



**TRABAJO DE DIPLOMA EN OPCIÓN AL TÍTULO DE
INGENIERO AGRONOMO**

Manejo del riego del maíz, a partir de la
evapotranspiración y uso de tensiómetros en la
Empresa Agropecuaria Horquita

AUTOR: Adis Ramona Hernández Jiménez

TUTOR: Reinaldo Pérez Armas

septiembre, 2024

RESUMEN

Con el objetivo de conducir el manejo del riego del maíz, a partir de la evapotranspiración y del balance de humedad se llevó a cabo la presente investigación de tipo experimental en la finca la prosperidad de la Empresa Agropecuaria Horquita en la campaña de siembra de invierno 2023-2024. El comportamiento de las variables meteorológicas se tomó de una estación meteorológica automática y un pluviómetro instalados en la propia finca y con el empleo de un monitor portátil. La evapotranspiración fue determinada a partir balance de humedad y el empleo del método gravimétrico para dar seguimiento a la dinámica de la humedad del suelo con tomas de muestras tres veces a la semana. Se empleó el programa CROPWAT 8.0 para determinar la evapotranspiración de referencia, lluvias aprovechables. En la programación del riego se empleó un set de tres tensiómetros. Como resultados principales se concluyó que la evapotranspiración de referencia para el periodo mostró un comportamiento creciente a lo largo del ciclo del cultivo como resultado del incremento de las variables climáticas que inciden en la misma. Enero mostró una Eto de 68,86 mm, en tanto el de abril fue de 185,33 mm, La evapotranspiración real del cultivo reflejó la influencia del desarrollo del cultivo sobre el consumo de agua y que la programación de riego indicó la necesidad de aplicar una lámina total de 268 mm, en 18 riegos con un intervalo promedio de 6.9 días

Palabras Clave

Evapotranspiración, maíz, programación del riego, tensiómetros

ABSTRACT

With the objective of conducting corn irrigation management, based on evapotranspiration and humidity balance, this experimental investigation was carried out on the prosperity farm of the Horquita Agricultural Company in the 2023 winter planting campaign. -2024. The behavior of the meteorological variables was taken from an automatic meteorological station and a rain gauge installed on the farm itself and with the use of a portable monitor. Evapotranspiration was determined from moisture balance and the use of the gravimetric method to monitor the dynamics of soil moisture with sampling three times a week. The CROPWAT 8.0 program was used to determine the reference evapotranspiration, usable rainfall. A set of three tensiometers was used in irrigation programming. As main results, it was concluded that the reference evapotranspiration for the period showed an increasing behavior throughout the crop cycle as a result of the increase in the climatic variables that affect it. January showed an Eto of 68.86 mm, while April was 185.33 mm. The actual crop evapotranspiration reflected the influence of crop development on water consumption and that irrigation programming indicated the need to apply a total sheet of 268 mm, in 18 irrigations with an average interval of 6.9 days

Key words

Evapotranspiration, corn, irrigation programming, tensiometers

ÍNDICE

Contenido

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPITULO I: REVISIÓN BIBLIORÁFICA	4
1.1 Evapotranspiración	4
1.1.1. Definición de evapotranspiración.....	4
1.1.2. Factores que influyen en la evapotranspiración	6
1.1.3. Evapotranspiración y necesidades hídricas de un cultivo	9
1.1.4. Evapotranspiración de referencia	9
1.2. Evapotranspiración del cultivo (ETc).	11
1.2.1. Factores que influyen en la evapotranspiración del cultivo	11
1.2.2. Requerimientos hídricos del cultivo	13
1.2.3. Métodos para estimar la evapotranspiración del cultivo	13
1.2.4. Precipitación efectiva	14
1.3. Evapotranspiración y programación del riego	16
CAPITULO II: MATERIALES Y MÉTODOS	19
2.1. Determinar la evapotranspiración de referencia (ETo) empleando el programa CROPWAT 8.0.....	19

2.2. Determinar la evapotranspiración del cultivo (ETc) a partir del balance de humedad en las condiciones edafoclimáticas de la finca La Prosperidad.	21
2.3 La programación del momento de riego	22
Capítulo III: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	25
3.1. La evapotranspiración de referencia (ETo) empleando el programa CROPWAT 8.0.....	25
3.1.1. Evapotranspiración de referencia por decenas	26
3.2. La evapotranspiración del cultivo (ETc) a partir del balance de humedad en las condiciones edafoclimáticas de la finca “La Prosperidad”.....	28
3.2.1. Lluvias aprovechables.....	29
3.2.2. Humedad presente en el suelo:	31
3.3. Programación del riego en función de la humedad presente en el suelo	35
CONCLUSIONES.....	39
RECOMENDACIONES	40
BIBLIOGRAFFÍA	41

INTRODUCCIÓN

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 (Machado, 2016)

Conocer cuál es el consumo por especies e incluso, por variedades, es importante para el agricultor de forma de poder hacer un uso eficiente del recurso hídrico disponible, además de poder utilizar las precipitaciones cuando en ocasiones no se cuente con suficiente agua para riego. La combinación del fenómeno físico conocido como evaporación y el biológico, transpiración, determinan un importante egreso que se denomina evapotranspiración.

Los antecedentes sobre el tema los resume Monteith en 1985, al mencionar los trabajos de propio autor y los de Thornhwaite y Penman (1948). Sobre la base de estos trabajos surge la idea de la evapotranspiración de referencia, o sea, que se tiene una vegetación de la cual se conoce su evapotranspiración, así como los parámetros climáticos que actúan sobre ella, de forma que con los coeficientes de cultivos se pueda calcular la evapotranspiración del cultivo en cuestión.

Doorembos y Pruitt (1977) hicieron un resumen de los cuatro métodos fundamentales para el cálculo de la evapotranspiración de referencia, definen que el uso de los coeficientes de cultivo es para transformar la evapotranspiración de referencia en la evapotranspiración del cultivo.

Heerman (1968) divulgó las bases para los futuros trabajos con la evapotranspiración de los cultivos. En 1990 es definido el uso generalizado de la expresión de Penman-Monteith modificada por la FAO para el cálculo de la evapotranspiración de referencia, recomendándose la calibración con respecto a la misma si se utilizan otras expresiones (Allen *et al.*, 1998).

Snyder (1998) divulgó por primera vez un programa de cómputo Reference Evapotranspiration que calcula la evapotranspiración de referencia por diferentes métodos.

Para la estimación de la evapotranspiración del cultivo (ET_c) se utiliza el coeficiente del cultivo (K_c), el cual surge de la relación entre ET_c y la ET_o, términos todos definidos por Allen *et al.*, (2006), citado por Alemán (2020).

El valor de K_c varía principalmente en función de las características particulares del cultivo y en una pequeña parte, en función del clima.

Jensen y Allen, (2016), plantean que la ET_c es afectada por diversos factores atmosféricos tales como: temperatura del aire, radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa. Además, la ET varía regional y estacionalmente de acuerdo con las condiciones de clima, suelo, y vegetación

En nuestro país el maíz se cultiva desde la época de los aborígenes y constituye un alimento básico en la alimentación humana, del ganado y las aves. En el 2006, en Cuba se cosecharon 122 160 hectáreas de maíz, de ellas, al sector estatal correspondieron 8 919 y al no estatal 113 241; con una producción de 305 400 miles de toneladas de maíz tierno, siendo en el sector estatal de 19 978 t y en el no estatal de 285 422 t. El rendimiento del maíz fue de 2,50 toneladas por hectárea (t.ha⁻¹) siendo, en el sector estatal de 2,24 t.ha⁻¹ y en el sector no estatal de 2,52 t.ha⁻¹ (ONEI, 2009).

Por su importancia tanto económica como social, este cultivo requiere de toda la atención y que se le aplique una agrotecnia cada vez ajustada a sus exigencias para obtener la respuesta productiva esperada

Por la susceptibilidad del maíz tanto a los excesos de humedad como a su carencia es preciso establecer sus demandas reales de agua durante todo el ciclo para establecer el momento y la dosis de riego

Como las magnitudes de la evapotranspiración y las necesidades de agua del cultivo son idénticas, este método es apropiado para la planificación, manejo y estudios de balance hídrico para riego de forma prospectiva, proyectiva y en tiempo real (Zamora *et al.*, 2014)

Problema Científico

El manejo del riego del maíz a partir de la evapotranspiración real del cultivo y la tensión de la humedad del suelo en la Empresa Agropecuaria Horquita

Hipótesis

Si se conduce el manejo del riego del maíz considerando la evapotranspiración real y la tensión de humedad en el suelo, se podrán proponer medidas para un correcto manejo de riego que permita cubrir las necesidades hídricas del cultivo en la Empresa Agropecuaria Horquita

Objetivo general

Evaluar el manejo del riego del maíz a partir de la evapotranspiración real del cultivo y la tensión de la humedad del suelo en la Empresa Agropecuaria Horquita

Objetivos específicos

1. Determinar la evapotranspiración de referencia (ET_o) empleando el programa CROPWAT 8.0
2. Determinar la evapotranspiración del cultivo (ET_c) a partir del balance de humedad en las condiciones edafoclimáticas de la finca La Prosperidad
3. Establecer el momento y la lámina de riego requerida durante todo el ciclo del cultivo

CAPITULO I: REVISIÓN BIBLIORÁFICA

No hay duda de que el clima juega un papel importante en la formación de la faz de la tierra y en el tipo de actividades económicas que el hombre puede practicar (Mohammed *et al.*, 2018).

Se espera que el cambio climático (CC) resultante del aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera altere los regímenes de temperatura y precipitación en todo el mundo, y que estos cambios, acompañados por un aumento de las fluctuaciones, causarán una gran disminución en el uso del agua de los cultivos y la producción de alimentos (Castillo *et al.* 2020)

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).

1.1 Evapotranspiración

1.1.1. Definición de evapotranspiración.

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 (figura 1). 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).

Se refiere al descenso del agua por evaporación desde cualquier punto de la superficie (suelo húmedo, superficie de agua, etc.) y transpiración del cultivo existente en el medio. Siendo determinante la calidad del agua que recorre a la superficie terrestre, lo cual es relevante para la determinación de la homogeneidad hídrica y/o balance hídrico. Además, es un indicador del balance hídrico, y un componente importante en la determinación de las necesidades hídricas de las plantas y por consiguiente en la programación de riego (Droogers, 2000, citado por Barjas, 2022)

Cuando el suelo se encuentra en capacidad de campo (CC) se da la mayor capacidad de evapotranspiración del cultivo, sin embargo, si el contenido de humedad del suelo es por debajo de la capacidad de campo, donde las estomas de las hojas de los cultivos se cierran progresivamente, con la finalidad de realizar menor transpiración y así incorporar el agua (Schosinsky, 2007).

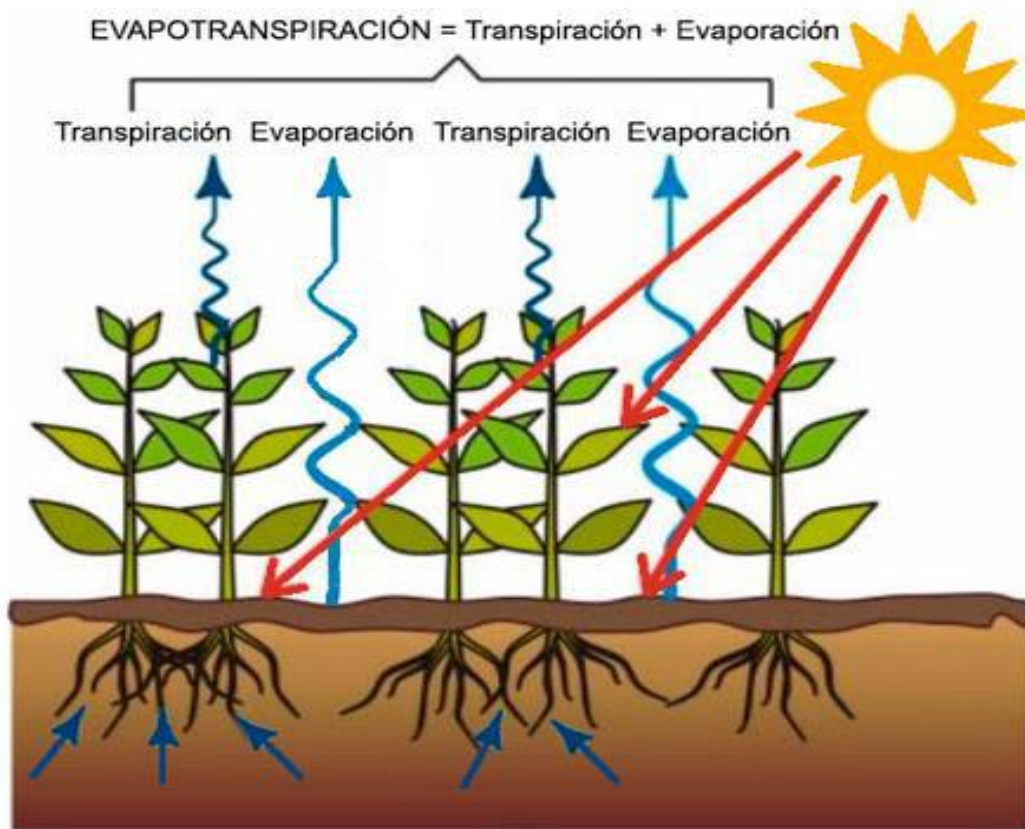


Figura 1: Evapotranspiración del cultivo

1.1.2. Factores que influyen en la evapotranspiración

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

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

En la Figura 2 se presenta la evapotranspiración dividida en sus dos componentes (evaporación y transpiración) en relación con el área foliar por unidad de superficie de suelo debajo de él. En el momento de la siembra, casi el 100% de la ET ocurre en forma de evaporación, mientras que cuando la cobertura vegetal es completa, más del de 90% de la ET ocurre como transpiración.

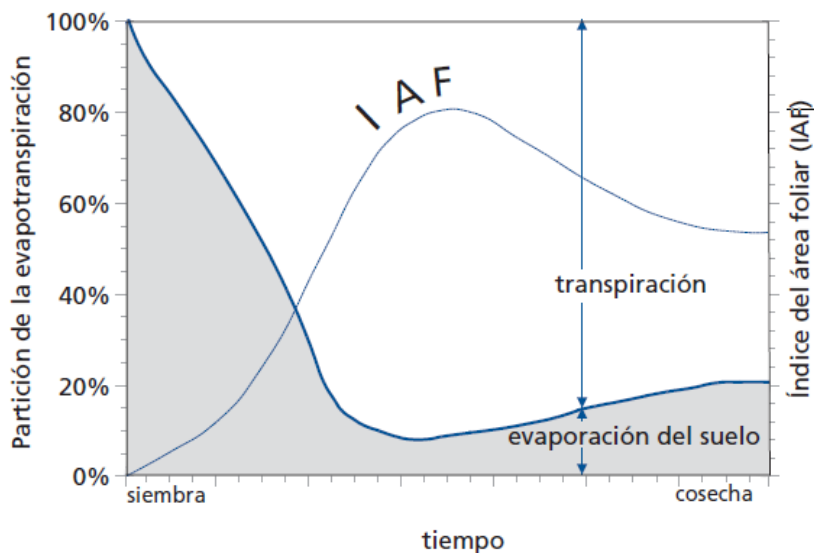


Figura 2: Repartición de la evapotranspiración en evaporación y transpiración

durante el periodo de crecimiento de un cultivo anual

El clima, las características del cultivo, el manejo y el medio de desarrollo son factores que afectan la evaporación y la transpiración. Los conceptos relacionados a la ET y presentados en la Figura 3 se describen en la sección sobre conceptos de evapotranspiración.

Variables climáticas

Según Méndez (2023) la ET depende de las características de la superficie terrestre, como el tipo de vegetación y la humedad del suelo, la energía térmica disponible de la luz solar y las condiciones climáticas atmosféricas; no es posible medirla directamente

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

Factores de cultivo

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

Manejo y condiciones ambientales

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

Cuando se evalúa la tasa de ET, se debe considerar adicionalmente la gama de prácticas locales de manejo que actúan sobre los factores climáticos y de cultivo afectando el proceso de ET. Las prácticas del cultivo y el método de riego pueden alterar el microclima, afectar las características del cultivo o afectar la capacidad de absorción de agua del suelo y la superficie de cultivo. Una barrera rompevientos reduce la velocidad del viento y disminuye la tasa de ET de la zona situada directamente después de la barrera. El efecto puede ser significativo especialmente en condiciones ventosas, calientes y secas, aunque la evapotranspiración de los mismos árboles podría compensar cualquier reducción en el campo. La evaporación del suelo de un huerto con árboles jóvenes, en donde los árboles están ampliamente espaciados, puede ser reducida usando un sistema de riego por goteo bien diseñado. Los goteros aplican el agua directamente al suelo cerca de los árboles, de modo en que dejan la mayor parte de la superficie del suelo seca, limitando las pérdidas por evaporación. El uso de coberturas, especialmente cuando el cultivo es pequeño, es otra manera de reducir substancialmente la evaporación del suelo. Los anti-transpirantes, tales como estimulantes del cierre de los estomas, o los materiales que favorecen el reflejo del suelo, reducen las pérdidas de agua del cultivo y por lo tanto la tasa de transpiración. Cuando las condiciones de campo difieran de las condiciones estándar, son necesarios factores de corrección para ajustar ET_c (ET_c aj). Estos factores de ajuste reflejan el efecto del ambiente y del manejo cultural de las condiciones de campo.

Se espera que el cambio climático (CC) resultante del aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera altere los regímenes de temperatura y precipitación en todo el mundo, y que estos cambios, acompañados por un aumento de las fluctuaciones, causarán una gran disminución en el uso del agua de los cultivos y la producción de alimentos

1.1.3. Evapotranspiración y necesidades hídricas de un cultivo

La disminución de los recursos hídricos disponibles causa problemas críticos de escasez de agua. En consecuencia, ganan importancia los estudios para hacer estimaciones precisas del consumo de agua del cultivo (Bozkurt-Colak, 2019; Opoku et al., 2019)

Uno de los parámetros que influyen en el cálculo del balance hídrico es la evapotranspiración (ET), que no se mide de forma sencilla. Si se quiere determinar experimentalmente, es necesario utilizar aparatos y mediciones precisas de varios parámetros físicos o medir el balance del agua en lisímetros. Estos procesos son caros y requieren de personal cualificado, por lo que de forma general se suele estimar, aunque siga siendo importante realizar comprobaciones en campo para evaluar las estimaciones. Comúnmente, esta ET es calculada con datos meteorológicos (influirán en el cálculo de la evapotranspiración del cultivo de referencia E_{To}) y a partir del cálculo del coeficiente de cultivo (K_c) (Gómez, 2021)

1.1.4. Evapotranspiración de referencia

Según FAO (2006), El concepto de evapotranspiración incluye tres diferentes definiciones: evapotranspiración del cultivo de referencia (E_{To}), evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (E_{Tc}), y evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar ($E_{Tc aj}$)

La tasa de evapotranspiración de una superficie de referencia, que ocurre sin restricciones de agua, se conoce como evapotranspiración del cultivo de referencia, y se denomina E_{To} . La superficie de referencia corresponde a un cultivo hipotético de

pasto con características específicas. No se recomienda el uso de otras denominaciones como ET potencial, debido a las ambigüedades que se encuentran en su definición. El concepto de evapotranspiración de referencia se introdujo para estudiar la demanda de evapotranspiración de la atmósfera, independientemente del tipo y desarrollo del cultivo, y de las prácticas de manejo. Debido a que hay una abundante disponibilidad de agua en la superficie de evapotranspiración de referencia, los factores del suelo no tienen ningún efecto sobre ET. El relacionar la ET a una superficie específica permite contar con una referencia a la cual se puede relacionar la ET de otras superficies. Además, se elimina la necesidad de definir un nivel de ET para cada cultivo y periodo de crecimiento. Se pueden comparar valores medidos o estimados de ETo en diferentes localidades o en diferentes épocas del año, debido a que se hace referencia a ET bajo la misma superficie de referencia (FAO 2006).

Para Gómez (2021) la evapotranspiración de referencia es la evapotranspiración de la atmósfera e influye en ella el tipo de cultivo ni su nivel de desarrollo, se basa únicamente en parámetros climáticos. Este método requiere datos de radiación, temperatura del aire, humedad atmosférica y velocidad del viento

Gómez *et al.*, (2023) Definen la evapotranspiración (ET) como la pérdida de agua por la combinación de dos procesos separados. En uno el agua se pierde desde la superficie del suelo por evaporación y en el otro a través de la transpiración del cultivo. Ambos procesos ocurren de forma simultánea y resulta difícil distinguir la separación entre ellos

La ETo se refiere a la influencia de las condiciones climáticas sobre la evapotranspiración que ocurre desde una superficie de referencia cubierta con un cultivo hipotético de pastos bajo determinadas condiciones (Allen et al., 2006). Si bien los conceptos de evapotranspiración potencial y evapotranspiración de referencia son diferentes en el sentido estricto, ambos indican cantidades máximas de agua perdidas hacia la atmósfera, por lo que en determinadas condiciones pueden considerarse similares (Sánchez y Carvacho, 2011). De esta manera, algunos autores (Bautista *et*

al., 2009; Vega y Jara, 2009), citados por Villazón (2021), consideran que para este tipo de estudio tal distinción es innecesaria.

1.2. Evapotranspiración del cultivo (ETc).

1.2.1. Factores que influyen en la evapotranspiración del cultivo

El clima, las características del cultivo, el manejo y el medio de desarrollo son factores que afectan la evaporación y la transpiración. Los conceptos relacionados a la ET y presentados en la Figura 3 se describen en la sección sobre conceptos de evapotranspiración (FAO 2006).

Los principales parámetros climáticos que afectan la evapotranspiración son la radiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y la velocidad del viento. Se han desarrollado varios procedimientos para determinar la evaporación a partir de estos parámetros.

El tipo de cultivo, la variedad y la etapa de desarrollo deben ser considerados cuando se evalúa la evapotranspiración de cultivos que se desarrollan en áreas grandes y bien manejadas. Las diferencias en resistencia a la transpiración, la altura del cultivo, la rugosidad del cultivo, el reflejo, la cobertura del suelo y las características radicales del cultivo dan lugar a diferentes niveles de ET en diversos tipos de cultivo, aunque se encuentren bajo condiciones ambientales idénticas.

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).

Los factores tales como salinidad o baja fertilidad del suelo, uso limitado de fertilizantes, presencia de horizontes duros o impenetrables en el suelo, ausencia de control de enfermedades y de parásitos y el mal manejo del suelo pueden limitar el

desarrollo del cultivo y reducir la evapotranspiración. Otros factores que se deben considerar al evaluar la ET son la cubierta del suelo, la densidad del cultivo y el contenido de agua del suelo. El efecto del contenido en agua en el suelo sobre la ET está determinado primeramente por la magnitud del déficit hídrico y por el tipo de suelo. Por otra parte, demasiada agua en el suelo dará lugar a la saturación de este lo cual puede dañar el sistema radicular de la planta y reducir su capacidad de extraer agua del suelo por la inhibición de la respiración.

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).

Los flujos verticales dentro del ciclo hidrológico tienen un rol fundamental, en particular, la evapotranspiración (ET), ya que, en zonas de llanuras, se pierde alrededor del 85% del agua del sistema mediante este proceso (Weinzettel y Usunoff, 2001).

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

1.2.2. Requerimientos hídricos del cultivo

Cuantificar espacial y temporalmente la evapotranspiración (ET), tiene importancia en la gestión de los recursos hídricos, en la determinación de la huella hídrica (Olivera *et al.*, 2020) y en la mejora de la productividad del agua y la seguridad alimentaria

La evapotranspiración de un cultivo determinado representa sus necesidades hídricas, la cual, según Montero *et al.*, (2023) se define como “la pérdida total de agua de una cubierta vegetal en forma de vapor a través de la evaporación y transpiración durante un intervalo de tiempo dado”

Según Chavarría *et al.* (2020) y Párraga *et al.* (2020) en las etapas iniciales los cultivos demandan menor cantidad de agua porque el área foliar es pequeña en comparación con las etapas de floración y fructificación. Esta mayor demanda de agua en las últimas etapas se debe a que es en este momento cuando se están formando los órganos reproductivos y el cultivo presenta mayor área foliar.

Debido a las diferencias en albedo, altura del cultivo, propiedades aerodinámicas, así como características de los estomas y hojas de las plantas, se presentarán diferencias entre la evapotranspiración de un cultivo bien desarrollado y regado y la de referencia ETo. (FAO, 2006)

1.2.3. Métodos para estimar la evapotranspiración del cultivo.

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.

FAO (2006) plantea que la evapotranspiración que ocurre en una superficie cultivada puede ser medida directamente a través de los métodos de transferencia de masa o del balance de energía. También se puede obtener la misma a partir de estudios del balance de agua en el suelo en campos cultivados o a través de lisímetros.

Por otra parte, la evapotranspiración de un cultivo puede ser estimada a partir de datos meteorológicos y del cultivo utilizando la ecuación de Penman-Monteith. Se puede inferir la tasa de evapotranspiración ajustando el valor de albedo y las resistencias aerodinámicas y de la superficie del cultivo, para representar las características de crecimiento del mismo

De acuerdo al enfoque del coeficiente del cultivo, la evapotranspiración del cultivo ET_c se calcula como el producto de la evapotranspiración del cultivo de referencia, ET_o y el coeficiente del cultivo K

$$ET_c = K_c \cdot ET_o$$

1.2.4. Precipitación efectiva

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 setenta del siglo 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 desatacan 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).

Las proyecciones climáticas para Cuba predicen un clima más extremo, más cálido y con déficits de agua, que regionalmente pueden ser acentuados. La reducción de la riqueza hídrica es, principalmente, consecuencia del incremento de los procesos de pérdida de agua que se están produciendo, ocasionados por el aumento de la temperatura del aire y de la radiación solar, por cambios en el régimen de precipitación y los impactos que se producen en la cobertura boscosa, junto con otros que vienen ocurriendo en el sistema hidrológico (CITMA 2020).

La precipitación es la primera fuente que el agricultor debe contabilizar como agua disponible en su finca. La precipitación tiene duración (tiempo total de precipitación), intensidad (volumen de precipitación por unidad de tiempo) y frecuencia (el número de precipitaciones en un tiempo dado y con determinadas características). Por ejemplo, una precipitación que se inició a las 03:00 PM y terminó a las 03:30 PM tuvo una duración de 30 minutos. Si la cantidad de agua precipitada alcanzó 20 mm, la intensidad fue de 40 mm h⁻¹. La frecuencia de una lluvia con estas características o mayores que ésta, puede ser de tres por mes. Cabe recordar que la lámina de 1 mm de precipitación equivale a 1,0 l m². Algunos países de la región miden la precipitación en pulgadas (1 pulgada = 2,54 cm = 25,4 mm) FAO (2002).

Se denomina precipitación efectiva (P_e) a la lluvia que es útil o utilizable (Dueñas, *et al.*, 1987) por quedar el agua almacenada en el suelo, dentro de la zona radicular de las plantas, en niveles de energía de retención que las raíces puedan absorberla (agua disponible).

Aunque no se llega a valores muy precisos, la experiencia ha comprobado que hay métodos que estiman la precipitación efectiva en valores que se acercan a la realidad. El método del balance diario de la humedad del suelo es considerado el más preciso para

estimar la lluvia efectiva, pero, en la práctica, durante la planificación de un caso de captación de lluvia no se dispone comúnmente de datos suficientes para aplicarlo. Sin embargo, si la región cuenta con datos de balance diario generados en experimentos de balance de agua en el suelo, estos deben ser los valores utilizados, por su precisión (Hernández, 2016)

1.3. Evapotranspiración y programación del riego

Pereira *et al.*, (2021). Consideran que estimar estos componentes de la evapotranspiración es muy difícil, debido a la cantidad de factores del clima, del suelo y de las plantas que influyen.

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 (Hernández, 2016)

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. Lo anterior ha estado asociado, en los países desarrollados, al uso de sistemas informáticos y a redes de estaciones meteorológicas automáticas que permiten entregar en tiempo real la programación del riego. De este modo, en varios países del mundo se observa una fuerte tendencia a usar estaciones meteorológicas automáticas para programar el riego y así optimizar el uso del

agua en la producción de frutales, viñas, hortalizas y cultivos. 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 escurriencia, 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).

El desarrollo de investigaciones en esta área ha generado un conjunto de resultados importantes que han favorecido el incremento de la superficie de cultivos bajo riego en países de Iberoamérica, lo cual ha permitido mayor producción y calidad de las cosechas con notables ingresos para sus agricultores.

En nuestro país la determinación se realiza por el conocido método bioclimático, a partir de la obtención de la reserva de humedad del suelo mediante controles de muestreos gravimétricos, establecidos para el pronóstico del riego en las empresas agrícolas. La metodología establece el momento de riego de los cultivos, sobre la base de humedad del suelo a partir de las propiedades hidrofísicas del mismo, las fases vegetativas del cultivo, los coeficientes biológicos del cultivo, las lluvias y la evaporación. La mayoría de los métodos que se aplican en la práctica ordinaria de la programación de riego, implican la recogida de todas las entradas y salidas del agua en la parcela cultivada, para conocer en todo momento la que queda a disposición del cultivo y no

descienda por debajo de un umbral de humedad prefijado, en función del objetivo perseguido con la programación.

En el estudio hay que distinguir dos fases necesariamente; el régimen de riego de proyecto y el de explotación. El primero representa un pronóstico estadístico con cierto grado de certeza, obtenido sobre la base de los factores que lo condicionaron en un periodo pasado, el cual debe ser suficientemente largo para tener adecuada representación de la variabilidad climática.

El régimen de riego de explotación es una regulación de la humedad del suelo de acuerdo con el desarrollo concreto de los elementos que la determinan. Esto conlleva a que se considere variable el régimen de riego cuando se analiza con respecto al tiempo, por lo que se debe observar éste en su dinámica, como un proceso casual, consecuencia de varios procesos también casuales; por tanto, su conocimiento es posible solo cuando se dispone de un número suficiente de datos empíricos de años anteriores. Pacheco *et al.*, (2012).

CAPITULO II: MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación del área de estudio

La zona de estudio se encuentra en la UBPC “Cuba Libre” de la Empresa Agropecuaria Horquita del municipio Abreu, la Provincia Cienfuegos en el periodo comprendido de enero a junio 2024. Posee como coordenadas geográficas 22.16796 °N y 80.72754 °W

El cultivo seleccionado es el maíz con la variedad H-Ame 15, para la campaña de primavera. El marco de siembra fue de 0.90*0.25 m. El área está beneficiada por la máquina de pivote central No 2, del modelo Western, con 5 torres y abarca un área de 30,7 ha

Para el estudio se tomó el II cuadrante de la máquina para las evaluaciones de las variables de suelo, clima y cultivo

2.1. Determinar la evapotranspiración de referencia (ET_o) empleando el programa CROPWAT 8.0.

La evapotranspiración de referencia (ET_o) se determinará empleando el modelo CROPWAT 8.0 (FAO, 2015), Este programa se fundamenta en el empleo de la fórmula de Penman-Monteith que se basa en la relación que existe entre la radiación solar y la evapotranspiración.

Ecuación de Penman-Monteith.

$$ET_o = \left[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma^*} \cdot (R_n - G) \frac{10}{L} + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma^*} \cdot \frac{90}{T + 275} \cdot U_2 \cdot (e_s - e_a) \right]$$

Donde:

- ET_o: evapotranspiración del cultivo de referencia (mm.día⁻¹)
- γ*: constante psicométrica modificada utilizada en el método de Penman-Monteith (kPa .°C⁻¹)
- e_s – e_a: déficit de presión de vapor (kPa)

- e_s : presión de vapor a saturación a la temperatura promedio del aire (kPa)
- e_a : presión de vapor tomada a la temperatura a punto de rocío (kPa)
- L : calor latente de vaporización (cal.gr^{-1})
- γ : constante psicométrica ($\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)
- Δ : pendiente de la curva de presión de la saturación de vapor a una temperatura específica ($\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)
- R_n : energía de radiación neta ($\text{Mj.m}^2 \cdot \text{día}^{-1}$)
- T : temperatura promedio del aire ($^\circ\text{C}$)
- G : flujo termal del suelo ($\text{Mj.m}^2 \cdot \text{día}^{-1}$)

La información climática se tomó de la Estación meteorológica portátil instalada en la finca y del monitor portátil disponible para las mediciones en el propio campo y se procesaron con el programa CROPWAT 8.0 para la estimación de la evapotranspiración de referencia (ET_o) (figura 3)

The screenshot displays the CROPWAT 8.0 software interface. The main window is titled "Monthly ETo Penman-Monteith - untitled" and contains a table for monthly climate data. A "Soil" dialog box is open, showing the following parameters:

- Soil name: []
- General soil data:
 - Total available soil moisture (FC - WP): [] mm/meter
 - Maximum rain infiltration rate: [] mm/day
 - Maximum rooting depth: [] centimeters
 - Initial soil moisture depletion (% TAM): [] %
 - Initial available soil moisture: [] mm/meter

Below the dialog box, there is a graph showing "Kc Values" and "Rooting depth (m)" over time. The graph is divided into stages: initial, development, mid-season, late season, and total. The "Kc Values" are represented by a blue line, and the "Rooting depth (m)" is represented by a red line. The bottom of the window has a tabbed interface with the following tabs: "ETo file", "Rain file", "Crop file", "Soil file", "Planting date", "Crop pat file", and "Schedule file".

Figura.3 Plantilla del programa Cropwat 8.0 con sus módulos de introducción de datos para las estimaciones de la evapotranspiración de referencia, precipitación efectiva, requerimientos hídricos y programación de riego

2.2. Determinar la evapotranspiración del cultivo (ETc) a partir del balance de humedad en las condiciones edafoclimáticas de la finca La Prosperidad.

La evapotranspiración del cultivo se determinó a partir del comportamiento de la dinámica de la humedad del suelo, la que fue obtenida a partir de las muestras de suelo tomadas tres veces por semana y aplicando el método gravimétrico y la ecuación del balance de humedad.

$$Wf = wi + Mh + Mn - Etc$$

Evapotranspiración real del cultivo

$$Etc = Wf - wi + Mh + Mn$$

A su vez se utilizó un monitor portátil (figura 4) para realizar observaciones de campo que se registraron en el modelo creado a tales efectos (tabla 1).



Figura 4: Monitor portátil para observaciones de suelo y clima

Tabla 1: Registro de variables de suelo y clima empleando el monitor portátil

		Hora											
Parámetros	UM	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Temperatura del suelo	°C												

Humedad del suelo	°C												
Temp Aire	°C												
Dew temp	°C												
H. aire	%												
CO ₂	ppm												
Iluminación	Lux												

Fuente: Elaboración propia

Las variables que se controlaron son

- Mediciones de la humedad del suelo,
- Temperatura del suelo,
- CO₂,
- Humedad relativa,
- Temperatura del aire,
- Iluminación.

2.3 La programación del momento de riego

La programación se realizó a partir del empleo dos métodos: el gravimétrico y el de los tensiómetros

A partir del comportamiento de la dinámica de la humedad del suelo que se obtuvo del muestreo de suelo, el cual se realizó tres veces por semana (lunes, miércoles y viernes), el cálculo del balance de humedad del suelo o balance de masas, se determinó el momento en que la humedad del suelo descendió hasta el límite productivo, lo que indica que es el momento de regar

$$Wf = wi + Mh + Mn - Etc$$

Donde:

Wi: reserva de humedad al inicio del periodo

Mh: Ingreso de humedad por lluvias

Mn: Lámina o dosis de riego aplicada

Etc: Evapotranspiración del cultivo

Wf: reserva de humedad al final del periodo

El empleo de los Tensiómetros fue el otro método empleado para programar el momento de riego. Considerando que el tipo de suelo presente es arcilloso el momento de riego es cuando la tensión de humedad se encuentra entre 50 y 60 kPa

Para el manejo del riego con tensiómetros, se colocaron tres a diferentes profundidades. Un sensor se ubicó en la zona de mayor cantidad de raíces (0.20 m) para determinar “cuándo regar”, otro a 0.40 m de profundidad para el control de drenaje y determinar “cuánto regar” y otro a 0.60 m.

Las lecturas se realizaron en el mañana previo al riego y en la tarde. Luego del riego, pasadas unas dos horas, se hicieron las lecturas para corroborar que la lámina aplicada satisface las necesidades de la planta, valores entre 10 y 20 kPa indican que el suelo estaba a capacidad de campo

¿CUÁNDO REGAR?

La lectura del tensiómetro ubicado donde se concentran las raíces (20 cm) indica el momento de riego. Cuando la lectura del manómetro está marcando entre 50 y 60 kPa es recomendable regar (figura 5)

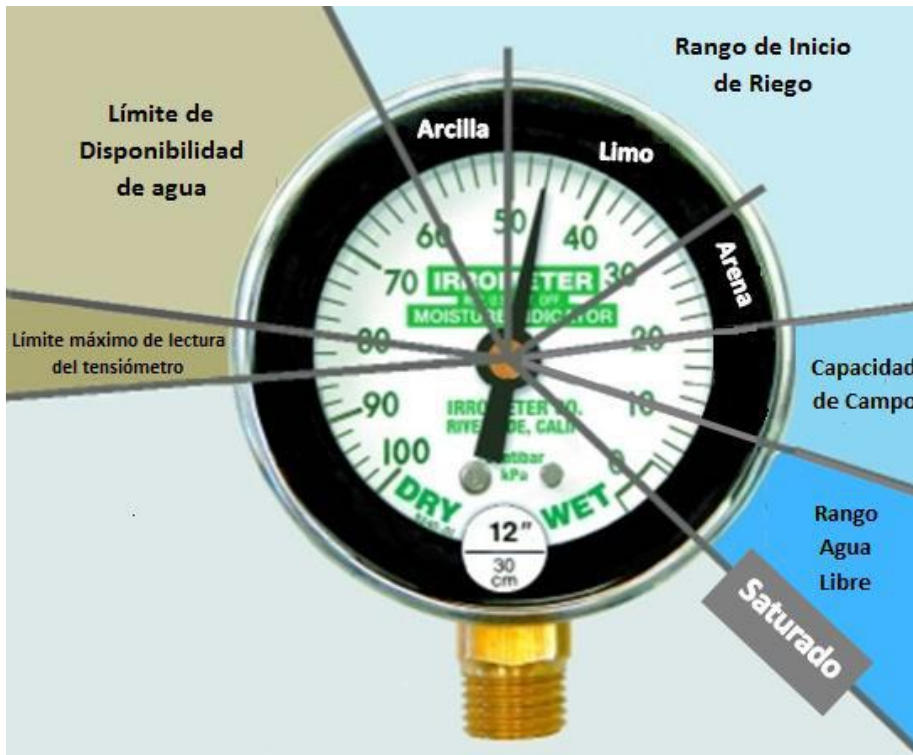


Figura 5: Límites de humedad a partir del potencial mátrico del suelo

Fuente: Reyes *et al.*, (2019)

La dosis de riego a aplicada se determinó por la diferencia entre la reserva máxima y la humedad presente en el momento de iniciar el riego

$$mn = w_{\text{máxima}} - w_{\text{presente}} \quad (\text{mm})$$

Donde:

w. máxima: reserva de humedad máxima del suelo o capacidad de campo

W. Presente: reserva de humedad del suelo en el momento del riego

mn: lámina de riego o norma de riego

Capítulo III: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. La evapotranspiración de referencia (ET_o) empleando el programa CROPWAT 8.0.

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 las realidades concretas de las localidades donde hoy se cultiva.

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.

Las variables que influyen en la evapotranspiración de referencia (ET_o) empleando el método de Penman Monteith mostraron a nivel de finca un comportamiento típico del clima de la zona para la época del año en que se realiza. Los valores locales obtenidos con una estación automática instalada en la propia finca dan una mayor confiabilidad, a la vez que permiten tomar decisiones más acertadas.

Como muestra la tabla 2, los valores de las diferentes variables tuvieron un incremento a lo largo del periodo o ciclo del cultivo como expresión de las características del clima de Cuba, lo que se refleja en un incremento también de los niveles de radiación o energía por unidad de superficie diaria.

Tabla 2: Variables meteorológicas en el periodo y área de estudio

	Temperatura Mínima	Temperatura Máxima	Humedad relativa	Velocidad del viento	Insolación	Rad
	°C	°C	%	m/s	horas	MJ/m ² /día
enero	19.2	28.4	84	1.7	7.1	14.9
febrero	17.3	28.8	88	1.8	8	17.9
marzo	19	30.2	77	3	8.4	20.5
abril	21.5	31.3	67	5.1	8.4	22.1

Fuente: Programa CROPWAT 8.0

El comportamiento de las variables meteorológicas es similar al encontrado por Ponce *et al.* (2022) en un estudio realizado en la CPA Mártires de Barbado con datos provenientes de la estación meteorológica de Cienfuegos.

3.1.1. Evapotranspiración de referencia por decenas

La evapotranspiración de referencia mostró, como tendencia, una variación creciente a lo largo del ciclo del cultivo como también los tuvieron las variables que en ella influyen y como consecuencia de ir transitando de los meses más fríos hacia meses más cálidos y que incrementan el poder evaporante de la atmósfera, como puede observarse en la figura 6

En la primera decena la ETo promedio diaria fue de 2,75 mm y en la última decena de abril, previo a la cosecha, ya alcanzaba 6,71 mm.día⁻¹

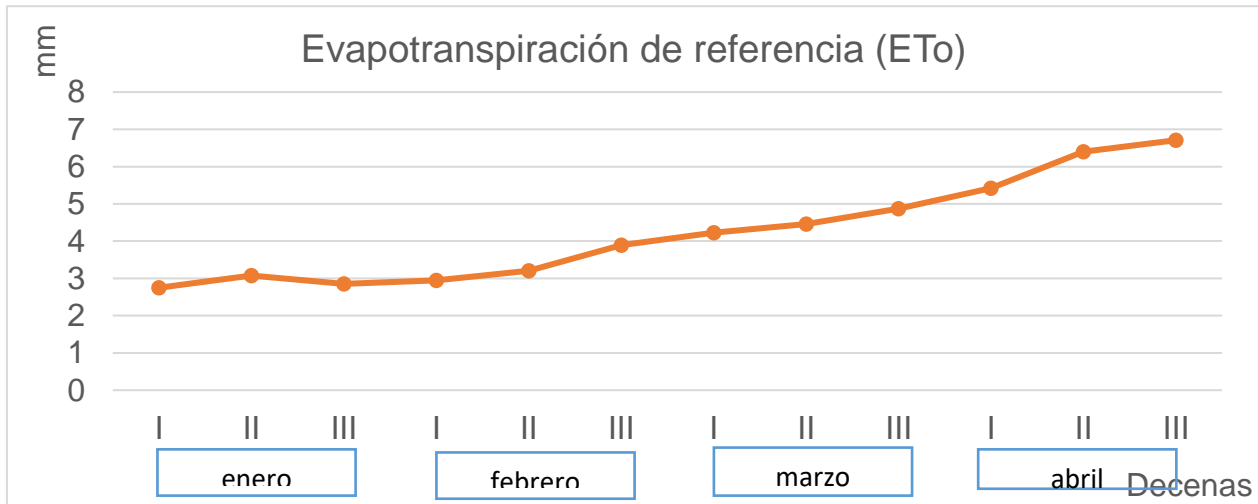


Figura 6: Evapotranspiración de referencia decenal

Fuente: Elaboración propia

Estos resultados coinciden con los obtenidos por Machado (2016) en un trabajo de caracterización la ETo histórica en la región central de Cuba y donde plantea que Los meses comprendidos entre noviembre y enero muestran 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.

Los resultados corroboran los obtenidos por De la casa *et al.*, (2022) quienes realizaron un análisis de la diferencia entre la tasa diaria de evapotranspiración de referencia (ETo), por el método de Penman-Monteith (PM) el cual calcula con el conjunto completo de variables meteorológicas, y la obtenida utilizando solo registros térmicos y una velocidad

superficial (u_2) constante de 2 m s^{-1} (PMxn), empleando información meteorológica de cuatro estaciones entre 1968 y 2018

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.

3.2. La evapotranspiración del cultivo (ETc) a partir del balance de humedad en las condiciones edafoclimáticas de la finca “La Prosperidad”

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 mesura y ahorrar este recurso sin que se eleve el costo de sus producciones.

Faramiñán, A.M.G., *et al.*, (2021), plantean que conociendo adecuadamente en espacio y tiempo la evapotranspiración es posible gestionar y planificar el manejo hídrico que se le da a una zona, cuenca, cultivo

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 reales ocurridas en el periodo que se analice.

Un productor necesita conocer el consumo de agua de sus cultivos si quiere proyectar su estrategia con una mayor seguridad en cuanto a clima se refiere

3.2.1. Lluvias aprovechables

La distribución temporal y espacial de la lluvia hace difícil su cuantificación teniendo en cuenta además la insuficiente red de pluviómetros con que se cuenta, los que en ocasiones representan zonas separadas y decenas de kilómetros como es el caso de la finca donde se realizó el estudio, que se encuentra a 10 km del pluviómetro más cercano, ubicado en Horquita

Con fines de estudio se instaló uno en la propia finca, el cual captó los volúmenes de agua que se muestran en la figura 7. En los cuatro meses del ciclo del se registró precipitaciones en 10 ocasiones con marzo con el mayor número de eventos (4) y mayor volumen, seguido de enero

Registrar las precipitaciones ocurridas y llevarlas al balance de humedad favoreció su aprovechamiento y la gestión eficiente del riego, lo cual tuvo un impacto económico expresado en el cultivo

En el periodo ocurrieron 10 eventos de lluvias, nueve de ellos con valores superiores a cinco milímetros, por lo que son volúmenes que aportan humedad al suelo coincidiendo con Hernández (2016), quien plantea que, si la cantidad de lluvia es muy pequeña (hasta 5 mm), puede ocurrir que no sea aprovechada porque toda o parte de ella queda en la superficie de la vegetación y de allí se evapora

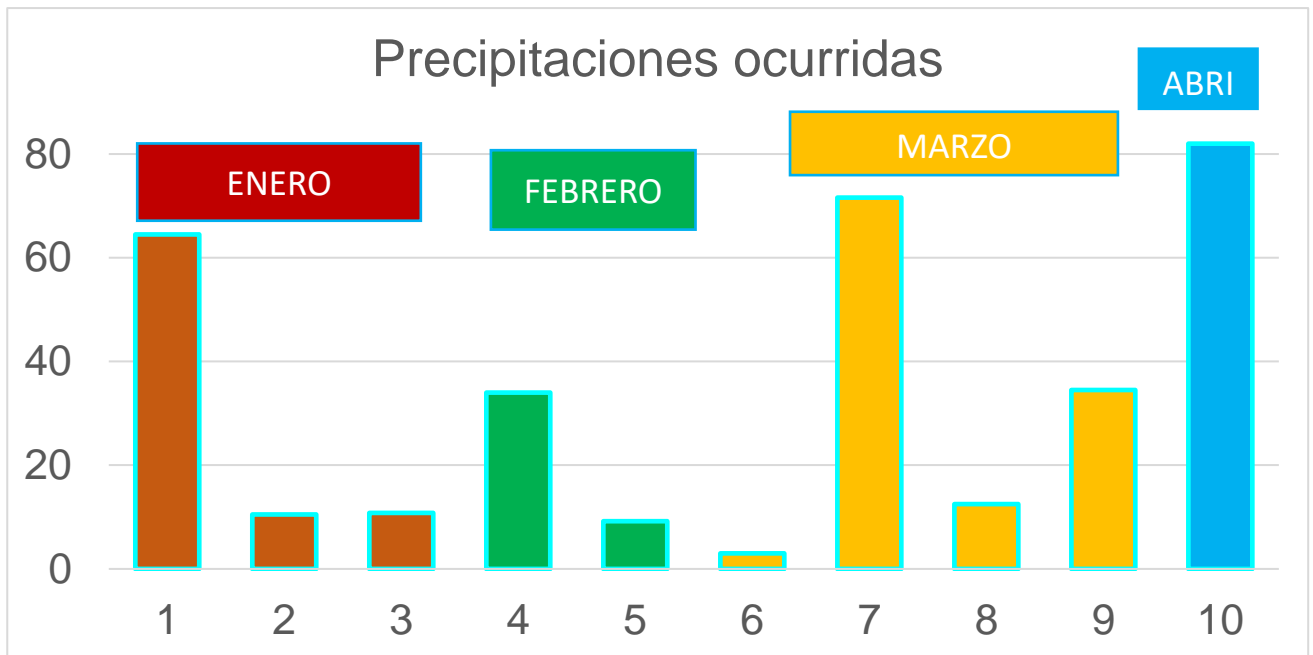


Figura 7: Eventos de precipitación y volumen de cada una en el periodo de estudio

Fuente: Pluviómetro instalado en la propia finca

Otras variables que inciden en la evapotranspiración del cultivo también fueron registradas a fin de tener una mejor interpretación y explicación de los valores que de la misma se registran en las condiciones edafoclimáticas donde se desarrolla el cultivo y pueda ser utilizado en otras zonas, en otros cultivos.

La temperatura del suelo tiene una influencia directa en la pérdida de agua que se encuentra en el suelo y como muestra en la tabla 3, esta variable presentó valores entre 20,4 °C en enero y 25,18 °C en abril. Aunque muestran una tendencia creciente esta no fue más marcada debido a que en la medida que el cultivo alcanzaba mayor desarrollo foliar producía un autosombreo y evitaba con ello la incidencia de los rayos del sol y por tanto se producía un menor calentamiento del suelo

Otras variables que tuvieron un comportamiento similar fueron la temperatura del aire, temperatura del punto de rocío

En tanto el nivel de iluminación registrada en el interior del campo tuvo un comportamiento decreciente desde el principio hasta el final del ciclo del cultivo, como resultado precisamente del desarrollo foliar, pero con valores que favorecieron el desarrollo de la planta y en particular su fotosíntesis

Valores similares fueron reportado por Campos (2018) en un trabajo de caracterización morfoagronómica de 23 entradas de maíz (*Zea mays* L.) con resultados sobresalientes en la respuesta productiva de la mayor parte de los cultivares

Tabla 3: Comportamiento de las diferentes variables del suelo y clima en el área de estudio

Variables	enero	febrero	marzo	abril
Temperatura del suelo	20.4	22.1602335	23.9583333	25.1875561
Temperatura del aire	23.2181818	24.4204384	26.6251667	27.221405
Punto de rocío	17.5363636	19.7119891	24.4058333	23.6966804
Humedad del aire	52.4454545	68.412521	87.1445	81.8373003
CO ₂	646.818182	959.8387	709.652662	640.683747
Iluminación	9383.81818	31578.8161	6545.75	3503.95193

Fuente. Estación meteorológica instalada en la zona de estudio

3.2.2. Humedad presente en el suelo:

Para responder a las dos preguntas, que permanentemente se hacen quienes tienen que ver con la aplicación del riego, es decir ¿Cuándo regar? y ¿Cuánto regar?, es imprescindible tener un control estricto de los niveles de humedad del suelo o dinámica de la humedad del suelo.

Esta dinámica es el resultado de la incidencia de las variables anteriores, que influyen en la evapotranspiración, de la lluvia y el riego y explican su carácter dinámico

El manejo correcto de esta dinámica es lo que permite que la humedad del suelo se mantenga dentro de los límites óptimo, es decir, entre la capacidad de campo y el límite productivo o umbral de riego, y que cultiva no sufra estrés hídrico ni excesos

En el caso de estudio estos límites fueron determinados en condiciones de campo y arrojó que el límite superior de la humedad óptima es de 28 % pss, en tanto el límite inferior se estableció en el 75 % de la CC, es decir el 21 % pss, este límite marca el momento del riego

El manejo con acierto del riego permitió, como muestra la figura 8, mantener la humedad del suelo dentro de estos límites y regar cuando el cultivo ya estaba demandando agua y con la dosis o lámina que permitía llevar la humedad hasta la capacidad de campo

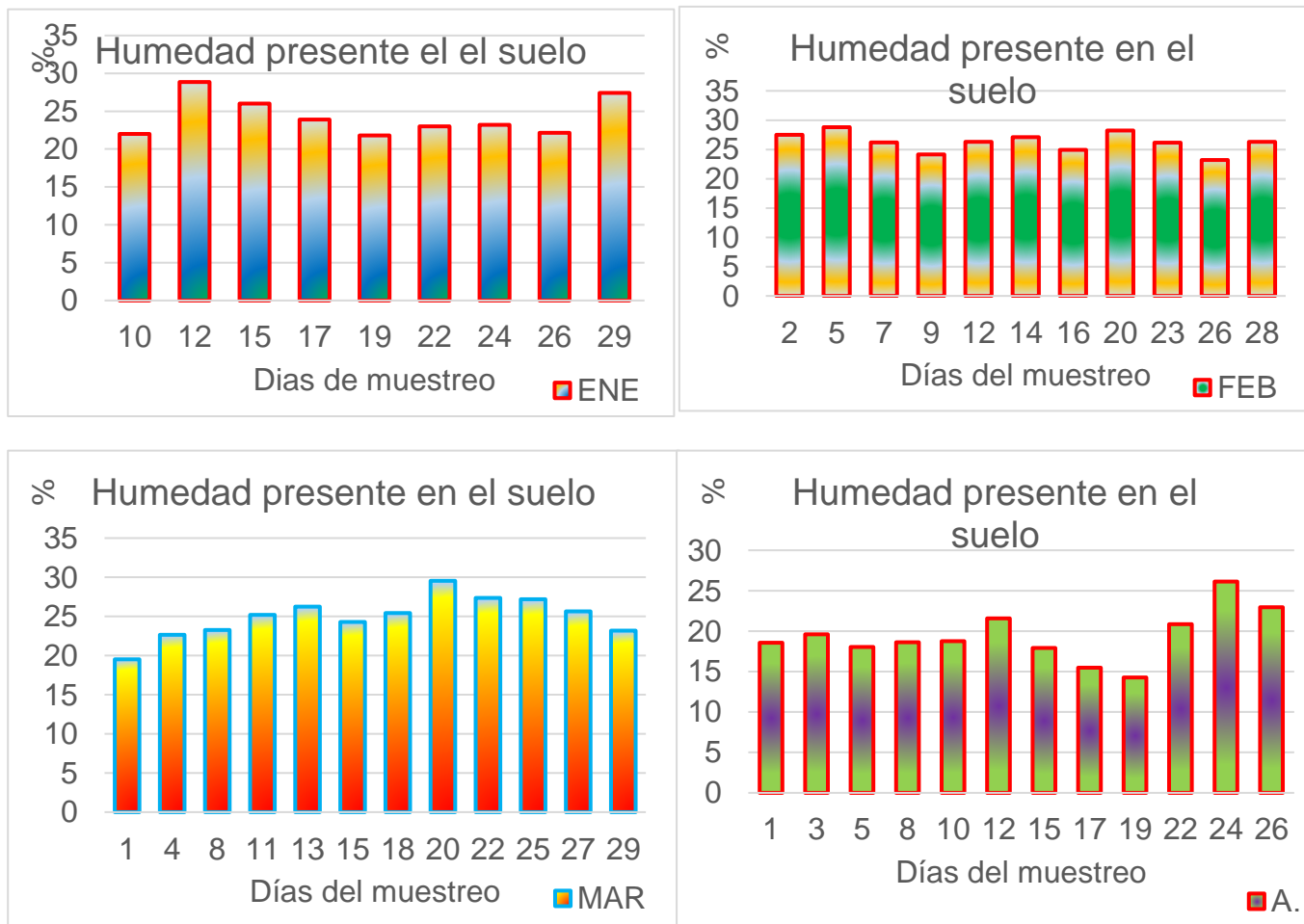


Figura 8: Humedad presente en el suelo en cada muestreo

Fuente: Elaboración propia

Con la información del suelo, el cultivo, el clima y empleando una propuesta de coeficiente de cultivo se determinó, la evapotranspiración del cultivo, la lluvia que pudo ser aprovechada por la planta y determinar así los requerimientos de riego para el cultivo, cuyos valores están reflejados en la tabla 4.

En las condiciones donde se desarrolló el cultivo las necesidades hídricas del cultivo en todo su ciclo fueron de 439,5 mm de las cuales el 46.4 % fueron cubiertas por la lluvia caía y dejando al riego el 53,6 %

Los requerimientos de agua del cultivo del maíz mostrados en este estudio difieren a los obtenidos por Ponce *et al.*, (2022) en la CPA Mártires de Barbados del municipio Cienfuegos para la campaña de primavera, donde se reportaron 515.2 mm

Conocer la evapotranspiración del cultivo, que representan las necesidades hídricas del mismo es imprescindible para hacer una correcta planificación del riego y tener de esta actividad la respuesta productiva esperada

Cuantificar la evapotranspiración (ETc) como la variable fundamental de déficit en la ecuación de balance hídrico es un proceso complejo que vincula los ciclos globales de agua, carbono y energía (Brust *et al.*, 2020; 2021).

El balance lluvia evapotranspiración mostró la necesidad de aplicar el riego como complemento de la satisfacción de las necesidades hídricas, coincidiendo con los resultados obtenido por Castillo *et al.*, (2020) al evaluar los impactos del cambio climático en el rendimiento del maíz sembrado en suelo Ferralítico Rojo compactado en la finca Pulido de Alquizar, provincia Artemisa

Tabla 4: Evapotranspiración y requerimientos de riego del cultivo

Mes	Decena	Etapa	KC	Etc mm.día ⁻¹	Etc mm.dec ⁻¹	Precip efectiva mm.dec ⁻¹	Req. Riego mm.dec ⁻¹
Ene	1	Inicio	0.81	2.72	5.4	0	5.4
Ene	2	Inicio	0.81	2.5	25	25	0
Ene	3	Inicio	0.81	2.32	25.5	19.1	6.4

Feb	1	Desarrollo	0.82	2.43	24.3	24.3	0
Feb	2	Desarrollo	0.85	2.73	27.3	8.8	18.5
Feb	3	Desarrollo	0.87	3.4	27.2	0	27.2
Mar	1	Desarrollo	0.9	3.8	38	0	38
Mar	2	Med	0.91	4.06	40.6	40.6	0
Mar	3	Med	0.91	4.43	48.7	36.5	12.4
Abr	1	Med	0.91	4.97	49.7	0	49.7
Abr	2	Fin	0.88	5.62	56.2	0	56.2
Abr	3	Fin	0.75	5.01	50.1	49.8	0.3
May	1	Fin	0.62	2.68	21.4	0	21.4
					439.5	204.1	235.6

Fuente: Programa CROPWAT 8.0

3.3. Programación del riego en función de la humedad presente en el suelo

Como se expresó anteriormente al ponderar el valor práctico de la evapotranspiración del cultivo, para llevar a cabo la programación del riego y determinar con exactitud el momento de riego y la dosis, lámina o norma de riego es imprescindible tener un control lo más exacto posible del consumo diario de agua de la planta, del volumen de las precipitaciones y del estado de la humedad del suelo en cada momento. Esto permitió establecer que parte de la lluvia caída se aprovecha, en que día aproximadamente pudiera estar la humedad del suelo tocando el límite productivo o umbral de riego y que volumen de agua es necesario aplicar para restituir el agua consumida y poner la humedad del suelo en el límite superior de la humedad óptima con lo cual se pondría nuevamente al cultivo en condiciones de un desarrollo óptimo.

Con toda la información disponible del suelo, el cultivo, el clima y el sistema de riego se pudo establecer el momento y la dosis de riego de manera certera que responda a las necesidades de la planta, coincidiendo con Bonet (2019), quien planteó que la programación del riego constituye una de las principales actividades que el técnico de riego debe atender. Para ello, deberá tener toda la información sobre las necesidades hídricas de los cultivos, las propiedades hidrofísicas de los suelos, condiciones climáticas del lugar y las particularidades de la tecnología de riego disponible.

El manejo combinado del método de los tensiómetros con el método gravimétrico permitió llevar un monitoreo constante de la humedad del suelo y determinar momento y dosis de riego aplicar, lo que favoreció que el cultivo se desarrollara sin carencias de agua como muestra la tabla 5 y con un alto aprovechamiento de la lluvia caída

Los tensiómetros son especialmente útiles para determinar la frecuencia de riego, estableciendo una pauta previa de actuación o, lo que es lo mismo, un valor de tensión matricial a partir del cual se decidirá aplicar un riego.

Según Baeza *et al.*, (2020) Los tensiómetros se pueden utilizar para ajustar la dotación de riego haciendo instalaciones por pares. Uno de los tensiómetros del par se instala en la zona radicular y el otro a más profundidad por debajo de la zona radicular.

La tensión de la humedad reflejada en la tabla indica cómo se encontraba el día del riego o el día en que ocurrió una lluvia.

El momento de riego a través del tensiómetro está en función del tipo de suelo, como se refleja en la figura 9, según criterio de Villablanca, Cajías y Allende (2015).

Para el caso del presente estudio, al estar en presencia de un suelo arcilloso las lecturas entre 10 y 20 cb indican que el suelo se encontraba a capacidad de campo y las lecturas

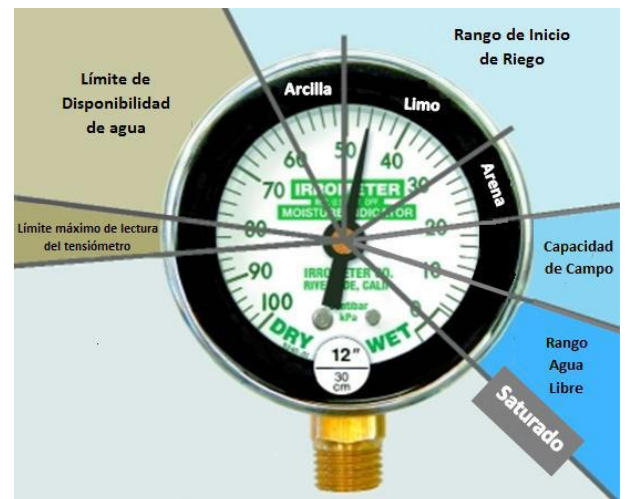


Figura 9: Límites de humedad por tipo de suelo según la tensión con que es retenida

de 60 cb indican el momento de riego. En el manejo llevado a cabo en esta investigación solo dos veces se excedió ligeramente de 60 cb la tensión y ello fue por que se había iniciado el riego por un cuadrante anterior al de la instalación de los tensiómetros o campo de control

La lámina de riego aplicada se corresponde con la necesidad del suelo y el cultivo en el momento que se aplicó, razón por la cual esta no tiene un valor fijo o único

Tabla 5: Variables que determinan el momento y dosis de riego

	Enero					febrero					marzo					abril											
Días	10	11	21	22	27	28	1	4	9	14	19	20	26	1	3	6	10	16	19	22	23	29	4	9	15	22	23
Humedad (%)	22		21	28	21		23		24	22		23	22	24	23	22	22	23		27	28	23	23	22	23	21	25
Tensión (cb)	55		61		63		58		40	55		52	59	40			57	52		13	10	49	44	59	54		32
Lluvia (mm)		65		11		11		39			9								72	13	35						82
L. riego (mm)	14		17		17		21		21	21		17	17	11	4	11	14	14				14	14	14	14	11	

Fuente: Elaboración propia

Durante el ciclo del cultivo y como fruto de un intenso trabajo de recolección de información y su procesamiento se aplicaron 18 riegos con una lámina promedio de 14,8 mm para una norma total de 268 mm (tabla 6).

El manejo oportuno del riego permitió las condiciones idóneas de humedad para el cultivo y evitó que sufriera las consecuencias del estrés hídrico que tiene efectos funestos en el desarrollo de la planta y en su rendimiento como los demostraron Sáez-Cigarruista *et al.* (2024) en un estudio sobre sensibilidad del cultivo de maíz (*Zea mays*) a diferentes períodos de déficit hídrico controlado

De igual modo se corrobora lo planteado por Sifuentes-Ibarra *et al.*, (2021) quienes plantean que un estrés hídrico afectará el rendimiento del maíz con base en su intensidad y etapa fenológica en la que se presente. La disponibilidad de humedad del suelo es el factor más importante que afecta el rendimiento y calidad del maíz

Tabla 6: Elementos del régimen de riego aplicado

Elementos	Valor unitario
Total de riegos	18
Lámina total (mm)	268
Lámina promedio (mm)	14.8
Intervalo promedio (días)	6.9

Fuente: Elaboración propia

CONCLUSIONES

1 La Evapotranspiración de referencia para el periodo de estudio mostró un comportamiento creciente a lo largo del ciclo del cultivo como resultado del incremento de las variables climáticas que inciden en la misma. Enero mostró una Eto de 68,86 mm, en tanto el de abril fue de 185,33 mm

2. La evapotranspiración real del cultivo reflejó la influencia del desarrollo del cultivo sobre el consumo de agua

3. La programación de riego indicó la necesidad de aplicar una lámina total de 268 mm, en 18 riegos con un intervalo promedio de 6.9 días

RECOMENDACIONES

1. Continuar el trabajo para determinar la ETc en otras campañas de siembra para establecer la propuesta completa de manejo del riego

BIBLIOGRAFÍA

- 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.*
- 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., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop Evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO *Irrigation and drainage paper 56*. FAO, Rome, 300(9).
- Barjas, R. (2022). *Coeficiente de cultivo Zea mais L. (Maíz) utilizando Lisímetros de drenaje, durante abril-junio en la estación climática José Abelardo Quiñonez*". Tesis para la obtención del título universitario de Ingeniero en Conservación de Suelos y Agua. Universidad Agraria La Selva.
- Bozkurt Çolak, Y. (2019). Effects of Irrigation Frequency and Level on Yield and tomatal Resistance of Eggplant (*Solanum melongena* L.) Grown in Open Field Irrigated with Surface and Subsurface Drip Methods. *Applied Ecology and Environmental Research* 17(6), 15585-15604.
- Cuba. Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente, (CITMA), (2020). "Tercera Comunicación Nacional a la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático". <https://unfccc.int/documents/266604>.Cuba
- Cuba. Oficina Nacional de Estadísticas, (2009). *Anuario Estadístico de Cuba*.
- 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.*
- Doorenbos J; Pruitt W O (1977). *Crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 24*. Food and Agricultural Organisation of the United Nations, Rome.

- Dueñas R. (2006). *Agua, Sostenibilidad y Uso Eficiente del Agua*. Editorial Samuel Feijoó.
- Dueñas, R.; Assenov, D.; Alonso, N. (1987). *El Riego*. Pueblo y Educación.
- FAO. (2002). *Proyecto TCP/CUB/0167. Estudio básico para la formulación de un Programa de Drenaje y Lucha contra la Salinidad en Cuba*.
- Heermann, D.F., Hein, P. R. (1968). *Performance characteristics of self-propelled Center pivot sprinkler irrigation Systems. Trans of the ASAE*
- Hernández Y. (2016). *Caracterización de la precipitación efectiva y la evapotranspiración de referencia en la provincia Villa Clara, Cuba*. Tesis de Diploma. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
- Jensen, M. E. and R. G. Allen. 2016. Evaporation, evapotranspiration, and irrigation water requirements. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice. *American Society of Civil Engineers, (70)*
- Machado Y. (2018): *Caracterización de la evapotranspiración de referencia estimada y predicha para su inserción en la programación de riego*. Tesis en opción al Grado Académico de Master. Universidad Central Marta Abreu de Las Villas
- 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. (Ponencia) *Memorias VII Edición de la Conferencia Científica Internacional sobre Desarrollo Agropecuario y Sostenibilidad AgroCentro*, La Habana. Cuba.
- 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.
- 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, 21(2)*. 53-61 p.

- Mohammed, A.; Li, J.; Elaru, J.; Elbashier, M.M.A.; Keesstra, S.; Artemi, C.; Martin, K.; Reuben, M.; Teffera, Z. (2018). "Assessing drought vulnerability and adaptation among farmers in Gadaref region, Eastern Sudan.
- Montero E., Romagnoli, M., Otegui, M., Chan, R., & Portapila, M. (2023). OSTRICH-CROPGRO multi-objective optimization methodology for calibration of the growing dynamics of a second-generation transgenic soybean tolerant to high temperatures and dry growing conditions. *Agricultural Systems*, 205.
- Pacheco, J.; Carlesso, R.; Gómez, J. (2012a). *Conservación y ahorro de agua en la agricultura*. Académica Española.
- 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*, (4), p. 67-68.
- Pereira, L., Paredes, P., Hunsaker, D., López-Urrea, R., & Shad, Z. M. (2021). Standard single and basal crop coefficients for field crops. Updates and advances to the FAO56 crop water requirements method. *Agricultural Water Management*, 243(106466), 1-33. <https://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106466>
- Sánchez M.I. & Carvacho, L. 2011. Comparación de ecuaciones empíricas para el cálculo de la evapotranspiración de referencia en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, Chile. *Revista de Geografía Norte Grande*, 50. 171-186.
- 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*.
- Schosinsky, G. (2007). Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos. *Geológica de América Central*, 13(35).
- Semana Nacional de Ganado Porcino, (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.
- Tarjuelo, J. M. (2005). El riego por aspersión y su tecnología. Ediciones Mundi- Prensa.

Zamora E., Duarte C.E., Cun R., Pérez R. León M. (2014). Coeficientes de cultivos (Kc) en Cuba. *Revista Ingeniería Agrícola*,4(3), pp. 16-22,

Zamora, Elisa y Chaterlán, Yoima. (2001). Estudios sobre evapotranspiracion de referencia en Cuba. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 10(3), pp. 87-89.