

"USO DE MODELOS DE SIMULACION DEL SISTEMA SUELO-PLANTA-ATMOSFERA  
EN LA DETERMINACION DE LA FACTIBILIDAD DE AGRICULTURA DE  
TEMPORAL EN 472,930 HA EN LINARES-MONTEMORELOS, N.L."

TESIS

Sometida a la consideración de la  
Escuela de Agricultura y Ganadería

de la

Universidad de Sonora

por

Manuel de J. Montiel Esquer

Como requisito parcial para obtener el título de Ingeniero Agrónomo con especialidad en Irrigación.

Mayo de 1985

## Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos  
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

Esta tesis fue realizada bajo la dirección del  
consejo particular, aprobada y aceptada como  
requisito parcial para la obtención del grado de:

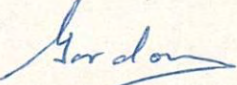
INGENIERO AGRONOMO EN:

IRRIGACION

CONSEJO PARTICULAR:

ASESOR: M.C. VICTOR M. BURQUEZ CANO

CONSEJERO: M.C. ALFREDO SERRANO ESQUER

CONSEJERO: M.C.  JOSE GORDON RAPOPORT

## AGRADECIMIENTOS

A la Comisión del Plan Nacional Hidráulico (CPNH), en cuyas instalaciones, Biblioteca, Centro de Cómputo, Percepción Remota, etc., se realizó el presente trabajo.

Al M.C. José Gordon R. por su apoyo en el aspecto de computación que requirió la realización del estudio.

Al M.C. Octavio Mijangos B. de quien recibí el apoyo institucional que facilitó grandemente la ejecución del estudio.

A la Srita. Elvia Olivia López Sánchez por su nobleza y paciencia desinteresada en los trabajos de mecanografía.

## DEDICATORIA

A mis Padres:

Don Manuel y la Locha, de quienes recibí todo el apoyo para hacer la carrera . . . y la vida.

A mis Hermanos:

Bety, Sergio, Pepe, Maricela y Carlos, a quienes respeto y me siento orgulloso de haberlos conocido.

A mi Pareja:

La Lupe, con quien comparto la vida y a cuyos empujes y cuestionamientos debo lo que soy.

A mis Amigos.

# I N D I C E

	Página
I. IMPORTANCIA Y OBJETIVOS . . . . .	1
II. LITERATURA REVISADA . . . . .	3
1. Definición de Conceptos . . . . .	3
2. Modelos de Simulación . . . . .	4
3. Modelos de Simulación Simplificados . . . . .	6
III. MATERIALES Y METODOS . . . . .	8
1. Modelo Flinn . . . . .	8
1.1 Principios del Modelo . . . . .	8
1.2 Componentes del Sistema . . . . .	10
1.2.1 Contenido de Humedad del Suelo . . . . .	12
1.2.2 Lluvia Efectiva . . . . .	16
1.2.3 Riego . . . . .	18
1.2.4 Evapotranspiración . . . . .	18
1.2.5 Relación entre Suelo y Clima . . . . .	20
1.2.6 Relación entre Agua y Suelo . . . . .	20
1.2.7 Estimación del Rendimiento . . . . .	21
2. Modelo FAO-Modificado . . . . .	23
2.1 Principios del Modelo . . . . .	23
2.2 Componentes del Sistema . . . . .	24
2.2.1 Evapotranspiración . . . . .	24
2.2.2 Reserva de Agua en el Suelo . . . . .	24
2.2.3 Indices de Temporal . . . . .	25
3. Integración de los Modelos . . . . .	26
IV. RESULTADOS OBTENIDOS . . . . .	27
V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES . . . . .	33
BIBLIOGRAFIA . . . . .	35
APENDICE . . . . .	37

## CONTENIDO DEL APENDICE

### Figuras

1. Localización del área del proyecto
2. Tasa de evapotranspiración relativa como una función de la tensión ó potencial del agua en el suelo para diferentes condiciones de evapotranspiración potencial
3. Funcionamiento diario del modelo Flinn
4. Localización de las estaciones climatológicas
5. Plano de unidades de suelo
6. Plano de topografía
7. Plano de uso potencial agrícola
8. Diagrama de bloques del programa Flinn
9. Índice de temporal contra fecha de siembra
10. Índices de temporal para maíz
11. Índices de temporal para sorgo

### Tablas

1. Número de curva de escurrimiento (CN)
2. Coeficientes de reducción del rendimiento (CRR) de algunos cultivos, en sus diferentes etapas de desarrollo
3. Precipitación media mensual por estación climatológica
4. Evaporación media mensual por estación climatológica
5. Unidades de suelo asociadas por texturas
6. Superficie de uso potencial agrícola

## Tablas

7. Comparación de los rendimientos históricos con los simulados mediante el modelo Flinn. Cultivo maíz, municipio Cadereyta
8. Comparación de los rendimientos históricos con los simulados mediante el modelo Flinn. Cultivo sorgo, municipio Cadereyta
9. Comparación de los rendimientos históricos con los simulados mediante el modelo Flinn. Cultivo maíz, municipio General Teran
10. Comparación de los rendimientos históricos con los simulados mediante el modelo Flinn. Cultivo sorgo, municipio General Teran



## RESUMEN

Se realizaron estudios para evaluar las posibilidades de desarrollar la agricultura de temporal en una superficie de 472,930 Ha del proyecto Linares-Montemorelos, N.L., de las cuales actualmente 42,707 Ha son de riego, 45,139 Ha se explotan de temporal y el resto son pastizales y áreas silvícolas. Para llevar a efecto este análisis, se empleó la metodología propuesta por la Organización para la Agricultura y la Alimentación (FAO) en un estudio de producción vegetal titulado "Pronóstico de Cosechas basado en datos agrometeorológicos" publicado en 1980, y el desarrollado por J.C. Flinn para simular rendimientos de los cultivos utilizando datos diarios de precipitación.

Se escogió esta zona porque en ella ocurre una precipitación media anual de 820 milímetros, que en términos generales se considera buena para desarrollar una agricultura de temporal; se cuenta con una gran proporción de buenos suelos, 352,548 Ha consideradas como de alta productividad, 20,176 Ha de media productividad y 97,800 Ha catalogadas como de baja productividad; se dispone de una red de doce estaciones climatológicas y un período común de registros de 22 años (1960-1981); además, está establecida alguna agricultura comercial de temporal que se practica exitosamente.

A fin de conocer el uso potencial del suelo, se realizó el análisis agroclimatológico basado en estudios de uso actual del suelo, agrológico y climatológico elaborados previamente. Este análisis consistió en probar si los requerimientos de agua de dos cultivos (sorgo y maíz) se satisfacen con las características de los suelos y las condiciones climáticas de la región. Para ello se utilizaron dos modelos matemáticos de simulación, el FAO modificado que da como resultado índices de temporal y el modelo Flinn que obtiene el

rendimiento en toneladas por hectárea de grano.

Los resultados indican que en la zona de estudio existe una superficie de 213,000 Ha cubierta por matorrales y 45,740 Ha de pastos, que presenta características físicas del suelo y clima apropiados para el desarrollo de la agricultura de temporal, con lo que se incorporarían 258,740 Ha que conjuntadas con las actuales se podría contar con 303,879 Ha dedicadas a esa actividad agrícola.

## I. IMPORTANCIA Y OBJETIVOS

La evaluación de zonas con posibilidades de desarrollar la agricultura de temporal reviste gran importancia, ya que la mayoría de los países en desarrollo dependen, en gran parte, de esta actividad agrícola como fuente de alimentos.

Por otra parte, en el aspecto físico del sistema que constituye la agricultura de temporal, no se han considerado muchas de las relaciones entre el suelo, las plantas y la atmósfera, que rigen el sistema. Esto justifica en parte, que muchas de las tecnologías tradicionalmente generadas, ofrezcan un alcance muy limitado en la solución de los problemas.

Cuando se trata de generar nuevas tecnologías de producción de cultivos, para la agricultura de temporal, el investigador ve limitada la aplicabilidad de ésta, por las condiciones climáticas que influyen en los resultados experimentales. Un recurso frecuentemente empleado para salvar esta dificultad, lo constituye la repetición de los experimentos por varios ciclos, con la esperanza de que las inferencias que se hagan sean de mayor confiabilidad. Obviamente este procedimiento resulta costoso y demorado; además de que limita la utilización de inmediato, de los nuevos aportes de otras investigaciones.

Un recurso empleado en varias ramas de la ciencia, para hacer frente a problemas vinculados con variables estocásticas, es la simulación a través de modelos. Esta técnica ha dado buenos resultados cuando se busca reproducir el comportamiento de sistemas complejos y a la vez reducir el costo y tiempo de las investigaciones. Cabe mencionar que esta técnica tiene ciertas restricciones; por ejemplo, la eficiencia del modelo y la confiabilidad de los re-

sultados dependen, idealmente, del conocimiento exacto de los mecanismos que rigen los procesos del sistema que se modela; pero de hecho, el mínimo requisito para intentar la solución de un problema es la comprensión en principio, de al menos una parte del mismo.

Dentro de este marco de referencia se realizó el proyecto Linares-Montemorelos, N.L., ver figura 1, en el cual se planteó como objetivo, determinar la factibilidad de establecer la agricultura de temporal en forma exitosa, en las superficies que actualmente no son usadas para fines agrícolas y que tienen potencial agrológico, analizando las características climatológicas y agrológicas predominantes en la zona, mediante dos modelos de simulación: el FAO modificado y adecuado a las condiciones específicas de la región en estudio y el modelo desarrollado por J.C. Flinn.

## II. LITERATURA REVISADA

### 1. DEFINICION DE CONCEPTOS

En la literatura de simulación de sistemas existe una serie de términos y conceptos comunes, de los cuales se definen algunos a continuación, con el fin de dar una mayor comprensión al presente trabajo.

Un sistema se define como una colección o arreglo de objetos asociados por alguna interacción o interdependencia regular, o como un conjunto de objetos que interaccionan de manera regular o interdependiente (4).

Gordon (1969) propone que: entidad es un objeto de interés en el sistema; atributo es una propiedad de una entidad; actividad, es cualquier proceso que ocasione cambio en el sistema; estado de sistema, puede utilizarse para significar una descripción de todas las entidades, atributos y actividades en un punto del tiempo. Los sistemas pueden ser afectados por cambios que ocurren fuera del sistema (medio ambiente), y ciertas actividades dentro del sistema pueden afectar el medio (3).

Palacios define modelo como la representación esquemática y simplificada, en cualquier forma, de un sistema (6); y Hall y Dracup, establecen a la simulación como la técnica de reproducir la esencia de un sistema sin reproducir el sistema en si, pero aclaran que el significado más común de la palabra simulación en los últimos años implica el uso de un modelo formulado, utilizando relaciones aritméticas y algebraicas; así como procesos lógicos no matemáticos (4).

## 2. MODELOS DE SIMULACION

Los primeros modelos de simulación que de modo muy simple consideran las relaciones del sistema suelo-planta-atmósfera, son los modelos de simulación hidrológica para la evaluación del rendimiento hídrico de cuencas hidrológicas.

Un segundo tipo de modelos que generalmente analizan las relaciones del sistema suelo-planta-atmósfera con mayor detalle, son los que evalúan el balance hídrico del suelo con fines agronómicos (10).

Un tercer tipo de modelos de simulación lo constituyen los diseñados con fines de evaluar el comportamiento de una planta en especial (1).

La evaluación del comportamiento de un cultivo puede efectuarse a través de la estimación del rendimiento; esto se logra empleando modelos matemáticos (empíricos) que consideran el rendimiento como función de alguna relación hídrica asociada al cultivo. Algunos modelos utilizan como variable independiente el agua evapotranspirada durante el desarrollo del cultivo; otros consideran la fracción de la humedad aprovechable, consumida o remanente en el suelo antes del riego. En el último caso, se trata más bien de polinomios que permiten la estimación del rendimiento en términos de producto útil (grano), a diferencia de los primeros, que estiman el rendimiento en términos de materia seca total (5).

Una vez desarrollado un modelo del balance de la humedad del suelo y disponiendo de una función de respuesta, se pueden hacer modificaciones a dicho modelo del balance para estimar el rendimiento del cultivo dado un régimen de humedad (9).

Un modelo menos complejo, que sintetiza mucho de la reciente tecnología generada en el suroeste de los Estados Unidos de América, es presentada por R.S. Hanks y R.W. Hill (1980) de la Universidad del Estado de Utah. Este modelo también permite estimar el rendimiento de los cultivos con base en el déficit evapotranspirativo, así como en el potencial del suelo, considerando la componente osmótica como efecto de la salinidad de los suelos.

A. Norero (1976) propuso un modelo para estimar el rendimiento con base en el déficit evapotranspirativo, esto es, consideró que cuando no se satisfacen las demandas hídricas del cultivo, disminuye el proceso evapotranspirativo y por consiguiente disminuye la fotosíntesis que finalmente repercute bajando el rendimiento del cultivo (5).

En el centro de Hidrociencias de Chapingo, ha sido desarrollado un modelo empírico, relativamente simplificado, para estimar el rendimiento de los cultivos en zonas agrícolas en áreas relativamente áridas, donde no puede esperarse una aportación freática y en la que en general se tendrá un déficit evapotranspirativo como es el caso de gran parte del territorio Mexicano. Este modelo presentado por M. Rojas y E. Palacios V. (1979), pretende simplificar muchos procesos, tales como el de entrada y distribución del agua en el suelo, ya que para simular apropiadamente el proceso de infiltración es necesario conocer la intensidad de la precipitación, al menos a nivel horario, además de requerirse suficientes pruebas de infiltración. Dadas estas restricciones, las consideraciones fueron: suponer que existe una máxima capacidad de infiltración en un suelo que está seco y que cuando se satura tiene una mínima capacidad que se denomina infiltración básica; que la cantidad de agua infiltrada varía linealmente en forma inversamente proporcional al contenido de humedad entre los valores mínimo y máximo considerados. Otro proceso que

se simplificó fue el de la evapotranspiración, la cual se estima con base en la evaporación medida en tina tipo A (8).

### 3. MODELOS DE SIMULACION SIMPLIFICADA

Es común que en muchos lugares no pueda disponerse de información climática a nivel diario. En la mayoría de las estaciones climatológicas que controla el Servicio Meteorológico Nacional, solo se tiene información a nivel mensual, únicamente en algunas estaciones de esta red se dispone de datos a nivel diario. Por esta razón es difícil usar un modelo como el de Flinn en esas regiones; sin embargo pueden usarse modelos más simplificados, donde se considere la información climatológica mensual, como el modelo FAO que obtiene como resultado final índices de temporal.

Para un mejor ajuste a la duración de los ciclos vegetativos de los cultivos, pueden considerarse períodos de quince días; en caso de disponer de información mensual, ésta se divide en dos partes iguales.

En estos casos es difícil poder hacer un balance de humedad del suelo; sin embargo, pueden considerarse otros factores del suelo en el modelo, que en alguna forma tomen en cuenta la aprovechabilidad de la lluvia, como podría ser la capacidad de almacenamiento de agua.

La estimación del déficit evapotranspirativo por etapa podría hacerse mediante fórmulas que consideren la precipitación observada en lugar de la evapotranspiración actual.

Los modelos para estimar el rendimiento, consideran además del déficit evapotranspirativo, otros factores del clima, del suelo y de manejo. Así, en un



trabajo de E. Palacios (1981) se obtuvieron varias funciones para estimar los rendimientos del frijol, maíz y sorgo, basados en 25 experimentos realizados en varias localidades de los estados de Jalisco y Nayarit, los cuales se usan para simular los rendimientos potenciales de estos cultivos con la finalidad de caracterizar agroclimáticamente varias regiones agrícolas del país (7).

### III. MATERIALES Y METODOS

Para la realización del presente trabajo, se utilizaron dos modelos de simulación:

El modelo propuesto por la FAO en un estudio de producción vegetal titulado "Pronóstico de Cosechas Basado en Datos Agrometeorológicos", publicado en 1980 y en el modelo de simulación de rendimientos presentado por J.C. Flinn en 1971.

Para lograr una mejor comprensión de la metodología empleada en el presente trabajo, a continuación se describen los componentes y principios que rigen a ambos modelos.

#### 1. MODELO FLINN

##### 1.1 PRINCIPIOS DEL MODELO

Este modelo, relativamente simple, permite simular la respuesta de un cultivo con base en las variaciones del contenido de humedad del suelo, utilizando registros diarios de precipitación y evaporación.

El modelo se basa en el principio de continuidad, el cual considera que la zona radicular de la planta funciona como el embalse de una presa, en la cual tienen lugar movimientos de entradas y salidas de agua.

Determina si el cultivo requiere riego o tiene suficiente humedad con el agua que recibe del temporal. En caso de riego se manejan diferentes políti-

cas para definir una operación óptima. Finalmente simula el crecimiento diario del cultivo, para obtener el rendimiento neto dadas las condiciones impuestas sin considerar las restricciones de tipo planta-ambiente, correspondientes a fotoperíodo, temperatura media y la incidencia de plagas o enfermedades.

El modelo de simulación al que se le ha llamado "Flinn" en honor al investigador que conjuntó todos los conceptos que en este modelo se involucran, se puede resumir en los siguientes doce pasos, así como en el gráfico de la figura 3.

- 1) Se simulan las variaciones de humedad en el suelo sin cultivo para obtener la humedad con que se iniciará el ciclo vegetativo.

Enseguida para cada día del ciclo:

- 2) Con la lluvia y la evaporación calcular la lluvia en exceso (LLEX), efectiva (LLEF) y la evapotranspiración potencial (ETP).
- 3) Con el contenido de humedad al inicio del día (HSR) y el tipo de suelo, calcular la tensión del agua en el suelo (PSI), cuadrante A de la figura 3;
- 4) Con PSI y ETP calcular la evapotranspiración relativa (ERE) y la real (ETA), parte B de la figura 3;
- 5) Con ERE calcular la tasa o índice del crecimiento diario del cultivo (TDC), parte C de la figura 3;

- 6) Acumular TDC para cada etapa del ciclo;
- 7) Calcular el contenido de humedad del suelo al final del día (HSA);
- 8) Verificar que HSA sea mayor que cero y menor o igual a 100; si HSA es mayor de 100, hacer HSA=100; si HSA es menor o igual a cero, parar la simulación y hacer el rendimiento (REE) igual a cero para todo el ciclo;
- 9) En caso de irrigación, verificar que HSA sea mayor a la política de riego;
- 10) Regresar al paso 2 para simular el siguiente día;
- 11) Al final de cada etapa calcular el rendimiento relativo (IR) y el esperado (REE);
- 12) Al final del ciclo mostrar los resultados

## 1.2 COMPONENTES DEL SISTEMA

Para tomar en cuenta que la profundidad radicular es variable en el tiempo, la simulación se propone realizarla para tres etapas.

En la primera etapa, que va de la fecha de siembra a un cuarto del ciclo vegetativo aproximadamente, se considera un tercio de la profundidad radicular para efectos del balance de la humedad residual del suelo. En estas condiciones, el modelo queda expresado en forma matemática de la siguiente manera:

$$HSL12=HSL1+LLEF+RIEG-ETA, \text{ en milímetros . . . (1A)}$$

donde:

HSL12: Contenido de humedad del suelo al final del día;

HSL1 : Contenido de humedad del suelo al inicio del día;

LLEF : Lluvia efectiva diaria;

ETA : Evapotranspiración real diaria.

RIEG : Riego aplicado en el día (en temporal RIEG=0)

En la segunda etapa, que empieza al término de la primera y finaliza aproximadamente a la mitad del ciclo vegetativo, se toma en cuenta dos tercios de la profundidad radicular. En este caso, para considerar el grado de extracción por la planta, se ha convenido usar un modelo de absorción con un nivel de consumo de agua del 80% para la capa del tercio superior y del 20% para la inferior. De esta forma, el modelo queda como:

Tercio superior

$$HSL12 = HSL1 + LLEF + RIEG - 0,8 * ETA, \text{ en milímetros . . . (1B)}$$

Tercio inferior

$$HSL22 = HSL2 + PERL1 - 0,2 * ETA, \text{ en milímetros . . . (2A)}$$

donde:

HSL22: Contenido de humedad del suelo al final del día en el estrato inferior;

HSL2 : Contenido de humedad del suelo al inicio del día, en el estrato inferior;

PERL1: Percolación del estrato superior.

En la última etapa, que corresponde a la segunda mitad del ciclo vegetativo, se analiza toda la profundidad de la zona radicular, pero por capas o estratos de un tercio cada uno para tomar en cuenta el grado de extracción de humedad. El modelo de absorción que en este caso se utiliza, tiene los siguientes niveles de consumo de agua: 60% para la capa superior, 30% para la media y 10% para la inferior. Así tenemos:

Tercio superior

$$\text{HSL12} = \text{HSL1} + \text{LLEF} + \text{RIEG} - 0.6 * \text{ETA}, \text{ en milímetros . . . (1C)}$$

Tercio medio

$$\text{HSL22} = \text{HSL2} + \text{PERL1} - 0.3 * \text{ETA}, \text{ en milímetros . . . (2B)}$$

Tercio inferior

$$\text{HSL32} = \text{HSL3} + \text{PERL2} - 0.1 * \text{ETA}, \text{ en milímetros . . . (3A)}$$

donde:

HSL32: Contenido de humedad del suelo al final del día en la capa inferior;

HSL3 : Contenido de humedad del suelo al inicio del día en la capa inferior;

PERL2: Percolación del estrato medio.

### 1.2.1 CONTENIDO DE HUMEDAD DEL SUELO

El contenido de humedad del suelo al final del día, para cualquier estrato, está limitado por un valor superior y uno inferior. El límite superior co-

responde a la capacidad de campo o de retención de humedad del suelo, HSCC, y el inferior al punto de marchitamiento permanente, HSPM.

Si se considera el contenido de humedad como un porcentaje absoluto, esto es, que el valor de capacidad de campo corresponde al cien por ciento y el punto de marchitamiento permanente al cero por ciento, entonces:

$$0 \leq HSA_i \leq 100 \quad i=1 \text{ a } 3 \text{ estratos}$$

donde:

$HSA_i$ , contenido de humedad del estrato  $i$  en porcentaje absoluto.

Si se toma como referencia el porcentaje absoluto, la textura del suelo es in dependiente y ello permite hacer las siguientes hipótesis para cualquier tipo de suelo:

- a) Cuando la humedad residual ( $HSA_i$ ) exceda el 100% ésta tomará el valor de cien y el resto se considera como percolación.
- b) Cuando la humedad residual sea menor al cero porcentaje en cualquier de las capas, siempre y cuando haya al menos una con valor superior a cero, enton ces la humedad residual se considera cero.
- c) Cuando la humedad residual sea menor o igual al cero por ciento en todas las capas, entonces se supondrá que el cultivo muere, porque estuvo sujeto a una fuerte sequía que le permitió alcanzar la marchitez total.

Bajo estas condiciones, la simulación se realiza considerando que el contenido de humedad del suelo al final del día será el mismo que al inicio del siguiente.

Dado que el contenido de humedad del suelo requiere de ser expresado en diferentes unidades, es necesario conocer la manera de pasar de una unidad a otra. La forma más frecuente de expresarlo es como un porcentaje del peso del suelo seco. Ahora bien, para convertir este porcentaje de humedad real a lámina de agua, utilizamos la siguiente fórmula:

$$HSL_i = \frac{(HSR_i - HSPM_i)}{100} * DA_i * 1/3PRA, \text{ en milímetros} \dots (4A)$$

donde:

$HSL_i$ , contenido de humedad del suelo del estrato  $i$  como lámina de agua en milímetros;

$HSR_i$ , contenido de humedad del suelo del estrato  $i$ , en porcentaje de humedad real;

$HSPM_i$ , contenido de humedad del suelo al punto de marchitamiento permanente del estrato  $i$ , en porcentaje de humedad real;

$DA_i$ , densidad aparente del estrato  $i$ , en gr/cc;

$PRA$ , profundidad de la zona radicular cuando ésta alcanza su madurez total, en milímetros.

Para convertir lámina de agua en porcentaje de humedad absoluta se tiene que:

$$HSA_i = \frac{HSL_i * 10\ 000}{DA_i * 1/3PRA * HA_i}, \text{ en \% absoluto} \dots (4B)$$

donde:

$HA_i$ , contenido de humedad aprovechable en el estrato  $i$ , en porcentaje de humedad real, o sea,

$$HA_i = HSCC - HSPM$$



Para pasar de por ciento absoluto a real, se usa la siguiente expresión:

$$HSR_i = \frac{HSA_j * HA_j}{100} + HSPM_j, \text{ en \% real . . . (4C)}$$

Con estos criterios y con la información de las características del suelo y la planta como densidad aparente, infiltración y permeabilidad, porosidad total, capacidad de campo, marchitez permanente y profundidad radicular, se calcula el contenido de humedad del suelo al inicio del día, primer término aditivo de las ecuaciones 1A, 1B, 1C, 2A, 2B y 3A.

Como se podrá observar, el modelo necesita un valor inicial de la humedad para empezar la simulación. Para ello, se simula primero la época del año que no tiene cultivo para la condición más desfavorable que se pueda presentar; ésta es cuando al término del ciclo vegetativo se alcanza el cero por ciento absoluto de humedad en el suelo. En otras palabras, se inicia la simulación del período que queda sin cultivar con un valor del cero por ciento. Esto se hace para el número de años que se tengan registrados con el fin de hacer un análisis de frecuencia con los resultados y definir la humedad del suelo al inicio del ciclo vegetativo (humedad final de la temporada sin cultivar) asociándola con cierta probabilidad. Por ejemplo, se define el contenido de humedad tal que cualquier otro valor que se presente lo exceda tres de cuatro veces ( $P(X > X_j) = 0.75$ ).

Todo este análisis es para obtener la humedad en la primera capa del suelo; para las otras dos, se supone que cuando éstas comienzan a formar parte de la simulación, tienen diez unidades más de por ciento de humedad con respecto a la que tiene el estrato inmediato superior (por ejemplo, si el estrato superior contiene 70% de humedad, el intermedio tendrá 80% y el inferior 90%).

### 1.2.2 LLUVIA EFECTIVA

Para calcular el segundo término aditivo de las ecuaciones 1A, 1B y 1C, la lámina de lluvia efectiva o infiltración, se utiliza el modelo de lluvia-escurrimiento propuesto por el Servicio de Conservación de Suelos del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América (11).

El modelo considera que la diferencia entre la lluvia diaria (LL) y la lámina que escurre o lluvia en exceso (LLEX) es la lámina que se infiltra y puede ser aprovechada por las plantas (LLEF), entonces:

$$LLEF=LL-LLEX, \text{ en milímetros . . . (5)}$$

De esta lámina, el suelo tomará siempre la necesaria para tratar de llegar a su capacidad de retención (capacidad de campo). Cuando ésto se logra, el excedente se supone que percola hacia las capas inferiores.

Para calcular la lluvia en exceso o escurrimiento, el SCS propone la siguiente ecuación:

$$LLEX=(LL-0.2*S)^2/(LL+0.8*S), \text{ en milímetros . . . (6)}$$

donde:

LL, Lluvia diaria

S, Diferencia máxima potencial entre la lluvia y el escurrimiento, en milímetros, medida cuando la tormenta comienza, esto es, el potencial máximo de infiltración.

$0.2*S$  Representa la retención inicial, R, o sea, las pérdidas por intercepción, almacenamiento superficial en pequeñas depresiones del terreno y agua que

se infiltra antes del escurrimiento.

Con el fin de tomar en cuenta la humedad antecedente, las condiciones del suelo, el uso y prácticas de conservación de la tierra, S está definida como:

$$S=(25400/CN)-254, \text{ en milímetros . . . (7)}$$

donde:

CN, número de una curva arbitraria que varía de 0 a 100, ver tabla 1, (cuando CN=100, LL=LLEX y S=0).

Los valores de CN son función de:

- 1) Tipo de suelo, dividido en cuatro grupos de acuerdo a su potencial de escurrimiento
- 2) Condición hidrológica, la cual depende de qué tan pobre o buena rotación de cultivos se lleva a cabo en la región
- 3) Tratamiento o práctica de la siembra del cultivo
- 4) Uso de la tierra o cobertura vegetal en ésta; y
- 5) Humedad en el suelo o lluvia antecedente.

Aparte de que el valor varía por todos los factores anteriores, también cambia conforme el cultivo se desarrolla. Para ello, el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos recomienda lo siguiente:

- a) Para la primera etapa del ciclo vegetativo, que va desde la plantación hasta un crecimiento temprano, cuando la superficie del suelo no está completamente cubierta por el cultivo, es conveniente usar CN para barbecho;
- b) Para la segunda y la tercera etapa del ciclo, que va desde el final de la etapa anterior hasta el tiempo en que comienza la maduración del cultivo, se usa CN para la condición promedio, éste es el que se lee directamente en la tabla 1;
- c) Para la última etapa del ciclo, maduración y cosecha, usar:

$$CN=2*CN \text{ PROMEDIO}-CN \text{ BARBECHO}$$

### 1.2.3 RIEGO

El tercer término aditivo de las ecuaciones 1A, 1B y 1C, corresponde a la lámina de riego que debe aplicarse. Esta se supone como la cantidad necesaria para regresar la humedad del suelo a su capacidad de campo, una vez que ésta haya alcanzado el nivel más bajo permitido; es decir, la política de riego (HSF). Para el presente caso en que se estudia una zona con agricultura de temporal, este término no se toma en cuenta.

### 1.2.4 EVAPOTRANSPIRACION

El último término que interviene en el modelo de simulación es la evapotranspiración real (ETA), parte negativa del balance.

Para obtener esta variable, se emplean las curvas propuestas por Denmead y Shaw (1962), ver figura 2, las cuales dan la evapotranspiración relativa (ERE), en función de la evapotranspiración potencial del cultivo (ETP), y el potencial de agua en el suelo (PSI). Así tenemos que,

$$ERE = \frac{ETA}{ETP}$$

Por lo tanto,

$$ETA = ERE * ETP \text{ en milímetros . . . (8)}$$

Para obtener el valor de ETP en este modelo, se utilizó el método del evaporímetro, tal y como lo recomienda la Organización para la Agricultura y la Alimentación, FAO. Este consiste en obtener ETP como:

$$ETP = CC * CEV * EVA, \text{ en milímetros . . . (9)}$$

donde:

- C : Coeficiente del cultivo que varía con el desarrollo de éste y las condiciones climatológicas existentes;
- CEV: Coeficiente del evaporímetro que dependen de las condiciones ambientales y climatológicas que imperan en las cercanías de la estación meteorológica, así como del tipo de tina de evaporación. Para las condiciones del área del proyecto se usó  $CEV = 0.7$
- EVA: Evaporación diaria que se registra en la tina en milímetros.

De acuerdo con la publicación editada por la FAO, la evapotranspiración potencial del cultivo ETP está definida como: "La evapotranspiración de un cultivo exento de enfermedades que crece en un campo extenso (una o más hectáreas) en condiciones óptimas de suelo, incluida una fertilidad y un agua su-

ficientes en el que se llega al potencial de plena producción de ese cultivo con arreglo al medio vegetativo dado".

#### 1.2.5 RELACION ENTRE SUELO Y CLIMA

En la ecuación 8 y la figura 2 se puede observar que ERE es el coeficiente que reduce la evapotranspiración potencial debido a la deficiencia de humedad que se presenta en el suelo. Si el suelo tiene la suficiente humedad para no provocarle ninguna tensión a la planta, ERE será igual a uno y la evapotranspiración real será igual a la potencial; pero si el suelo pierde humedad, aumenta la tensión del agua en él, entonces a la planta le costará más trabajo succionarla, viéndose obligada a reducir su transpiración. Algo similar ocurre con la evaporación del suelo, conforme el terreno va perdiendo su humedad, la cantidad de agua evaporada se va reduciendo.

#### 1.2.6 RELACION ENTRE AGUA Y SUELO

Cuando se busca la manera de determinar los efectos de la escasez de agua en el rendimiento de un cultivo, en realidad lo que se mide es el efecto producido en el rendimiento por las tensiones de agua en el suelo. Anteriormente, se vio que esta tensión está relacionada con los factores climatológicos que miden las necesidades hídricas de los cultivos, por lo cual estas relaciones pueden expresarse de manera que el rendimiento del cultivo sea una función de la tensión del agua en el suelo.

La forma de obtener la relación entre la tensión y el contenido de humedad, es mediante el trazo de la curva característica de la humedad del suelo, la

cual es el resultado de analizar muestras de suelos en el laboratorio. Para ahorrar trabajo de laboratorio, investigadores en el campo de suelos han determinado métodos empíricos para estimar la tensión del suelo en relación con su contenido de humedad. Gardner y otros (1970) propusieron un modelo bastante simple que se ajusta con buena aproximación a la curva característica.

### 1.2.7 ESTIMACION DEL RENDIMIENTO

Como un principio general, la fotosíntesis disminuye conforme declina la evapotranspiración. Esta disminución puede ocurrir debido a un cierto déficit en la presión hidrostática de los tejidos, lo cual acciona ciertos mecanismos del cierre de los estomas. Al reducirse la apertura estomatal, se restringe también el acceso de gas carbónico, esencial para la fotosíntesis. De esto se deriva la estrecha asociación entre la cantidad de agua en el suelo, la transpiración y la fotosíntesis; ésta última a su vez, directamente relacionada con el crecimiento y producción de los cultivos.

Basado en estas teorías, Flinn (1971), propone una función que determina la tasa del crecimiento relativo diario de un cultivo (TDC). Este índice o tasa se suma día con día para todo el período del cultivo. La suma total representa el número de días que estuvo desarrollándose el cultivo, según el modelo, bajo las condiciones de clima y humedad del suelo que prevalecieron durante el ciclo vegetativo simulado. Esto es, si el ciclo del cultivo es de 120 días y con el modelo obtenemos un valor de la suma de los TDC igual a 105, significa que la planta fue castigada debido a las deficiencias de humedad y ello ocasionó un desarrollo en sólo 105 días.

Con esa función, Flinn postula que el índice de crecimiento (TDC) depende linealmente de la evapotranspiración relativa (ERE). Así, supone que en cualquier día cuando ERE es uno, el crecimiento de la planta no es retardado, pues no estuvo sujeta a tensiones; sin embargo, cuando hay deficiencias de humedad en el suelo, el rendimiento se reduce de uno, o condición óptima, tendiendo a cero que es cuando ERE ha bajado hasta un valor de 0.5, ver figura 3 cuadrante C (2).

Para obtener el rendimiento esperado (REE) en cada una de las etapas fenológicas del cultivo, se multiplica el índice acumulado durante la etapa por un coeficiente de ponderación (CRR) que toma en cuenta la reducción del rendimiento, debido a las tensiones ocurridas durante esa etapa; también por el rendimiento óptimo potencial (ROP) y por último, se divide por el número de días de la etapa  $i$  considerada ( $ND_i$ ). Matemáticamente tenemos:

$$REE_i = 1/ND_i * \left( \sum_{j=1}^{ND_i} TDC_j \right) * CRR * ROP, \text{ en ton/ha} \dots (10)$$

$i$ : Etapa fenológica

$j$ : Días de la etapa

Por lo tanto,

$$IR = REE/ROP$$

Donde:

IR; Rendimiento relativo del cultivo

De este modo, el rendimiento esperado para todo el ciclo será:



$$SRE = \sum_{j=1}^N REE_j$$

donde: N, número de etapas fenológicas en que se divide el ciclo.

Con esta última expresión, se completa el modelo de simulación. De todas sus partes, la información que es más difícil de obtener es la referente al coeficiente de ponderación (CRR). Los valores que se utilizaron están basados en los resultados que obtuvieron Denmead y Shaw (1960) al estudiar los efectos de la tensión que ocurre por la falta de humedad en el suelo, en el desarrollo y rendimiento del maíz; en los de Mojarro (1977) para el frijol; y en las recomendaciones de Palacios (1978) para algunos cereales, leguminosas y oleaginosas. Estos valores se resumen en la table No.2.

## 2. MODELO FAO MODIFICADO

### 2.1 PRINCIPIOS DEL MODELO

Este modelo se basa en el principio de continuidad del agua, esto es, el balance hidráulico, que no es más que la diferencia entre la porción de la precipitación que se infiltró en las capas aprovechables del suelo, más la humedad útil precedente en el terreno contra el uso consuntivo del cultivo, por períodos de 10 días sucesivos durante su ciclo vegetativo.

## 2.2 COMPONENTES DEL SISTEMA

### 2.2.1 EVAPOTRANSPIRACION

La evapotranspiración del cultivo en cada período se calcula multiplicando la evapotranspiración índice (ET<sub>0</sub>) por los coeficientes de desarrollo del cultivo analizado (KC). Para calcular la evapotranspiración índice se utilizó el método del evaporímetro. Esta se obtiene multiplicando la evaporación decenal registrada en el evaporímetro (EV), por un coeficiente que depende del tipo de evaporímetro, de si hay o no cobertura vegetal y de la distancia de la misma alrededor de éste, de la humedad relativa media en porcentaje y de la velocidad del viento. En general, se ha observado que en la zona de estudio éste coeficiente varía de 0.7 a 0.75, considerándose para este efecto un valor de 0.7 que corresponde a una humedad relativa media (40% a 70%) y a vientos moderados (2 a 5 m/seg).

### 2.2.2 RESERVA DE AGUA EN EL SUELO

La reserva de agua en el terreno (RS) indica la cantidad de agua almacenada en el suelo que resulta al final de cada período y que puede ser aprovechada en el siguiente. El valor inicial corresponde a la cantidad útil de agua en el suelo que resultó del balance anterior, con o sin cultivo.

La cantidad de agua utilizable acumulada en el terreno depende de la profundidad aprovechable por las raíces del cultivo y las características físico-químicas del suelo, y nunca será mayor a la lámina aprovechable; ésta se define como:

$$LA = ((CC - PMP) * DA * PR) / 100$$

donde:

LA, lámina aprovechable

CC, capacidad de campo en porciento

PMP, punto de marchitamiento permanente en porciento

DA, densidad aparente en gramos por centímetro cúbico

PR, profundidad radicular en centímetros.

Cualquier cantidad infiltrada en el terreno más allá del valor de la lámina aprovechable, percolará hasta las capas más profundas del terreno, y será por lo tanto, eliminada del balance hidráulico.

Se consideraron los excesos y déficit hidráulicos en el terreno de acuerdo a su capacidad de retención. El exceso se refiere a toda cantidad de agua que supere el nivel de almacenamiento correspondiente a la lámina aprovechable. Los déficit se refieren a la necesidad de agua del cultivo que supere a la disponibilidad de ésta en el suelo.

### 2.2.3 INDICES DE TEMPORAL

El índice de temporal se refiere a la proporción con que se satisfacen las demandas de agua del cultivo en un ciclo, se expresa en porcentaje y se calcula de la siguiente manera:

Se supone que el inicio del ciclo vegetativo tiene lugar cuando la disponibilidad de agua en el terreno es grande y se considera entonces que el índice es igual a 100 permaneciéndolo así para las decenas (períodos) sucesivas, hasta

que aparece un exceso en la lámina aprovechable por encima de 100 mm, en cuyo caso se disminuye el índice en 3%; si existe un déficit, el índice se disminuye un porcentaje igual al déficit dividido por la demanda del cultivo en todo el ciclo.

Las modificaciones al índice se deben, por un lado, a que cualquier exceso de agua se revelará nocivo para los cultivos tanto a causa de la acción mecánica como a la acrecentada incidencia de enfermedades. Como resultado de experiencias de investigaciones de la FAO se ha visto que lo anteriormente descrito es representativo del fenómeno real. Por otro lado, cualquier déficit va en detrimento del crecimiento de la planta y, en consecuencia, el rendimiento del cultivo se ve disminuido. Para el caso de este estudio se le hizo una modificación al modelo, que consistió en proporcionar el valor de la humedad del suelo al inicio del período de análisis (12).

### 3. INTEGRACION DE LOS MODELOS

El modelo FAO se aplicó utilizando diferentes fechas de siembra con el objeto de determinar las más adecuadas. Una vez definidas se emplearon en la determinación de los índices de temporal, considerando únicamente un tipo de suelo, el de textura arcillosa. Este análisis se llevó a cabo tomando en cuenta uno y dos ciclos por año: el ciclo temprano que comprende el período de marzo a junio y el tardío de julio a octubre.

Ambos modelos anteriormente descritos, se complementan en este análisis ya que por un lado con el FAO se pueden obtener las zonas específicas donde es posible obtener buenas cosechas con el temporal y el Flinn nos muestra los rendimientos que se pueden esperar en la misma zona, ratificando los resultados del primero.

#### IV. RESULTADOS OBTENIDOS

La información utilizada para el análisis fue básicamente la referida al clima, suelo y cultivos, la cual se procesó mediante un modelo digital de computadora.

##### Clima.

Para realizar el análisis agroclimatológico, se escogieron doce estaciones climatológicas base y un período común comprendido entre los años de 1960 y 1981, lo que da un total de 22 años de registro (figura 4).

Se utilizó información mensual de temperatura, y datos de precipitación y evaporación diaria. Las precipitaciones más altas ocurren en las estribaciones de la Sierra Madre Oriental y disminuyen hacia las partes más bajas, localizadas en el oriente del Estado y la precipitación media anual dentro de la zona en estudio es de 820 milímetros con una distribución temporal en la que se tienen lluvias en casi todo el año, con un período seco intermedio que comprende todo el mes de julio. Esto hace que se tengan dos períodos de lluvias significativos, de marzo a junio y de agosto a noviembre, siendo en el segundo donde se presenta la mayor magnitud de lluvias. En las tablas 3 y 4 se muestran las precipitaciones y evaporaciones medias mensuales por cada estación respectivamente (13).

Se tiene un tipo de clima semicálido-subhúmedo, con temperatura media anual de 27 grados centígrados y en el mes más frío la temperatura varía de -3 a 18 grados centígrados. En lo que concierne a la evaporación potencial anual, se tienen variaciones desde 1290 a 2180 milímetros, y la media de la zona es de 1715 milímetros.

### Suelos.

Se realizó un estudio de reconocimiento de las unidades de suelo con base en las cartas edafológicas de la Dirección General de Estudios del Territorio Nacional (DETENAL) y se encontró que algunas de las unidades clasificadas no correspondían a las características físicas de suelos propias de las respectivas unidades, por lo que se tuvo que hacer una reclasificación con base en muestreos y recorridos de campo. Se obtuvieron las constantes de humedad del suelo, tales como: capacidad de campo, punto de marchitamiento permanente y densidad aparente.

En general, los suelos que dominan esta zona son básicamente Vertisoles, Regosoles, Cambisoles, Chernozem, Litosoles, Castañozem y Rendzinas, (figura 5). Sin embargo, dado que una gran parte de las unidades están asociadas con otras, se agruparon por texturas, obteniéndose para los suelos con potencial agrológico cuatro grupos: arcilloso, franco, franco-arcilloso y arcillo-arenoso. En la tabla No.5 se presenta un resumen de las unidades de suelo predominantes y asociadas por texturas. Además se realizó la clasificación de los suelos por topografía (figura 6) y por clase de uso potencial agrícola (figura 7), cuyos resultados se muestran en la tabla No.6; como se puede ver, se cuenta con una gran proporción de buenos suelos, 352,548 Ha consideradas como de alta productividad, 20,176 Ha de media productividad y 97,800 Ha catalogadas como de baja productividad agrícola.

### Cultivo.

La información obtenida en este renglón se orientó solamente a los básicos, específicamente a sorgo y maíz, debido a que actualmente son los cultivos cíclicos más comunes en la región.

En el Distrito de Temporal Número 86, con sede en Montemorelos, N.L., se obtuvieron estadísticas de rendimientos y superficies de los cultivos de sorgo y maíz de temporal, para los ciclos temprano (marzo-junio) y tardío (julio-octubre). En esta información se contempla que la mayor superficie cosechada de maíz corresponde al municipio de Montemorelos en el año de 1969 con 7,000 Ha en las que se obtuvo un rendimiento de 0.85 ton/ha y la de sorgo grano al municipio de General Terán en el año de 1977 con 5,750 Ha y con un rendimiento de 2.2 ton/ha, ambas ocurrieron en el ciclo temprano.

Los rendimientos máximos de maíz de temporal se obtuvieron en el municipio de General Terán en 1981 con 2.99 ton/ha y de sorgo en Montemorelos en el año de 1977 con 2.80 ton/ha, ambas ocurrieron también en el ciclo temprano. También se obtuvo información de coeficientes de crecimiento, profundidad radicular y ciclo vegetativo de cada cultivo.

#### Programa.

Con el objeto de efectuar la simulación con rapidez y precisión, se creó un programa en lenguaje Fortran para usarse en una Computadora PDP 11/70.

El programa está diseñado de tal manera que permite interrelacionar una serie de archivos que contienen la información requerida en el modelo; el esquema de bloques de su funcionamiento se puede ver en la figura 8.

Los archivos creados previamente son cuatro y contienen la información que a continuación se describe:

#### Archivo Base.

Contiene título informativo (nombre del proyecto), meses del año y su duración en días, índices de impresión que permiten obtener diferentes formatos

de salida de resultados, número de etapas fenológicas, número de estaciones que se analizarán, duración del ciclo vegetativo en días, mes y día de siembra, nombres de las etapas del cultivo (germinación, crecimiento, floración y maduración) y probabilidad con que se realizará el análisis de frecuencia.

#### Archivo Estación.

Este archivo contiene en primer término, el número de suelos asociados con la estación climatológica, nombre de la estación, número de años de registro, coeficiente del evaporímetro para cada mes, precipitaciones y evaporaciones diarias para cada mes.

#### Archivo Suelo.

Contiene el nombre del tipo de suelo (textura), densidad aparente de las tres capas de suelo que se están considerando, humedad aprovechable de la capa me dia e inferior, contenido de humedad a capacidad de campo y punto de marchitamiento permanente de la capa superior y el número de curva de escurrimiento para el cultivo (CN).

#### Archivo Cultivo.

En este archivo se incluye el nombre del cultivo, duración de cada etapa fenológica o de la época de barbecho, día en que finaliza la etapa inicial del sistema radicular de la planta, día en que finaliza la maduración del sistema radicular, coeficiente de crecimiento del cultivo para la tercera etapa fenológica y al término de la última etapa del ciclo vegetativo, coeficiente de reducción del rendimiento para cada etapa, rendimiento máximo del cultivo en toneladas por hectárea y finalmente la profundidad radicular en milímetros.



Del análisis efectuado para definir las fechas de siembra más adecuadas, se encontró que los meses de marzo, para el ciclo temprano, y julio para el tardío, fueron los más recomendables para estos propósitos, ya que para ellos se obtienen los índices de temporal más altos, tal como se muestra en la figura 9. Se calcularon los índices para cada estación y con ello se trazaron curvas de igual índice de temporal. Estas curvas (figuras 10 y 11) se usaron como criterio para definir por comparación si las superficies analizadas se pueden dedicar a la agricultura de temporal de igual o mejor forma que las regiones que ya cuentan con este tipo de agricultura establecida en forma comercial.

De los resultados obtenidos se puede afirmar en forma general que si el rendimiento de los cultivos dependiera exclusivamente de la disponibilidad de agua y suelo, de cultivarse un solo ciclo, el tardío ofrece mayores posibilidades de éxito que el temprano. Sin embargo, debido a plagas, inundaciones y granizadas que se presentan principalmente en los meses de julio a octubre, la superficie cosechada disminuye considerablemente en el tardío, con lo que resulta más atractivo cultivar en el primer ciclo, ésto se comprobó al revisar los registros de rendimientos y superficies cosechadas en la zona con agricultura de temporal establecida.

Se determinó la probabilidad de ocurrencia de índices de temporal menores o iguales al 50%. Se encontró que para el caso de un cultivo por año, para el ciclo temprano, las probabilidades son casi cero.

Para el ciclo tardío, la probabilidad máxima de tener índices de temporal menores o igual al 50% es de 9%.

Lo anterior demuestra que aún cuando esta zona cuenta con condiciones agroclimatológicas favorables para el desarrollo de la agricultura de temporal, existen riesgos de pérdidas por sequías, por lo que es importante el establecimiento de un seguro agrícola para proteger la economía del agricultor.

En las tablas 7 a la 10 se presenta una comparación de los rendimientos históricos (1970-1981) con los simulados mediante el modelo Flinn; puede observarse que en la mayoría de los casos el rendimiento simulado es mayor al histórico. Se hizo también un análisis de frecuencia de donde resultaron los rendimientos tales que con una probabilidad del 75%, se espera obtener un rendimiento igual o mayor a ellos. O sea, que en tres de cada cuatro resultados se obtengan rendimientos iguales o mayores que los simulados.

## V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El análisis consistió en probar, mediante modelos matemáticos de simulación, si la precipitación y las características de los suelos de la zona satisfacen las necesidades hídricas de dos cultivos propuestos (sorgo y maíz), encontrándose que ambos cultivos tienen amplias posibilidades de desarrollarse con la humedad obtenida del temporal cumpliéndose con esto los objetivos propuestos en el presente trabajo.

Los modelos matemáticos utilizados fueron el FAO modificado, que obtiene como resultado final índices de temporal, y el modelo Flinn mediante el cual se obtuvieron rendimientos esperados de los cultivos.

Las principales limitaciones del desempeño de los modelos de simulación se derivan de la necesidad de suponer y simplificar algunos procesos, pero que a cambio se obtiene sencillez y funcionalidad en el modelo. Entre los principales supuestos y simplificaciones está el hecho de considerar que el suelo tiene un perfil homogéneo; por otro lado se asume también que no existe contribución a la humedad por parte del manto freático, limitando con esto la aplicabilidad de los modelos a los casos en que las características de las lluvias y de los suelos no permiten la presencia de mantos freáticos elevados.

Los únicos factores aleatorios que se supone gobiernan la producción de un cultivo son, la humedad del suelo, la evapotranspiración y las temperaturas medias.

La demanda evapotranspirativa de los cultivos es representada por los valores de evaporación medida en evaporímetro, lo cual ocasiona una gran simplicidad

en el modelo y una gran aplicación, ya que aunque existen métodos más exactos para calcular dicha demanda, éstos requieren un mayor número de datos climáticos y de los cultivos, no siempre disponibles en la mayor parte de las estaciones climatológicas de México.

Los resultados derivados de los estudios realizados indican que en la zona del proyecto Linares-Montemorelos N.L., existe una superficie de 213,000 Ha cubiertas por matorrales y 45,740 Ha de pastos que presenta características físicas del suelo y clima apropiados para el desarrollo de la agricultura de temporal, con lo que se incorporarían 258,740 Ha las que conjuntadas con las actuales se tendrían 303,879 Ha dedicadas a esa actividad agrícola.

Para llevar a cabo las propuestas de cambio en el uso del suelo, de matorrales a pastos y de pastos a granos, se requieren acciones consistentes en trabajos preagrícolas, construcción de almacenes para granos, caminos, rectificación de cauces naturales, drenes y acciones de apoyo tales como reforzar los servicios de crédito, seguro agrícola, extensionismo e investigación agrícola, de tal manera que se alcance una completa tecnificación del temporal.

Con el objeto de aprovechar al máximo la lluvia acumulada en los meses previos a la fecha de siembra, cuando se cultive en el ciclo temprano, se recomienda utilizar técnicas de manejo del suelo, como subsoleo, levantar bordos y rastrear; con la primera práctica se incrementaría la infiltración y con los bordos se trataría de inundar la superficie antes de la siembra; con el rastreo se disminuiría la pérdida de humedad en las capas superficiales.

## B I B L I O G R A F I A

1. Duncan C. Simcot a Simulation of Cotton Growth and Yield. In Murphy, C. E.J.D. Hersketh and B.R. Strain, Eds. Duke University, 1972.
2. Flinn J.C. "The Simulation of Crop-Irrigation Systems" in System Analysis in Agricultural Management. J.B. Dent. Ed. John Wiley and Sons. Australasia, Sidney, 1971.
3. Gordon, G. System Simulation-an Introduction to the Principles of Simulation and Application of Several Simulation Languages to system studies. Prentice-Hall, U.S.A., 1969.
4. Hall, W.A. y J.A. Dracup. Ingeniería de Sistemas en Recursos Hidráulicos. Trad. de la primera ed. inglesa, 1970 por Francisco Plata Olvera. C.E.C.S.A., México, 1971.
5. Norero, A. Fórmula para estimar la Influencia de la Humedad del suelo en la Productividad de los Cultivos. V Jornada Venezolana de Riego. Caracas, Ven. 1971.
6. Palacios V.E. Introducción al Análisis de Sistemas. Rama de Riego y Drenaje. Colegio de Postgraduados, Escuela Nacional de Agricultura, Chapingo, México, 1976.
7. Palacios y A. Martínez. Respuestas en Rendimiento de los Cultivos a diferentes niveles de Humedad del Suelo. Un enfoque metodológico de investigación. Rama de Riego y Drenaje. Colegio de Postgraduados, Chapingo, México 1978.
8. Palacios, V.E. Modelos de Simulación del Sistema Suelo-Planta-Atmósfera para evaluar Regiones Temporales. Rama de Riego y Drenaje, Colegio de Postgraduados, Escuela Nacional de Agricultura, Chapingo, México, 1981.

9. Palacios y J.L. Jaspeado. Método para Estimar la Tensión del Suelo en Fun  
ción de su Contenido de Humedad. Centro de Hidrociencias, Reco  
pilación de Artículos Publicados en diferentes revistas técni-  
cas. Chapingo, México, 1982.
10. Rojas, A.M. Modelo de Simulación Digital del Sistema Suelo-Planta-Atmósfe  
ra para estimar rendimientos de cultivos. Tesis de Maestría.  
Colegio de Postgraduados, Chapingo, México, 1978.
11. Soil Cons. Serv., National Handbook, Hidrology, Sect. 4, 1972. U.S.A.
12. Frere M. Et. Al. Pronóstico de Cosechas basado en Datos Agrometeorológi-  
cos: Producción y Protección Vegetal. Roma, Italia. Editado  
por FAO, 1980.
13. S.A.R.H. Dirección de Hidrología: Departamento de Hidrometría. Registros  
Climatológicos. México, 1982.

A P E N D I C E

TABLA No.1, Número de Curva de Escurrimiento (CN)

USO DE LA TIERRA O COBERTURA	TRATAMIENTO O PRACTICA	CN POR GRUPO DE SUELO */			
		A	B	C	D
Barbecho	Surcos Rectos	77	86	91	94
Cultivo de Surco	Surcos Rectos	70	80	87	90
	Contornos	68	77	83	87
	Terrazas	64	73	79	82
Granos Pequeños	Surcos Rectos	64	76	84	88
	Contornos	60	74	82	85
	Terrazas	60	71	79	82
Densamente Sembradas, Leguminosas o Potrero de Rotación	Surcos Rectos	62	75	83	87
	Contornos	60	72	81	81
	Terrazas	57	70	78	82
Pastizal	Pobre	68	79	86	89
	Normal	49	69	79	84
	Bueno	39	61	74	80
Superficie Impermeable		100	100	100	100

\*/ Grupo de Suelos descrito en la continuación de la Tabla 1.



Continuación . . . TABLA 1

*GRUPO	DESCRIPCION	INF. BASICA
A	Esgurrimiento potencial bajo. Suelos que tienen una alta tasa de infiltración, aún cuando estén completamente húmedos; consisten principalmente de capas gruesas de arenas o gravas con drenaje de bueno a - excesivo. Estos suelos tienen una tasa alta de transmisibilidad.	8-12 CM/H
B	Esgurrimiento potencial moderadamente bajo. Suelos que tienen tasas moderadas de infiltración cuando - están completamente húmedos; consisten principalmente en capas de moderadamente profundas a profundas con drenaje de moderadamente bueno a bueno y con texturas moderadamente finas a moderadamente gruesas. Estos suelos tienen una tasa moderada de transmisibilidad.	4-8 CM/H
C	Esgurrimiento potencial moderadamente alto. Suelos que tienen tasas de infiltración lenta cuando están completamente húmedos; consisten principalmente de suelos con una capa que impide el movimiento descendente del agua, o suelos con textura de moderadamente fina a fina. Tienen una tasa de transmisibilidad lenta.	1-4 CM/H
D	Esgurrimiento potencial alto. Suelos que tienen una tasa de infiltración muy lenta cuando están completamente húmedos; consisten principalmente de suelos arcillosos o con un alto potencial de expansión, -- suelos con un nivel freático permanentemente alto, suelos con estratos arcillosos o con capas de arcilla en o cerca de la superficie y suelos poco profundos demasiado cerca de material impermeable. Tienen una tasa de transmisibilidad muy lenta.	0-1 CM/H

FUENTE: U. S. Soil Conservation Service National Engineering Handbook. Hydrology. Sectio 4. 1972.

TABLA No.2, Coeficientes de Reducción del Rendimiento (CRR) de algunos cultivos, en sus diferentes etapas de desarrollo.

CULTIVO	CRR EN %			
	GERMINACION	CRECIMIENTO	MADURACION	COSECHA
Maíz	3	25	50	22
Frijol	2	24	65	9
Algodón	3	55	30	12
Cártamo	3	25	55	17
Girasol	3	30	40	27
Sorgo	3	55	30	12
Soya	2	29	60	9
Tomate	3	35	50	12

**TABLA 3**      PRECIPITACION      MEDIA MENSUAL      POR ESTACION  
 CLIMATOLOGICA  
 (milímetros)

ESTACION	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
Magueyes	21.5	16.0	31.7	47.9	91.0	137.9	84.0	140.2	206.8	92.4	26.2	19.9	914.8
Santiago	20.9	21.7	30.7	51.5	70.2	179.3	115.7	191.0	289.5	105.0	40.7	20.2	1136.8
C. Prieto	15.4	10.5	17.6	35.6	93.4	90.5	51.7	81.9	128.7	61.8	23.1	18.3	629.1
Linares	22.4	18.4	21.6	52.5	98.1	118.1	64.3	124.2	180.8	91.8	26.0	23.6	842.0
El Realito	17.0	16.7	18.1	29.7	76.1	73.5	49.5	104.7	170.7	60.7	19.2	12.9	649.2
Cabezones	21.0	20.4	28.6	60.0	97.7	127.2	74.4	137.8	208.2	98.9	27.3	20.8	928.6
Enramadas	27.8	16.8	19.7	50.7	79.7	92.7	65.3	121.5	228.2	79.8	25.3	22.4	829.8
Terán	18.4	19.4	31.5	36.1	82.0	105.5	65.9	102.5	204.6	93.7	27.9	22.2	809.4
Montemorelos	21.7	22.3	33.7	57.5	96.9	126.2	65.1	124.4	202.1	104.3	40.1	21.2	915.8
Cadereyta	15.2	19.5	23.2	43.4	75.0	104.6	74.8	88.9	161.4	84.3	34.4	27.8	753.0
San Juan	22.0	21.2	11.9	52.3	84.6	101.3	76.9	83.0	158.5	79.6	33.7	17.0	742.7
Allende	26.6	32.8	36.3	71.0	97.5	158.8	110.3	158.8	282.9	114.2	53.7	25.1	1167.9

**TABLA 4** EVAPORACION MEDIA MENSUAL POR ESTACION  
CLIMATOLOGICA  
(milímetros)

ESTACION	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
Magueyes	72.3	89.8	141.9	161.5	165.4	191.8	214.7	194.9	146.8	102.6	69.9	61.9	1613.7
Santiago	120.2	127.0	168.5	191.8	203.2	218.2	225.5	217.2	181.3	150.5	123.3	116.6	2043.5
C. Prieto	108.9	109.5	161.1	174.4	193.8	200.1	223.1	214.4	167.9	138.4	114.9	110.3	1916.7
Linares	65.9	89.9	137.6	163.0	169.8	193.3	228.0	201.6	136.2	97.3	71.9	57.9	1612.3
Cabezones	70.3	88.6	140.0	154.5	167.2	186.3	216.7	199.2	140.2	106.2	74.6	64.8	1608.6
Enramadas	122.4	131.0	183.5	197.0	211.7	228.2	264.0	243.9	189.9	156.6	132.8	123.0	2181.0
Terán	101.4	116.8	174.6	200.2	207.9	235.1	241.6	227.9	160.5	138.6	108.6	101.1	2014.3
Montemorelos	57.3	78.8	126.6	144.6	147.3	176.2	200.6	192.5	118.5	84.4	62.2	52.8	1441.8
Cadereyta	70.3	91.6	132.1	146.1	170.9	185.6	221.7	199.0	141.3	102.1	73.4	64.0	1598.0
San Juan	71.7	85.7	120.7	139.6	154.4	177.4	203.3	189.5	143.6	116.6	83.7	68.4	1549.6
Allende	53.0	72.7	110.0	122.8	131.4	153.3	183.7	165.9	111.1	81.0	55.6	48.3	1288.8

TABLA No.5, Unidades de Suelo Asociadas por Texturas

UNIDADES DE SUELO	TEXTURA
Vertisoles	Arcillosa
Regosoles Cambisoles Xerosoles	Arcillo-arenosa
Chernozem Faeozem	Franca
Fluvisoles Castañozem	Franco-arcillosa

TABLA No.6, Superficie por Clase de Uso Potencial Agrícola

CLASIFICACION (PRODUCTIVIDAD)	SUPERFICIE (HAS)	% DEL TOTAL
I Alta	352,548	74.5
II Media	20,176	4.3
III Baja	97,800	20.7
Cuerpos de Agua	1,446	0.3
Zonas Urbanas	960	0.2
T o t a l	472,930	100.0

TABLA No.7, Comparación de los Rendimientos Históricos con los Simulados mediante el modelo Flinn

Cultivo: Maíz  
Municipio: Cadereyta

AÑO	R E N D I M I E N T O (TON/HA)		
	HISTORICO	S I M U L A D O	
		SUELO FRANCO	SUELO FRA-ARCILLOSO
1970	1.00	1.84	1.99
1971	0.80	1.84	1.87
1972	0.90	4.61	4.79
1973	1.00	1.65	1.83
1974	--	1.99	2.03
1975	0.90	1.67	2.11
1976	0.90	4.14	4.17
1977	1.20	3.67	3.75
1978	--	2.19	2.06
1979	1.00	3.97	3.93
1980	1.00	1.29	1.39
1981	1.17	4.46	4.56

TABLA No.8, Comparación de los Rendimientos Históricos con los Simulados mediante el Modelo Flinn

Cultivo: Sorgo  
Municipio: Cadereyta

AÑO	R E N D I M I E N T O (TON/HA)		
	HISTORICO	S I M U L A D O	
		SUELO FRANCO	SUELO FRA-ARCILLOSO
1970	2.00	2.47	2.59
1971	2.00	2.38	2.44
1972	2.00	4.11	4.23
1973	--	2.20	2.41
1974	--	2.61	2.63
1975	--	2.30	2.62
1976	1.85	4.03	4.05
1977	2.00	3.63	3.72
1978	--	2.76	2.72
1979	1.39	3.90	3.89
1980	1.20	2.01	2.11
1981	1.88	4.14	4.22



TABLA No.9, Comparación de los Rendimientos Históricos con los Simulados mediante el modelo Flinn

Cultivo: Maíz (Temprano)  
Municipio: General Terán

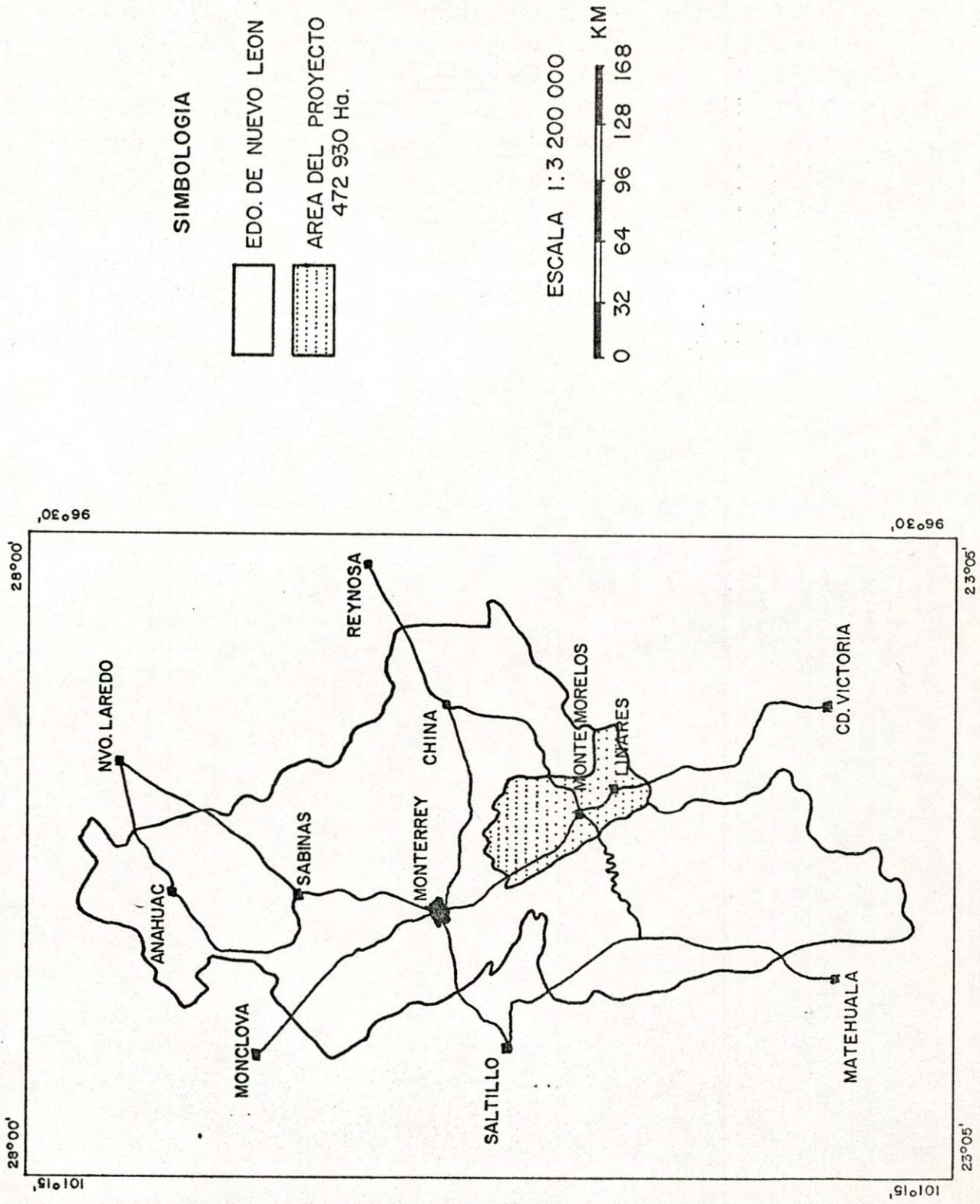
AÑO	R E N D I M I E N T O (TON/HA)		
	HISTORICO	S I M U L A D O	
		SUELO FRANCO	SUELO FRA-ARCILLOSO
1970	1.00	2.69	3.07
1971	1.00	0.95	1.10
1972	1.00	1.71	2.13
1973	1.20	1.76	2.23
1974	--	1.49	1.80
1975	0.90	0.86	0.62
1976	0.85	1.13	1.24
1977	1.20	1.22	1.51
1978	--	1.47	1.81
1979	1.00	1.57	1.99
1980	0.70	1.20	1.37
1981	2.99	4.71	4.82

TABLA No.10, Comparación de los Rendimientos Históricos con los Simulados mediante el Modelo Flinn

Cultivo: Sorgo  
Municipio: General Terán

AÑO	R E N D I M I E N T O (TON/HA)		
	HISTORICO	S I M U L A D O	
		SUELO FRANCO	SUELO FRA-ARCILLOSO
1970	1.30	3.13	3.38
1971	--	1.63	1.82
1972	--	2.34	2.65
1973	--	2.52	2.87
1974	--	2.21	2.46
1975	1.90	1.49	1.18
1976	1.90	1.83	1.95
1977	2.20	1.91	2.18
1978	--	2.15	2.41
1979	2.00	2.21	2.54
1980	2.50	1.87	2.07
1981	3.11	4.06	4.16

FIG. I LOCALIZACION DEL AREA DEL PROYECTO



**Fig 2** Tasa de evapotranspiración relativa como una función de la tensión o potencial del agua en el suelo para diferentes condiciones de evapotranspiración potencial.

Fuente: Taylor, Ashcroft, Physical Edaphology, W.H. Freeman, San Francisco, 1972, U.S.A

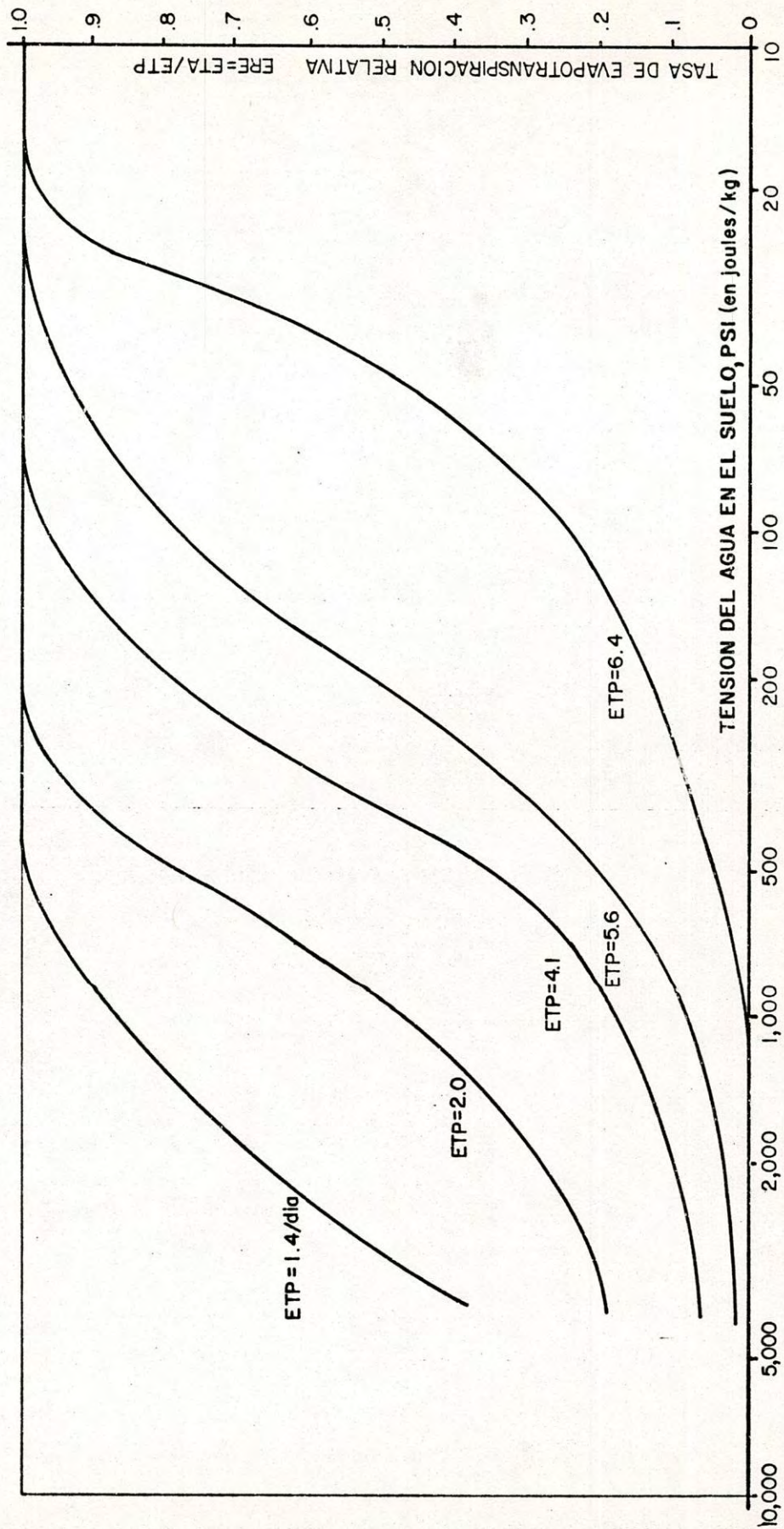


FIG. 3 FUNCIONAMIENTO DIARIO DEL MODELO. FLINN

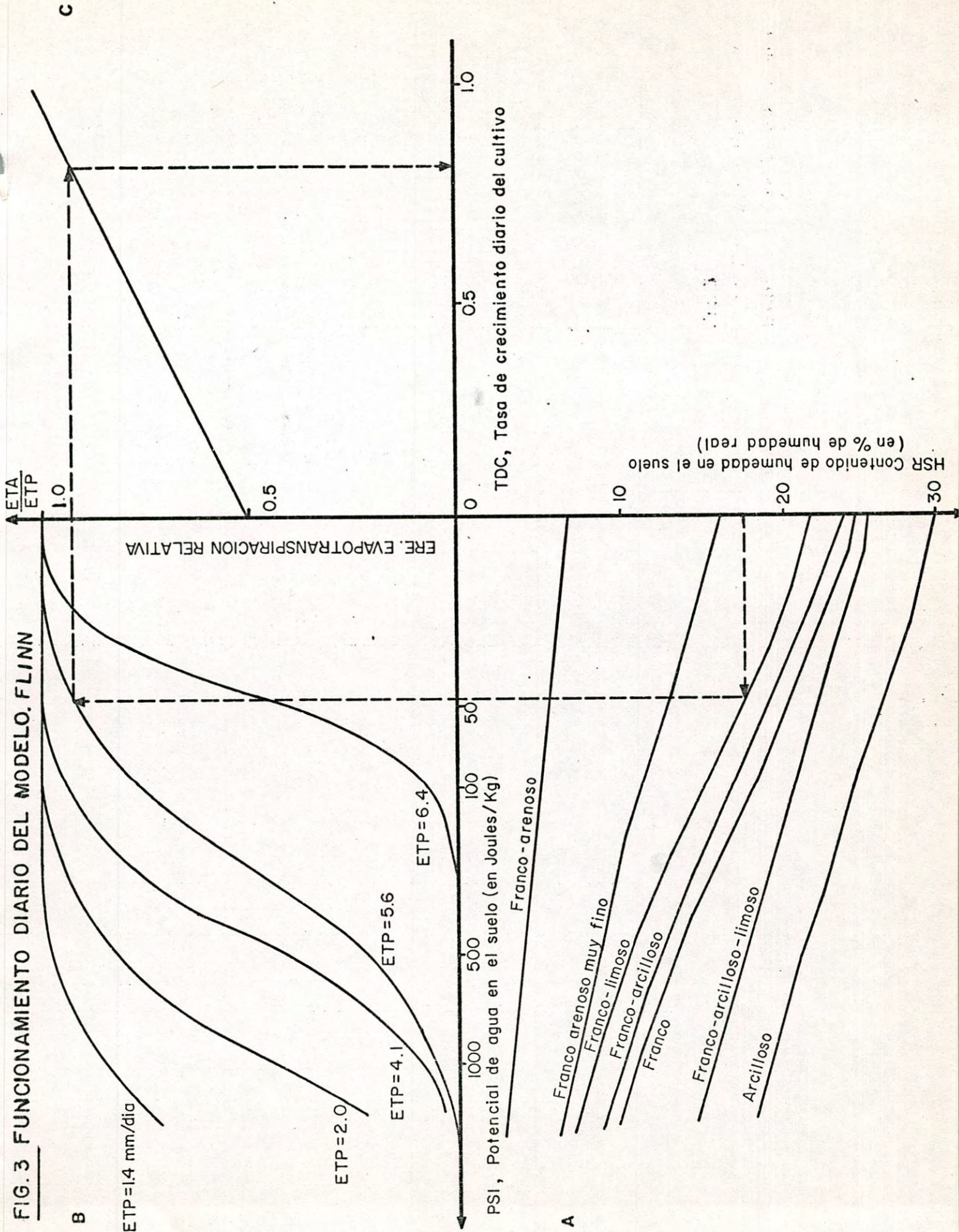


FIG. 4 LOCALIZACION DE LAS ESTACIONES CLIMATOLOGICAS

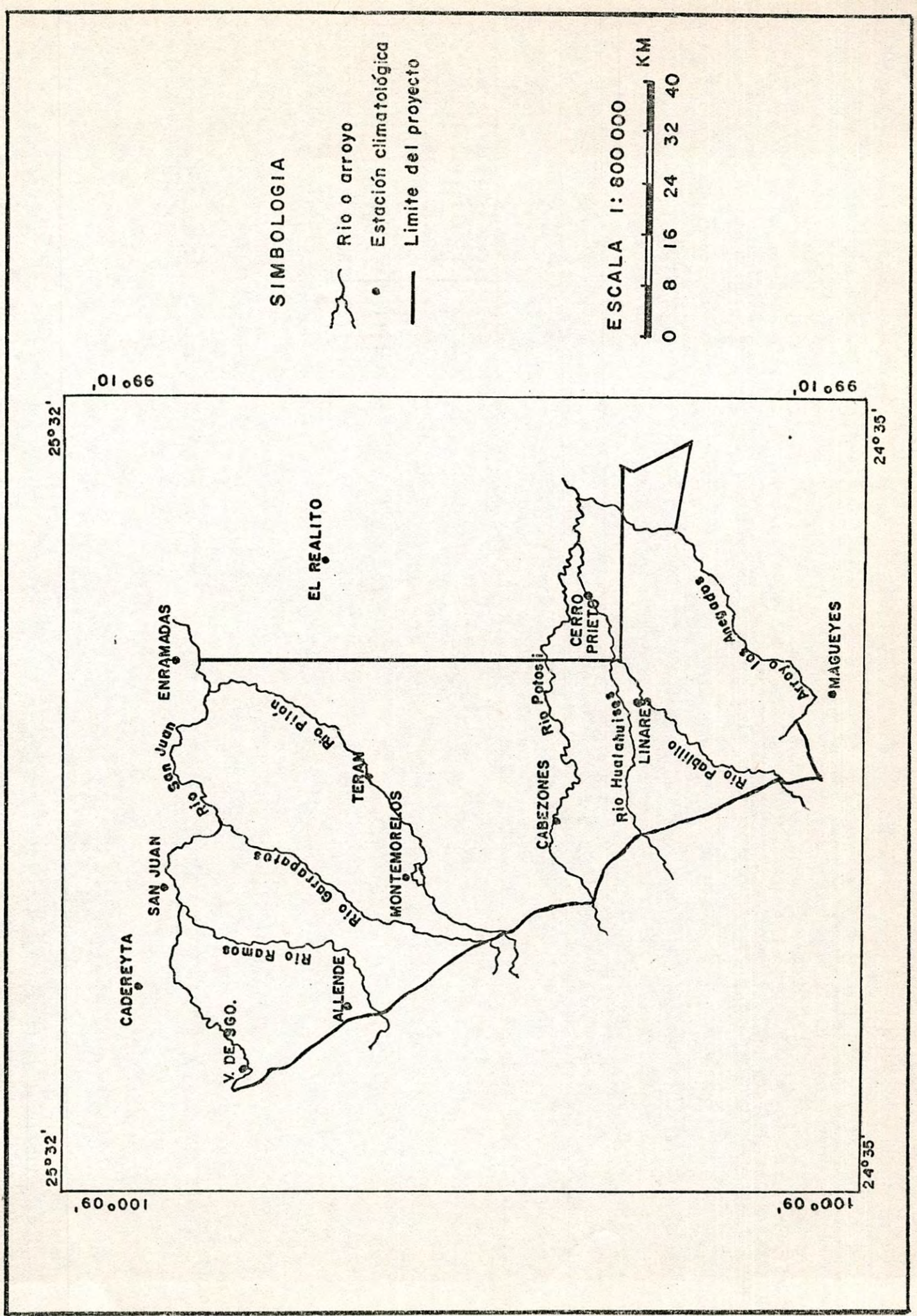


FIG. 5 PLANO DE UNIDADES DE SUELO

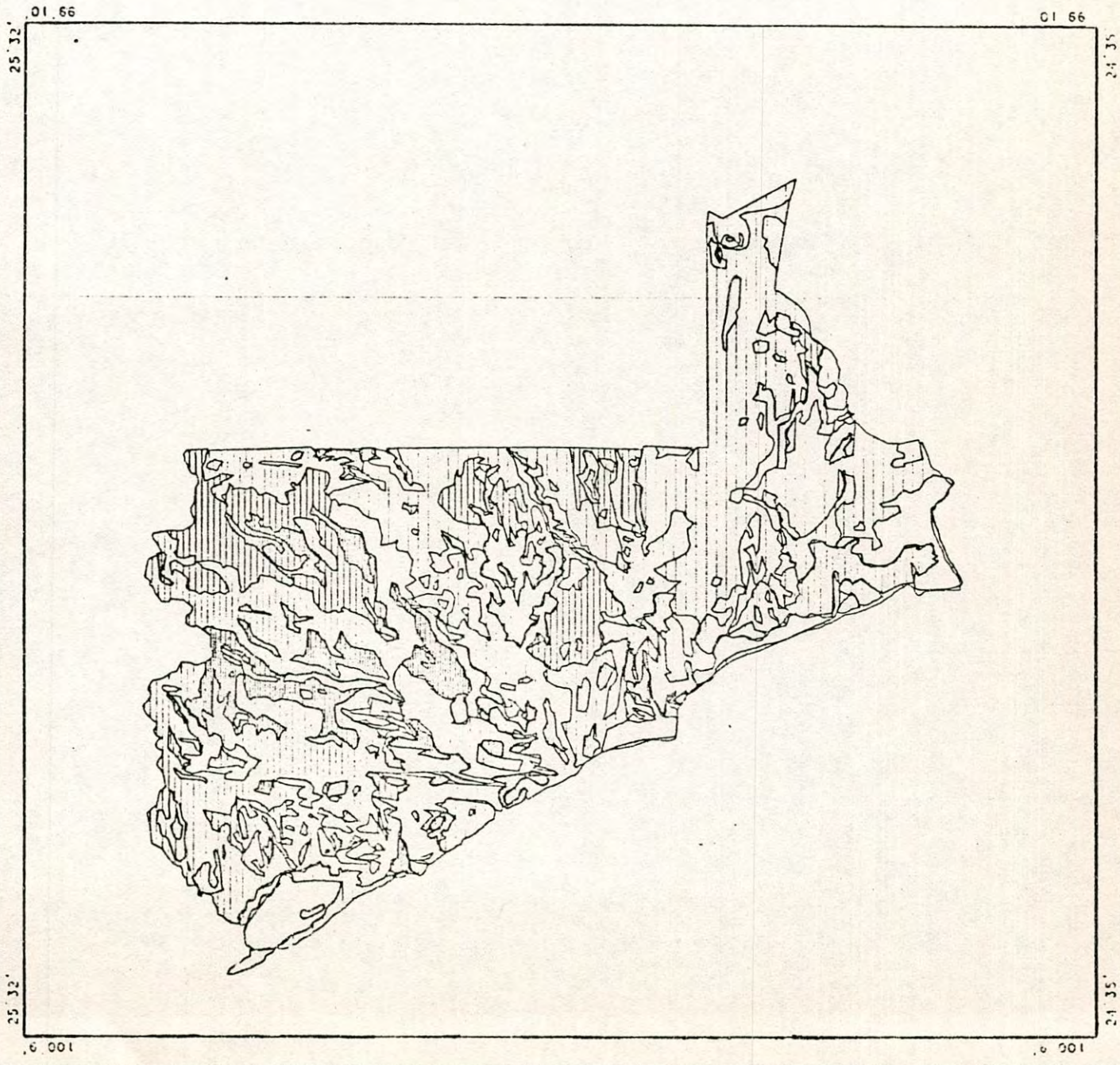


FIG. 6 PLANO DE TOPOGRAFIA

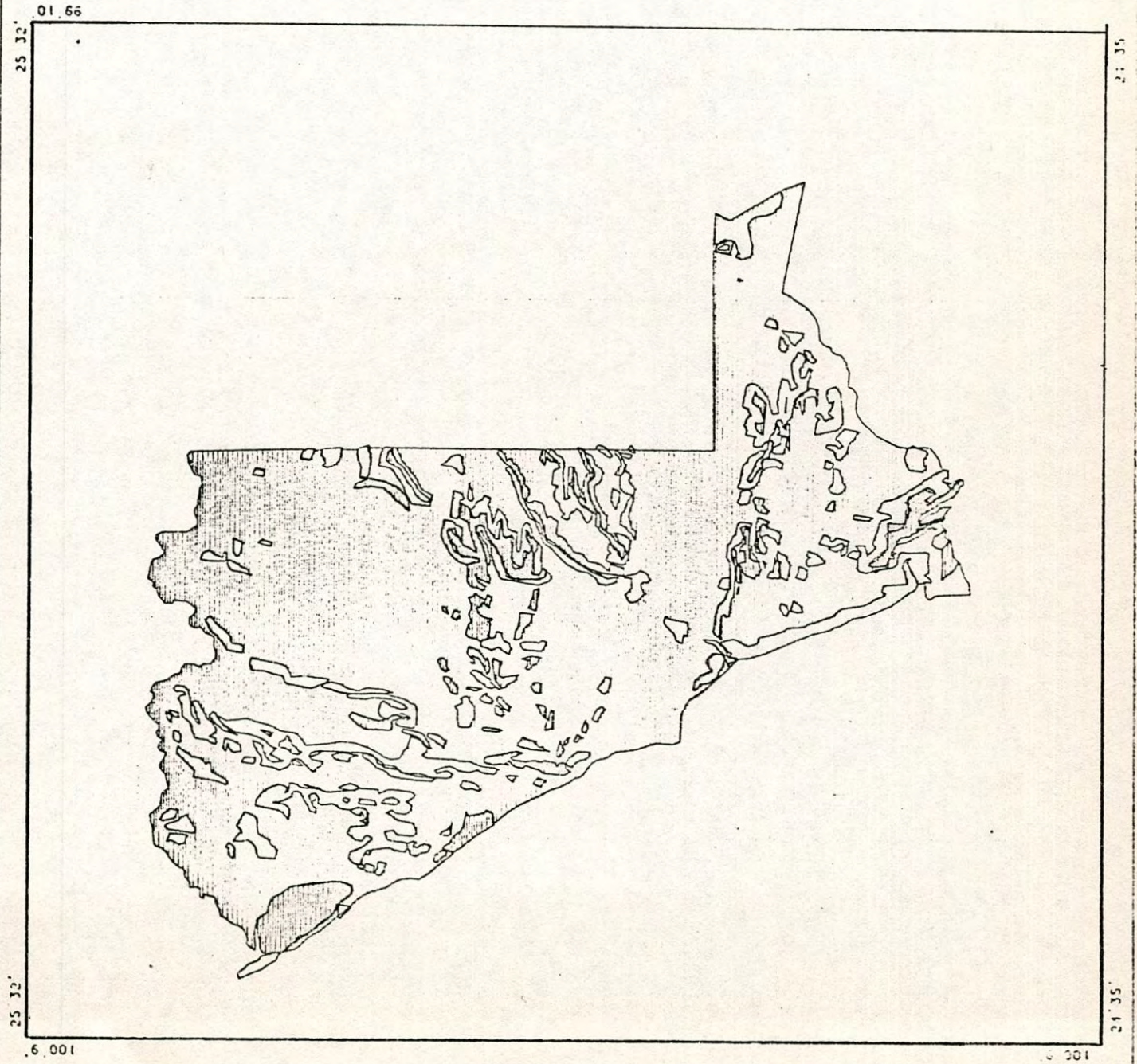




FIG. 7 PLANO DE USO POTENCIAL AGRICOLA

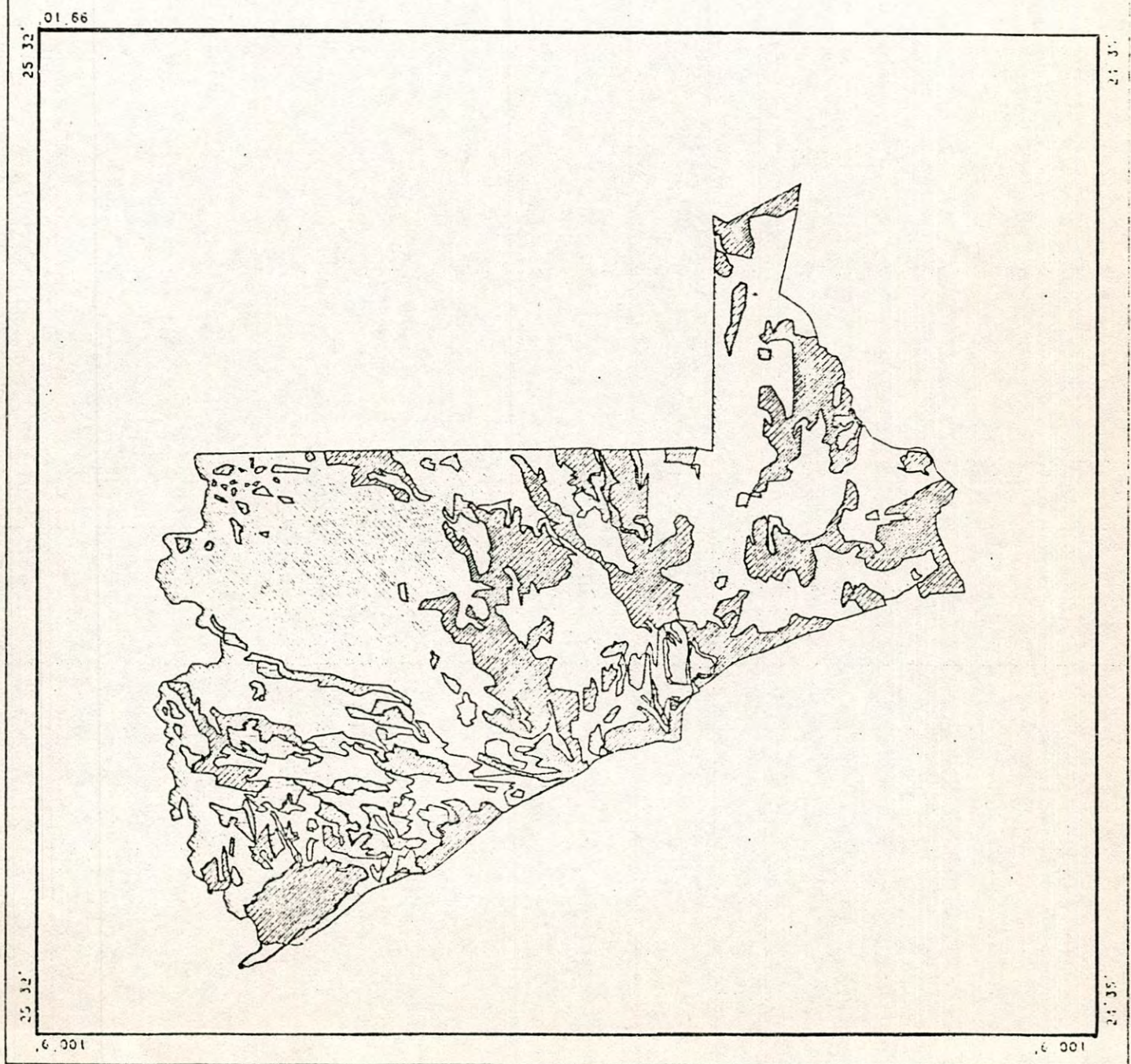


FIG. 8 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PROGRAMA FLINN

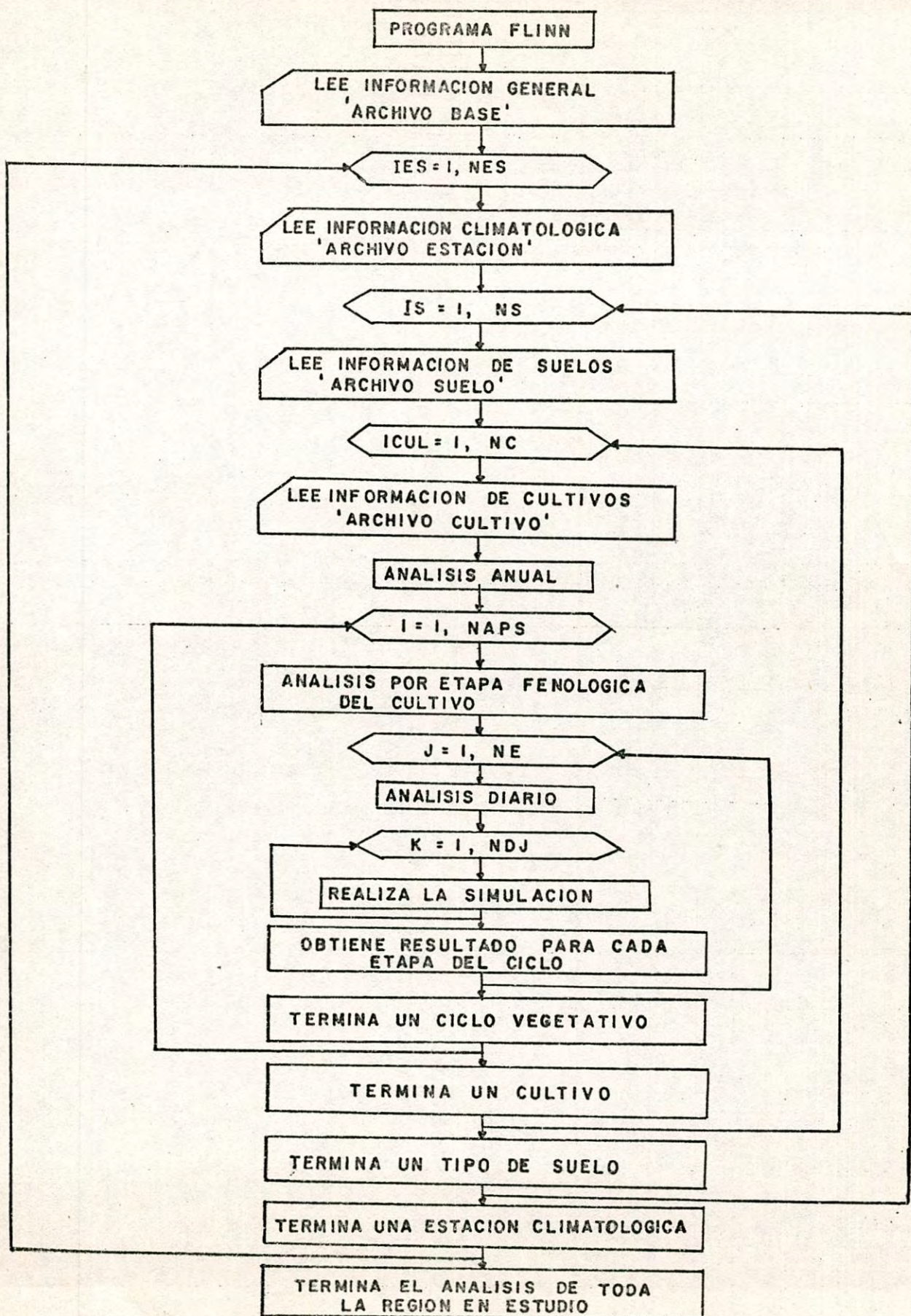


FIG. 9 INDICE DE TEMPORAL CONTRA FECHA DE SIEMBRA

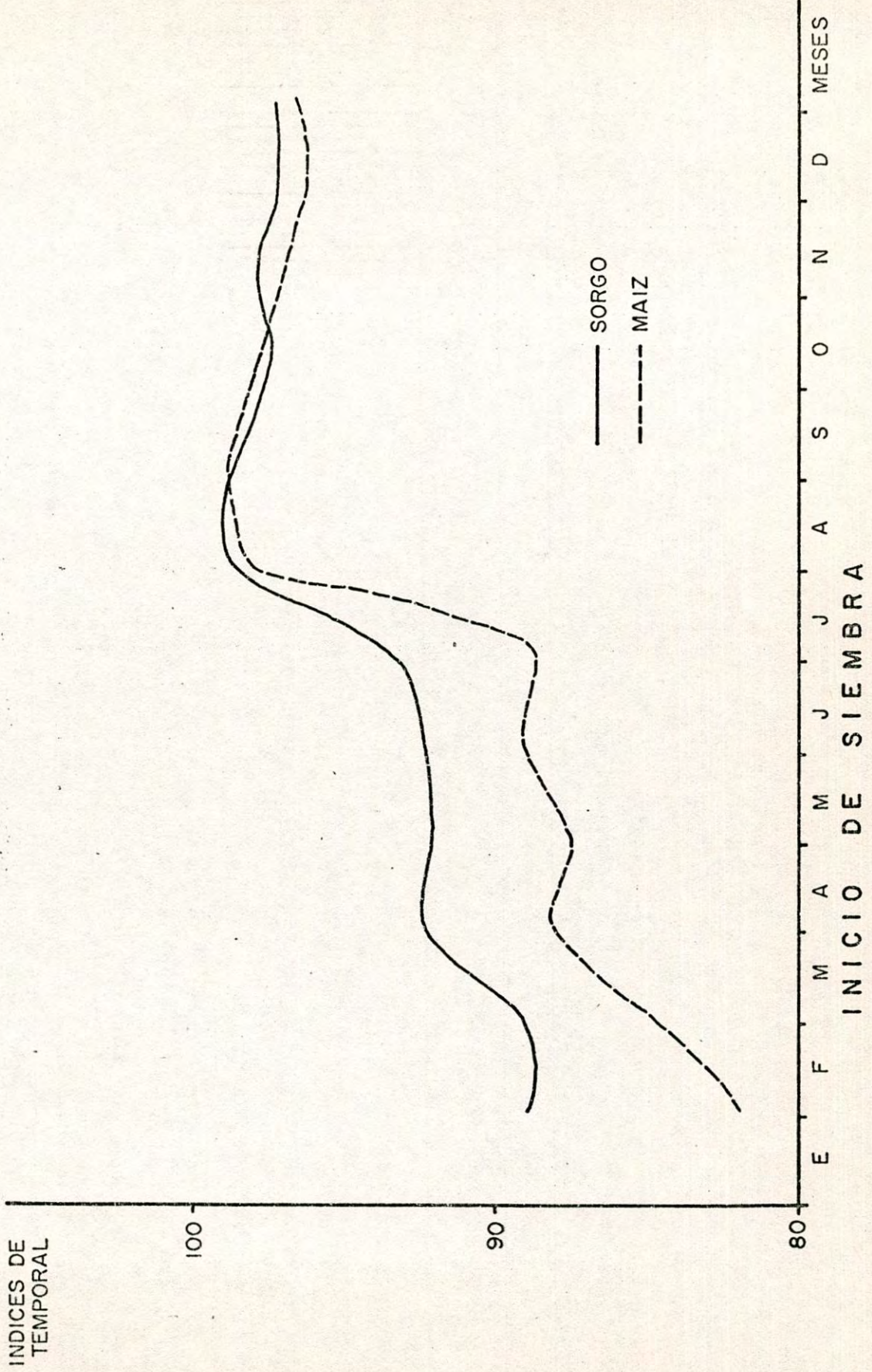
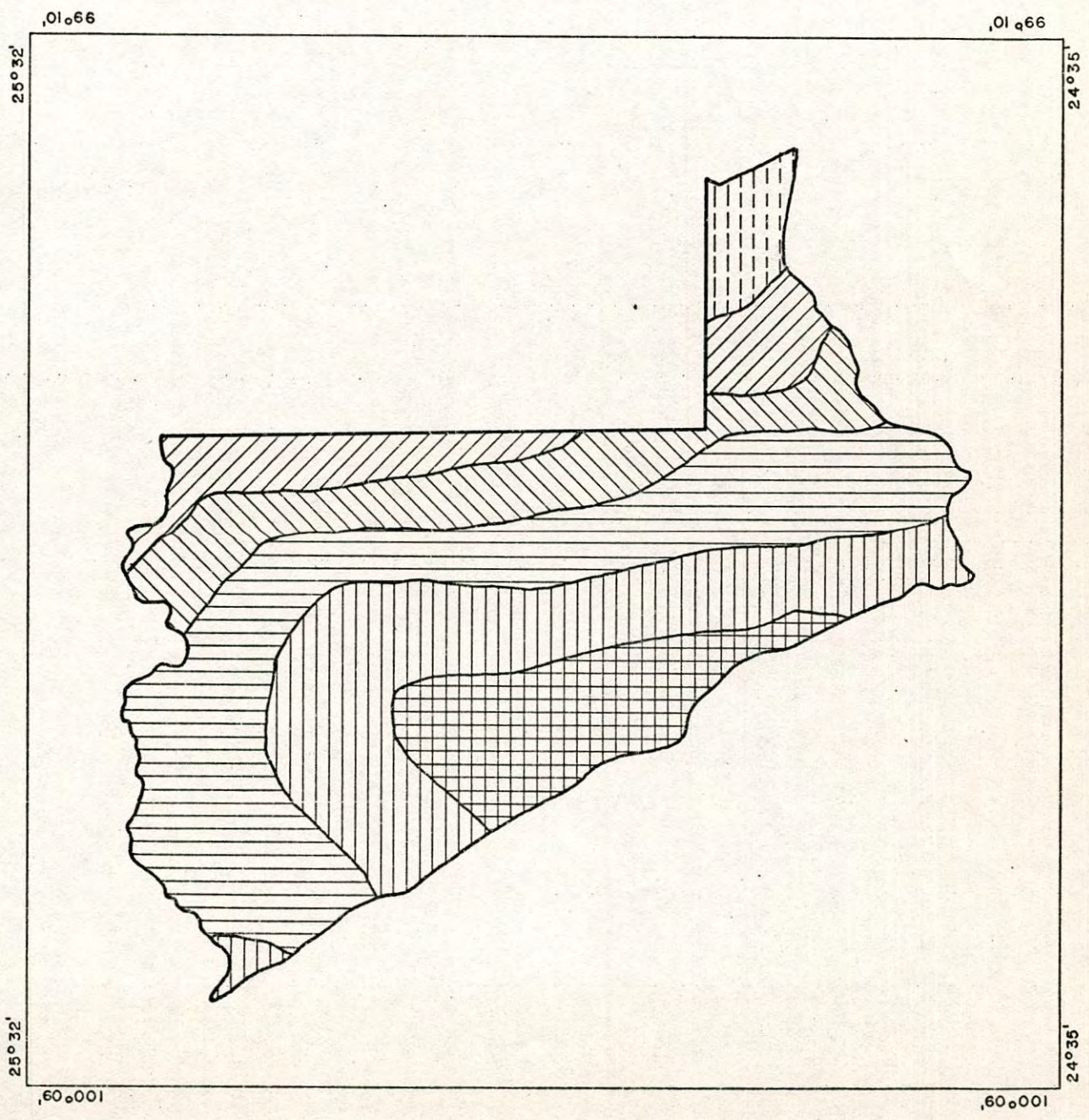


FIG. 10 INDICES DE TEMPORAL PARA MAIZ



**SIMBOLOGIA**

Indices de Temporal en % para  
suelos de textura arcillosa  
ciclo: Temprano  
cultivo: Maiz

- Mayor de 90
- Entre 85 y 90
- Entre 80 y 85
- Entre 75 y 80
- Entre 70 y 75
- Entre 65 y 70

ESCALA 1:800 000



