Ibis; Iraola Ramírez, Caridad; Rojas Díaz, Yanneyis; Hernández Gil, Mirna (2012). Estudio de la marcha interanual de la frecuencia de ocurrencia de observaciones con tormenta para el territorio cubano. *Revista de Climatología*. Vol. 12 p: 1-21. ISSN 1578-8768.
- Bastiaanssen, W. G. M. (2000) SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. *Journal of Hydrology*, 222 pp. 87-100. [8]
- Bastiaanssen, W.G.M., Noordman, E.J.M., Pelgrum, H., Davids, G., Thoreson B.P. y Allen, R.G. (2005) SEBAL model with remotely sensed data to improve water

- resources management under actual field conditions. *J. Irrig. and Drain. Engrg, ASCE* 131(1):85-93.
- Belda, F. (2014). *Predicción meteorológica. Problemas clásicos y nuevos retos.* Agencia Estatal de Meteorología.
- Belda, F., 2013. *Predicción meteorológica: Problemas clásicos y nuevos retos.* [En línea] [Último acceso: 24 Agosto 2015].
- Boletín Hidrológico. (2014). Análisis de lluvias, embalses y acuíferos. Dirección de uso racional del agua. Servicio Hidrológico Nacional. Disponible en: http://www.hidro.cu/index.php?option=com_content&view=article&id=16&Itemid=12. Consultado 11/08/14. Canada.
- Brizuela, A. B. & Espoz, C., 1986. Avances sobre el análisis digital en agrometeorología. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 7(1), pp. 63-70.
- Cabrera, J.;Giro, P.; Rodríguez, J. (2003). Análisis de situación de la región de Mesoamérica, Cuba y República Dominicana. Unión Mundial para la Naturaleza, Oficina Regional para Mesoamérica UICN/ORMA. 8 p.
- Castro, M.; Águila, F. M.; Quevedo, A. Kleisinger, S.; Tijerina, L.; Mejía, E. (2008). Sistema de riego automatizado en tiempo real con balance hídrico, medición de humedad del suelo y lisímetros. *Rev. Agricultura Técnica. México.* v.34 No.4. p-11. ISSN 0568-2517.
- Centella, A., B. Lapinel, O. Solano, R. Vazquez., C. Fonseca, V. Cutié, R. Báez, S. González, J. Sille, P. Rosario y L. Duarte (2006). La sequía meteorológica y agrícola en la República de Cuba y la República Dominicana, 174 pp. Publicado por el Programa de Desarrollo de las Naciones Unidas (PNUD) en Cuba 2007.
- Chipana R.; Osorio A. (2007). Necesidades de Agua y Programación de riegos: Avances basados en nuevas tecnologías de la información. Taller Internacional: Modernización de Riegos y Uso de Tecnologías de Información. Síntesis de resultados. La Paz Bolivia. P 9 – 13.
- Cisneros, E.; González, P.; y Solano O. (2004). El Servicio de Asesoramiento al Riego una necesidad del futuro, 14pp., Informe Técnico IIRD. Doc. 91, La Habana.
- Cisneros, E.; López, Teresa.; Leyva, Aleida.; Placeres, Z. (2011). Consideraciones sobre el servicio de asesoramiento al regante para las condiciones de Cuba. *Rev. Ciencias Técnicas Agropecuarias.* Vol. 20 No.3. ISSN 2071-0054. p-14.

- Collard, A., Hilton, F., Forsythe, M., and Candy, B. (2011). From observations to forecasts Part 8: The use of satellite observations in numerical weather prediction. *Weather*, 66(2):31-36 p.
- CubaAgua. (2014). Recursos hídricos e hidráulicos. Disponible en: <http://www.hidro.cu/> . Consultado el 10/08/14.
- Domínguez I. M.; Lamadrid J.; Pacheco S. (2008). Información agrometeorológica para el enfrentamiento de la variabilidad climática en el riego de la provincia Villa Clara, Cuba.
- Domínguez I. M.; Moya A.; Estrada A. (2008). Vigilancia del riesgo de ocurrencia de incendios forestales mediante estaciones meteorológicas de superficie. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 14(2): p119-128.
- Domínguez I. M.; Saturnino A.; Estrada A. (2012). Vigilancia agrometeorológica de condiciones ambientales para ganado vacuno. Sección de Meteorología Agrícola, Centro Meteorológico Provincial de Villa Clara. P – 21.
- Dominguez, R. 2009. Evaluation of satellite evapotranspiration estimates using ground-meteorological data available for the Flumen District into the Ebro Valley of N.E. Spain. *Agricultural Water Management*. 96: 638-652.
- Dueñas R. (2006). Agua, Sostenibilidad y Uso Eficiente del Agua. Editorial Samuel Feijóo. U CLV. Facultad de Ciencias Agropecuarias. 84p.
- Environmental Modeling Center, 2013. *NCEP Office Note 442: The GFS Atmospheric Model*, Washington D.C.: s.n.
- Garcés, C.; Vermillion, D.; Muños, G. (2008). Transferencia de la gestión del riego. Esfuerzos y resultados globales. Informe de la FAO sobre temas hídricos 32. International Water Management Institute. Roma. ISBN: 978-92-5-305907-2.
- García, E.; Llellish, M. (2011). Spatial estimation of evapotranspiration by Landsat satellite images and the SEBAL model in the Paraíso wetland – Huacho. Proyecto Libro Digital. Lima, Perú. *Rev. ECIPERU* Vol.8, No. 2. p 73-79.
- García, J. (2013). Los modelos numéricos de predicción del tiempo. *Rev. TETHYS*. Vol.5. No 2. p-22.
- Girolimetto, D. Venturini, V. (2013). Estimación de la evapotranspiración utilizando bandas del infrarrojo medio. *Asociación Española de Teledetección Revista de Teledetección* 40, ISSN: 1988-8740. p 41-50.
- González-Dugo, M. P; Lorite, I. J.; Gavilán, P.; Berengena, J.; Santos, C. y Serrano, A. (2008). Estimación de la Evapotranspiración en zonas regables combinando

- datos de teledetección y estaciones meteorológicas. Resumen de los Trabajos desarrollado por el Grupo de Riegos del IFAPA. Disponible en:
- Gordillo, V.M; Flores, H.; Tijerina, L.; Arteaga, R. (2014). Estimación de la evapotranspiración utilizando un balance de energía e imágenes satelitales. *Rev. Mexicana de Ciencias Agrícolas* Vol.5 Núm.1 1 de enero - 14 de febrero, 2014 p. 143-155.
- Guzman, G. H. (1989). La canícula interestival en el Salvador y sus efectos en la Agricultura. Memoria del I Congreso Guatemalteco de Agrometeorología. Ed. Ministerio de Comunicaciones, Transporte y Obras Pública; Instituto Nacional de sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología y Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. Ciudad de Guatemala, pp 18-27.
- Herrera, J.; García, Aymara.; Cum, R.; Rodríguez, M.R.; Pujol, R.; Cid, G.; Cisneros, G.; Alemán, C.; Roque, R. (2013). Uso eficiente de sistemas de riego. Manual práctico sobre el riego de los cultivos. IAGRIC. La Habana. ISBN: 978-959-285-021-7. p- 122.
- Herrera, J.; González, Félicita. (2015). Estudio de las necesidades de agua de los cultivos, una demanda permanente, un nuevo enfoque. *Revista Ingeniería Agrícola*, Vol. 5, No. 1 pp. 52-57. ISSN-2306-1545, RNPS-0622
- Ibarra Martín, C. M., Vega Briones, R. & Espinosa Goitzolo, R. edits., 1978. *Atlas de Cuba. XX Aniversario del triunfo de la Revolución Cubana..* La Habana: Instituto Cubano de Geodesia y Cartografía.
- Infante, S.; Ortega, J.; Cedeño, F. (2008). Estimación de datos faltantes en estaciones meteorológicas de Venezuela vía un modelo de redes neuronales. *Revista de Climatología*. Vol. 8 p: 51-70. ISSN 1578-8768.
- INRH. (2014). Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos. Disponible en: http://www.ecured.cu/index.php/Instituto_Nacional_de_Recursos_Hidr%C3%A1ulicos . Consultado el 10/08/14.
- Kelnay, E. (2003). *Atmospheric modeling, data assimilation, and predictability.* Cambridge University Press.
- Kustas, W. P. (1990) Estimates of evapotranspiration with a one and two-layer model of heat transfer over partial canopy cover. *Journal of Applied Meteorology*, 29, pp. 704-715.

- Lapinel P. B. (1988). La circulación Atmosférica y las Características Espacio Temporales de las Lluvias en Cuba. Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias. Instituto de Meteorología, A.C.C., Cuba, 173p.
- Machado, Y., Domínguez, I.M., Chacón, A., Suárez-Hernández, A.M. y Yera-Yera, Y. (2016). Caracterización de la precipitación y la precipitación efectiva en la Empresa Agropecuaria Yabú. Memorias VII Edición de la Conferencia Científica Internacional sobre Desarrollo Agropecuario y Sostenibilidad AgroCentro 2016. ISBN: 978-959-312-174-3.
- Machado, Y.; Pérez, A.; Medina, A. (2014). Influencia de la uniformidad de distribución sobre los rendimientos del cultivo de la papa. Memorias VI Edición de la Conferencia Científica Internacional sobre Desarrollo Agropecuario y Sostenibilidad AgroCentro 2014. ISBN: 978-959-250-973-3.
- Martínez, A. (2010). Aplicación de la Teledetección a la mejora del manejo y gestión del agua de riego en Aragón. Monografías, Teledetección. Departamento de Suelo y Agua. Estación Experimental de Aula *Dei*. CSIC.
- Martiniano C.; Francisco M.; Quevedo A.; Kleisinger S.; Tijerina L.; y Mejía E. (2008). Sistema de riego automatizado en tiempo real con balance hídrico, medición de humedad del suelo y lisímetro. Agricultura Técnica México v.34 n.4. ISSN 0568-2517. P.
- Matveev, L. T., 1984. *Física de la atmósfera*. Leningrado: Gidrometeoizdat.
- Mena, C.; Ormazábal, Y.; Llanos, J.; Díaz J. (2007). Desarrollo de un Sistema de Información Geográfica para Mejorar la Gestión del Agua de Riego del Embalse Convento Viejo, Chile. Agricultura Técnica. v.67 n.1 Chillán. ISSN 0365-2807. p 49 – 59.
- Méndez, A., Solano, O., Ponce, D. (2012). Valoración de las incertidumbres en la estimación de la evapotranspiración de referencia en Cuba. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias. La Habana Cuba. Vol. 21, No 2. 53-61 p.
- Méndez, J.; E. García O. Solano: Utilización de modelos geestadísticos y técnicas de redes neuronales artificiales en la evaluación espacio temporal de la evapotranspiración en Cuba. Memorias del XIII Simposio Internacional de la Sociedad Latino Americana de Percepción Remota Satelital SELPER 2008 Habana. Cuba. Artículo C-58. ISBN 978-959-247-063-7. Editorial Obras, [en línea] 2008, Disponible en: <http://www.selpercuba.unaicc.cu/> [Consulta: septiembre 18 2008].

- Morse, A., Tasumi, M., Allen, R. G. y Kramber, W. J. (2000). Application of the SEBAL methodology for estimating consumptive use of water and streamflow depletion in the Bear river basin of Idaho through remote sensing - Final Report. Idaho Department of Water Resources - University of Idaho.
- Moya Álvarez, A. S. & Estrada Moreno, A., 2007. *Pronóstico de cobertura espacial y cantidad de precipitaciones. Un acercamiento al pronóstico probabilístico de tormentas locales severas*. Santa Clara, Centro Meteorológico Provincial de Villa Clara, p. 5.
- Ocampo, D.; Rivas, R.; Carmona, F. (2013). Aplicación de tres modelos de estimación de la evapotranspiración a partir de imágenes Landsat e información de terreno. Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, INPE.
- Oliveira Filho , C. L. d., 2007. *Prognóstico das variáveis meteorológicas e da evapotranspiração de referência com o modelo de previsão do tempo GFS/NCEP*. Piracicaba: s.n.OMM - No. 485, Volumen II - Aspectos regionales
- OMM (1992): Manual del Sistema Mundial de Proceso de Datos y de Predicción. Oficina Nacional de Estadísticas e Información de la República de Cuba, (2011). Anuarios estadísticos de Cuba y sus territorios, La Habana: s.n..
- Pacheco, J. (2008). Servicio de asesoramiento al regante en la provincia Villa Clara. Informe Final de Proyecto Ramal del MINAG. Código: 22-24, p 67.
- Pacheco, J.; Alonso, R.; Pujol, P.; Camejo, E. (1995). Riego y Drenaje. Editorial Pueblo y Educación. La Habana. Cuba. P-414.
- Pacheco, J.; Carlesso, R.; Gómez. J. (2012a). Conservación y ahorro de agua en la agricultura. España. Editorial Académica Española. 55p.
- Pacheco, J.; Ismabel, M.; Domínguez, Y.; Lamadrid, J.O. (2006). Lluvia y evapotranspiración de referencia en cuatro puntos representativos de la provincia de Villa Clara, Cuba. Revista Centro Agrícola No 4. Editorial Feijóo ISSN: 0253-5785. p. 67-68.
- Pacheco, J.; Pérez, A.; Cueto, Y. (2012b). Programación del riego de la papa (*Solanum tuberosum* L.) mediante métodos agrometeorológicos en el Valle del Yabú. Memorias V Edición de la Conferencia Científica Internacional sobre Desarrollo Agropecuario y Sostenibilidad AgroCentro 2012. ISBN: 978-950-250-775-3.

- Pacheco, J.; Pérez, A.; Evaluación del manejo del riego de la papa en la Empresa de Cultivos Varios Valle del Yabú, Villa Clara, Cuba. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, Vol. 19, No.3, p 47-52.
- Pacheco, J.; Pérez, A.; Job, B. (2010). Programación del riego en el Valle del Yabú Santa Clara, Cuba. *Revista NEXO, Nicaragua*. Vol. 23, No. 2. p 41-46. ISSN:1818-6742.
- Pérez, J. R.; Cuellar, I.; De León, M.E.; santana, M.; Fonseca, J.; Pérez, M. (2004). Caña de Azúcar: Captación, conservación y manejo sostenible del agua y la humedad del suelo. Instituto Nacional de Investigaciones de la Caña de Azúcar. Serie Caña de Azúcar Siglo XXI. Suplemento especial de la Revista Cuba & Caña. Vol. 1, No. 4. 44p.
- Pérez, R. (2004). El riego de los pivotes y su impacto ambiental en Cuba: reflexiones. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, Vol. 25, No. 2, p – 1-5.
- Pérez, R., Blanco, J. L., Piña, N., Pérez, A.G. (2010). Emisores, uniformidad de riego y rendimiento agrícola en pivotes para cultivos varios. *Rev. Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, Vol. 31, No. 1. p - 43-50.
- Plummer, N. y otros, 2007. Directrices sobre la gestión de datos climáticos. Ginebra: Organización Meteorológica Mundial.
- Press, W. H., Flannery, B. P., Teukolsky, S. & Vetterling, W. T., 2007. *Numerical Recipes in C++: The Art of Scientific Computing*. Tercera ed. s.l.:Cambridge university press.
- Richardson, D. (2011). From observations to forecasts Part 11: Ensemble products for weather forecasters. *Weather*, 66(9):235-241p.
- Santos, L.; Valero, J. A.; Picornell, María.; Tarjuelo, J. (2010). El Riego y sus Tecnologías. Centro Regional de Estudios del Agua. Universidad de Castilla-La Mancha. Albacete España. CREA-UCLM. ISBN: 13: 978-84-692-9979-1.
- SEPOR. (2007). Servicio de programación y optimización del uso del agua de riego. Programación de riego usando estaciones meteorológicas. Boletín Informativo. Comisión Nacional de Riego. Chile. p-14.
- Servicio de Investigación Agroalimentaria. (2014). Aplicaciones agrarias y ambientales de la teledetección espacial. Aragón Investiga. <http://www.aragoninvestiga.org/Aplicaciones-agrarias-y-ambientales-de-la-teledeteccion-espacial/>. Consultado 01/08/14.

- Servicio Hidrológico Nacional. (2006). Nuevos logros en el estudio de la pluviosidad en Cuba: Mapa isoyético para el período 1961-2000. Voluntad Hidráulica, No. 98. La Habana. Servicio Hidrológico Nacional, Dirección de Cuencas, INRH.
- Solano Ojeda O. J., R. J. Vázquez Montenegro, J. A. Menéndez Ginorio, C. J. Menéndez García. (2003a). Estudio de la evapotranspiración de referencia en Cuba. Revista Cubana de Meteorología, Instituto de Meteorología, La Habana. Vol. 10 No. 1. 33 – 39 pp.
- Solano, O., C. J. Menéndez, R. J. Vázquez y J. A. Menéndez, T. De los R. Burgos, Maribel Osorio y Myriam González (2003): Zonificación de la precipitación en Cuba. Revista Cubana de Meteorología, Instituto de Meteorología, La Habana. Vol. 10, No. 2. 9 – 19 pp.
- Swennenhuis, J. (2014). Manual de Usuario CropWat 8.0. Roma, Italia: FAO.
- Tarjuelo, J. M. (2005). El riego por aspersión y su tecnología. Ediciones Mundi-Prensa, pág. 318. Madrid, España.
- Wang, H., Pitman, A.J., Zhao, M., and Leemans, R. (2003). The impact of land_cover modification on the June meteorology of China since 1700, simulated using a regional climate model. International Journal of Climatology, 23(5):511-527p.
- Warland, J., and K. Taillon. 2002. Spatial variability of eddy covariance measurements: A comparison of two identical eddy correlation systems in adjacent plots. In: 15th Conference on Boundary Layer and Turbulence. Wageningen, The Netherlands, pp: 1–2.
- Zamora, Elisa y Chaterlán, Yoima. (2001). Estudios sobre evapotranspiración de referencia en Cuba. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias. La Habana Cuba. Vol. 10, No. 3. 87-89 p.

Anexos

Anexo 1. Salidas gráficas de predicción agrometeorológica de Eto.



Pronóstico para las próximas 24 horas



Pronóstico para las próximas 48 horas



Pronóstico para las próximas 72 horas



Pronóstico para las próximas 96 horas



Pronóstico para las próximas 120 horas

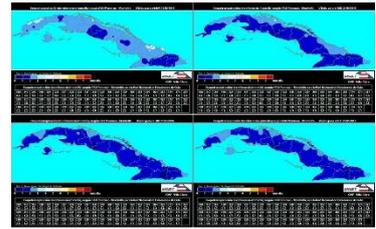


Figura 12. Panel integral de estimación y predicción agrometeorológica de la Eto para Cuba.