



CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL
DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA



LA SIMULACION DEL BALANCE HIDRICO

APLICACION PARA LA DETERMINACION DE FECHAS DE SIEMBRA

Florent MARAUX

Bruno RAPIDEL

Septiembre de 1990

**Proyecto Regional
de Agrometeorología
CATIE - CIRAD - ORSTOM**



PRESENTACION

En los estudios de carácter agronómico publicados, existe generalmente un capítulo sobre las características climáticas de las zonas de trabajo, o del lugar donde los experimentos publicados fueron desarrollados. Sin embargo, es de destacarse por lo general la gran pobreza de los mencionados capítulos, que presentan un catálogo de datos no relacionados entre ellos, y que, al final, sirven más de adorno que de sustento científico para las publicaciones.

Aunque no es siempre fácil interrelacionar estos parámetros, y darles una interpretación agronómica que aporte explicaciones a los fenómenos estudiados, la agrometeorología ha desarrollado algunas herramientas sintéticas que si permiten caracterizar y discriminar las situaciones agroclimáticas en forma eficiente.

Entre estas herramientas están los modelos, y las simulaciones de balance hídrico, así como el concepto inmediatamente derivado de los mismos, que es el de "satisfacción de las necesidades hídricas".

La literatura científica ofrece numerosos modelos sobre el tema, con diferentes grados de complejidad. El presente documento no pretende hacer un análisis exhaustivo de los mencionados modelos, ni mucho menos indicar cuales son los buenos y cuales son los malos. Simplemente, se pretende explicar la filosofía de los modelos de balance hídrico, la forma en que están contruidos, sus limitaciones, sus campos de aplicación, así como una de sus posibles aplicaciones en la investigación agronómica (determinación de fechas de siembra y variedades óptimas).

De esta manera, esperamos que los técnicos e investigadores de la Región Centro-americana desarrollen y utilizen correctamente las herramientas presentadas, dándole así al clima su verdadera dimensión en la comprensión de los fenómenos agronómicos.

Florent MARAUX

Líder del Proyecto Regional de Agrometeorología

CATIE-CIRAD-ORSTOM

AGRADECIMIENTOS

Este estudio no hubiera podido realizarse sin el apoyo y la ayuda de las personas e instituciones siguientes:

- **El Programa Nacional de Agrometeorología del MIDINRA de Nicaragua donde se elaboró gran parte de este estudio, en particular el Señor Leonel Rodríguez O., que fungía en aquel entonces como director del Programa**
- **Los señores Francisco Jiménez y Jean Paul Lhomme, del Programa Regional de Agrometeorología del CATIE, por su estricta revisión del documento final**
- **La señorita Rocío Jiménez, por las artes gráficas.**

A ellos van nuestros sinceros agradecimientos.

INDICE

| | |
|---|----------|
| INTRODUCCION | 1 |
| 1 EL PRINCIPIO DEL BALANCE HIDRICO Y SU MODELIZACION | 1 |
| 1.1 Principio general | 1 |
| 1.2 La modelización del balance hídrico | 4 |
| 2 EL MODELO DE BALANCE HIDRICO DE FOREST | 5 |
| 2.1 Explicación del modelo | 5 |
| a. Principio general | |
| b. Estimación de la REServa y del DREnaje | |
| c. Estimación del ESCurrimiento | |
| d. Estimación de la E.T.R. | |
| 2.2 Limitaciones de construcción | 9 |
| a. El sub-modelo de escurrimiento | |
| b. El paso de tiempo | |
| c. Relación balance hídrico con otras funciones biológicas | |
| 2.3 Ajuste a la realidad | 10 |
| a. Estimación de la evaporación del suelo desnudo | |
| b. Estimación de los ascensos capilares | |
| c. Estimación de la reserva | |
| 2.4 Comparación con otros modelos | 11 |
| a. El modelo de Thornthwaite | |
| b. El sub-modelo de balance hídrico del modelo CERES | |
| c. Síntesis | |

| | |
|--|-----------|
| 3 APLICACIONES DE LOS MODELOS DE BALANCE HIDRICO: | |
| DETERMINACION DE FECHAS DE SIEMBRA Y VARIEDADES OPTIMAS ... | 15 |
| 3.1 Problemática general | 16 |
| Las fechas de siembra | |
| Metodologías | |
| a. La experiencia campesina | |
| b. Simulación de balance hídrico | |
| Principio del método. | |
| Crítica del método | |
| Síntesis | |
| 3.2 Aplicación práctica en la región de Estelí, Nicaragua | 18 |
| a. Problemática general | |
| b. Metodología del análisis | |
| c. Resultados | |
| d. Análisis de los resultados | |
| 3.3 Espacialización | 25 |
| a. Problemática | |
| b. Resultados | |
| CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS | 30 |
| BIBLIOGRAFIA | 31 |

INTRODUCCION

Entre los factores climáticos que más influyen sobre la producción agrícola está el agua; además, la lluvia es el factor que más variabilidad presenta de un año a otro en una región determinada.

El simple estudio de la distribución de las precipitaciones no permite razonar los problemas de la relación agua-cultivos. El suelo interviene de manera muy importante, ya que tiene la propiedad de almacenar agua, y de restituirla a las plantas en función de lo que las mismas demandan. Esta realidad viene a complicar el dispositivo analítico, y justifica que se haya buscado crear una herramienta que permita analizar en términos sintéticos el problema de la alimentación hídrica de los cultivos.

El concepto de balance hídrico es una representación teórica de los intercambios de agua entre las plantas, el suelo y la atmósfera que es bastante potente, de fácil modelización, y sujeta a aplicarse por medio de simulaciones a toda clase de situaciones climáticas, edáficas, y de cultivos.

El documento presenta en una primera gran parte los principios generales que rigen los modelos de balance hídrico, y en una segunda parte se desarrolla un ejemplo de aplicación de las simulaciones de balance hídrico efectuada en Nicaragua durante el año 1987.

1 EL PRINCIPIO DEL BALANCE HIDRICO Y SU MODELIZACION

1.1 PRINCIPIO GENERAL

Se presenta en la figura 1 un esquema general que describe los diferentes destinos posibles del agua, dentro del marco de la relación Clima-Suelo-Planta.

La ecuación fundamental simplificada del balance hídrico deriva del principio de la conservación general del agua: de la totalidad del agua aportada, mediante las precipitaciones (PRE) o por medio de riego (RIE), no se pierde nada; el agua puede:

- ser evaporada desde el suelo, o ser transpirada por la planta. En este caso, juntando y sumando las dos cantidades, se habla de Evapo-Transpiración-Real (ETR) de la cobertura vegetal
- filtrarse hacia la profundidad del suelo, fuera del alcance de las raíces de las plantas cultivadas (en este caso, se habla de DREnaje)
- escurrir sobre la superficie del suelo, y ser recolectada fuera de un área agrícola (un cauce, o más generalmente un río). En este caso, se habla de ESCurrimiento
- ser almacenada por el suelo, y recargar la REServa de agua del mismo.

Ningún otro destino puede tener el agua.

BALANCE HIDRICO

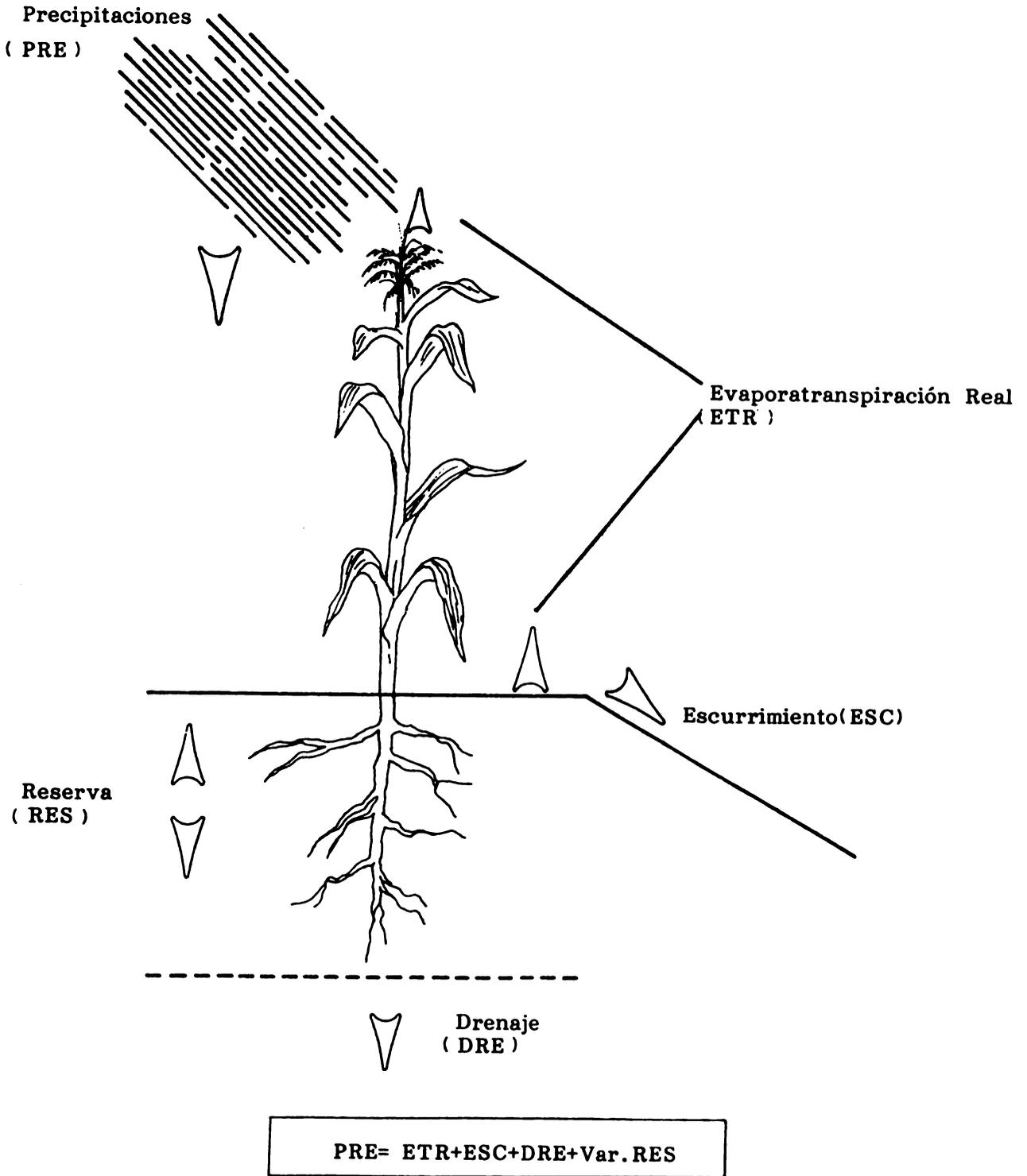


Figura 1. Esquema General del Balance Hídrico

Por lo tanto, entre dos fechas (1) y (2), se puede escribir la ecuación del balance hídrico en estos términos:

$$PRE + RIE = ETR + DRE + ESC + [RES(2) - RES(1)]$$

Por sencilla que sea esta fórmula, autoriza a muchas conclusiones y especulaciones entre las cuales están las siguientes, partiendo de lo sencillo hacia lo complejo:

- 1) No todo el agua que precipita es aprovechada por la planta; de hecho, tanto si filtra hacia las profundidades como si escurre hacia un río, el agua pierde toda posibilidad de ser aprovechada por las plantas cultivadas. Eso significa que no se puede hacer una estimación correcta del agua disponible para las plantas únicamente a través de un total de agua recolectada en un pluviómetro.
- 2) El suelo, por medio de la reserva de agua juega un papel muy importante, ya que por ejemplo si los suelos son arenosos, van a tener poca capacidad para retener mucha agua. Esto implica que, de las precipitaciones fuertes una pequeña parte solamente va a poder ser almacenada, y posteriormente aprovechada por los cultivos. En cambio, los suelos más arcillosos, o los suelos volcánicos del Sur de Guatemala, de El Salvador y del Occidente de Nicaragua, que presentan un alto porcentaje de alófanos, tienen una mayor capacidad de retención.
- 3) Si bien es cierto el factor fundamental del balance hídrico (las precipitaciones) obedece a leyes de tipo estadísticas, los otros términos obedecen a leyes de tipo biofísico y se pueden analizar por separado por medio de experimentos y calibraciones específicos. Son entonces simplificables a través de modelos matemáticos.
- 4) Teniendo un carácter absoluto la mencionada ecuación, autoriza que los términos desconocidos, y no medibles directamente se puedan deducir de los otros por diferencia.

Como consecuencia de estos apuntes se concluye lo siguiente:

El estudio del balance hídrico conduce a la estimación de la cantidad de agua realmente aprovechada por las plantas.

1.2 LA MODELIZACION DEL BALANCE HIDRICO

El rápido desarrollo de la informática en la década de los sesenta, así como de la bioclimatología y de la ciencia del suelo, ha permitido avanzar rápidamente en la conceptualización de modelos de balance hídrico, los cuales van de lo menos hasta lo más sofisticado, en el sentido que toman en cuenta una cantidad variable de parámetros, biológicos o edáficos.

El principio de la modelización es la descripción, por medio del encadenamiento de fórmulas matemáticas, de un fenómeno real. Esta descripción tiende, evidentemente, a simplificar el fenómeno estudiado por cuanto no puede tomar en cuenta todos los parámetros del medio exterior que interactúan sobre él.

Dentro de este marco, los modelos oscilan entre dos extremos, de sencillez o de complejidad: los modelos más sencillos necesitan pocos parámetros de entrada, son aplicables a una gran diversidad de zonas con esfuerzos mínimos, pero en cambio, se presenta en promedio mucha diferencia entre los resultados que arrojan y la realidad medida. Al contrario, los modelos más complejos necesitan una mayor cantidad de información para que funcionen (son más 'precisos'), y se supone que se acercan más a la realidad que pretenden simular.

En general todos los modelos presentan características similares:

- Una estructura en la cual se encuentra articulada la secuencia lógica de las operaciones a efectuarse durante la simulación; incluye, por lo que a los modelos de balance hídrico se refiere, las leyes físico biológicas que rigen los intercambios de agua entre el suelo, la planta y la atmósfera.
- Una serie de parámetros de entrada, que describen en forma cualitativa o cuantitativa las condiciones en las cuales el modelo va a trabajar (condiciones de suelo, desarrollo radical, ETP, precipitaciones, etc.)
- Una salida, que presenta los resultados intermedios y finales de las simulaciones.

Desde luego, este esfuerzo de modelización tiene el objetivo de ahorrar materiales y tiempo, ya que, una vez disponiendo de un modelo confiable, y congruente con la disponibilidad de información biofísica del lugar del análisis, ya no es necesario realizar efectivamente una experimentación para tener sus resultados. Basta con realizar la simulación correspondiente. Se puede estudiar años anteriores. El interés es obvio, con tal que se tomen una serie de precauciones que se detallan a continuación. }

No es el propósito de este documento presentar un listado exhaustivo de todos los modelos que se encuentran en la literatura sobre balance hídrico. A continuación, se analiza uno de ellos a fondo, y se proponen reflexiones metodológicas aplicables a cualquiera de ellos.

2 EL MODELO DE BALANCE HIDRICO DE FOREST

Este modelo ha sido objeto de numerosos estudios de calibración, y ha dado lugar a múltiples usos satisfactorios en el campo de manejo de riego, zonificaciones, seguimiento de la campaña agrícola, determinación de fechas de siembra óptimas en el marco del Programa Nacional de Agrometeorología de Nicaragua. Por este motivo, y por ser el más agronómico de los modelos 'sencillos' se presenta a continuación.

El modelo de Forest ha sido elaborado con base en experiencias de estudios de la dinámica del agua efectuados por el IRAT/CIRAD en los suelos de varios países de Africa del Oeste . Obviamente, los suelos y las condiciones ambientales de Africa del Oeste son muy diferentes de las condiciones que prevalecen en Nicaragua y en América Central. Por ello, y antes de darle un uso intensivo se han realizado numerosos estudios de calibración *in situ* de este modelo, los cuales se presentarán posteriormente en este documento.

2.1 EXPLICACION DEL MODELO

A continuación presentamos las características principales del modelo de FOREST (IRAT/CIRAD).

a. Principio general

El modelo mencionado simula el funcionamiento hídrico del complejo suelo-cultivo-atmósfera; se calculan cada cinco días los movimientos de agua entre estas tres entidades bajo condiciones de pluviometría reales (tomadas de los archivos pluviométricos), desde antes de la siembra hasta la cosecha.

Cada término de la ecuación del balance hídrico se calcula en base a los sub-modelos abajo descritos:

b. Estimación de la REServa y del DREnaje

Como primer paso, se define la Reserva Util (RU), que es un parámetro que caracteriza la cantidad máxima de agua que puede almacenar el suelo, en la capa explorada por el sistema radical del cultivo, y que puede ser extraída por las plantas (es la diferencia entre las humedades volumétricas a capacidad de campo y al punto de marchitez permanente). En este sentido, la RU es una característica física del suelo por un lado, y agronómica por el otro.

La reserva inicial es la cantidad de agua almacenada en el suelo al momento de la siembra. Posteriormente, a cada paso de la simulación (cada 5 días) la diferencia entre el agua que ha precipitado y el agua que no ha sido aprovechada por el cultivo ni tampoco escurrida viene a sumarse al agua ya almacenada en la reserva del paso anterior, para constituir la nueva reserva.

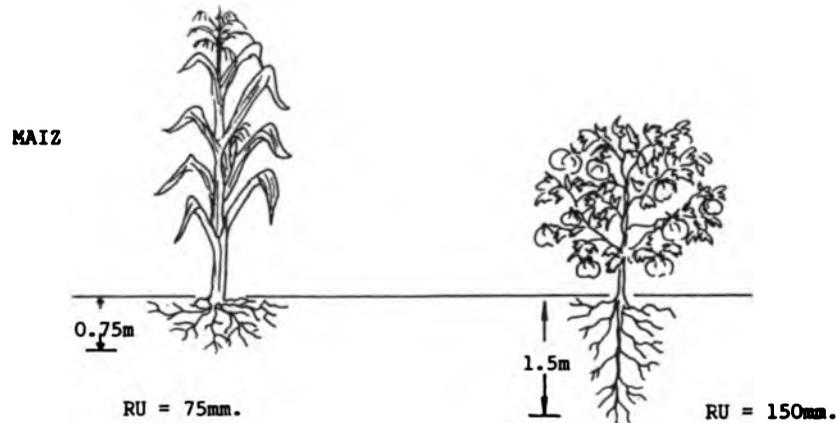
En caso de que la nueva reserva sea superior a la Reserva Util, se considera que el excedente de agua se pierde por DREnaje, quedando la REServa a su nivel máximo RU.

Un esquema que ilustra la estimación de la Reserva Util y del DREnaje se presenta en la figura 2.

LA RESERVA UTIL

La Reserva Util depende de la textura del suelo

La Reserva Util es proporcional a la profundidad del desarrollo radical



EL DRENAJE

$$RES_{(i+1)} = RES_{(i)} + PRE_{(i+1)} - ESC_{(i+1)}$$

$$1. \text{ Si } RES_{(i+1)} < RU \quad \begin{cases} RES_{(i+1)} = RES_{(i+1)} \\ DRE_{(i+1)} = 0 \end{cases} \quad 2. \text{ Si } RES_{(i+1)} > RU \quad \begin{cases} RES_{(i+1)} = RU \\ DRE_{(i+1)} = RES_{(i+1)} - RU \end{cases}$$

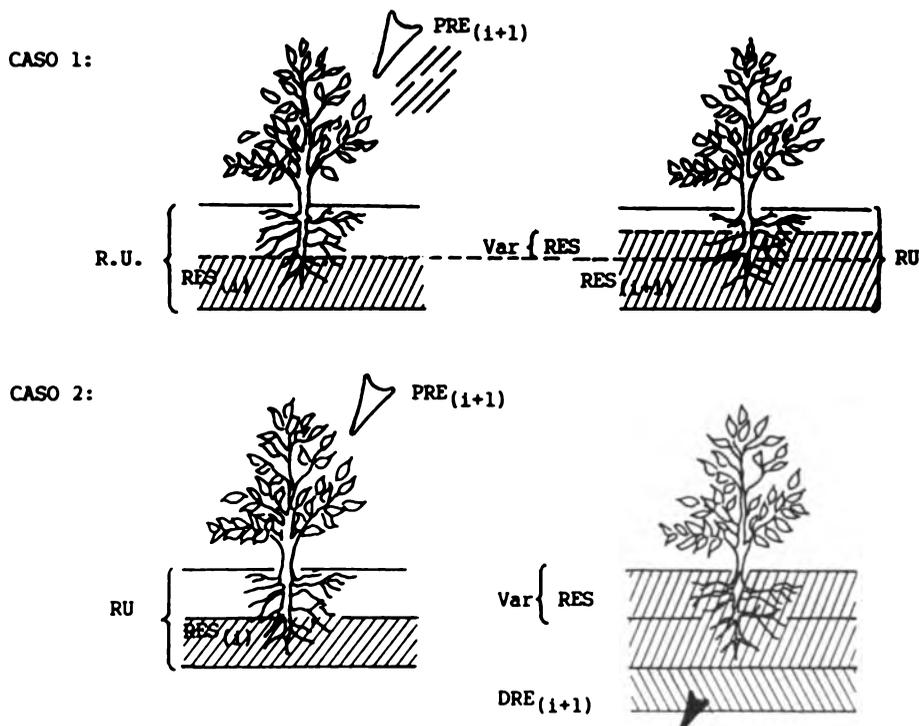


Figura 2. Esquema para la estimación de la reserva útil (RU) y el drenaje (DRE)

c. Estimación del ESCurrimiento

El agua perdida por escurrimiento no puede ser aprovechada por los cultivos. Entonces es necesario estimarla, para descartarla de la cantidad de agua posiblemente utilizable por los cultivos.

Para estimar el escurrimiento de agua superficial, disponemos de pocos elementos cuantificados, ya que la modelización del fenómeno presenta dificultades serias. Sin embargo, algunos criterios pueden orientar en la cuantificación del fenómeno:

- Entre más intensas son las lluvias, más escurrimiento
- Entre más pendiente, más escurrimiento
- Entre más densa es la cobertura vegetal, menos fuerte es el escurrimiento.

El modelo que presentamos utiliza para la modelización del escurrimiento un sub-modelo lineal de este tipo:

- Si el valor de la precipitación diaria es menor que una cantidad "P", se considera que el escurrimiento es nulo.
- Si el valor es mayor que "P", se considera que una fracción " α " del agua que esta por encima del umbral "P" se pierde por escurrimiento.

Los niveles de los valores α y P son parámetros que se ajustan en función de características de suelo, cultivo y de pendiente.

Un esquema que ilustra la estimación del ESCurrimiento se presenta en la figura 3.

EL ESCURRIMIENTO

P: umbral de escurrimiento

α : coeficiente de escurrimiento

Si $P_i < P \Rightarrow Esc = 0$

Si $P_i \geq P \Rightarrow Esc = \alpha (P_i - P)$

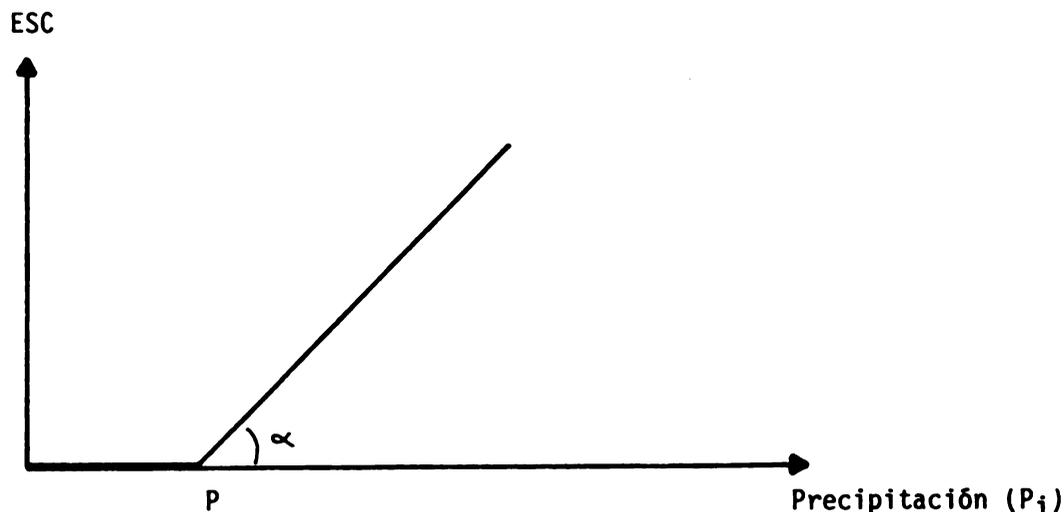


Figura 3. Modelo de Escurrimiento

d. Estimación de la E.T.R.

Para este término, que es el más importante, se procede por etapas. La primera etapa consiste en estimar las necesidades hídricas del cultivo (ETM), la segunda consiste en estimar la oferta de agua por parte del suelo, y la síntesis se hace por último.

1) Cálculo de la evapotranspiración máxima ETM :

La ETM representa la evapotranspiración máxima que puede tener el cultivo, en caso de presentarse en perfectas condiciones de desarrollo, y sin limitación alguna en su alimentación hídrica. Por lo tanto, este valor depende de la ETP, o demanda climática (la cual depende únicamente del clima del lugar considerado), y del estado de la planta a través de su coeficiente de cultivo (se entiende por sí solo que un cultivo joven y poco desarrollado tendrá necesidades hídricas menores que un cultivo más desarrollado). Este coeficiente de cultivo, que llamaremos K_c , ilustra precisamente esta proporción de la demanda climática potencial que necesita el cultivo durante una fase determinada de su ciclo:

$$ETM = (ETP) \times K_c$$

Los valores de los coeficientes de cultivo se encuentran, por cultivo, en la bibliografía. (Doorenbos y Pruitt, 1976).

2) Cálculo de la ETR :

En un primer tiempo, se es necesario determinar el contenido relativo del agua del suelo (HR), que es el cociente entre la REServa y la RU. Por lo tanto, siempre es menor o igual a 1, ya que por definición la RU es el máximo que puede alcanzar la REServa. El término HR es entonces un indicador del llenado relativo del suelo en agua disponible. Entre menor será, más dificultades tendrá la planta para extraer agua del suelo.

La ETR se calcula como una función de dos variables: La ETM por un lado, y la Humedad Relativa (HR) por otro lado: Concretamente, se entiende bien que entre más seco está el suelo con relación a lo que puede almacenar de agua, menos agua extrae el cultivo, y menos satisface sus necesidades hídricas. En cambio, si la reserva de agua se acerca a la RU, la planta está en capacidad de evapotranspirar (de consumir) integralmente sus necesidades (ETM). El modelo de FOREST estima la relación ETR/ETM a través de una función polinomial del tercer grado, la cual ha sido calibrada en evapotranspirómetros bajo diferentes condiciones de déficit hídrico por EAGELMAN.

3) Recálculo de la REServa

La REServa se recalcula por diferencia entre las PREcipitaciones (o sino el RIEgo) y los términos precedentes, (ETR, DRE, ESC) estimados previamente por medio de los sub-modelos descritos anteriormente.

Aquí se cierra la ecuación general del Balance Hídrico, y con ella el estudio de los diferentes términos que la componen.

Las variables de entrada fundamentales para realizar estas simulaciones son las precipitaciones. Todos los otros parámetros se pueden determinar de una vez por todas (ETP, coeficientes de cultivo, Reserva Util, parámetros de escurrimiento).

2.2 LIMITACIONES DE CONSTRUCCION

Este modelo presenta, como cualquier otro, limitaciones que llamamos de construcción: derivan de la lógica de cálculo de los términos del balance. El eliminar estas limitaciones introduciría complicaciones que dificultarían el uso mismo del modelo. Sin embargo, el conocer estas limitaciones permite usar correctamente el modelo con las precauciones necesarias.

Al contrario, las deficiencias de ajuste a la realidad, que se consideran en el capítulo siguiente son debilidades de funcionamiento en las condiciones locales de utilización, y es necesario tratar de corregirlas.

a. El sub-modelo de escurrimiento

Se presentó este sub-modelo en el apartado anterior. Es muy sencillo, hasta un poco simplificador. Sin embargo, una correcta estimación de la escurrimiento necesita una escala de trabajo diferente. Por ejemplo, no se puede pretender mejorar mucho las estimaciones si no se tienen registros de las intensidades horarias de las precipitaciones, ni registros de los estados de superficie del suelo. Por otro lado, las heterogeneidades de pendientes dentro de una parcela son importantes, y el tomarlas en cuenta en forma integrada impondría un importante trabajo. En fin, todos los términos (intensidad de las lluvias, pendiente, textura del suelo, humedad del mismo, cobertura vegetal, estado de superficie del suelo, etc.) interactúan entre ellos, y el intentar tomar en cuenta en forma interactiva todos estos factores introduciría tantas complicaciones que es seguramente más razonable, para los propósitos que nos interesan, contar con un sub-modelo muy sencillo, del cual se conocen las limitaciones.

b. El paso de tiempo

El paso de tiempo (5 ó 10 días) representa una limitación, por lo menos cuando se intenta realizar adecuaciones entre el balance hídrico medido en una parcela y la simulación. En efecto, hay fenómenos de resecamiento o de drenaje que ocurren muy rápidamente.

Sin embargo, el considerar un paso de tiempo inferior supone también que los otros parámetros estén acorde con este paso de tiempo, lo cual significa que, también, hubiera que presentar entre los parámetros de entrada, la ETP y los coeficientes de cultivo a un nivel diario. La mayoría de las aplicaciones de las simulaciones de balance hídrico no se procesan con este paso de tiempo.

c. Relación balance hídrico con otras funciones biológicas

No se puede considerar objetivamente que el aprovechamiento del agua por los cultivos es independiente de otros factores, como su alimentación mineral, la densidad de plantas, el estado fitosanitario. El no considerar estos otros parámetros constituye una limitación evidente. Sin embargo, el considerarlos, y de nuevo, sus interacciones, procede de tipos de modelos diferentes, como los modelos de crecimiento y desarrollo, que tienen métodos y objetivos diferentes. En este tipo de modelo (tipo CERES), el balance hídrico es solamente una de las funciones que condicionan el crecimiento y el desarrollo de las plantas, y esta función interactúa con las otras funciones fisiológicas.

En resumen, nos damos cuenta que las limitaciones de construcción provienen de un arbitraje del autor del modelo, quien estima hasta que grado de complejidad quiere ir en la formalización de su modelo. Para realizar este arbitraje, el autor tiene que considerar dos aspectos en relación con los nuevos parámetros que serán necesarios para afinar el modelo:

- *La importancia relativa de la precisión adicional que aporta este afinamiento.*
- *La facilidad de obtención de los nuevos parámetros.*

2.3 AJUSTE A LA REALIDAD

Las limitaciones que se acaban de presentar son estructurales, y resultan de la decisión del autor del modelo, de hasta donde está dispuesto a simplificar la realidad. Sin embargo, existen desajustes que, sin cuestionar la arquitectura global del modelo, pueden ser limitados a dentro del modelo propuesto. Estos desajustes se pueden reducir con una calibración adecuada en función de las condiciones que prevalecen en el lugar donde se va a utilizar el modelo.

La calibración se efectúa confrontando las mediciones experimentales con los resultados paralelos de la simulación. Se procede a una reflexión sobre las causas de las diferencias entre lo observado y lo simulado, la cual puede conducir a una crítica de la estructura del modelo, a un cuestionamiento de la secuencia lógica de ecuaciones describiendo el fenómeno simulado, o sino a un reajuste argumentado de los parámetros de las ecuaciones mismas.

Tomando en cuenta, por lo que a Nicaragua se refiere, la particularidad de los suelos volcánicos, el Programa Nacional de Agrometeorología consideró bastante arriesgado lanzarse sobre tal o cual modelo sin haber previamente verificado como se ajustaba a la realidad bajo condiciones de cultivos.

Se realizaron varios experimentos de calibración y validación de este modelo de balance hídrico, en condiciones experimentales y en condiciones de producción comercial. Presentamos a continuación los principales desajustes que se identificaron en dichos experimentos.

a. Estimación de la evaporación del suelo desnudo

El primer desajuste que se puso en evidencia tiene que ver con la sub-estimación de la evaporación en la superficie del suelo por parte del modelo (más precisamente del pequeño submodelo que calcula esta evaporación, durante la fase anterior a la siembra del cultivo). Los efectos de esta sub-estimación se hacen sentir principalmente al inicio del desarrollo del cultivo y en los períodos anteriores a la siembra. Se puede corregir parcialmente esta deficiencia aumentando el valor de los primeros coeficientes de cultivo. Sin embargo, cabe destacar que:

- Sería necesario rectificar, afinar o adaptar el modelo de evaporación del suelo desnudo.
- En la práctica, este desajuste tiene poca importancia, por cuanto no cambian los resultados del balance durante las fases sensibles del desarrollo del cultivo.

b. Estimación de los ascensos capilares

En los suelos con carácter volcánico que existen en Centro-América, al contrario de los suelos arenosos con los cuales se elaboró este modelo, los ascensos capilares pueden llegar a ser cuantiosos. Por ello, podría ser importante tomarlos en cuenta. Sin embargo, su determinación requiere de datos de humedad y de tensión del agua en el suelo, además de una determinación muy precisa de las características hidrodinámicas del suelo. Estos parámetros difícilmente se pueden determinar de otra manera que experimentalmente. Por todo ello, en el estado actual de los conocimientos, es difícil tomar en cuenta los ascensos capilares en el modelo, fuera de los lugares puntuales donde han sido medidos y modelados.

c. Estimación de la reserva

En Africa del Oeste, al inicio de la estación lluviosa, las precipitaciones suelen presentarse paulatinamente. Las raíces de los cultivos frecuentemente siguen el frente de humectación en el suelo (o sea, la profundidad hasta donde llegó el agua en el suelo). Luego, se consideró en el modelo que la reserva en agua efectivamente al alcance de las raíces del cultivo es la parte de la reserva útil total que se ha llenado en cualquier momento del ciclo. El modelo podría incorporar, un modelo de crecimiento de las raíces con el tiempo.

En las condiciones climáticas de Centro-América, ocurren con frecuencia lluvias intensas al inicio del invierno (con los tradicionales vendavales). El modelo que se utiliza en estas condiciones considera que desde el inicio de su ciclo, el cultivo puede aprovechar grandes cantidades de agua. Lleva a discrepancias como en el año 1989 durante el cual se registraron en el campo déficits hídricos importantes en las fases de crecimiento y de pre-floración del maíz. Sin embargo, las simulaciones realizadas sobre este año arrojaban resultados satisfactorios, ya que precipitaciones intensas cayeron al inicio del ciclo. En este caso, el modelo resultó poco adaptado a la realidad.

Sin embargo, estas condiciones límites (precipitaciones intensas al inicio del ciclo y escasez de agua en fases inmediatamente posteriores) no se presentan a menudo, lo que autoriza aceptar como válido el modelo cuando se analizan series relativamente largas de años.

2.4 COMPARACION CON OTROS MODELOS

a. El modelo de Thornthwaite

El modelo que más referencias tiene en el área Centroamericana es el de Thornthwaite, el cual ha sido y sigue siendo utilizado ampliamente para trabajos de zonificación. A continuación se propone una breve descripción del funcionamiento del modelo mencionado:

Principio general:

El Modelo de Thornthwaite funciona según un ritmo mensual, con:

- Una reserva máxima (Reserva útil) de agua en el suelo (RU)
- Una demanda evaporativa (ETP_i)
- Una reserva de agua del suelo mensual (R_i)
- Precipitaciones mensuales (P_i)

La ETP se calcula por la fórmula del mismo autor, que toma únicamente en cuenta la temperatura media mensual.

A las precipitaciones mensuales se resta la ETP del mes (ETP_i).

- Si la diferencia ($P_i - ETP_i$) es positiva, se considera que:

$$ETR_i = ETP_i$$

A partir de allí, se suma esta diferencia con la reserva de agua del suelo al salir del mes anterior. Si esta suma es mayor que la reserva útil del suelo, se considera perdida (por drenaje) la fracción de agua que pasa de la RU. En este caso, tenemos que:

$$R_i = RU$$

Si esta suma es menor que la RU, entonces se considera como la reserva de agua del suelo al entrar al mes siguiente.

$$R_i = R_{i-1} + P_i - ETP_i$$

- Si la diferencia ($P_i - ETP_i$) es negativa (lo cual corresponde a un déficit climático), existen dos posibilidades:

1) La reserva de agua al salir del mes anterior, es suficiente para suplir el agua necesaria para cubrir este déficit. En este caso:

$$ETR_i = ETP_i$$

y la reserva de agua al salir del mes es igual a la reserva anterior menos el déficit climático del mes considerado.

$$R_i = R_{i-1} + P_i - ETP_i$$

2) La reserva de agua no es suficiente para suplir este déficit. En este caso, la totalidad de la reserva de agua del mes anterior es movilizada para cubrir la demanda climática, aunque sea parcialmente. En este caso, tenemos que:

$$ETR_i = P_i - ETP_i + R_{i-1}$$

$$R_i = 0$$

El modelo de Thornthwaite, evidentemente es mucho más sencillo que el que acabamos de presentar:

- Ocupa muy pocos parámetros meteorológicos (temperatura y precipitaciones) y de suelos (Reserva Util)
- Los cálculos son muy sencillos.

En cambio, ignora muchos factores de la realidad bioclimática, y no se puede esperar que este modelo arroje resultados finos. Puede ser utilizado para contrastar situaciones o zonas, pero de ninguna manera para solucionar un problema agronómico, a nivel de una finca o de una parcela agrícola.

b. El sub-modelo de balance hídrico del modelo CERES

Al otro extremo, se presenta en forma muy resumida el componente hídrico del modelo CERES.

Los modelos de la familia CERES son modelos que simulan a un ritmo diario el crecimiento y el desarrollo de las plantas, tomando en cuenta una serie de factores en forma de submodelos articulados entre ellos (alimentación hídrica, alimentación mineral, fotosíntesis, etc.). Estos modelos conducen a una estimación del rendimiento.

En cuanto al submodelo hídrico, he aquí una breve descripción del funcionamiento de cada uno de los términos del balance hídrico:

- El término ESCurrimiento se estima por separado, según las características generales de la categoría de suelo sobre el cual se efectúa la simulación y la intensidad de las precipitaciones (diarias).
- El término DREnaje se estima con base en una representación del perfil de suelo en varias capas superpuestas, donde el agua percola desde una capa en la otra, teniendo cada capa características específicas (Capacidad a saturación, capacidad de campo, retención de agua al punto de marchitez permanente) particulares del suelo en función de grandes categorías predefinidas.
- En cuanto a la ETR, el submodelo procesa por separado el componente de evaporación del suelo y de transpiración de la planta.

El término de evaporación del suelo se calcula con la humedad de la capa superficial del suelo, y a la fracción de la radiación neta que llega al suelo.

El término transpiración se calcula a partir de:

- El balance de energía radiativa, estimado a partir de la temperatura, la humedad, y la radiación solar, con una fórmula climática derivada de la fórmula de Penman.
- El índice foliar del cultivo
- El agua disponible en el suelo en cada una de las capas de suelo anteriormente mencionadas.
- La densidad relativa de raíces en cada una de estas capas.

Al efectuarse cada día la simulación, se estiman entonces cada uno de los términos del balance hídrico, y se tiene como salida, a nivel diario una "fotografía" del nuevo estado de la planta y del suelo.

Evidentemente, este modelo es más fino que el que detallamos, y, asumiendo una etapa de calibración previa, se puede esperar de este tipo de modelo un mejor ajuste entre simulación y realidad que con los otros modelos más rústicos. Sin embargo, requiere para trabajar de una gran cantidad de parámetros difíciles de medir y específicos del área de ensayo, con posibilidades de regionalización reducidas a primera vista.

c. Síntesis

En síntesis, se puede decir que no existen modelos de balance hídrico que tengan aplicaciones universales. Si son muy refinados, se reduce su espacio de posibles aplicaciones. Si son muy gruesos, se limita la precisión de sus resultados. En lo que a los ejemplos presentados se refiere, se propone entonces un planteamiento estableciendo correspondencias en términos de escalas entre modelos y sus aplicaciones, como se representa en el esquema siguiente (figura 4):

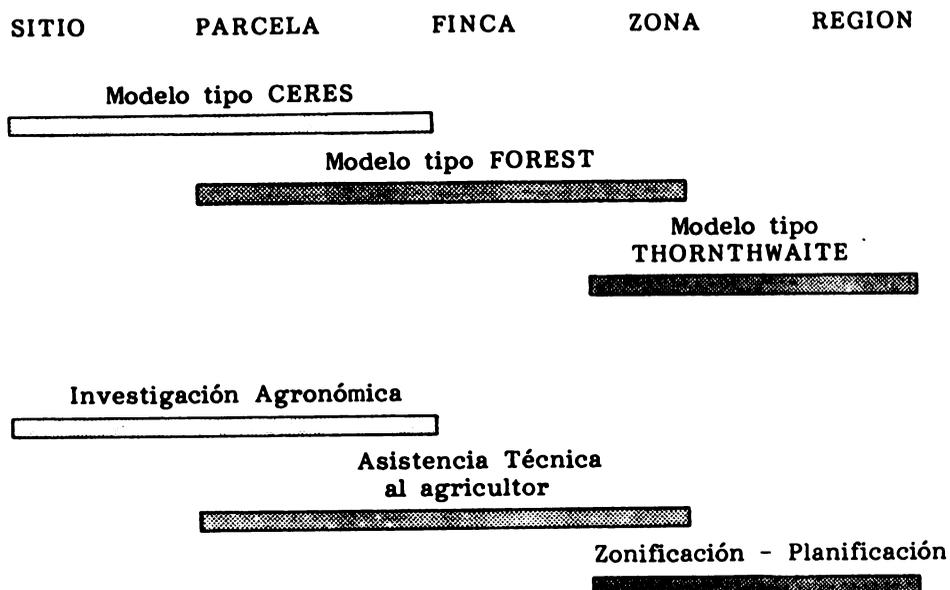


Figura 4. Correspondencia entre modelos, escalas y usos.

El diagrama anterior no tiene carácter absoluto. Existe traslape entre tipos de modelos y tipos de aplicaciones. Incluso, existen perspectivas en cuanto a la posibilidad, a través de los Sistemas de Información Geográfica, de espacializar, es decir de aplicar en un espacio más amplio modelos supuestamente finos. Sin embargo, esta dinámica sólo funcionaría en un sentido: de la misma manera que es un error de lógica ampliar un mapa al 1/500,000 para crear varios mapas al 1/50,000, sería un error utilizar el modelo de Thornthwaite para proponer un plan de manejo de riego de un cultivo (dosis y frecuencias) para la parcela de un agricultor.

3 APLICACIONES DE LOS MODELOS DE BALANCE HIDRICO: DETERMINACION DE FECHAS DE SIEMBRA Y VARIEDADES OPTIMAS

Las aplicaciones de los modelos de balance hídrico son muchas y muy diversas. Haciendo un listado (no exhaustivo), se podría proponer lo siguiente:

- *Manejo de riego (dosis y frecuencias)*
- *Diagnóstico hídrico de un cultivo establecido*
- *Predicción de rendimiento*
- *Determinación de fechas de siembra y variedades óptimas*
- *Estimación cuantitativa de la lixiviación*
- *Estimación de erosión hídrica*
- *Seguimiento de la campaña agrícola*
- *Zonificación agroecológica*

Los dos últimos puntos mencionados son temas de dos publicaciones del Programa Regional de Agrometeorología.

En este capítulo no se detallarán todas estas aplicaciones. En cambio, a través de un ejemplo elaborado por el Programa Nacional de Agrometeorología de Nicaragua, sobre la región seca del país, se presentarán paso a paso todas las etapas metodológicas que conducen a la elaboración de recomendaciones de fechas de siembra óptimas en la región considerada, a partir del modelo de simulación de balance hídrico de Forest.

Este ejemplo es bastante completo. Incluye los principios metodológicos necesarios para la realización de otras investigaciones con este mismo modelo, así como las necesarias reflexiones críticas que el usar este (u otro) modelo debe inspirar.

3.1 PROBLEMATICA GENERAL

LAS FECHAS DE SIEMBRA

En todo el trópico, la determinación de las fechas de siembra representa un elemento clave de la producción de secano, por las grandes irregularidades que presentan las lluvias de un año a otro. Sin embargo, aunque aleatorias, las lluvias no están distribuidas al azar en un área determinada, sino que siguen leyes de tipo estadísticas, o probabilísticas, que son características del lugar.

Por lo tanto, sembrando a tal o cual fecha, se tiene una probabilidad a priori más o menos elevada de tener una buena cosecha. El presente trabajo es una ilustración de lo que la agrometeorología puede aportar en cuanto a la cuantificación de estas probabilidades de tal manera que se determinen fechas de siembra, que maximicen las esperanzas de rendimiento y que minimicen los riesgos de mala cosecha.

METODOLOGIAS

Para determinar las fechas de siembra óptimas en una zona, existen varias metodologías, más o menos sofisticadas, de las cuales dos se presentan a continuación:

a. La experiencia campesina

A todo lo largo de su vida, el agricultor experimenta, observa y analiza diferentes combinaciones variedades/fechas de siembra en las condiciones locales de su finca. Sin lugar a duda, en las condiciones específicas de su finca, es él que más elementos posee para definir una estrategia óptima en cuanto a la fecha de siembra. Además, integra otros factores de tipo no-naturales como preparación de suelos, disponibilidad de maquinaria, disponibilidad de mano de obra. Es muy probable la estrategia que escoja en estas condiciones resulte.

Sin embargo, esta estrategia no siempre es la mejor, por diversos motivos:

- Todos los agricultores no tienen la misma experiencia ni el mismo sentido de la observación. Además, la experiencia campesina se aplica únicamente a las situaciones que él conoce (su finca, las variedades a las cuales está acostumbrado). En el caso de la introducción de variedades 'tecnificadas', esta metodología puede conducir a errores importantes.
- Si bien es cierto, las estrategias definidas por el agricultor toman en cuenta un clima esperado, no es menos cierto que la representación que el mismo agricultor se hace del clima se fundamenta únicamente en lo que recuerda de los últimos cuatro o cinco años. Tal enfoque se justifica en su representación por la idea que el clima cambia, y que por lo tanto, los últimos años son más representativos de la tendencia climática conyuntural que una serie climática completa que él mismo haya podido observar. Evidentemente, este enfoque introduce un sesgo en su propio sistema de observación, ya que descarta de hecho años anteriores que podrían tener el mismo peso que los últimos años en su sistema de observación.
- La estrategia que un agricultor declara tener un año considerado también se determina en función de lo que él pronostica a mediano plazo para el clima del año. Este pronóstico descansa en otros indicadores como la fenología silvestre, comportamiento de animales, refranes y conocimientos heredados de los ancianos.

Además, aún en el caso en que la estrategia escogida por un campesino es la mejor posible, resulta difícil proponer un sistema de determinación de las fechas de siembra que descansa sobre esta metodología. Son previamente necesarios la reinterpretación, el análisis y la integración de las estrategias campesinas en función de diversos factores (climáticos, de suelo, de condiciones técnico-económicas, etc.), para definir la estrategia mayoritaria de los agricultores en estas condiciones.

En la práctica, representaría un trabajo muy importante levantar una encuesta sobre el tema, que acopie suficiente información como para lograr esta tipología de una manera operacional (problemas de muestreo, de procesamiento de informaciones cualitativas, etc.).

Sin negar entonces el interés que presentaría el estudio de esta problemática, todo lo contrario, hacemos énfasis sobre las dificultades que presenta un estudio científico con este enfoque.

b. Simulación de balance hídrico

Principio del método.

Este método es hasta cierto punto opuesto al anteriormente descrito. Consiste en simular en forma puramente teórica el desarrollo de cultivos cuyas necesidades y características son conocidas, sobre los años climáticos anteriores de los cuales se poseen registros meteorológicos. Para cada año estudiado, uno tiene los resultados (simulados) de lo que hubiera dado una variedad x, sembrada a una fecha determinada en cuanto a la satisfacción de sus necesidades hídricas. En otros términos, con este método, uno está regenerando la memoria de un observador que hubiera sembrado sucesivamente todos los años a la misma fecha la misma variedad.

Posteriormente se procesan los resultados de las simulaciones en términos frecuenciales para varias fechas de siembra, y la fecha seleccionada es la que proporciona la mayor frecuencia de éxito en cuanto al rendimiento, contabilizando todos los años sobre los cuales se realizó la simulación.

Crítica del método

Independientemente del problema de saber si el modelo de balance hídrico está o no está bien ajustado al funcionamiento hídrico del suelo y de la planta, las críticas que se pueden hacer al método presentado son múltiples:

- Si bien es cierto, la satisfacción de las necesidades hídricas es un factor fundamental de explicación del rendimiento, no puede pretender explicarlo todo. También deberían de entrar en el modelo criterios como el manejo del cultivo, los ataques de plagas y enfermedades, características ambientales etc. Por lo tanto, es algo arriesgado asociar en forma directa un cierto nivel de satisfacción y un rendimiento. Para mejorar entonces la calidad de la estimación del rendimiento obtenido, es necesario calibrar la función de rendimiento, es decir, medir sobre algunas parcelas en condiciones reales el rendimiento de la variedad analizada en relación con diferentes niveles de déficit hídrico.
- Más generalmente, los modelos de balance hídrico no toman en cuenta el sistema de cultivo, y mucho menos el sistema de producción de la finca considerada. La estrategia en términos de fecha de siembra también considera factores como la sucesión de cultivos en su parcela, la disponibilidad de maquinaria, los requerimientos en trabajo de otras actividades agropecuarias, todos factores que no puede pretender reflejar el único balance hídrico.

Síntesis

Los métodos presentados son, en la realidad, complementarios. Incluso, si se propone usar únicamente el método de simulaciones de balance hídrico, es fuertemente aconsejable realizar en forma previa una encuesta con el fin de conocer aunque sea en forma gruesa las prácticas de los agricultores en una zona determinada, y por otro lado, las limitaciones de todo tipo que rodean al agricultor.

3.2 DETERMINACION DE FECHAS DE SIEMBRA/VARIEDADES DE MAIZ OPTIMAS EN LA REGION DE ESTELI, NICARAGUA

a. Problemática general

La región de Estelí se caracteriza como una de las más secas de Nicaragua, con un promedio de precipitación anual de 800 mm repartidos de manera desuniforme desde el mes de mayo hasta principios de noviembre. La mayoría del área agrícola se encuentra en manos de pequeños y medianos agricultores y de cooperativas, con acceso limitado a la maquinaria ya sea por condiciones adversas de topografía, o bien por motivos técnico-económicos.

Uno de los principales sistemas de cultivo en la región es la sucesión maíz/frijol. Un análisis frecuencial sencillo de las precipitaciones muestra que en esta región, el maíz es en la mayoría de los casos deficitario en cuanto a su alimentación hídrica: las precipitaciones medias acumuladas durante el ciclo del cultivo no logran cubrir las necesidades en agua del maíz, aún antes de tomar en cuenta el problema de la repartición de estas precipitaciones. En cambio, las necesidades hídricas del frijol están satisfechas con mayor frecuencia.

Además, la región se caracteriza a nivel climático por la existencia de un período canicular muy marcado (julio y principios de agosto) el cual puede ser fatal para los cultivos de maíz en caso que se manifieste de una manera intensa.

La problemática de la fecha de siembra del maíz puede resumirse de la manera siguiente:

¿Cuál es la combinación variedad/fecha de siembra que da la mejor esperanza de rendimiento y que minimiza los riesgos de pérdida de cosecha?

Para simplificar el problema, se supone que los agricultores sólo disponen de dos variedades de maíz:

- variedad precóz NB 100, de 90 días de ciclo, florece a los 40 días, y con esperanza de rendimiento en parcelas comerciales y condiciones óptimas de 45 quintales por manzana (3 toneladas por hectárea).
- variedad intermedia NB 6, de 110 días de ciclo, florece a los 55 días y con esperanza de rendimiento en condiciones óptimas de 70 quintales por manzana (5 toneladas por hectárea).

Se dispone de los elementos siguientes:

- Datos diarios de precipitación desde 1954
- Datos de ETP por todo el año por período de diez días
- Coeficientes de cultivo K_c de las dos variedades
- Referencias de reserva útil de los suelos.

Además, imponemos la limitación de no sembrar el maíz NB6 después del primero de julio (y la variedad NB100 después del 20 de julio), ya que esta práctica impediría la siembra a tiempo del frijol en relevo del maíz. Consideramos también otra limitación en cuanto a la preparación de suelo, admitiendo que no se puede preparar el suelo ni sembrar antes que haya un mínimo de 50 milímetros de agua almacenada en el suelo.

Tenemos entonces un período de siembra posible de dos meses, durante el cual escoger la o las mejores combinaciones posibles.

b. Metodología del análisis

Para resolver el problema, se procede en forma de simulaciones de balance hídrico, sobre todos los años disponibles, haciendo variar los factores "fecha de siembra", y "variedad". Después de haber realizado todas las simulaciones con todas las combinaciones posibles de estos dos factores, se selecciona la combinación que proporciona los mejores resultados, asumiendo entonces que esta combinación es la que mejores esperanzas le da al agricultor.

La simulación se efectúa sobre tantos años como los que contiene el archivo de datos pluviométricos. Las fechas de siembra varían de diez días en diez días.

Los resultados son interpretados usando como criterio la relación ETR/ETM, es decir la relación entre el agua efectivamente consumida y el agua que hubiera consumido el cultivo en caso de haber estado durante todo su ciclo en condiciones óptimas de alimentación hídrica.

Desglosamos este indicador (ETR/ETM) en función de la fase fenológica en la cual se encuentra el cultivo: germinación-crecimiento-floración-llenado del grano. En este punto del análisis, es importante destacar la importancia de este desglose. Cada cultivo tiene sus fases llamadas críticas (floración), durante las cuales un déficit de alimentación hídrica marcado provoca efectos depresivos importantes sobre los rendimientos, mientras que otras fases resultan menos sensibles (crecimiento).

Se probaron dos métodos de procesamiento de los resultados. A cada simulación, se le asigna una apreciación relacionada con las posibilidades de cosecha (buena, regular o mala), según los criterios siguientes:

Primera forma:

- Se analiza el criterio ETR/ETM durante la floración. Si este criterio es mayor que 0.8, se considera que la cosecha es buena. Si es comprendido entre 0.5 y 0.8, se considera como regular. Si es menor que 0.5, entonces es considerada como mala.

- Después de esta preclasificación, se verifica simulación por simulación que el cultivo no ha sufrido durante las otras fases fenológicas, menos sensibles a un estrés hídrico, algún estrés particular. Si se da el caso, se baja de una categoría la clasificación inicial.

Por ejemplo, si estudian los resultados de la simulación del maíz NB6 sembrado en la última década del año 1974:

| 1974 | Germinación | Crecimiento | Floración | LLenado | Ciclo |
|---------|-------------|-------------|-----------|---------|-------|
| ETR/ETM | 1.00 | 0.89 | 0.25 | 0.51 | 0.61 |

Se considerará una cosecha mala para esta simulación.

En cambio, si se analizan los resultados de simulación del año 1975, con las mismas hipótesis de trabajo:

| 1975 | Germinación | Crecimiento | Floración | LLenado | Ciclo |
|---------|-------------|-------------|-----------|---------|-------|
| ETR/ETM | 0.99 | 0.63 | 0.95 | 0.97 | 0.8 |

Según los mismos criterios, se considerará una cosecha buena.

Analizando el año 1978, se encuentran los resultados intermedios siguientes:

| 1978 | Germinación | Crecimiento | Floración | LLenado | Ciclo |
|---------|-------------|-------------|-----------|---------|-------|
| ETR/ETM | 1.00 | 0.77 | 0.54 | 0.82 | 0.74 |

Se considera una cosecha regular.

Segunda forma

- Se multiplica el valor de ETR/ETM durante la floración por el valor promedio de ETR/ETM durante el ciclo completo, formándose así el indicador sintético llamado IRESP.
- Si IRESP es mayor que 0.8 se considera como buena la cosecha. Si IRESP está comprendido entre 0.4 y 0.8, se considera regular, y si IRESP es menor que 0.4, la cosecha se considera mala.

Se puede verificar sobre los ejemplos que arroja los mismos resultados que trabajando con la regla de decisión anterior.

Esta última forma de procesar los resultados presenta la ventaja que es fácilmente computarizable, y que, según experimentos realizados en varios lugares de Africa representa relativamente bien la respuesta al agua del maíz (Reyniers, 1989). Incluso, el mismo autor propone para la estimación cuantitativa del rendimiento una relación lineal empírica sencilla del tipo:

$$RDT = RDT_{potencial} \times IRESP$$

Esta relación no ha sido objeto de estudios específicos en Centroamérica, y por lo tanto no se recomienda su aplicación sin previa verificación. Sin embargo, de poder aplicarse, sería de un uso muy cómodo.

c. Resultados

Se han realizado entonces las siguientes simulaciones:

- 29 años de registro de Estelí (de 1954 a 1985, habiéndose descartado los años 1967, 1976 y 1979 por no presentar registros de precipitaciones)
- Cinco fechas de siembra (del 10 de mayo al 20 de junio, cada 10 días), que corresponden con las fechas de siembra corrientes del ciclo llamado localmente "de Primera" así también con las siembras llamadas "de Postrerón".
- Dos variedades: NB 100, variedad precóz de 90 días
NB 6, variedad intermedia de 110 días
- Un solo tipo de suelo: Plano, profundo, con 120 mm de reserva útil en el horizonte explorado por las raíces, y sin escurrimiento de aguas superficiales.

Suele destacar que, los suelos predominantes en la región de Estelí son de pendiente moderada a fuerte, y que sus capacidades de retención de agua son muy variables. En cambio, en los valles, como el de Estelí, predominan los suelos pesados con fuerte retención de agua, posibilidades de mecanización etc. Si quisieramos elaborar recomendaciones válidas para las situaciones de laderas, tendríamos que considerar otras hipótesis de Reserva útil (80 mm, por ejemplo) y de escurrimiento.

Entre todo, tenemos entonces $29 \times 5 \times 2 = 290$ simulaciones que analizar.



A continuación, y como ejemplo, se presenta un juego de 29 simulaciones realizadas con los siguientes parámetros:

Estación: ESTELI

Fecha de siembra: A partir del 20 de mayo

Cultivo : MAIZ NB-6 (110 días)

Reserva Util (RU):120 mm

| AÑO | 30 días germin ETR/ETM | 60 días crecim ETR/ETM | 90 días floracio ETR/ETM | 110 días llenado ETR/ETM | ciclo ETR/ETM | IRESP. |
|------|------------------------------|------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|--------|
| 1954 | 1.00 | .95 | .64 | .97 | .850 | .54 |
| 1955 | 1.00 | .96 | .78 | .96 | .900 | .70 |
| 1956 | .98 | .92 | .18 | .25 | .530 | .09 |
| 1957 | 1.00 | .82 | .44 | .13 | .570 | .25 |
| 1958 | 1.00 | .95 | .38 | .52 | .670 | .25 |
| 1959 | 1.00 | .87 | .35 | .23 | .580 | .20 |
| 1960 | 1.00 | .94 | .68 | .90 | .850 | .58 |
| 1961 | .99 | .83 | .61 | .76 | .760 | .46 |
| 1962 | 1.00 | .93 | .54 | .14 | .650 | .35 |
| 1963 | .98 | .31 | .79 | .96 | .690 | .55 |
| 1964 | 1.00 | .93 | .44 | .95 | .770 | .34 |
| 1965 | 1.00 | .75 | .20 | .25 | .490 | .10 |
| 1966 | 1.00 | .97 | .75 | .44 | .790 | .59 |
| 1968 | 1.00 | .93 | .30 | .51 | .630 | .19 |
| 1969 | 1.00 | .92 | .82 | .96 | .900 | .74 |
| 1970 | 1.00 | .96 | .87 | .94 | .930 | .81 |
| 1971 | 1.00 | .80 | .13 | .92 | .610 | .08 |
| 1972 | 1.00 | .83 | .17 | .06 | .470 | .08 |
| 1973 | 1.00 | .91 | .92 | .96 | .940 | .86 |
| 1974 | 1.00 | .93 | .41 | .60 | .700 | .29 |
| 1975 | .99 | .64 | .95 | .97 | .860 | .82 |
| 1977 | 1.00 | .84 | .19 | .38 | .530 | .10 |
| 1978 | 1.00 | .91 | .74 | .71 | .820 | .61 |
| 1980 | 1.00 | .92 | .83 | .74 | .860 | .71 |
| 1981 | 1.00 | .94 | .50 | .96 | .790 | .40 |
| 1982 | 1.00 | .85 | .21 | .09 | .490 | .10 |
| 1983 | 1.00 | .94 | .72 | .74 | .830 | .60 |
| 1984 | 1.00 | .89 | .73 | .96 | .860 | .63 |
| 1985 | 1.00 | .89 | .37 | .80 | .700 | .26 |

La fase siguiente es el análisis de los resultados así caracterizados, en términos frecuenciales.

d. Análisis de los resultados

A continuación, se presentan los resultados de los análisis realizados, para las dos variedades.

Cuadro 1, variedad NB100

Fechas de siembra

| | 10/05 | 20/05 | 01/06 | 10/06 | 26/06 |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Buena cosecha | 15 | 12 | 10 | 8 | 11 |
| Regular cosecha | 9 | 8 | 9 | 8 | 8 |
| Mala cosecha | 5 | 9 | 10 | 13 | 10 |
| TOTAL | 29 | 29 | 29 | 29 | 29 |

Cuadro 2, variedad NB6

Fechas de siembra

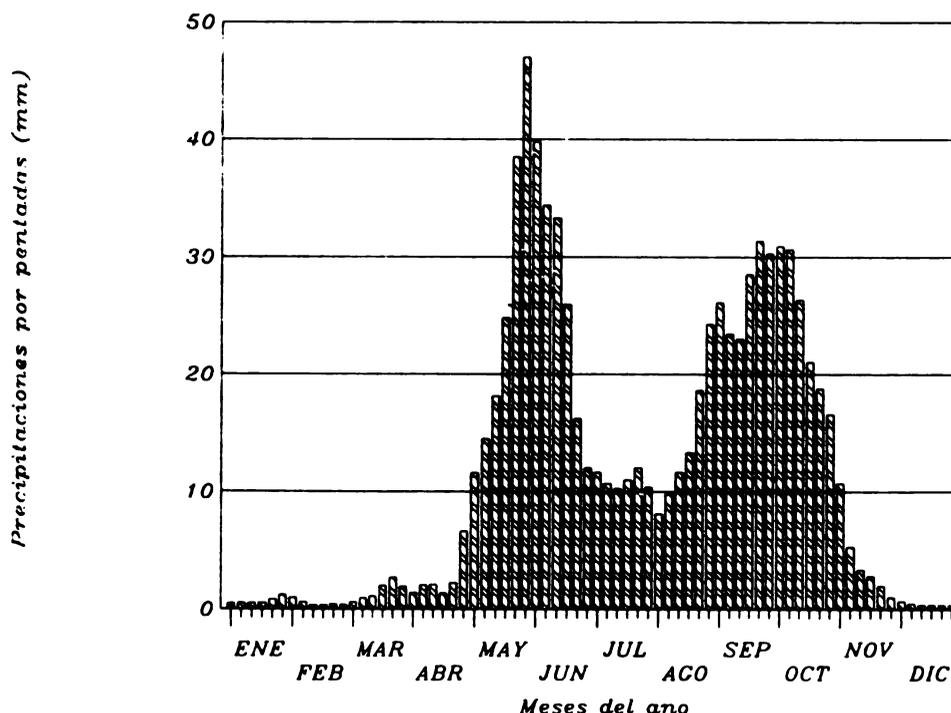
| | 10/05 | 20/05 | 01/06 | 10/06 | 26/06 |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Buena cosecha | 5 | 5 | 6 | 10 | 14 |
| Regular cosecha | 8 | 9 | 10 | 6 | 4 |
| Mala cosecha | 16 | 15 | 13 | 13 | 11 |
| TOTAL | 29 | 29 | 29 | 29 | 29 |

Los cuadros anteriores llaman a comentarios interesantes:

El cuadro 1, de la variedad NB-100 muestra que la mejor fecha de siembra es la primera, el 10 de mayo. Al contrario, el cuadro 2 muestra que, para la variedad NB-6, resulta mejor sembrar lo más tarde posible en el rango de las fechas estudiadas.

Estos resultados pueden parecer contradictorios, ya que se hubiera podido pensar que entre más precoz era la variedad, más tiempo se tenía para sembrarla. En la realidad es al revés, por el motivo siguiente:

En la gráfica siguiente (figura 5) de las precipitaciones promedias en Estelí, se distinguen claramente los dos picos de finales de mayo y de finales de septiembre, así como el período canicular de julio-agosto.



Los resultados anteriores se explican de la manera siguiente: siendo la floración la fase crítica para el maíz, se tiene que buscar como evitar que esta fase ocurra durante el período canicular: para lograrlo, existen dos posibilidades:

- tratar que el maíz florezca antes, y en este caso no le queda otra posibilidad que sembrar TEMPRANO una variedad PRECOZ
- tratar que la floración ocurra después, lo que implica sembrar TARDE una variedad INTERMEDIA.

Reflexiones sobre las recomendaciones

No siempre es posible sembrar temprano, ya que eso depende de la entrada de las lluvias, de la disponibilidad de maquinaria, de crédito, de mano de obra etc.

Es de recordarse que después de la siembra de maíz viene la de frijol, y que no se puede recomendar posponer en forma indefinida la siembra de maíz: se pondrían en peligro los resultados potenciales de la siembra de frijol. La siembra de variedades tipo NB6 obliga de todos modos a sembrar el frijol asociado con el maíz, lo que perjudica parcialmente al frijol.

Por lo tanto, el siguiente estudio puede traducirse en recomendaciones sintéticas de este tipo:

- ***Sembrar lo más temprano posible variedades precoces es la mejor solución cuando el clima y las condiciones generales lo permiten.***
- ***De no poder hacerse, esperar hasta el 10 de junio y sembrar variedades intermedias, antes de finales de junio.***

3.3 ESPACIALIZACION

La metodología presentada en el análisis anterior tiene en sí un carácter muy local; los resultados son válidos estrictamente en el área de estudio. Sin embargo, es legítimo preguntarse sobre el campo de validez de las recomendaciones formuladas, en términos geográficos. ¿Hasta donde pueden extrapolarse los resultados mencionados?

Para avanzar en este sentido, se procede a zonificar utilizando los principios siguientes:

1. Identificar zonas con comportamiento homogéneo con relación a las condiciones agroclimáticas (básicamente de suelos, topografía, y clima).
2. Correr el modelo sobre la o las estaciones meteorológicas disponiendo de registros de las zonas consideradas como homogéneas, con los parámetros edáficos propios y mayoritarios de la región considerada.
3. Analizar y sintetizar los resultados según el grado de fineza que necesita el estudio (en otros términos, según la escala geográfica a la cual se necesitan resultados operativos).

A continuación se presentan los resultados de un estudio que fue solicitado por la Dirección General de Agricultura del Ministerio de Agricultura de Nicaragua, para dar elementos técnicos al sistema técnico-financiero nacional en cuanto a la siembra de maíz de Primera a nivel nacional:

a. Problemática

Año tras año se está sembrando maíz de primera en todo el territorio nacional, presentándose en forma crónica pérdidas importantes por sequía, plagas, tormentas, etc. por lo general siempre en las mismas regiones; la Dirección General solicitó un estudio sintético, que analice el riesgo global que rodea la producción de maíz de primera, y que permita ayudar a definir a nivel nacional y de pequeñas regiones una estrategia del Estado en cuanto a este cultivo.

b. Resultados

El mapa adjunto (mapa 5) divide el territorio de Nicaragua en cinco grandes zonas: esta zonificación gruesa se elaboró con base en la metodología arriba presentada.

Evidentemente, tratándose de una escala nacional, no era posible tener el mismo nivel de detalle que el que se presentó para la Región de Estelí.

Sin embargo, el mencionado análisis permitió contrastar zonas, y formular recomendaciones específicas para cada una de ellas. Como ejemplo, presentamos el cuadro No 3 y el mapa No 1 que fueron elaborados para tal efecto:

Cuadro No 3: RECOMENDACIONES PARA LA SIEMBRA DE MAIZ

| Zona | Fecha óptima de siembra | Variedad | Rendimiento Esperado (qq/mz) | Explicación |
|---|----------------------------------|--|------------------------------|--|
| A. | | | | |
| Posoltega Chinandega El Viejo | Del 15 de mayo al 15 de junio | cualquier variedad diponible | | la distribución de las precipitaciones y su cantidad autorizan cualquier variedad y fecha de siembra de Primera |
| Meseta de Carazo, Diria Diriomo | | NB 100 | 40 | |
| | | NB 3, NB 4, NB 5, NB 6, Santa Rosa | 70 | |
| Tola Rivas | | | | |
| Jalapa La Viga Quilalf Jinotega Matagalpa | Después del 15 de Junio | Unicamente NB 6, Santa Rosa | 70 | NB 6 y Santa Rosa son tolerantes al achaparramiento |
| B. | | | | |
| Cinco Pinos Somotillo Achuapa | Todo el mes de mayo | NB 100 | 25 | La pluviometría promedia es alta (más de 1500 mm) pero mal distribuida, además de una Canícula definida que afecta la floración y el llenado del grano en las siembras tardías después del 15 de junio |
| El Sauce Mina el Limón Villa 15 de Julio Telica | Del 1ro al 15 de Junio | NB3, NB4, NB5, NB6, Santa Rosa | 40 | |
| León San Rafael del Sur | Después del 15 de junio | No sembrar maíz | | |
| C. | | | | |
| Managua Tipitapa | Todo el mes de mayo | cualquier var. disponible NB100 | 35 | Llueve menos que en la zona B, pero con mejor distribución |
| Granada Nandaime | | NB6, NB5 | 55 | |
| Boaco Juigalpa San Dionisio | Después del 15 de junio | unicamente NB6 Santa Rosa | 55 | Variedades tolerantes al achaparramiento |

Cuadro No 3 (continuación): RECOMENDACIONES PARA LA SIEMBRA DE MAIZ

| Zona | Fecha óptima de siembra | Variedad | Rendimiento Esperado (qq/mz) | Explicación |
|--|-----------------------------------|----------|------------------------------|---|
| D. | | | | |
| Nagarote Malpaisillo San Francis. Libre | NO SEMBRAR MAIZ DE PRIMERA | | | El acumulado de las lluvias y su irregularidad no autorizan perspectivas serias de cosechar maíz |
| Darfo Sébaco Limay | | | | |
| E. | | | | |
| La Trinidad Estelí Condega Pueblo | Todo el mes de mayo | NB 100 | 25 | Variedades de ciclo corto con necesidades hídricas acumuladas bajas |
| -Nuevo Somoto Ocotal | Mes de junio | NB6, NB5 | 40 | Variedades de ciclo intermedio cuyas etapas de floración y llenado de grano se deben de ubicar después de la canícula |

El ejemplo anterior mostró una metodología que permite analizar en términos de probabilidades una problemática agroclimática, y proponer como conclusiones **RECOMENDACIONES** en cuanto a las estrategias acertadas de fechas de siembra/variedades, para un lugar determinado, y extrapolando, para las diferentes regiones del país. Por científicas que aparezcan estas metodologías, no dejan de ser cuestionables, a varios niveles:

1. Se propusieron una serie de parámetros (R.U., Coeficientes culturales, E.T.P.,...) que tienen un cierto nivel de validez, pero que no tienen un carácter absoluto por la variabilidad natural de los mismos, y por no haber sido siempre objeto de un estudio específico.
2. La metodología descansa sobre el análisis frecuencial de los resultados de simulaciones de balance hídrico, procesados sobre las estaciones principales del país que presentan un número elevado de años de registro. Por lo tanto, **NO** se toman en cuenta posibles microclimas, o micro variaciones de suelos. Estas limitaciones son particularmente serias en regiones montañosas, en las cuales la variabilidad del medio natural es muy elevada.
3. La relación entre nivel de satisfacción de las necesidades hídricas y rendimiento es muy general, y hasta cierto punto empírica, ya que es muy difícil calibrar a nivel experimental para cada variedad este tipo de relación. Para aproximarla, se usaron referencias establecidas en el campo por medio de una red de seguimiento de parcelas comerciales, pero estas referencias no tienen un carácter absoluto.
4. Estas recomendaciones son generales, y no toman en cuenta la coyuntura climática tal como se presenta un año determinado. Desde luego las lluvias pueden entrar temprano, o tarde, y por el hecho que las recomendaciones tienen un carácter "promedio", no necesariamente se adaptan a una coyuntura determinada. Por este motivo, consideramos necesarios incorporar a estas recomendaciones el concepto de "tiempo real", a través del cual se hace una síntesis entre recomendaciones de tipo general, y una coyuntura determinada.

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

El disponer de modelos de balance hídrico calibrados en condiciones reales de producción representa un avance en lo que a estudios agroclimáticos se refiere. Disponiendo de estas herramientas, el investigador puede ya traducir los factores climáticos, entre los cuales las precipitaciones y su variabilidad natural, en términos agronómicos.

A pesar de sus limitaciones, que detallamos hasta severamente a todo lo largo de este estudio, consideramos que las simulaciones de balances hídricos son las herramientas que mejor permiten acercarse a la realidad agroclimática, con tal que sean utilizadas con cuidado. Además, el uso correcto de estos modelos, y más, la correcta lectura e interpretación de los resultados que arrojan, dependen del conocimiento previo que se tiene de la realidad agro-socio-económica de las zonas de estudio.

El esfuerzo para mejorar estas herramientas está ciertamente limitado por un motivo que ya se explicitó en el desarrollo de este documento: entre más preciso pretende ser un modelo, mayor cantidad de datos de entrada se necesita, y menor es la posibilidad de extensión espacial de los resultados.

Sin embargo, el tener cada vez mayores y mejores referencias sobre el medio que se analiza y sobre su funcionamiento permite alimentar ciertas esperanzas en la posibilidad de extensión espacial de los resultados de los modelos más complejos, como los modelos de crecimiento y desarrollo de los cultivos que solamente mencionamos en este documento.

Para tal efecto, la gran cantidad de información necesaria, pero también de resultados generados hace necesario un importante esfuerzo de ordenamiento y de sistematización de las informaciones disponibles: sería de lo más deseable que estos esfuerzos fuesen coordinados y conduzcan, a los niveles nacionales e internacionales a la construcción de bases de datos, sobre las cuales se podría, a la vez, mejorar y calibrar nuevos modelos, y preparar las condiciones para montar verdaderos sistemas de información geográficos.

Dichos sistemas permitirán, en un futuro próximo o mediano, utilizar los modelos finos a grandes escalas.

BIBLIOGRAFIA

DOORENBOS J. y PRUITT WO., 1977, Las necesidades hídricas de los cultivos, FAO, Irrigación y Drenaje No 24

DOORENBOS J. y KASSAM A.H., 1979. Yield response to water, FAO, Irrigación y drenaje.

FARATS, A., 1989, Suivi hydrique du haricot à l'échelle d'une petite région et ajustement d'un modèle de simulation du bilan hydrique. IRAT/CIRAD

FOREST F., 1984, Simulation du bilan hydrique des cultures pluviales, Présentation et utilisation du logiciel BIP, IRAT/CIRAD

JONES C.A., Kiniry J.R., 1986. CERES-Maize, a simulation of maize growth and development, TEXAS A & M UNIVERSITY PRESS.

MARAUX FL., RAPIDEL B., 1988, Calibration of a water balance model, AIEA project, Nicaragua

REYNIERS FN, FOREST F., 1988, Improving the water supply and its efficiency in sub Saharan Africa rainfed agriculture. ILRI/CTA seminar Harare, 25-29/04/88 pp. 95-120

RITCHIE J., Singh U., Godwin D., Hunt L., 1989. A user's guide to CERES-Maize, V2.10, International fertilizer development center.

RODRIGUEZ, J., 1990. Determinación de la relación entre la satisfacción hídrica y los rendimientos del maíz (Zea mays L.) en la IV región de Nicaragua, tesis de grado de la Universidad Nacional Agraria.

THORNTHWAITE C.W., MATHER J.R., 1957. Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. Publ. climatol., X(3): 311 pág.

UMAÑA E., 1990, Calibración del modelo BIP4 de simulación del balance hídrico en parcelas de producción comercial de frijol en la región IV de Nicaragua, tesis de la Universidad de Chapingo.