

MODELO AGROCLIMATICO PARA EL CÁLCULO DEL ÍNDICE DE
HUMEDECIMIENTO MODIFICADO

**Jorge A. Menéndez Ginorio, Oscar Solano Ojeda, Ransés Vázquez Montenegro
y María Eufemia Martín Padrón**

Instituto de Meteorología, Departamento Meteorología Agrícola

Apdo. 17032

C.P. 11700, Habana 17

**Ciudad de La Habana
Cuba**

Teléfono: (537) 867-0714 y (537)867-0721 al 24, ext. 300

Fax: (537) 33-8010

E-mail Oficial : agromet@met.inf.cu

E-mail Particular : j_agustin72@yahoo.com

RESUMEN

Se modificó el índice de humedecimiento diseñado para evaluar las condiciones agrometeorológicas de crecimiento y desarrollo de los cultivos; basado en resultados mostrados en el Estudio FAO No. 56 de la Serie de Riego y Drenaje. Se obtuvo un modelo para calcular el índice de humedecimiento a partir de la información proveniente de estaciones meteorológicas y pluviométricas de superficie. Se muestra como se lleva a cabo operativamente la distribución espacial del índice de humedecimiento modificado, mediante la utilización de diversas herramientas de los Sistemas de Información Geográfica. Los resultados de este índice son empleados para evaluar y pronosticar las condiciones de vegetación de las plantas, las reservas de humedad productivas para realizar las siembras, el inicio, la propagación, la intensificación y el fin de la sequía agrícola, detección de condiciones de peligro para la ocurrencia de incendios forestales y otros aspectos. Se muestran dos ejemplos de la aplicación del índice de humedecimiento modificado en la vigilancia de la sequía agrícola y de condiciones de peligro de ocurrencia de incendios forestales.

Palabras clave: Índice agrometeorológico, índice agroclimático.

INTRODUCCIÓN

Cuba se ubica en el límite entre las zonas tropical y subtropical y aunque presenta un patrón estacional del clima bastante estable, las frecuentes anomalías climáticas de las tres últimas décadas (Centella *et al.* 1997) han tenido un impacto apreciable sobre la agricultura. Estas anomalías han estado vinculadas a la presencia de bajas extratropicales en el Golfo de México, y aunque esto pudiera parecer provechoso, por la influencia que tienen en el régimen de precipitaciones en Cuba, las lluvias se producen en forma de episodios de poca duración y gran intensidad, lo que hace que las mismas sean poco aprovechables y además, dañinas para muchas actividades agrícolas.

Centella *et al.* (1997), Lapinel *et al.* (1993) y Solano y Vázquez, (2002) observaron también un incremento significativo en el número y en la intensidad de las sequías, éstas no sólo duplicaron su frecuencia de ocurrencia, sino que también registraron un aumento considerable en el número de casos extremos, lo cual constituye un factor adicional de estrés a la situación de deforestación y degradación progresiva de los suelos (Gutiérrez *et al.* 1999).

Estas condiciones han requerido el desarrollo de métodos de evaluación y pronósticos para ser aplicados en la vigilancia agrometeorológica y en la emisión de avisos tempranos de alerta con el propósito de suministrar continuamente información confiable, autorizada y oportuna a los agricultores y directivos relacionados con la producción agrícola.

No toda la lluvia que cae al suelo se infiltra en él. Los resultados del balance hídrico del suelo (Solano *et al.*, 2003) indican que en superficies inclinadas una fracción de la precipitación se pierde por la escorrentía superficial. El balance hídrico simplificado del suelo asume que en superficies horizontales no se consideran movimientos laterales de agua. No obstante, es considerada la fracción de la precipitación que se pierde por percolación profunda a partir del momento en que la humedad del suelo alcance el valor de la capacidad de campo y la diferencia entre la precipitación efectiva y la evapotranspiración del cultivo en el período sea positiva.

Según Solano y Vázquez, (1998) el Índice de Humedecimiento para los cultivos representa la relación entre la necesidad hídrica de las plantas, el suministro de agua por las precipitaciones y la reserva de humedad productiva del suelo para el mismo período temporal dado. Esta representación del contenido de humedad en el medio donde se encuentran las plantas, ya esté en condiciones óptimas o en condiciones de exceso o déficit de humedad, puede cambiar considerablemente de un período temporal a otro e indica el comienzo, las condiciones normales y el fin de los períodos de crecimiento, húmedos y secos en que se encuentra la vegetación y además, otros aspectos de interés agrícola relacionados con el estado y manejo de cultivos, condiciones favorables para el desarrollo o no de plagas y enfermedades y otros aspectos.

El objetivo general de este trabajo fue utilizar los conocimientos agrometeorológicos más novedosos de la literatura internacional, adaptarlos a las condiciones de Cuba y formular el desarrollo teórico y los algoritmos necesarios que simulen el efecto que producen las condiciones climáticas sobre la vegetación de las

plantas y otros aspectos relacionados con el medio ambiente donde éstas crecen y se desarrollan, utilizando para ello técnicas avanzadas de procesamiento de datos y los Sistemas de Información Geográfica, con el fin de aplicar estos conocimientos en la evaluación posterior de las condiciones de sequía agrícola y de peligro potencial de incendios en la vegetación.

Los objetivos específicos fueron:

Obtener un modelo de evaluación que describa, por métodos objetivo, las condiciones de vegetación de las plantas y otros aspectos relacionados con el medio ambiente donde éstas crecen y se desarrollan, en una escala adecuada para fines exploratorios.

Aplicar los resultados obtenidos en el servicio operativo a la agricultura y en la generación futura de una base de datos que permita desarrollar nuevas investigaciones agrometeorológicas y estudios de riesgo de sequía agrícola e incendios en la vegetación.

MATERIALES Y MÉTODOS.

La herramienta básica para el cálculo del índice de humedecimiento es el balance hídrico agrometeorológico del suelo en la rizosfera, según el método tradicional empleado por la FAO, modificado por Allen et al. (1998) y simplificado y calibrados algunos cálculos de sus elementos principales, por Solano *et al.* (2003a), para su uso operativo en el servicio de vigilancia y en la investigación agrometeorológica.

El balance hídrico agrometeorológico simplificado del suelo, expresado en términos del agotamiento de agua en la rizosfera (Ar_i), al final de un día, década, mes, etc., es planteado por Solano *et al.* (2003a) como:

$$Ar_i = Ar_{i-1} - Pe_i - I_i + ETca_i$$

donde:

Ar_{i-1} es el agotamiento de agua en la rizosfera al final del período temporal anterior de análisis ($i - 1$).

Pe_i es la precipitación efectiva en el período temporal de análisis (i).

I_i es la irrigación en el período temporal de análisis (i).

$ETca_i$ es la evapotranspiración de cultivo ajustada en el período temporal de análisis (i).

Si el balance hídrico del suelo se realiza en condiciones de agricultura sostenible y de secano, la ecuación simplificada toma la forma:

$$Ar_i = Ar_{i-1} - Pe_i + ETca_i$$

El proceso se repite para todas las décadas siguientes $i + 1$, $i + 2$, ... , $i + n$.

La evapotranspiración del cultivo (ETc o necesidad hídrica de un cultivo específico), para condiciones estándar (cultivos bien abastecidos de agua), durante un período de

tiempo dado, se obtiene como resultado del producto de la evapotranspiración de referencia de ese mismo período calculada por el método Penman - Monteith ajustado para las condiciones de Cuba, según Menéndez *et al.* (1999), por los coeficientes de cultivo que relacionan Allen *et al.* (1998).

$$ET_c = K_c \cdot E_{To}$$

donde:

K_c es el coeficiente de cultivo.

E_{To} es la evapotranspiración de referencia.

Cuando el agua disponible es menor que el límite productivo, la tasa a la cual se evapora el agua disminuye. Para simular este fenómeno, Allen *et al.* (1998) señalan que para condiciones no estándar (con ajustes en el suministro de agua), la evapotranspiración del cultivo ajustada (ET_{ca}), durante un período de tiempo dado, es el producto de la ET_c de ese mismo período, por el coeficiente de estrés:

$$ET_{ca} = (K_c \cdot E_{To}) \cdot K_s$$

donde:

K_s es el coeficiente de estrés.

El índice de disponibilidad hídrica (IDH) representa la razón entre la reserva de agua del suelo en la década de análisis y el total de agua disponible por los cultivos:

$$IDH = (ATD - A_{r_i}) \cdot ATD^{-1}$$

donde:

$(ATD - A_{r_i})$ es el máximo contenido de agua en la rizosfera.

ATD es la fracción del agua total disponible en la rizosfera.

y este índice es usado para conocer indirectamente las condiciones de vegetación de las plantas en el período i , utilizado en el cálculo del índice de humedecimiento modificado.

La relación entre la precipitación efectiva y las necesidades hídricas de las plantas, mediante el balance hídrico agroclimático del suelo en la rizosfera, permiten estimar la reserva de humedad productiva del suelo. La razón entre esta variable agroclimática y la máxima capacidad de almacenamiento de agua del suelo disponible para las plantas da lugar a un índice agroclimático que representa el porcentaje de la reserva de humedad productiva respecto a la capacidad de campo, llamado índice de disponibilidad hídrica para las plantas. Este índice puede ser calculado mediante una hoja de cálculo en un tabulador electrónico programado (Excel 97) confeccionada en el modelo de balance hídrico simplificado del suelo (Solano *et al.*, 2003a) con formularios especiales sustentados en métodos de avanzada y ajustados a las condiciones de Cuba.

El índice de humedecimiento modificado se conceptuó en una escala de seis valores mediante los algoritmos siguientes:

$\theta_{\text{sat}} \cdot \text{Pr} < (\text{Pe}_i + \text{I}_i - \text{ETca}_i - \text{Ar}_{i-1})$, para la categoría **excesivamente húmedo**,

donde:

θ_{sat} - contenido de agua en el suelo en condiciones de saturación (m^3/m^3)

Pr - profundidad de las raíces del cultivo (mm)

Pe_i - precipitación efectiva (mm)

I_i - irrigación (mm)

ETca_i - evapotranspiración de cultivo ajustada (mm)

Ar_{i-1} - agotamiento del agua en la rizosfera (mm)

$\theta_{\text{CC}} \cdot \text{Pr} < (\text{Pe}_i + \text{I}_i - \text{ETca}_i - \text{Ar}_{i-1}) \leq \theta_{\text{sat}} \cdot \text{Pr}$, para la categoría **muy húmedo**,

donde:

θ_{CC} - contenido de agua en el suelo a la capacidad de campo (m^3/m^3)

$(1-f) \leq \text{IDH} \leq 1$, para la categoría **favorablemente húmedo**,

donde:

f - fracción de agua fácilmente aprovechable.

IDH - índice de disponibilidad hídrica $(\text{ATD} - \text{Ar}_i) \cdot \text{ATD}^{-1}$.

$(1-f) \cdot 2^{-1} \leq \text{IDH} < (1-f)$, para la categoría **ligeramente seco**,

$0.00 \leq \text{IDH} < (1-f) \cdot 2^{-1}$ y $\text{Pe}_i + \text{I}_i > 0$, para la categoría **muy seco**,

$\text{Pe}_i = 0$ y $\text{IDH} = 0$, para la categoría **severamente seco**.

La información utilizada para calcular y realizar la distribución espacial del índice de humedecimiento modificado en el territorio cubano provino de estaciones de superficie. En total unas 70 estaciones meteorológicas pertenecientes al Instituto de Meteorología y unas 630 estaciones pluviométricas pertenecientes al Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos, ambas Instituciones de la República de Cuba.

La escala temporal utilizada para el cálculo y seguimiento del índice de humedecimiento fue la década, según recomiendan Eldin (1986), Frère *et al.* (1978) y Rojas (1985), como una solución intermedia entre la necesidad de determinar la influencia de la distribución del índice en los días del mes y la sencillez del cálculo.

La escala espacial de trabajo fue 1:1 000 000, la cual resulta adecuada para la exploración al nivel nacional de diversos índices agrometeorológicos. Esta escala fue utilizada previamente por los autores en las zonificaciones de diferentes índices de interés agrícola para el Atlas Agrometeorológico de Disponibilidades Hídricas para una Agricultura de Secano (Menéndez *et al.* 2001) y en la vigilancia de índices agrometeorológicos dentro del servicio operativo a la agricultura.

Se emplearon diversas herramientas de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) que permitieron múltiples y complejas operaciones con los mapas, al organizar la información a manera de capas, entre ellas, las operaciones básicas fueron: la

vectorización, la interpolación, la reclasificación, la tabulación cruzada y la sobreposición.

Se utilizó el MAPINFO 5.0 para obtener la información vectorial del contorno de Cuba, la división político administrativa, la hipsometría y la composición mecánica de los suelos. Los mapas, sacados del Nuevo Atlas Nacional de Cuba (ACADEMIA DE CIENCIAS DE CUBA, 1989), fueron escaneados, geo-referenciados y digitalizados.

Para utilizar la información en formato rejilla (raster) se utilizó el IDRISI 2.0 para Windows. Se generó una rejilla cuyos límites en décimas de minutos son los siguientes: -84.97 y -74.11 de longitudes extremas y 19.81 y 23.23 de latitudes extremas. La cuadrícula (pixel) así generada corresponde a 0.01 décimas de minuto de lado (aproximadamente 1 km²).

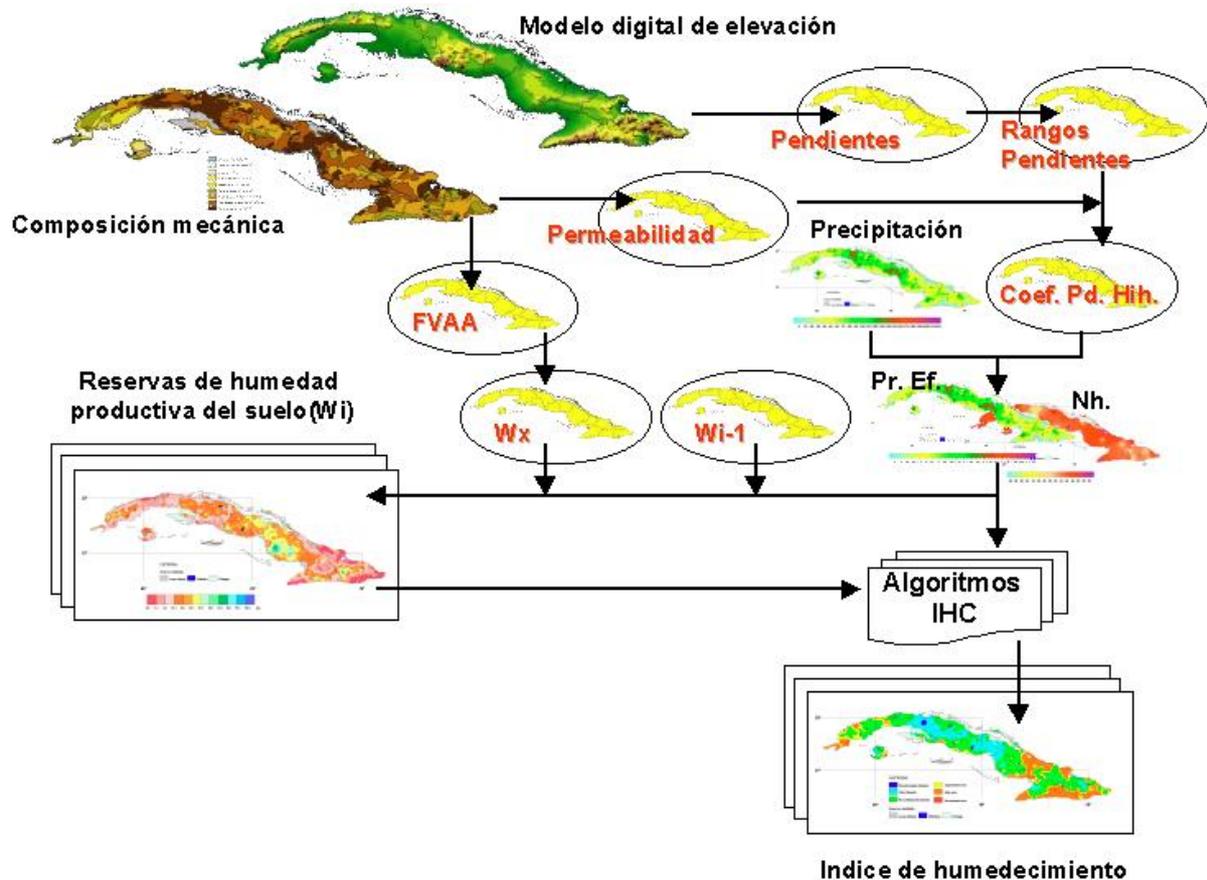
Se utilizó el SURFER, inicialmente su versión 6.2 y posteriormente la 7.0 para realizar la distribución espacial de los elementos agrometeorológicos que intervienen en el cálculo del balance hídrico simplificado del suelo y que son medidos en estaciones meteorológicas o estaciones pluviométricas (ET_o, precipitación). El método de interpolación utilizado fue el kriging con variograma lineal y efecto de nodo cero, lo que lo hace un interpolador exacto.

Teniendo en cuenta que el módulo del álgebra de mapas de los SIG utilizados no permite el análisis de la información con "***Si condicionales***", proceso en el cual se basan los algoritmos utilizados, se exportó la información temática de cada cuadrícula necesaria para la construcción de los balances hídricos del suelo para su procesamiento en un tabulador EXCEL. Finalmente, la información del índice de humedecimiento modificado obtenida para cada cuadrícula fue remapeada, y se le practicó el acabado cartográfico.

Se muestra la introducción del modelo obtenido para el cálculo del índice de humedecimiento modificado, como una herramienta teórica, en dos sistemas de vigilancia agrometeorológica: el de la sequía agrícola, la evaluación de las sequías agrícolas de 1998 y 1999 en Cuba (Solano *et al.*, 2000) y el de condiciones de peligro de incendios forestales, la evaluación de las condiciones de peligro de incendios en la vegetación (Solano *et al.*, 2003b).

En la Figura 1 se muestra el diagrama de flujo para calcular el índice de humedecimiento mediante el auxilio de los SIG y los algoritmos de cálculo. A partir de los mapas de hipsometría y de composición mecánica del suelo se generan diferentes mapas temporales que permiten la construcción del coeficiente de pérdidas hídricas por escorrentía para la obtención del mapa de precipitación efectiva, el cual junto a las reservas de humedad del suelo antecedentes, actuales y máximas, y de la relación entre la precipitación efectiva y las necesidades hídricas de las plantas, aplicar los algoritmos correspondientes para la obtención final del mapa de la evaluación del índice de humedecimiento, para cada década.

Figura 1. Diagrama de flujo para calcular el índice de humedecimiento mediante la utilización de los SIG y los algoritmos de cálculo.



RESULTADOS

Los resultados del contraste entre diferentes índices agrometeorológicos tales como el contenido de agua del suelo en condiciones de saturación y a capacidad de campo, los ingresos de agua al suelo por precipitaciones o irrigación, la evapotranspiración de las plantas la fracción de agua aprovechable por las plantas y el agotamiento del agua en la rizosfera, mediante los algoritmos determinados, dan lugar al índice de humedecimiento (Solano y Vázquez, 1998) modificado, el cual permite evaluar, para una agricultura de secano, las condiciones de vegetación y otros aspectos relacionados con los cultivos tales como la recogida de la cosecha, las variaciones de la disponibilidad hídrica del suelo, etc. y según sus resultados, fácilmente se puede conocer, para diferentes escalas temporales y espaciales, las condiciones de humedecimiento en que se encuentran las plantas. Los autores conceptuaron el índice de humedecimiento modificado en una escala de seis valores que expresan condiciones beneficiosas o desfavorables para la vegetación y otras actividades relacionadas con ella, los cuales se exponen a continuación:

Excesivamente húmedo

El agua en del campo sobrepasa el contenido de humedad a suelo saturado. El alto volumen de lluvia caída resulta perjudicial para la vegetación, excepto para aquella que se encuentra establecida en suelos bien drenados y protegidos, la cual crece sin dificultad y satisface sus necesidades hídricas extrayendo el agua del

suelo a tensiones bajas. Se reportan pérdidas considerables de agua por escorrentía y percolación profunda, las cuales suelen ser aprovechadas en el incremento de los volúmenes almacenados en embalses y del nivel del manto freático. El agua de escorrentía erosiona el suelo con pendientes inclinadas y daña a las nuevas plantaciones. Hay aportes notables de agua a las reservas de humedad productiva del suelo. Donde el drenaje es deficiente se producen inundaciones importantes. Se hace prácticamente imposible el trabajo mecanizado en la intemperie. Estas condiciones dificultan sensiblemente el trabajo manual. En general, reducen notablemente la población de plagas de insectos y roedores y son muy favorables para la aparición de las enfermedades de las plantas.

Muy húmedo

La humedad del suelo supera el contenido de agua en el suelo a capacidad de campo y puede llegar hasta el contenido de humedad a suelo saturado. Esta fracción de agua es considerada como gravitacional. La vegetación establecida en suelos bien drenados y protegidos crece sin dificultad y satisface sus necesidades hídricas extrayendo el agua del suelo a tensiones bajas. Hay aportes importantes de humedad al almacenamiento de agua en el suelo. El agua de escorrentía erosiona el suelo desnudo con pendientes inclinadas y daña a las nuevas plantaciones. Pueden reportarse pérdidas de agua por escorrentía y percolación profunda las cuales pueden producir incrementos en los niveles de agua de embalses y del manto freático. Donde el drenaje es deficiente se producen inundaciones localizadas que dificultan la aireación del suelo, resultan perjudiciales para determinadas especies vegetales y hacen muy difícil el trabajo mecanizado en la intemperie. Estas condiciones dificultan el trabajo manual. En general, reducen la población de plagas de insectos y roedores y son favorables para la aparición de las enfermedades de las plantas.

Favorablemente húmedo

La fracción de agua del suelo se encuentra entre el límite productivo y la capacidad de campo, se encuentra adherida a la matriz de suelo a tensiones muy bajas y es fácilmente disponible por las plantas. La vegetación crece y se desarrolla sin dificultad y satisface sus necesidades hídricas. Hay aporte de humedad al almacenamiento de agua en el suelo y en ocasiones se reportan ligeras pérdidas de agua por escorrentía y percolación profunda, las cuales no generan cambios significativos en los niveles de agua de embalses y del manto freático. En suelos mal drenados se dificulta el trabajo mecanizado en la intemperie y en general se puede realizar satisfactoriamente el trabajo manual. En general, estas condiciones resultan favorables para las plagas de insectos y satisfactorias para el desarrollo de los roedores y la aparición de las enfermedades de las plantas.

Ligeramente seco

El contenido de agua del suelo es inferior al límite productivo y es mayor o igual a la mitad del contenido de agua que el suelo almacena cuando se encuentra en el límite productivo. La vegetación se encuentra en estrés ligero, casi satisface sus necesidades hídricas y extrae el agua del suelo con ciertas limitaciones, crece con algunas dificultades y esto influye negativamente en su producción de biomasa.

Estas condiciones son buenas para el trabajo mecanizado y muy buenas para el trabajo manual. En general, las plagas de insectos y roedores se desarrollan favorablemente y se reduce la aparición de las enfermedades de las plantas.

Muy seco

La fracción de agua del suelo se encuentra por debajo de la mitad del contenido de agua que éste almacena en el límite productivo, pero no llega al punto de marchitez. La vegetación se encuentra en estrés moderado, no satisface sus necesidades hídricas, extrae el agua del suelo a altas tensiones y crece con muchas limitaciones. La producción de biomasa en estas condiciones resulta escasa. Las hojas de las plantas pierden turgencia y el déficit de humedad en la atmósfera incrementa la evaporación del agua en los embalses. Son buenas las condiciones agrometeorológicas para realizar el trabajo mecanizado a la intemperie y excelentes para el trabajo manual. Estas condiciones resultan desfavorables para el desarrollo de plagas de insectos y de roedores y para la aparición de las enfermedades de las plantas.

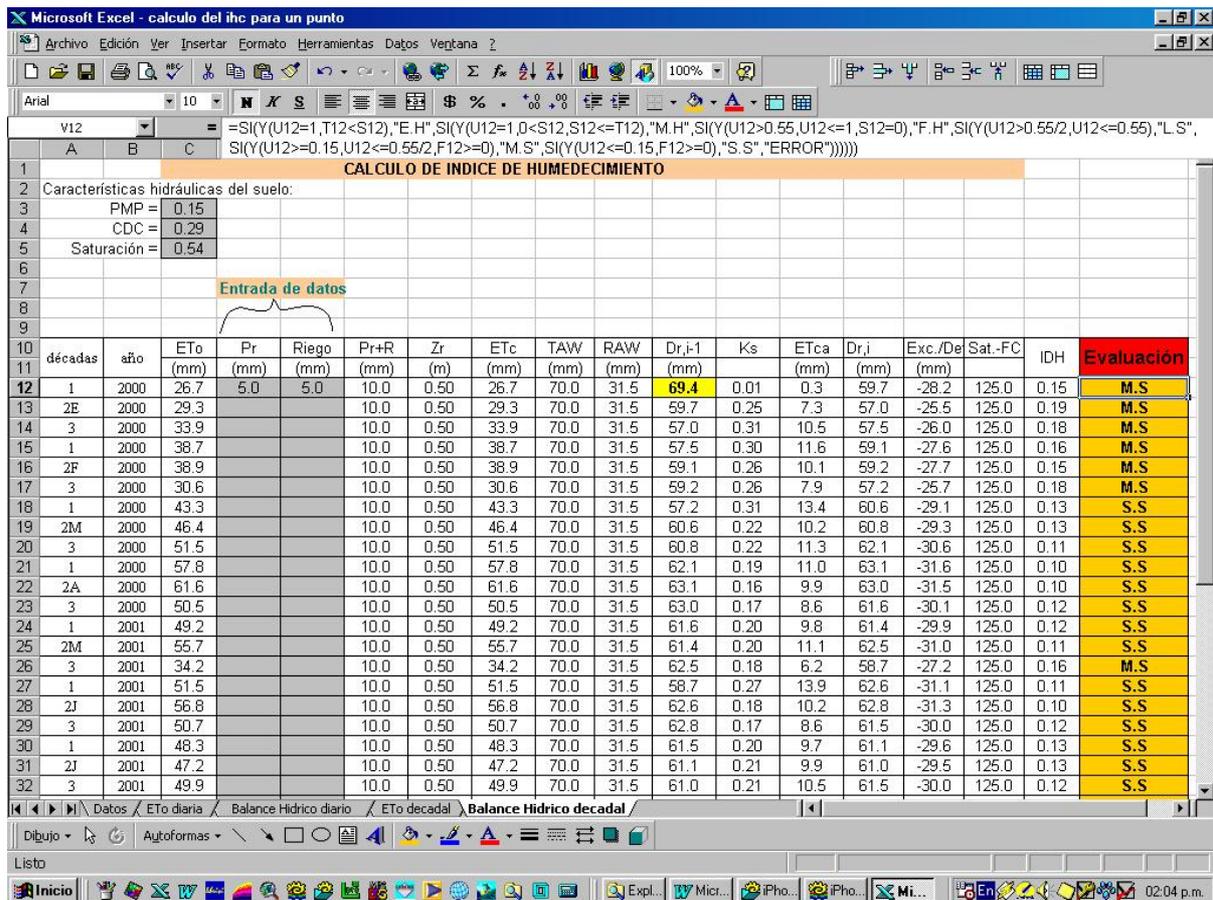
Severamente seco

La fracción de agua del suelo se encuentra en el punto de marchitez permanente. La vegetación se encuentra en estrés severo próxima a la marchitez. No hay crecimiento y los brotes pequeños se secan. Si estas condiciones persisten por un largo período de tiempo pueden secarse los matorrales y la vegetación asociada al bosque y disminuye sensiblemente el nivel de agua de los embalses y del manto freático. Estas condiciones son desfavorables para realizar algunos trabajos con la maquinaria agrícola y muy buenas para el trabajo manual. En general, resultan muy desfavorables para el desarrollo de las plagas de insectos y de roedores y para la aparición de las enfermedades de las plantas.

La precipitación efectiva, la demanda evaporativa de la atmósfera y la reserva de humedad del suelo disponible para las plantas, calculada por el balance hídrico del suelo a partir de la información obtenida en estaciones meteorológicas de superficie, permiten evaluar, para condiciones de agricultura de secano, el índice de humedecimiento modificado y según sus resultados, fácilmente se puede conocer, para un período de tiempo dado y en un lugar determinado, importantes características de los cultivos y otros aspectos que se relacionan con ellos y que permiten al agricultor tomar decisiones adecuadas en el manejo de sus intereses agrícolas.

El índice de humedecimiento se emplea en la investigación y en la vigilancia agrometeorológica operativa a través de los boletines agrometeorológicos nacional y especializados desde el año 1998 (Solano y Vázquez 1998), tanto para evaluar las condiciones de vegetación y otros aspectos relacionados con la agricultura, como en la evaluación de la sequía agrícola (Solano *et al.* 2000) y el pronóstico de siembra de cultivos (Solano y Vázquez, 1999; Solano *et al.* 1999b).

Figura 2. Fragmento en ambiente Windows de la hoja electrónica utilizada para el cálculo del índice de humedecimiento para un punto y un período de tiempo.



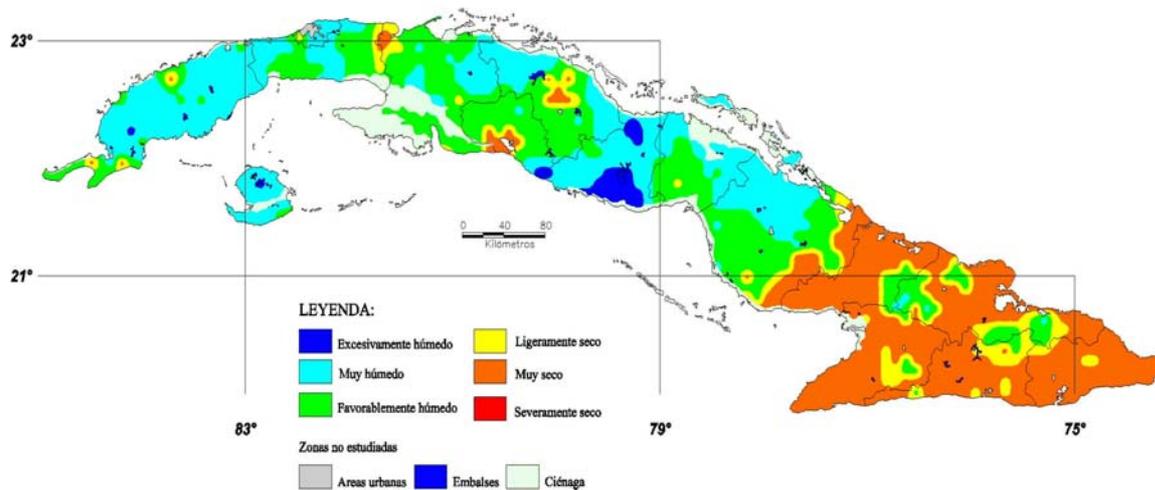
La Figura 2 muestra un fragmento en ambiente Windows de la hoja electrónica en la cual se obtienen, a partir de las formulaciones correspondientes, los parámetros del balance hídrico agrometeorológico del suelo para un punto específico (estación, empresa, etc.) y para un período temporal determinado. En la columna con rotulo "Evaluación" se depositan los resultados de los algoritmos complejos utilizados para obtener las diferentes gradaciones del índice de humedecimiento. Nótese como en la zona de entrada de información se muestra un detalle parcial de dichos algoritmos.

De igual manera se obtuvo una hoja electrónica de Microsoft Excel en la cual se obtiene, a partir de las formulaciones correspondientes, los parámetros del balance hídrico agrometeorológico del suelo para cada una de las cuadrículas geográficas y para una década en particular.

El empleo de los Sistemas de Información Geográfica, permitió realizar la distribución espacial en Cuba del índice de humedecimiento modificado y a partir de ella, conocer, por ejemplo, las condiciones de vegetación de las plantas y otros importantes aspectos útiles relacionados con la planificación agrícola durante un período de tiempo determinado, en cualquier zona del país.

La Figura 3 muestra la distribución espacial del índice de humedecimiento modificado al final de la segunda década del mes de mayo de 2001.

Figura 3. Distribución espacial, en el territorio de Cuba, del índice de humedecimiento modificado.



A manera de ejemplo al evaluar en la Figura 3 la distribución espacial del índice de humedecimiento modificado en un período de diez días, puede llegarse a la conclusión de que en la región occidental del país, donde el índice de humedecimiento es clasificado como muy seco, la vegetación, en condiciones de secano, se encontraba en estrés hídrico moderado; las condiciones del tiempo en el campo fueron buenas para el trabajo mecanizado y excelentes para el trabajo manual.

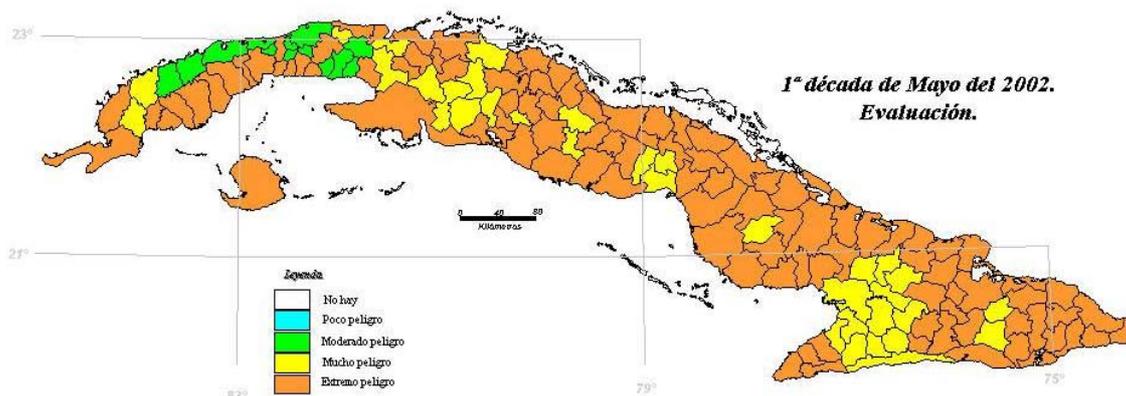
Sobre el índice de humedecimiento modificado se sustentan las evaluaciones y el pronóstico de condiciones agrometeorológicas dirigidas a una agricultura de secano, de aspectos tan importantes como las evaluaciones y el pronóstico de la sequía agrícola, las reservas de humedad para la siembra, las condiciones de peligro de incendios forestales, etc.

Resulta muy difícil probar en la práctica los resultados de la aplicación del modelo obtenido para el cálculo del índice de humedecimiento modificado sobre la vegetación natural establecida, sin embargo, pueden mostrarse ejemplos alentadores mediante el uso de evaluaciones teóricas de las condiciones de vegetación en dos eventos meteorológicos extremos: la sequía agrícola y las condiciones de peligro de incendios en la vegetación, los cuales se describen a continuación.

Solano *et al.* (2000), al evaluar las sequías agrícolas críticas, de corto período, ocurridas en los años 1998 y 1999, a partir de los resultados obtenidos con la aplicación del modelo para el cálculo del índice de humedecimiento modificado, concluyeron que entre las dos sequías evaluadas, la de 1999 resultó la más intensa. El modelo obtenido describió con muy buena aproximación la evolución, temporal y espacial, de la sequía agrícola al nivel de localidad, municipio, provincia, región y país. Estas sequías impactaron severamente el sector agropecuario cubano. Los daños ocasionados por la sequía de 1999 resultaron mayores que los reportados por la sequía de 1998 lo cual se corresponde con los resultados de la evaluación de la sequía a partir del índice de humedecimiento.

La Figura 4 muestra las condiciones de peligro de ocurrencia de incendios en la vegetación para la primera década de mayo de 2002, evaluadas por el modelo que utiliza, como herramienta, el índice de humedecimiento. La Figura 6 muestra los municipios en los cuales fueron reportados incendios forestales durante la primera década de 2002.

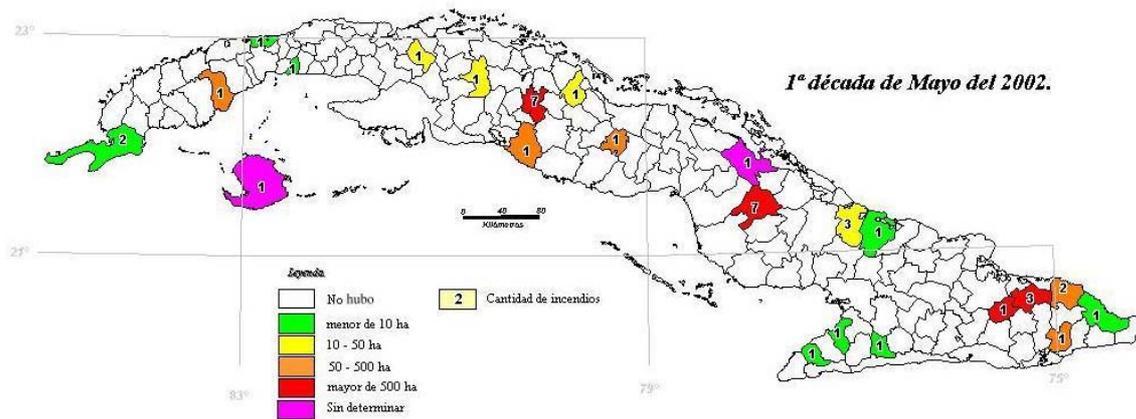
Figura 4. Evaluación de condiciones de peligro para la ocurrencia de incendios en la vegetación durante la primera década de mayo de 2002.



Solano (2001) determinó un índice agrometeorológico para evaluar condiciones de peligro potencial de explosión de incendios en la vegetación, el cual se sustenta en el análisis de los índices de humedecimiento y de la sequía agrícola. Este índice fue utilizado por Solano *et al.* (2003b) para describir el sistema de vigilancia de las condiciones agrometeorológicas de peligro de incendios en la vegetación utilizado en el servicio agrometeorológico cubano.

En total se registraron 41 incendios en ese período, los cuales ocurrieron en 23 municipios del país. El número que aparece en el interior del municipio indica la cantidad de incendios ocurridos y el color de fondo indica los daños ocasionados por la suma de todos ellos, en hectáreas. En dos incendios no se pudo determinar el área afectada. Un incendio ocurrió en la categoría de moderado peligro, con una afectación menor a las 10 ha, cuatro ocurrieron en la categoría de mucho peligro, dos de ellos con una afectación menor a las 10 ha, uno entre 10 y 50 ha y otro con más de 500 ha. Los restantes ocurrieron en la categoría de peligro extremo. De éstos, en cinco municipios se reportaron afectaciones menores a 10 ha, en tres entre 10 y 50 ha, en cinco entre 50 y 500 ha, en tres mayores a 500 ha y en dos no se determinó el área afectada.

Figura 5. Incendios ocurridos durante la primera década de mayo de 2002.



Al evaluar la distribución de los incendios y afectaciones medias por categoría de peligro, en Cuba, de enero a julio de 2002, de 1290 casos evaluados en la condición “no hay peligro” para la ocurrencia de incendios forestales en la próxima década, fueron reportados 21 casos, por lo que el error, en este caso fue de 1,6%. No obstante, 86% de los casos ocurrió en la provincia Pinar del Río, donde la frecuencia de incendios originados por descargas eléctricas es la mayor del país. El área afectada media de los incendios surgidos en esta categoría (2 ha), sugiere que los incendios tuvieron condiciones poco favorables para su propagación. De un total de 587 incendios forestales, 566 ocurrieron en las categorías de peligro 1 a 4, lo que equivale a 96% de los casos.

La experiencia práctica de la aplicación del modelo agroclimático para el cálculo del índice de humedecimiento modificado generado para la evaluación de las condiciones de vegetación, como herramienta teórica, permitió mostrar dos ejemplos promisorios en la evaluación de las condiciones de vegetación en dos eventos meteorológicos extremos diferentes: la sequía agrícola y las condiciones de peligro de incendios en la vegetación.

CONCLUSIONES

Se generó un modelo agroclimático para el cálculo del índice de humedecimiento modificado, sustentado en técnicas agrometeorológicas de avanzada, a partir del cual pueden ser evaluadas, para una agricultura sostenible y de secano, las condiciones de vegetación y otros aspectos relacionados con la agricultura. Permite además, explicar las condiciones de vegetación de las plantas en las escalas temporal y espacial, con una resolución de 1 km², a niveles de localidad, municipio, provincia, región y país, a partir del análisis de la existencia y continuidad en el tiempo de condiciones de estrés hídrico en las plantas, su duración e intensidad. La mayor parte de los resultados mostrados por los autores en esta investigación se obtienen por primera vez en Cuba.

Los resultados de la aplicación de este modelo en los sistemas de seguimiento agrometeorológico para la elaboración de avisos tempranos de alerta y en la investigación, tienen una gran importancia para la planificación agropecuaria,

fundamentalmente en condiciones sostenibles y de secano. Ello permitió obtener el conocimiento puntual de las condiciones de la vegetación en los lugares de observación y su distribución espacial, para toda Cuba, mediante el empleo de los Sistemas de Información Geográfica y su uso en la vigilancia operativa y en la investigación ha generado una base de datos decadal, en soporte digital, donde cada cuadrícula de 1 km² posee información de las condiciones del índice de humedecimiento.

La aplicación práctica del modelo agroclimático generado para el cálculo del índice de humedecimiento modificado, utilizado como herramienta teórica, permitió evaluar adecuadamente las condiciones de vegetación en dos eventos meteorológicos extremos diferentes: la sequía agrícola y las condiciones de peligro de incendios en la vegetación. El empleo de este modelo sobre la información proveniente de las predicciones climáticas a plazos corto y medio, ha permitido emitir avisos tempranos de alerta para plazos temporales mucho mayores a los avisos emitidos anteriormente por el sistema de vigilancia nacional, lo que ha ayudado a los agricultores y actores a manejar el riesgo climático en la toma de sus decisiones. El conocimiento futuro de las condiciones de la vegetación ha sido un criterio potencialmente útil para determinar las fechas de siembras agrícolas, la época de riego y el monto de agua a suministrar por irrigación a los cultivos, entre otras opciones de manejo agrícola, lo cual ha contribuido a un incremento de la seguridad alimentaria en el país.

REFERENCIAS

ACADEMIA DE CIENCIAS DE CUBA. 1989. "Nuevo Atlas Nacional de Cuba". Editado por el Instituto Cubano de Geodesia y Cartografía.

Allen R., L. Pereira, D. Raes. y M. Smith. 1998. "Crop Evapotranspiration. Guidelines for Computing Crops Requirements". in FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome. Italy, 301 p.

Centella A., L. Naranjo, L. Paz, P. Cárdenas, B. Lapinel, M. Ballester, R. Pérez, A. Alfonso, C. González, M. Limia, y M. Sosa. 1997. "Variaciones y cambios del Clima en Cuba". Informe Técnico Centro Nacional del Clima, Instituto de Meteorología, La Habana, Cuba, 58 p.

Eldin M. 1986. "Variabilité climatique. Alalyse et incidences sur l'établissement et l'utilisation des bilans hydriques pour le zonagr agri-pedo-climatique". Pp 343-352.

Frère M., J. Q. Rijks y J. Rea. 1978. Estudio Agroclimatológico de la Zona Andina en Nota Técnica No. 161 de la OMM, Ginebra, Suiza, 297 p.

Gutiérrez T., A. Centella, M. Limia y M. López. 1999. "Impacto del Cambio Climático y Medidas de Adaptación en Cuba". Informe de Proyecto No. 01301019. Programa Nacional de Ciencia y Técnica Los Cambios Globales y la Evolución del Medio Ambiente Cubano.

Lapinel B., R. E. Rivero, V. Cutié, R. R. Rivero, N. Varela y M. Sardinas. 1993. "Sistema Nacional de Vigilancia de la Sequía: Análisis del período 1931 – 1990". Informe Científico Técnico, Centro Meteorológico Provincial de Camagüey, Cuba, 45 p.

Menéndez C. J., O. Solano, R. Vázquez, J. A. Menendez, M. Osorio, M. González, T. Burgo y T. Gutiérrez. 2001. "Atlas Agrometeorológico de Disponibilidades

Hídricas para una Agricultura de Secano”. Informe final de resultado de investigación. Instituto de Meteorología. La Habana, Cuba.

Menéndez J. A., O. Solano y R. Vázquez. 1999. “Estimación de la Evapotranspiración de Referencia por el Método de Penman – Monteith”. Disco Compacto de las Memorias de la Convención Trópico’ 99, en el Congreso de Meteorología Tropical. Palacio de Convenciones de La Habana, Cuba, Ref. MT 001, 5 p.

Rojas, O. E. 1985. “Estudios agroclimáticos y zonificación agroecológica de cultivos: metodología y resultados”. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. OEA. San José, Costa Rica, 106 p.

Solano O. y R. Vázquez. 1998. “Sistema de Seguimiento Agrometeorológico Decadal del Índice de Humedecimiento para los Cultivos”. Disco compacto de las Memorias del X Congreso Brasileño de Meteorología y VIII Congreso de la FLISMET. Área de Agrometeorología Ref. AG-98034, 5 p.

Solano O. y R. Vázquez. 1999. “Pronóstico de condiciones agrometeorológicas de reservas de humedad para la siembra en una agricultura de secano”. Disco Compacto de las Memorias de la Convención Trópico’ 99, en el Congreso de Meteorología Tropical. Palacio de Convenciones de La Habana, Cuba, Ref. MT 006, 4 p.

Solano O., R. Vázquez, J. A. Menéndez y A. Planas. 1999. “Pronóstico de condiciones agrometeorológicas de reservas de humedad para la plantación de cafetos en una agricultura sostenible”. Trabajo presentado en el Congreso Internacional de Café y Cacao, Guantánamo, 7 p.

Solano O., R. Vázquez, C. J. Menéndez y J. A. Menéndez. 2000. “Sistema Agrometeorológico Operativo para la Detección y Seguimiento de la Sequía Agrícola en Cuba”. En Actas de la Reunión de Expertos de las Asociaciones Regionales III y IV Sobre Fenómenos Meteorológicos diversos, Caracas, Venezuela, 12 – 14 de julio de 1999, pp 45 – 54.

Solano O. 2001. “Diseño de una estrategia para el combate de incendios forestales”. Informe de consultoría sobre prevención de incendios forestales del Proyecto FAO TCP/CUB/0066(A) La Habana, Cuba, 77 p. + 24 a.

Solano, O. y R. Vázquez. 2002. “Estudio de caso de la sequía agrícola en las cinco provincias más orientales de Cuba”. Disco compacto de las Memorias del Primer Seminario Taller “La Física en la Meteorología”. Ciudad de La Habana. Cuba. 23 p.

Solano, O., R. Vázquez, J.A. Menéndez y M.E. Martín. 2003a. “Modelo agroclimático de balance hídrico del suelo. formulación y representación espacial”. Informe científico técnico de resultado de investigación. Proyecto “Pronostico de peligro de incendios forestales su seguimiento y evolución, utilizando técnicas de observación terrestre y la percepción remota”. Instituto de Meteorología. La Habana. 30 p.

Solano O., R. Vázquez, E.. Pérez y M. Figueredo. 2003b. “La Vigilancia de las Condiciones Agrometeorológicas de Peligro de Incendios en la Vegetación”. Disco compacto de las memorias del X Congreso Latinoamericano e Ibérico de Meteorología, II Congreso Cubano de Meteorología y II Simposium Internacional de Ciclones Tropicales “Padre Benito Viñes S.J. in Memoriam” Hotel Nacional de Cuba. La Habana, 3 – 7 de marzo de 2003. 10 p.