

Bases tecnológicas para el riego en palma de aceite*

Irrigation of oil palm's technological basis

ROBERT J. LASCANO¹

RESUMEN

La palma de aceite es una fuente importante de aceite y de lípidos, sin embargo está expuesta a sequías frecuentes en Malasia, Indonesia y América del Sur. Este hecho ha promovido la práctica la irrigación utilizando especialmente métodos empíricos que no están basados en el uso real del agua que necesita la palma de aceite. Además la información sobre los horarios de irrigación de las palmas de aceite es escaso y además incompleto. Los horarios de irrigación tienen que ver con la cantidad y con la frecuencia con la que se aplica el agua para que la producción sea óptima. En ese momento, la cantidad de agua de irrigación que se aplica se puede evaluar utilizando instrumentos que miden el nivel de agua del suelo y de la planta. Estos instrumentos incluyen sensores para el contenido de agua en el suelo y su potencial (tensión), el potencial de agua de las hojas, la resistencia estomacal y una medida directa del agua de la planta utilizando el método TDP-Granier. Un acercamiento micrometeorológico también se puede utilizar para calcular el uso del agua de la palma de aceite tomando las medidas del clima y utilizando el método Penman-Monteith. En realidad la demanda de transpiración se debe calcular de manera separada y directa, en vez de con la ecuación Penman-Monteith, en la cual se desconocen varios parámetros. De todos los nuevos sensores que existen el método TDP-Granier es tal vez el más simple y el método más práctico para medir de manera directa la utilización de agua. Por otra parte, la frecuencia de la irrigación es más difícil de establecer porque requiere información sobre el presupuesto suelo-agua, patrones de lluvia y el sistema de irrigación utilizado. Con frecuencia se puede determinar tomando en cuenta ensayos de investigación de campo que evalúan los efectos de la frecuencia y la cantidad de irrigación sobre la producción de Racimos de Fruta Fresca y Aceite. Finalmente, un consejo, la tecnología por sí sola no aumenta la productividad de la palma de aceite. Esta requiere de optimización en otros factores agrícolas y en recursos humanos para establecer una operación eficiente y económica.

SUMMARY

Oil palm is an important source of oil and lipids and is subject to frequent drought events in Malaysia, Indonesia and South America. This has prompted the practice of irrigation using mainly empirical methods that are not based on the actual water use by the oil palm. Furthermore, information on irrigation scheduling of oil palms is scarce and incomplete. Irrigation scheduling deals with the *amount* and *frequency* of water application for optimal oil production. Currently, the *amount* of irrigation water to apply can be evaluated using instruments that measure the water status of the soil and the plant. These instruments include sensors to measure soil water content and potential [tension], leaf water potential, stomatal resistance and a direct measure of plant water use using the TDP-Granier method. A micrometeorological approach can also be used to calculate daily oil palm water use from weather measurements using the Penman-Monteith method. In reality, transpirational demand must be ascertained separately and directly, rather than with a Penman-Monteith equation, in which several parameters are not well known. Of the new sensors available the TDP-Granier method is perhaps the simplest and most practical method to directly measure water use. Conversely, *Frequency* of irrigation is more difficult to establish because it requires information about the soil-water budget, rainfall pattern and irrigation system used. Frequency is best determined from research field trials that evaluate the effects of irrigation frequency and amount on FFB and oil production. Finally, a word of caution, technology alone does not increase oil palm productivity. This requires the optimization of other agronomic inputs and the human resources to establish an efficient and economic operation.

Palabras claves: Palma de aceite, Riego, Sistemas de riego.

* Ponencia presentada en la XII Conferencia Internacional sobre **Palma de Aceite. "Retos y oportunidades para la Palma de Aceite"**. 3 al 5 de septiembre de 1997. Cartagena de Indias, Colombia.

Traducido por Fedepalma. Esta ponencia se encuentra disponible en inglés en el Centro de Información de Fedepalma.

1 Profesor Asociado de Geofísica. Universidad de Texas A y M Estación de Experimentos Agrícolas de Texas. Route 3, Box 2 19, Lubbock, TX 79401. U.S.A. Correo Electrónico: r-lascano@tamu.edu.

INTRODUCCIÓN

La palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq.) es un importante cultivo de plantaciones en toda la zona tropical húmeda y es una especie importante como fuente de aceite y lípidos. En las zonas tropicales húmedas, en ocasiones la lluvia es inadecuada para proveer las demandas de agua de la palma de aceite. y los déficits de agua del suelo que comúnmente se observan en África Occidental, Suramérica e Indonesia se reconocen como uno de los factores limitantes para la productividad de la palma de aceite (Corley y Hong 1981; Chuah y Lim 1989; Smith 1989; Dufréne et al. 1992; Comaire et al. 1993; Lubis et al. 1993; Lim et al. 1994, 1996). Debido a la sequía, especialmente durante los meses de enero a abril, en algunas regiones del mundo se utiliza el riego para proporcionarle agua a la palma de aceite. Las prácticas de riego en las plantaciones de palma de aceite son relativamente nuevas y no se han difundido extensivamente. Además, en áreas donde se practica el riego, los administradores del agua tienen que considerar, no sólo la provisión de lluvia, sino también la administración de otros insumos agronómicos, tales como la fertilidad, para que sea efectivo en costos y económico.

Los efectos del estrés hídrico y la sequía en el rendimiento de la palma de aceite son bien conocidos. El estrés hídrico afecta las relaciones planta-agua y la fisiología de la palma de aceite y los resultados han sido resumidos por Corley y Hong (1981), Kee y Chew (1991) y Comaire et al. (1993). Sus hallazgos se resumen como sigue. El estrés hídrico causa el cierre de la estoma a mediodía (Smith 1989; Corley 1973; Daniel 1979; Dufréne et al. 1992); aumenta la temperatura de la hoja (Hong y Corley 1976), reduce la fotosíntesis (Smith 1989) y la transpiración, induce el aborto de la inflorescencia y retrasa la apertura de la hoja (Broekmans, 1957; Hardon et al. 1969), reduce la proporción del sexo y aumenta el número de inflorescencia masculina (Corley 1976), reduce el contenido de aceite del mesocarpio (Ochs y Daniel 1976), el intervalo desde anthesis hasta madurez es más corto en tiempo seco; sin embargo, se ha encontrado que el tiempo seco también retrasa la abscisión del fruto; durante la estación seca, es posible que se

impida que algunos racimos maduren completamente y se observa una relación más alta entre aceite y racimo (Corley y Hong 1981).

Información sobre los efectos del riego en el rendimiento de la palma de aceite a través de regiones en las cuales crece la palma es escasa y no existe un consenso claro sobre cómo manejar el agua de riego para aumentar los racimos de fruta fresca (RFF) y el contenido de aceite en el mesocarpio. Dentro de este contexto, no se puede estudiar el manejo del agua de riego por sí sólo, sino que se debe considerar el equilibrio general del agua sobre el rendimiento de la palma de aceite, como lo hicieron Dufréne et al. (1992), Comaire et al. (1993) y Lim et al. (1994). Sin embargo, la información sobre los requerimientos de agua diarios de la palma de aceite y sobre las prácticas de riego para maximizar el rendimiento económico de la palma de aceite es escasa y, en muchos casos, no está fácilmente disponible.

El propósito de este artículo es revisar los conceptos generales relacionados con el riego en la palma de aceite y su relación con el rendimiento. Se presentan y se discuten los efectos del estrés hídrico sobre el rendimiento de la palma de aceite, la programación y los sistemas de riego y la nueva tecnología que está disponible para valorar y medir el estado del agua tanto del suelo como de la planta. Se da un énfasis especial a las regiones geográficas de Colombia donde se practica el riego en palma de aceite y

continuará ampliándose en el futuro. Este artículo se enfoca principalmente en las prácticas agronómicas asociadas con el riego en palma de aceite y no tanto en los aspectos de ingeniería, tales como el diseño y la instalación de los sistemas de riego que están disponibles. Información sobre esto último está ampliamente disponible en libros tales como Riego en Cultivos Agrícolas (Stewart y Nielsen 1990) y libros de texto de ingeniería tales como Evapotranspiración y Requerimientos de Agua de Riego (Jensen et al. 1990).

En primer lugar, este artículo presenta una visión general de los sistemas de riego disponibles y que se utilizan en palma de aceite. En segundo lugar, se da una discusión general sobre la relación entre el riego y la productividad. Tercero, se introduce y se discute el


*Los déficits de
 agua del
 suelo, son
 factores
 limitantes
 para la
 productividad
 de la palma de
 aceite.*


concepto de programación del riego, haciendo énfasis a la forma cómo se miden los parámetros del suelo, la planta y el tiempo que pueden utilizarse para valorar el nivel y el grado del estrés hídrico. También se describen métodos que se utilizan para programar el riego. Igualmente se presenta la nueva tecnología disponible para medir el estrés hídrico y los métodos utilizados para medir y calcular el requerimiento diario de agua en palma de aceite.

SISTEMAS DE RIEGO

Los sistemas de riego que se utilizan en todo el mundo se pueden dividir en cinco categorías (Kruse et al. 1990): 1) de superficie (por gravedad), 2) de rociador, 3) de micro (goteo/chorro delgado), 4) sub-riego y 5) sistemas híbridos. En los sistemas de riego de *superficie*, el agua fluye a través de la superficie del suelo por gravedad y se infiltra en el suelo mientras el frente de agua avanza o se encharca en la superficie del suelo. Los sistemas de riego por *rociador* proporcionan agua mediante líneas presurizadas y emiten agua desde los grifos rociadores montados en soportes fijos o móviles. El *micro-riego* distribuye el agua en tubos plásticos y el agua es arrojada mediante sistemas de baja presión e incluyen métodos conocidos como el riego por goteo o por chorro delgado. El *sub-riego* proporciona agua a los cultivos controlando el nivel de la tabla de agua, de forma que por la vía del movimiento capilar, el agua pueda elevar y mover hacia la zona de raíces. Los sistemas *híbridos* son aquellos métodos de riego que combinan dos o más de los cuatro sistemas discutidos antes.

Para el riego en la palma de aceite se utilizan varios sistemas. Por ejemplo, en Colombia actualmente están en uso los sistemas de superficie, micro-rociador y sistemas de goteo tanto enterrados como de superficie. Por lo general, para regar viveros se utilizan sistemas de rociador por encima del suelo (Lim y Ho 1991). Debido a las características del cultivo, los únicos sistemas de riego que se pueden adaptar a el rendimiento de la palma de aceite son los de superficie, micro-rociador, sub-riego y goteo por debajo y encima del suelo (chorro delgado). Cada uno de estos sistemas tiene ventajas y desventajas y su uso en Colombia ha sido presentado y discutido por López (1991).

La selección de un sistema de riego para una plantación de palma de aceite dada es un factor de muchas variables. Estas incluyen, pero no están limitadas a la fuente y provisión del agua, el costo de la inversión, el mantenimiento y la administración, la capacidad retención del agua del suelo, la distribución de las lluvias y el área a regar. En muchos casos el sistema de riego que se escoge determinará la programación del riego. Por ejemplo, con un riego de superficie es muy difícil aplicar menos de 50 a 75 mm de agua por cada evento de riego; mientras que con un sistema de micro-rociador o rocío por goteo es posible aplicar menos de 5 mm de agua por cada riego.

RELACIÓN ENTRE EL RIEGO Y LA PRODUCTIVIDAD DE LA PALMA DE ACEITE

El principal resultado del estrés hídrico en palma de aceite es la reducción del rendimiento de racimos de fruta fresca por unidad de área; sin embargo, la magnitud de esta disminución en el rendimiento y los efectos del riego sobre el rendimiento de la palma de aceite no son bien conocidos ni cuantificados. Además, no está claro si en realidad el riego siempre aumenta el rendimiento o cómo afecta la calidad del aceite que se cosecha. La respuesta de las palmas de aceite al riego puede ser considerable (Corley y Hong 1981). Por ejemplo, existen experimentos de campo en Costa de Marfil (África Occidental) en los cuales el riego aumentó inicialmente el rendimiento cuatro veces y más que el doble del rendimiento durante un largo período. Ochs y Daniel (1976) también han reportado aumentos en el rendimiento y han enumerado los beneficios del riego como un aumento

en la tasa de producción de hojas, una reducción en la tasa de abortos y una proporción de sexos más alta. El riego tuvo como resultado un aumento considerable en el número de racimos, pero tuvo poca influencia sobre el peso promedio de los racimos. En Malasia, Corley (1973) especuló que eliminar todo el estrés hídrico podría resultar en un aumento del rendimiento del 10%. No se conocen artículos publicados en revistas sobre estudios de riego en Suramérica, especialmente en Colombia, que hayan intentado cuantificar el efecto del manejo del riego (frecuencia y cantidad) sobre la producción de RFF y aceite.

*En Colombia
se usan los
sistemas de
riego de
superficie,
micro-
rociador y
goteo.*

En general, existe una relación lineal entre la transpiración acumulada de un cultivo y su rendimiento de materia seca acumulada (Kramer y Boyer 1995). Esta relación no es simple y la pendiente de la línea (Fig. 1) difiere entre la especie de planta, los climas y los sistemas de manejo que afectan el rendimiento de las plantas. Sin embargo, esta complejidad no altera el principio que dice que la transpiración de un cultivo bien regado, tal como el de la palma de aceite, debe ser igualada continuamente a lo largo de su ciclo de crecimiento para asegurar una producción óptima (Van Bavel et al. 1996). Según Foong (1991) el total teórico de producción de materia seca de palma de aceite se ha calculado en 44 t/ha/año, produciendo un rendimiento de aceite de 17 t/ha/año. Por ejemplo, en Malasia los rendimientos de RFF fluctúan entre 35 y 42 t/ha/año (Foong 1991). Estos valores son extraordinariamente altos y otros datos sobre rendimientos de RFF de Malasia entre 1980 y 1990, muestran rendimientos de RFF mucho más bajos, que fluctúan entre 9,5 y 24,0 t/ha (Lubis et al. 1993). No obstante, para lograr estos rendimientos potenciales, o sea, > 30 t/ha/año, la palma de aceite tiene que mantenerse bajo condiciones óptimas de agua y nutrientes. Precisamente este rendimiento se puede lograr mediante el manejo apropiado del agua en una plantación de palma de aceite, incluido el riego. Por lo tanto, el objetivo primario del riego es optimizar el rendimiento económico y aplicar correctamente la

cantidad de agua que iguale el uso diario de agua (transpiración) del cultivo.

En Colombia se pueden identificar cuatro regiones geográficas que producen palma de aceite (López 1991). Estas cuatro regiones son la Zona Norte, la Zona Centro, la Zona Oriental y la Zona Tumaco (Fig. 2), y cada región está caracterizada por un patrón mensual de lluvia. A excepción de Tumaco, las otras tres regiones están sujetas a una baja precipitación mensual durante los meses de noviembre a abril. La poca cantidad de lluvia que cae durante estos meses está directamente correlacionada con el descenso en el rendimiento de RFF, y por consiguiente con la necesidad de suministrar agua suplemental mediante el riego. Estas cuatro regiones son sumamente diferentes y cada una está caracterizada por suelos específicos para el lugar, un juego de prácticas culturales singulares y un patrón diferente de lluvias y de sistemas de riego. Adicionalmente, otras diferencias debidas a recursos humanos e infraestructura instalada en el lugar, crean innumerables condiciones que son específicas para el lugar y determinan el manejo de agua óptimo para cada región.

PROGRAMACIÓN DEL RIEGO

El manejo del agua de riego en muchos casos es más un arte que una ciencia. La programación de los riegos es la aplicación de agua (frecuencia y cantidad) para una producción óptima del cultivo (Heerman et al. 1990). Existen varias tecnologías para calcular la fecha (frecuencia) y la cantidad de agua de riego a aplicar y éstas dependen de varios factores, tales como los que enumeran Heerman et al. (1990): 1) provisión del agua de riego; 2) capacidades técnicas del regador; 3) sistema de riego; 4) valor del cultivo; 5) la respuesta del cultivo al riego; 6) costo de la implementación de la tecnología y 7) preferencia personal.

La programación del riego de un cultivo trata sobre dos interrogantes fundamentales, ¿cuánta agua se debe aplicar (cantidad) y con qué frecuencia (momento oportuno) se debe aplicar el agua? La respuesta a estas dos preguntas depende de varios factores, incluido el uso del agua por el cultivo, la disponibilidad de agua de riego, el sistema de riego utilizado y el equilibrio de agua del cultivo (Lascano et al. 1996). No obstante, el esquema del manejo del agua que se seleccione se debe encaminar a hacer un uso eficiente del agua de lluvia y se debe basar en métodos que

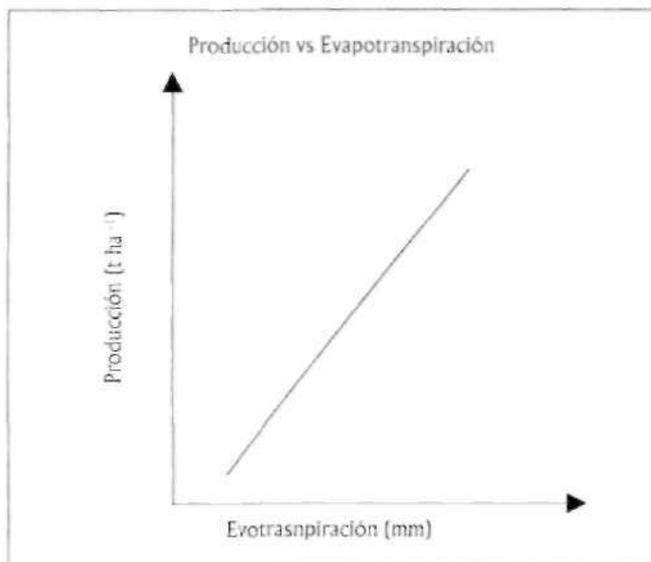


Figura 1. Relación entre el rendimiento acumulativo de materia seca y evapotranspiración acumulativa. La pendiente de la línea difiere entre especies de plantas, climas y sistemas de manejo.

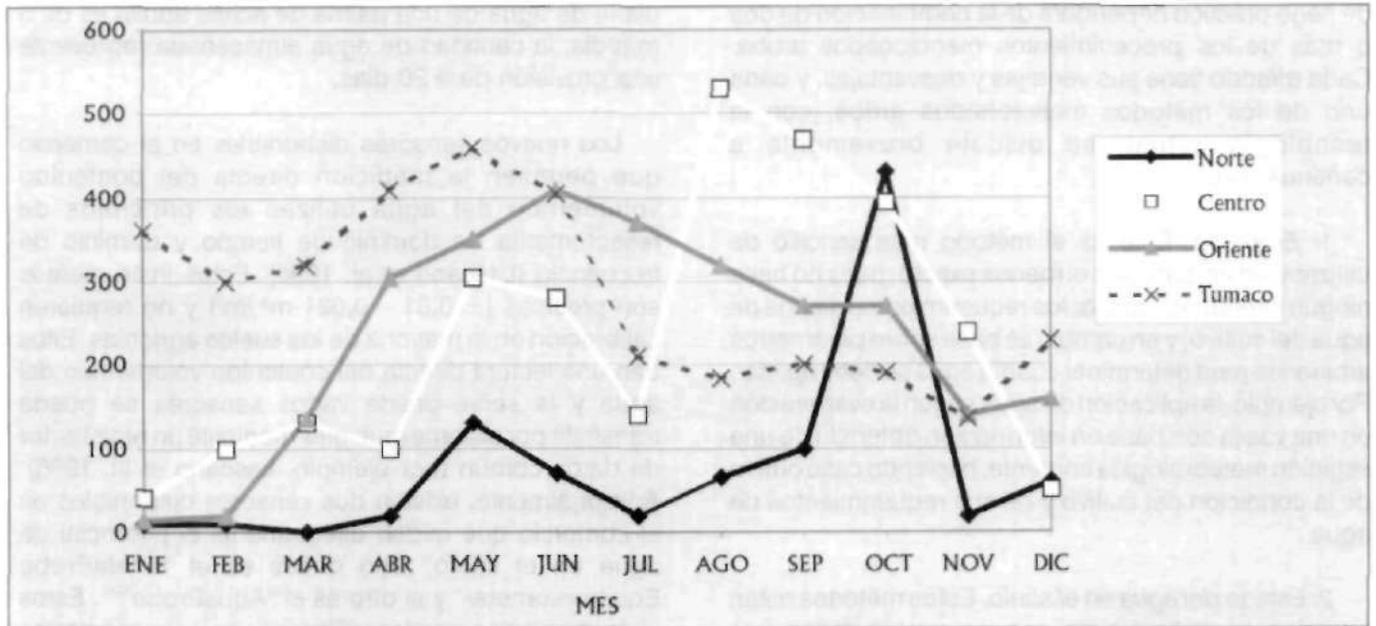


Figura 2. Lluvia mensual en cuatro regiones geográficas de Colombia donde crece la palma de aceite (Tomado de: López 1991).

cuantifiquen el estado del agua del cultivo. Un requerimiento final e importante es acortar el tiempo entre la medición y la decisión de cuándo y cuánta agua se debe aplicar. Con la llegada de los computadores y microprocesadores y con la introducción de nuevos sensores para medir el estado del agua en el suelo y la planta, este tiempo ahora es de horas y días, en vez de semanas o meses. Actualmente, en la agricultura se tiene a disposición una amplia variedad de sensores del suelo y de la planta sofisticados que son fáciles de manejar y que se pueden utilizar como herramientas para cuantificar los requerimientos de agua de un cultivo. Esta nueva tecnología también incluye el uso de la sensibilidad remota como herramienta en el manejo del agua.

Las diferentes técnicas para programar el riego incluyen principalmente métodos basados en información empírica, del suelo, la planta y el clima. Los requerimientos de datos del campo normalmente incluyen una estación meteorológica para registrar los parámetros diarios del clima y así poder calcular la evapotranspiración potencial o de referencias (Penman 1948). Adicionalmente, la medición del agua de lluvia y de riego que se aplica es necesaria para mantener los presupuestos de agua para la programación del riego. En el caso de una plantación de palma de aceite, la lluvia se debe medir por debajo del dosel del follaje en distintas localidades, de forma que se pueda calcular un valor promedio de la precipitación. Esto, según lo

demonstró Dufréne et al. (1992), quienes indicaron que el 14% de la lluvia anual era interceptada por el dosel del follaje. Además de medir los parámetros de lluvia y clima, es esencial medir el estado del agua en la planta y en el suelo. Las mediciones del estado del agua en la planta incluyen el potencial de agua en el follaje, la conductancia estomática y, últimamente, ya es posible medir directamente el flujo de la savia que está estrechamente relacionado con la transpiración (Granier 1985; Granier et al. 1995). La técnica propuesta por Granier es muy adaptable a árboles grandes, según lo demuestran Ringersma et al. (1996), quienes midieron la transpiración de palmas de datileras. La exactitud de medir correctamente la transpiración diaria se facilita inmensamente con la introducción de este método, especialmente según se aplica a la palma de aceite, donde la información sobre el uso diario del agua es escasa y difícil de medir.

Una gran variedad de métodos se han propuesto para programar el riego y estos métodos se pueden agrupar en cuatro tipos: 1) procedimientos empíricos basados en mediciones que no están relacionadas con el uso de agua por el cultivo; 2) basados en la medición del estado del agua en el suelo (contenido volumétrico de agua y su energía asociada); 3) basados en estimativos del uso del agua, calculados de datos del clima; y 4) basados en la medición del estado del agua en la planta, incluyendo la medición directa de la transpiración de las plantas. En realidad, un esquema

de riego práctico dependerá de la combinación de dos o más de los procedimientos mencionados arriba. Cada método tiene sus ventajas y desventajas, y cada uno de los métodos mencionados arriba, con la tecnología actual, se discute brevemente a continuación.

1. *Empírico*. Este es el método más sencillo de utilizar y sin embargo es el menos exacto, pues no hace ningún intento por igualar los requerimientos diarios de agua del cultivo, y en cambio se basa sobre parámetros arbitrarios para determinar cuánta agua se debe aplicar. Por ejemplo, la aplicación de agua según la evaporación en una vasija con base en información obtenida de una estación meteorológica corriente, haciendo caso omiso de la condición del cultivo y de sus requerimientos de agua.

2. *Estado del agua en el suelo*. Estos métodos están basados en el hecho de que los suelos tienen una capacidad de retención y que el almacenamiento de agua es una función de varias propiedades del suelo, determinada principalmente por su textura. Históricamente, la cantidad de agua que un suelo puede retener y que está disponible para ser tomada por las raíces, fue definida como la cantidad de agua mantenida entre la llamada *capacidad del campo* y el *punto de marchitez permanente*. Cada uno de estos puntos extremos está asociado con un potencial de agua dado, es decir, la energía requerida para que la planta extraiga el agua del suelo. El extremo mojado, la capacidad del campo, tiene un potencial de agua en el suelo (matric) y a veces referido como tensión, el cual varía según la textura entre -0,1 bar para una arena y -0,3 bar para una arcilla. En forma inversa, el extremo seco, el punto de marchitez permanente tiene un potencial de agua de -15,0 bar. La relación entre la humedad del suelo y la presión potencial (matric), por lo general se llama la curva de liberación de humedad del suelo (Fig. 3). Cada suelo tiene una curva única de liberación de humedad en el suelo y esta relación cambia con la profundidad del suelo. Por ejemplo, si un suelo tiene una capacidad de campo de $0,35 \text{ m}^3/\text{m}^3$ y un punto de marchitez permanente de $0,15 \text{ m}^3/\text{m}^3$, entonces la cantidad de agua disponible es de $0,20 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ($= 0,35 - 0,15$) y si se supone que la profundidad de la zona de raíces es de 0.5 m, entonces el suelo puede almacenar un máximo de 100 mm ($= 0,20 \text{ m}^3/\text{m}^3 \times 500 \text{ mm}$) de agua disponible para extracción por las raíces, lo cual es el caso de la palma de aceite, donde una gran porción de la zona de raíces está en los primeros 0.4 m (Tan 1979; Dufréne et al. 1992). Si el uso

diario de agua de una palma de aceite adulta es de 5 mm/día, la cantidad de agua almacenada representa una provisión para 20 días.

Los nuevos sensores disponibles en el comercio que permiten la medición directa del contenido volumétrico del agua utilizan los principios de reflectometría de dominio de tiempo y dominio de frecuencia (Lascano et al. 1996). Estos instrumentos son precisos ($\pm 0,01 - 0,021 \text{ m}^3/\text{m}^3$) y no requieren calibración en la mayoría de los suelos agrícolas. Ellos dan una lectura directa del contenido volumétrico del agua y la señal desde varios sensores se puede transmitir por sistema multiplex mediante un registrador de datos común (por ejemplo, Lascano et al. 1996). Adicionalmente, existen dos sensores disponibles en el comercio que miden directamente el potencial de agua en el suelo. Uno dellos es el "ThetaProbe Equitensiometer" y el otro es el "AquaProbe™". Estos instrumentos se pueden utilizar en vez de tensiómetros que normalmente son fastidiosos para manejar y conservar y tienen un alcance operacional reducido de potencial de presión de menos de -0,8 bar.

En adición a los instrumentos mencionados arriba para medir el contenido de agua, métodos antiguos y comprobados, tales como la atenuación por neutrón,

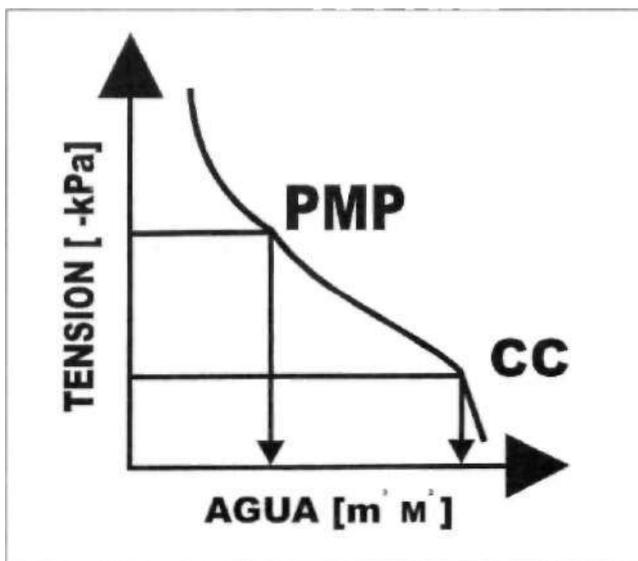


Figura 3. Relación generalizada entre el potencial del agua del suelo (tensión) y el contenido volumétrico del agua. CC es la capacidad del campo y PMP es punto de marchitez permanente. La diferencia entre estos dos puntos extremos representa el agua disponible para la planta. La forma de la curva será diferente para distintas texturas del suelo.

continúan ofreciendo mediciones exactas y confiables in situ del agua del suelo. Este método todavía se utiliza ampliamente y cuando se calibra apropiadamente da una determinación exacta del contenido de agua en el suelo. La principal ventaja que tiene este método por encima de otros sensores, es que integra un volumen relativamente grande de suelo y la facilidad de su uso. Su principal desventaja es que debido a su naturaleza radioactiva, requiere un manejo especial. Sin considerar el método que se utilice para medir el contenido de agua en el suelo, el método gravimétrico es decididamente el más sencillo de usar y el procedimiento más preciso que se puede utilizar en aplicaciones de campo. Este es el método utilizado para calibrar otros procedimientos, y el único equipo requerido es una báscula para pesar y un horno para secar las muestras de suelo. Adicionalmente, se necesita un estimativo de la densidad del suelo para convertir valores gravimétricos en valores volumétricos. Su principal desventaja es que es tedioso y exige mucho tiempo.

3. *Estimativos del uso de agua con base en el tiempo.* El uso total de agua de una plantación de palma de aceite está dado por la evaporación del agua del suelo (E_{suelo}), de la palma (E_{palma}) y del cultivo de cobertura ($E_{\text{cobertura}}$). La suma de estos tres valores ($E_{\text{suelo}} + E_{\text{palma}} + E_{\text{cobertura}}$) normalmente se denomina evapotranspiración (ET). En el caso de una plantación de palma de aceite adulta, donde el índice del área foliar excede 3,0, por lo general se supone que el mayor contribuyente a la ET es E_{palma} y que E_{suelo} y $E_{\text{cobertura}}$ son mínimos. Sin embargo, no se han reportado medidas directas de pérdidas de agua del suelo ni del cultivo de cobertura. Radersma y De Ridder (1996) calculan que en una plantación de palma de aceite adulta el E_{suelo} de suelo húmedo era menos del 5% de la ET total.

El concepto de la evapotranspiración potencial (ET_p) basado en la física de la evaporación de agua de diferentes superficies fue introducido en 1948 por H.L. Penman. En este trabajo clásico, Penman (1948) demostró que era posible calcular la ET_p utilizando un método de combinación que combina el equilibrio de la energía de una superficie con los flujos de intercambio aerodinámico sobre de la misma superficie. Este trabajo está basado en el concepto de que la evaporación de

agua se debe a los intercambios de calor radioactivos, latentes y sensibles entre la superficie y la atmósfera encima de dicha superficie y que con mediciones de la temperatura del aire y la humedad, la irradiación global de onda corta y la velocidad del viento, es posible calcular la ET_p . Este método fue modificado por Monteith (1965) y Van Bavel (1996) y extendido a superficies vegetativas. Históricamente, este método se conoce actualmente como el sistema Penman-Monteith para calcular la ET_p . En forma breve, la ET_p se calcula con las siguientes ecuaciones:

$$ET_p = \frac{\Delta R_n}{[\lambda(\Delta + \gamma)]} + \frac{(pcp \delta_e g_a)}{[\lambda(\Delta + \gamma)]} \quad [1]$$

en donde Δ es la pendiente de la presión de vapor de saturación, contra la curva de temperatura ($\text{Pa } ^\circ\text{K}^{-1}$); λ es el calor latente de la vaporización del agua (J kg^{-1}); γ es la constante sicométrica ($\text{Pa } ^\circ\text{K}^{-1}$); pcp es la capacidad de calor del aire a presión constante ($\text{J m}^{-3} \text{ } ^\circ\text{K}^{-1}$); δ_e es el déficit de presión de saturación del aire (Pa) medido en la cima del dosel del follaje de la palma de aceite; R_n es la irradiación neta en $\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ y g_a es la conductancia aerodinámica ($\delta \text{ m}^{-1}$) calculada con la ecuación dada por Monteith (1965):

$$g_a = \frac{k^2 U}{\ln^2 [(z-d)/z_0]}$$

en donde k es la constante de von Karman ($= 0.41$), U es la velocidad del viento en m s^{-1} medida por encima del dosel del follaje de la palma de aceite, z es la altura por encima de la superficie del suelo (m), d es la altura de desplazamiento del plano de cero (m) y z_0 es la altura de aspereza (m). Cuando no hay datos del perfil del viento disponibles, d y z_0 se pueden aproximar con ecuaciones dadas por Monteith y Unsworth (1990):

$$\begin{aligned} d &= 0,65/h \\ z_0 &= 0,10/h \end{aligned} \quad [3]$$

en donde h es la altura promedio de un árbol en m.

Este sistema micrometeorológico para calcular la ET_p diaria de la palma de aceite en Costa de Marfil, en África Occidental fue utilizado por Dufréne et al. (1992). Ellos midieron T_{aire} y p_{aire} 15 m por encima de la

superficie y 3 m por encima del dosel de follaje de la planta para explicar los intercambios de energía al nivel del dosel del follaje. En su estudio que duró tres años, calcularon que en promedio la ET_p anual era de 4 mm/día y que el 81% de esta cantidad era la ET diaria de la palma de aceite. Estos valores de ET_p son un poco bajos, pero se pueden explicar por los bajos valores de la irradiación de onda corta diaria que en promedio eran de 13.3 MJ/m²/día, sugiriendo condiciones de cielos nublados. Radersma y De Ridder (1996) calcularon valores similares de ET para palma de aceite.

En Colombia, donde se siembra la palma de aceite se calcula que en promedio la irradiación de onda corta diaria, en días despejados, puede lograr valores tan altos como 22 a 28 MJ/m²/día. Los valores de ET_p que aparecen en la Figura 4 no se calcularon para palma de aceite utilizando valores específicos de d y z_0 , según se definen en la ecuación [3]. Sin embargo, la magnitud y el alcance de estos valores de ET_p han sido confirmados por cálculos de ET_p hechos desde una estación meteorológica que mide la temperatura y la humedad del aire, la irradiación global y la velocidad del viento, situada en la plantación de palma de aceite El Carmen, cerca de Codazzi (Cesar), Colombia (Carlos Mario Peláez. Comunicación personal. 1997). Además se ha notado que la ET_p es más alta durante los meses de enero a abril cuando la humedad del aire

(temperatura de punto de rocío) es relativamente baja y prevalecen velocidades de fuertes vientos.

Para calcular la ET_p utilizando las ecuaciones [1 a 3] se requiere una estación meteorológica que mida la temperatura y la humedad del aire, la irradiación de onda corta y la velocidad del viento. Los sensores que se utilizan actualmente en estaciones meteorológicas y que son disponibles comúnmente en el comercio son fuertes y precisos y requieren un mínimo de mantenimiento, aparte de la calibración rutinaria. El cálculo de la ET_p se puede automatizar utilizando el mismo registrador de datos que se utiliza para medir y coleccionar parámetros del tiempo, o se puede calcular utilizando una página desplegable tal como Microsoft Excel o Lotus*. Sin embargo, el cálculo de la ET_p es sólo el primer paso que se requiere para obtener un estimativo del uso diario de agua de un cultivo. Un sistema común y práctico que se utiliza para calcular la ET diaria de un cultivo es el llamado sistema ingeniero.

Sistema Ingeniero. Existen varias formas que se pueden utilizar para calcular los requerimientos diarios de un cultivo. En la sección anterior se describió lo que se conoce tradicionalmente como el sistema micrometeorológico; sin embargo, en muchos casos este método no es práctico porque requiere mediciones que no son fáciles de obtener. Por esta razón, los ingenieros de riego han desarrollado un concepto que

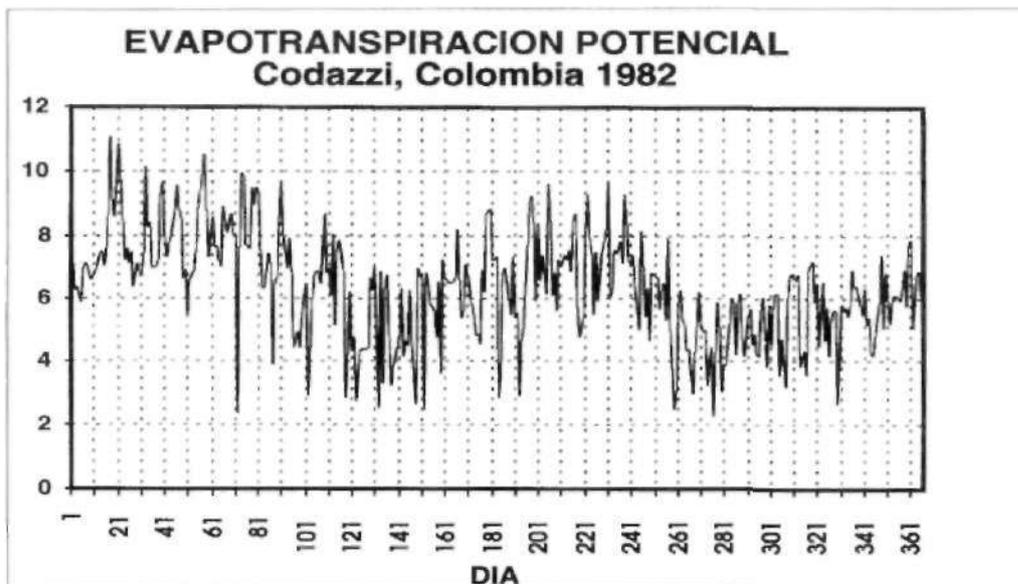


Figura 4. La evapotranspiración potencial diaria (ET_p) para Codazzi (Cesar), Colombia en 1982. Los valores de ET_p se calcularon con la ecuación Penman-Monteith similar a los que se dieron en las ecuaciones 1 y 2. Los valores de entrada de irradiación global diaria se calcularon de un modelo teórico y los otros parámetros de entradas para calcular la ET_p se obtuvieron de la estación meteorológica de Codazzi.

está basado en la evapotranspiración potencial y el llamado coeficiente del cultivo. Este sistema define y calcula principalmente los requerimientos diarios de un cultivo mediante:

$$ET_d = ET_p \times k_c \quad [4]$$

en donde ET_d es el requerimiento diario de agua en mm, ET_p es la ET potencial en mm y k_c es el coeficiente del cultivo. El k_c es una función del desarrollo del cultivo y cuando el dosel del follaje del cultivo cubre toda la superficie del suelo, se supone que $k_c = 1$. Estos valores normalmente se miden con una estación meteorológica estándar con sensores situados a 2,0 m por encima del suelo. Está claro que los valores de ET_d obtenidos con la ecuación [4] sólo son una aproximación; sin embargo, este sistema se utiliza extensivamente para calcular los requerimientos diarios de agua de un cultivo. El cálculo más cercano de un valor k_c para una palma de aceite adulta en suelos arenosos en Costa de Marfil, fue dado por Dufréne et al. (1992). Ellos reportaron que cuando el suelo estaba húmedo, la relación de $ET_d/ET_p = k_c$ era de 0,81, y durante la estación seca, la relación k_c era de 0,56. Sin embargo, la dificultad en este sistema yace en que los valores de k_c de una región geográfica a otra no se pueden extrapolar ya que se pueden introducir errores serios en el cálculo de ET_d . Además, el valor de k_c no es constante a lo largo de todo el ciclo de crecimiento de la planta. El k_c en muchos casos, es específico tanto del cultivo (variedad) como del lugar.

En Colombia, por lo general se supone que la evapotranspiración diaria es de 5 mm/día para la palma de aceite y de 7 mm/día para una palma de aceite con cultivo de cobertura (Eugenio Cuza. Comunicación personal. 1997). Estos valores están basados en observaciones empíricas que se pueden utilizar como guía y aproximación para el riego de la palma de aceite. Estos valores calculados están de acuerdo cuando se comparan con los valores calculados de la ET_p que aparecen en la Figura 4 que cuando se multiplican por un factor de 0.81 dan valores de ET_d que fluctúan entre 2.5 a 8 mm/día y un promedio de 5 mm/día. Sin embargo, cuando el agua de riego es escasa y su aplicación es cara, se necesita un cálculo de día en día de la ET_d para aplicar la cantidad correcta de agua.

4. *Estado del agua de la planta.* Estos métodos están basados en mediciones del estado del agua en plantas utilizando métodos tanto directos como indirectos. Los métodos indirectos incluyen mediciones del potencial del agua del follaje, utilizando una cámara de presión de tipo Schollander o sicómetros cortadores de hojas. Estos dos instrumentos dan una medición del potencial del agua del follaje y los valores bajos indican estrés hídrico en la planta, por ejemplo, un potencial de agua del follaje de - 20,0 bar tiene más estrés que un valor de - 50,0 bar. Otro método indirecto es la medición de la resistencia estomática de hojas utilizando un porómetro. Este método ha sido utilizado para valorar el estrés hídrico de las plantas en palmas de aceite por Corley y Hong (1981), Smith (1989), Dufréne et al. (1992) y otros. Un ejemplo de la variación por hora de la resistencia estomática (s/cm) entre una palma de aceite regada y otra no regada, aparece en la Figura 5 (tomada de Corley y Hong 1981). La resistencia estomática está relacionada inversamente con el orificio estomático, lo cual significa que un valor más alto de resistencia estomática indica que los estomas están parcialmente cerrados. Dufréne et al. (1992) pudieron relacionar

la resistencia estomática con el contenido del agua del suelo en el suelo. Por ejemplo, ellos encontraron que el cierre estomático temprano ocurría cuando la fracción de agua extractable en la superficie de 0,8 m disminuía por debajo de 0,67 y esto correspondió a un valor de resistencia estomática de 7 cm/s. Está claro que una medición del potencial del agua del follaje y de resistencia estomática está relacionada con el estado del agua de la planta. Ninguna de estas mediciones da un cálculo de los requerimientos de agua de la planta. Sin embargo, actualmente es posible medir directamente la cantidad de agua que una planta está utilizando.

La medición directa del agua que está fluyendo a través del tallo de una planta, o sea la transpiración, actualmente se puede medir utilizando manómetros de tallo (Lascano et al. 1996) y utilizando sondas térmicas de disipación, TDP, introducidas por Granier (1985) y Granier et al. (1995). La TDP está mejor adaptada para medir la transpiración de árboles grandes y ha sido utilizada para medir el uso de agua de palmas datileras (Ringersma et al. 1996), una especie muy similar a la palma de aceite.

*En Colombia
se supone que
la evotrans-
piración
diaria es de
5mm/día para
palma de
aceite.*

El método Granier (Granier 1985) consiste en insertar dos agujas hipodérmicas recubiertas con Teflón, separadas 40 mm, en la albura del tronco (capa blanda debajo de la corteza) de un árbol. Una aguja se calienta y el método consiste en medir la diferencia de temperatura de la albura entre las dos agujas insertadas. Un diagrama esquemático del método aparece en la Figura 5. La conductancia térmica aparente de la albura aumenta con la velocidad de la savia. A medida que la velocidad del flujo de la savia aumenta, las diferencias medidas de la temperatura disminuyen. El método primeramente consiste en determinar K, un parámetro sin dimensión definido como:

$$K = \frac{(\Delta T_m - \Delta T)}{\Delta T} \quad [5]$$

en donde ΔT es la diferencia en temperatura de la albura calentada y la no calentada y $\Delta T_m = \Delta T$ cuando no hay flujo de savia. La ecuación [5] muestra que cuando $\Delta T = 0$, $K = \infty$ y si $\Delta T_m = \Delta T$, $K = 0$. Los valores de K se relacionan empíricamente con la velocidad del flujo de la savia (U) por medio de la siguiente ecuación:

$$U = 0,000119 \times K^{1231} \quad [6]$$

en donde U tiene dimensiones de m/s. Para convertir U en tasa de flujo de savia (m^3/s) se necesita un factor de conversión en m^2 . Las señales eléctricas de los termocuplas y el calentador se vigilan y controlan

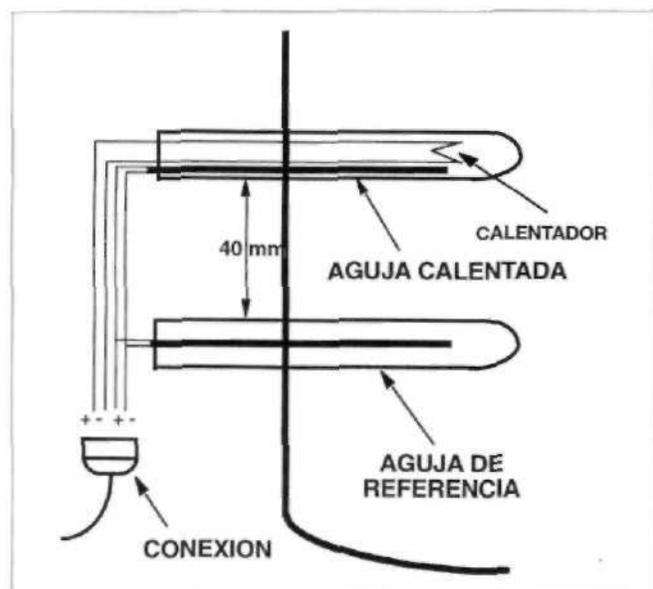


Figura 5. Diagrama esquemático del método Granier.

fácilmente con un registrador de datos que también se pueden programar para dar un valor integrado de U a lo largo del día.

De los nuevos instrumentos disponibles en el comercio para valorar el estrés hídrico de la planta, el método Granier de sondas térmicas de disipación (TDP) es quizás el más fácil y más práctico de usar, especialmente para palma de aceite. Este método no ha sido evaluado para calcular la transpiración diaria de las palmas de aceite y, debido a la naturaleza empírica, primero se deben tomar medidas exploratorias para confirmar la suficiencia del procedimiento. No obstante, este es el método más prometedor para medir directamente el uso diario de agua de una palma de aceite y elimina tener que vigilar el estado de agua del suelo o de la planta. Es el único método práctico que mide directamente el uso diario de agua que se puede utilizar para dar un cálculo de cuánta agua se debe regar. En el caso de palmas de aceite inmaduras, donde no existe el cierre del dosel del follaje, también será necesario obtener un estimativo del uso del agua por el cultivo de cobertura. Igualmente se pueden obtener mediciones directas de la transpiración mediante la lisimetría (Ling 1979); sin embargo, este método no es práctico para una palma de aceite adulta, ya que requiere un lisímetro del tipo de pesar para determinar la transpiración.

Frecuencia del Riego. Hasta este punto, esta discusión sólo ha tratado la determinación de la cantidad diaria de agua que una palma de aceite está usando y no ha tratado el tema de la frecuencia o el momento oportuno del riego. La frecuencia del riego depende de muchos factores, por ejemplo, el sistema de riego, la disponibilidad de agua, el patrón de lluvias y los recursos humanos. Existe una relación estrecha entre la frecuencia del riego y el rendimiento. Por ejemplo, en los High Plains de Texas, la investigación ha demostrado que para el algodón, una frecuencia de 3 días, con un sistema de riego de pivote, en la mayoría de los años produce los más altos rendimientos de "lint" (Bordovsky et al. 1992). Sin embargo, este resultado no se puede generalizar a otros cultivos ni a otras regiones geográficas. La frecuencia de riego estará determinada principalmente por el presupuesto suelo-agua, el cultivo y el sistema de riego que se utilice. El presupuesto suelo-agua proporciona el agua almacenada en la zona de raíces y está determinado por la evapotranspiración del cultivo, la lluvia efectiva y las pérdidas debidas a drenaje por debajo de la zona de raíces. La lluvia efectiva es un parámetro importante en

la palma de aceite porque, según lo muestran Dufréne et al. (1992), el dosel del follaje de la palma de aceite puede interceptar hasta un 14% de la precipitación anual.

El sistema de riego utilizado juega un papel importante en la determinación de la frecuencia del riego. Por ejemplo, un sistema de goteo enterrado se puede utilizar para reemplazar diariamente la cantidad de agua utilizada por la palma de aceite, con un mínimo de pérdidas de agua; mientras que es posible que un micro-rocador en la superficie que riegue todos los días aumente las pérdidas por evaporación debido a la interceptación de agua por el cultivo de cobertura. Estas pérdidas quedan mejor ilustradas con el siguiente ejemplo. Por ejemplo, si la evapotranspiración de una palma de aceite es de 7 mm/día y el operador necesita decidir la frecuencia de riego. Las dos elecciones son: aplicar 7 mm de agua cada día durante tres días, ó 21 mm cada tres días, y también se sabe que el cultivo de cobertura intercepta 2 mm de agua. Regar todos los días tendrá como resultado un riego eficaz de sólo 15mm (= 7 mm - 2 mm/día x 3 días). comparado con 19 mm (= 21 mm - 2 mm) cuando se riega cada tres días. Esta diferencia representa un 20% de ahorro del agua que se aplica. Además, regar cada día conduce al desarrollo de un sistema de raíces muy poco profundas que, en casos de una grave sequía, obstaculizará la capacidad del cultivo de resistir eventos de sequía prolongados. A más de esto, según lo muestran Dufréne et al. (1992), aunque la palma de aceite tiene una gran porción de raíces concentrada en los primeros 0,8 m de profundidad, ellos midieron la extracción de agua en las raíces en los terrenos arenosos profundos de Costa de Marfil a una profundidad de por lo menos 4,8 m.

El patrón de precipitación regional también juega un papel importante en determinar la frecuencia del riego. Al planificar un esquema de programación de riego, el patrón a largo plazo de la intensidad y la cantidad de lluvia se puede utilizar para determinar la frecuencia del riego. La idea básica aquí es guardar una "asignación" de espacio (volumen) en el suelo para almacenar el agua de lluvia. Por ejemplo, si en una región llueve cada 2 a 3 días, con intensidades de menos de 10 mm/día entonces es beneficioso regar

con una cantidad mínima de agua y así aprovechar la lluvia. Sin embargo, si una palma de aceite se riega con, por ejemplo, 100 mm de agua proveniente de cualquier evento de lluvia, es posible que dentro de los próximos dos días después del riego, el agua se pierda por escorrentía debido a la falta de capacidad de almacenamiento del suelo. Esta práctica depende de la experiencia del operador y en el método de tanteos. No se puede determinar *a priori* debido a la inseguridad asociada con el pronóstico de la lluvia.

Ultimamente, la práctica de la frecuencia de riego se determina mejor con las pruebas de investigación en el campo para evaluar su efecto en los rendimientos de RFF y el de aceite. Estos resultados tienden a ser específicos para un lugar y se debe tener cuidado de no extrapolar prácticas entre regiones. Finalmente, los recursos humanos y la infraestructura instalada en el lugar también juegan un papel importante, en determinar tanto la frecuencia como la calidad de agua para regar.

██████████

*La frecuencia
de riego
depende del
patrón de
lluvias, el
sistema de
riego y los
recursos
humanos.*

██████████

RESUMEN Y CONCLUSIONES

Aunque la palma de aceite crece en las zonas tropicales húmedas, estas regiones, a menudo, están sujetas a eventos de sequías periódicas que limitan y reducen el rendimiento de la palma de aceite en África Occidental, Suramérica e Indonesia. Para contrarrestar estos períodos secos, con frecuencia se utiliza el riego para reducir y aliviar la fatiga debida al estrés hídrico. Las prácticas actuales de riego en la palma de aceite son mayormente empíricas en naturaleza y sólo recientemente se han hecho intentos por cuantificar la programación de los riegos utilizando métodos que se practican en otros lugares para otros cultivos.

La programación del riego es la aplicación de agua (frecuencia y cantidad) para la óptima producción del aceite. En palma de aceite, la información sobre la respuesta en RFF, al riego es escasa. Sin embargo, con la tecnología actual, ahora es posible medir fácil y útilmente los parámetros del suelo, la planta y el clima, que están estrechamente vinculados con el estrés hídrico y que se pueden utilizar para valorar el uso diario de agua de las palmas de aceite. Esta tecnología

incluye sensores para medir el contenido de agua en el suelo y su energía asociada; el potencial de agua en el follaje y la conductancia estomática, así como una medición directa de la transpiración. Esta última es quizás la forma más práctica de medir la cantidad diaria de agua que una palma de aceite está usando. Esta tecnología, con el uso de microprocesadores, ha aumentado la capacidad de eliminar la adivinación y aplicar correctamente los requerimientos diarios de agua de la palma de aceite. La frecuencia del riego depende del patrón de lluvias, el sistema de riego utilizado y los recursos humanos. La frecuencia de riego se determina mejor mediante pruebas de investigación en el campo para evaluar los efectos de sus en la producción de RFF y de aceite.

En plantaciones comerciales de palma de aceite, donde los gastos de bombeo e infraestructura para regar representan una alta inversión económica, el uso correcto y la aplicación de esta tecnología, sin duda reducirán los costos del riego y aumentarán el rendimiento de RFF. La tecnología del riego continuará proporcionando herramientas para cuantificar el uso de agua por los cultivos y suministrará información instantánea para asistir al operador en su proceso de toma de decisiones. Sin embargo, la tecnología sola no aumenta la productividad y es fácil sucumbir al uso de

esta tecnología mientras se ignora la investigación agronómica que evalúa la práctica del riego. Para lograr esta meta se requiere un apoyo agronómico fuerte que cuantifique los efectos de la frecuencia y la cantidad de agua de riego sobre la producción de RFF y de aceite, junto con los recursos humanos para perfeccionar todos los aspectos del rendimiento. En la agricultura, con la introducción de la nano-tecnología, los sensores continuarán disminuyendo en tamaño y en costo, y proporcionarán información para manejar la entrada de agua, fertilizantes y plaguicidas.

AGRADECIMIENTOS

Deseo dar las gracias al Sr. Carlos R. Murgas por introducirme en el maravilloso mundo de la palma de aceite y por compartir su sabiduría y visión de la vida. Mis agradecimientos también van para el Sr. Carlos M. Peláez por proporcionar datos meteorológicos y valores potenciales de evapotranspiración; para el Dr. Fernando Munévar por proveerme con referencias relacionadas con el riego de la palma de aceite y el uso del agua y para el Dr. Pedro León Gómez Cuervo y otros ejecutivos de Cenipalma por patrocinar mi viaje a esta conferencia. Su amistad, hospitalidad y buena voluntad son reconocidas y apreciadas.

BIBLIOGRAFIA

- BORDOVSKY, J.P.; LYLE, W.M.; LASCANO, R.J.; UPCHURCH, D.R. 1992. Cotton irrigation management with LEPA systems. *ASAE Transactions* (Estados Unidos) v.35, p.879-884.
- BROEKMANS, A.F.M. 1957. Growth, flowering and yield of the oil palm in Nigeria. *Journal of the West African Institute of Oil Palm Research* (Nigeria) v.2. p.187-220.
- CHUAH H.J.; LIM, H.K. 1989. Water management of soil palm on coastal soils - Sime Darby's experiences. *The Planter* (Malasia) v.65. p.334-344.
- CORLEY, R.H.V. 1973. Midday closure of stomata in the oil palm in Malaysia. *MARDI Research Bulletin* (Malasia) v.1, p. 1-4.
- _____. 1976. Inflorescence abortion and sex differentiation. *In: R.H.V. Corley; J.J. Hardon; B.J. Wood* (Eds). *Oil Palm Research*. Elsevier, Amsterdam. p.37-54
- _____; Hong, T.K. 1981. Irrigation of oil palms in Malaysia. *In: E. Pushparajah; C.P. Soon* (Eds). *International Conference on Oil Palm*. Proceedings. p.343-356.
- CORNAIRE, B.; DANIEL, O; ZUILY-FODIL, Y.; LAMADE, E. 1993. Oil palm performance under water stress: background to the problem, first results and research approaches. *In: J. Sukaimi; D. Ariffin; N. Rajanaidu; Tn Hj Dolmat; K. Paraniothy; M.S. Wahid; E. Henson; C.K. Choong* (Eds.). 1993 *PORIM International Palm Oil Congress Update and Vision*. Proceedings. p.159-172.
- DANIEL, C 1979 Use of the stomata test to control oil palm water supply in plantation. *Oleagineux* (Francia) v.34, p.285-287.
- DUFRENE, E.; DUBOS, B.; REY, H.; QUENCEZ, P.; SAUGIER, B. 1992. Changes in evapotranspiration from an oil palm stand *Elaeis guineensis* Jacq. exposed to seasonal water deficits. *Acta Oecologica* (Francia) v. 13, p.299-314.
- JENSEN, M.E.; BURMAN, R.D.; ALLEN, R.G. (Eds.). 1990. *Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements*. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 70. American Society of Civil Engineers, New York, NY. 332p.
- FOONG, S.F. 1991. Potential evapotranspiration, potential yield and leaching losses of oil palm. *In: Y. Basiron; J. Sukaimi; C.K. Choong; C.S. Choo; E. Henson; N. Kamaruddin; K. Paranjothy; N. Rajanaidu; Tn. Hj Dolmat; D. Ariffin* (Eds.). 1991 *International Palm Oil Conference, Progress, Prospects and Challenges Towards the 21st Century*. Proceedings, p. 105-117.
- GRANIER, A. 1985. Une nouvelle methode pour la mesure de seve brute dans le tronc des arbres. *Annales Sciences Forestieres* (Francia) v.42, p.193-200.
- _____; HUC, R.; BARIGAH, ST. 1995. Transpiration of natural rain forest and its dependence on climate factors. *Agricultural and Forest Meteorology*. v.78, p. 19-29.

- HARDON, J. J.; WILLIAMS, C. N.; WATSON, I. 1969. Leaf area and yield in the oil palm in Malaya. *Experimental Agriculture* (Reino Unido) v.5, p.25-32.
- HEERMAN, D. F.; MARTIN, D. L.; JACKSON, R. D.; STEGMAN, E. C. 1990. Irrigation scheduling controls and techniques. In: B.A. Stewart; D.R. Nielsen (Eds.). *Irrigation of Agricultural Crops*. American Society of Agronomy, Madison, WI. p.509-535. (Agronomy Monograph No. 30).
- HONG, T. K.; CORLEY, R. H. V. 1976. Leaf temperature and photosynthesis of a tropical C3 plant, *E. guineensis*. *MARDI Research Bulletin* (Malasia) v.4, p.16-20.
- STEWART, B. A.; NIELSEN, D. R. (Eds.). 1990. *Irrigation of Agricultural Crops*. American Society of Agronomy, Madison, WI. 1218p, (Agronomy Monograph No.30).
- KEE, K. K.; CHEW, P. S. 1991. Oil palm responses to nitrogen and drip irrigation in a wet monsoonal climate in peninsular Malaysia. In: Y. Basiron; J. Sukaimi; O.K. Choong; O.S. Choo; E. Henson; N. Kamaruddin; K. Paranjothy; N. Rajanaidu; Tn. Hj Dolmat; D. Ariffin (Eds.). "991 International Palm Oil Conference, Progress, Prospects and Challenges Towards the 21st Century. Proceedings, p.321-335.
- KRAMER, P. J.; BOYER, J. S. 1995. *Plant Water Relations of Plants and Soil*. Academic Press, San Diego, CA. 495p.
- KRUSE, E. G.; BUCKS, D. A.; VON BERNUTH, R. D. 1990. Comparison of irrigation systems. In: B.A. Stewart; D.R. Nielsen (Eds.). *Irrigation of Agricultural Crops*. American Society of Agronomy, Madison, WI. p.475-508. (Agronomy Monograph No. 30).
- LASCANO, R. J.; BAUMHARDT, R. L.; HICKS, S. K.; EVETT, S. R.; HEILMAN, J. L. 1996. Daily measurement and calculation of crop water use. In: International Conference on Evapotranspiration and Irrigation Scheduling. Nov. 3-6 1996, San Antonio, TX. Proceedings, p.225-230.
- LIM H. K.; CHUAH JOO. H.; HO, Y. C. 1994. Improving water management practices on oil palm through the water balance concept. In: K.H. Chee (Ed.). *Management for Enhanced Profitability in Plantations*. The Incorporated Society of Planters, Kuala Lumpur, p.101-119.
- _____; HO, Y. C. 1991. Irrigation trials on oil palm nurseries. In: Y. Basiron; J. Sukaimi; C. K. Choong; O.S. Choo; E. Henson; N. Kamaruddin; K. Paranjothy; N. Rajanaidu; Tn. Hj Dolmat; D. Ariffin (Eds.). 1991 International Palm Oil Conference, Progress, Prospects and Challenges Towards the 21st Century. Proceedings, p.211-218.
- _____; KWOK, Y. C.; CHUAH, H. J. 1996. Effects of moisture and water levels on the soil bearing capacity of a coastal soil under oil palm. In: D. Ariffin; M.B. Wahid; N. Rajanaidu; T. Dolmat; K. Paranjothy; C. S. Choo; C.K. Choong; S. Ravigadevi (Eds.). 1996 PORIM International Palm Oil Congress Competitiveness for the 21st Century. Proceedings. p.436-441,.
- LING, A. H. 1979. Some lysimetric measurements of evapotranspiration of oil palm in central peninsular Malaysia. In: E. Pushparajah (Ed.). *Symposium Water in Malaysian Agriculture*. Proceedings. Malaysian Society of Soil Science, Kuala Lumpur, p.89-101.
- LOPEZ D. J. 1991. Riego en la palma de aceite en Colombia. *Revista Palmas* (Colombia) v.12, Numero Especial, p.53-56.
- LUBIS, A.; ENDANG, S.; KABUL, P. 1993. Effect of long dry season in oil palm yield at some plantations in Indonesia. In: J. Sukaimi; D. Ariffin; N. Rajanaidu; Tn. Hj Dolmat; K. Paranjothy; M.S. Wahid; E. Henson; C.K. Choong (Eds.). 1993 PORIM International Palm Oil Congress Update and Vision. Proceedings, p.253-262.
- MONTEITH, J. L. 1965. Evaporation in the environment. In: G.E. Fogg (Ed.). *The state and environment of living organisms*, 19th Symposium Society Experimental Biology. The company of Biologists. Cambridge, University Press, p.205-234.
- _____; UNSWORTH, M. H. 1990. Momentum transfer. In: J.L. Monteith; M.H. Unsworth (Eds.). *Principles of Environmental Physics*, Chapter 7, 2nd. Ed. Edward Arnold, p.101-120.
- OCHS, R.; DANIEL, C. 1976. Research on techniques adapted to dry regions. In: R.H.V. Corley, J.J. Hardon; B.J. Wood (Eds.). *Oil Palm Research*, Elsevier. Amsterdam, p.315-330.
- PENMAN, H. L. 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Royal Society of Edingurgh. Proceedings. Section A* (Reino Unido) v.193, p.120-145.
- RADERSMA, S.; DE RIDDER, N. 1996. Computed evapotranspiration of annual and perennial crops at different temporal and spatial scales using published parameter values. *Agricultural Water Management* v.31, p.17-34.
- RINGERSMA, J.; MECHERGUI, M.; PIJNENBURG, S. 1996. Transpiration measurements in date palms using the Granier Method. In: O.R. Camp; E.J. Sadler; R.E. Yoder (Eds.). *International Conference Evapotranspiration and Irrigation Scheduling*. Proceedings, p.141-146.
- SMITH, B. G. 1989. The effects of soil water and atmospheric vapour pressure deficit on stomatal behaviour and photosynthesis in the oil palm. *Journal of Experimental Botany* (Reino Unido) v.40, p.647-651.
- TAN, K. S. 1979. Root development of oil palm on inland soils of west Malaysia. In: R. Lai; D.J. Greenland (Eds.) *Soil Physical Properties and Crop Production in the Tropics*. John Wiley and Sons, New York, p.363-374.
- VAN BAVEL, C. H. M. 1996. Potential evaporation: The combination concept and its experimental verification. *Water Resources Research* (Estados Unidos) v.2, p.455-467.
- _____; Van Bavel, M.G.; Lascano, R.J. 1996. Automatic irrigation based on monitoring plant transpiration. In: International Conference on Evapotranspiration and Irrigation Scheduling. Nov. 3-6 1996, San Antonio, TX. Proceedings, p.1088-1092.