

BALANCE DE HUMEDAD DEL SUELO BAJO DOS TIPOS DE VEGETACION,
RELACIONADO CON LA EVAPOTRANSPIRACION

Por

LEONCIO LOJAN IDROBO

Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la OEA
Centro Tropical de Investigación y Enseñanza de Graduados
Turrialba, Costa Rica

Noviembre, 1961

BALANCE DE HUMEDAD DEL SUELO BAJO DOS TIPOS DE VEGETACION,
RELACIONADO CON LA EVAPOTRANSPIRACION

Tesis

Presentada al Consejo de la Escuela de Graduados
como requisito parcial para optar al grado

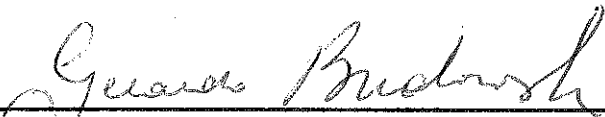



de

Magister Agriculturae

en el

Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la OEA

APROBADA:

	Consejero
	Comité
	Comité
	Comité

Noviembre, 1961

A la memoria de mi padre:
Guillermo Loján Romero

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa su sincero agradecimiento a las siguientes personas:

Dr. Gerardo Budowski, Dr. Joseph Tosi, Ing. Waldemar Albertin y Prof. Frederick Hardy, consejero y miembros del Comité respectivamente, por la colaboración y dirección recibida.

A los compañeros Eduardo Izquierdo y Julio Molineros, por la ayuda prestada en la toma de algunos datos de campo.

A los demás compañeros y personal del Instituto que en una u otra forma colaboraron en la terminación de esta tesis.

También desea expresar sus agradecimientos a las siguientes instituciones:

A la Universidad de Loja, por la licencia concedida para la realización de estudios posgraduados.

A la Organización de Estados Americanos, por la beca otorgada, que hizo posible la adquisición de nuevos conocimientos.

BIOGRAFIA

Leoncio Lolán Idrobo, nació en Loja, Ecuador el 20 de Abril de 1932.

Realizó sus estudios primarios en diferentes escuelas de su ciudad natal y los secundarios en el Normal Juan Montalvo de Quito y en el Colegio Bernardo Valdivieso de Loja, obteniendo el título de bachiller en 1951.

De 1951 a 1956 estudió en la escuela de Ingeniería Agronómica de la Universidad de Loja, graduándose en 1958.

De 1956 a 1957 trabajó en la rama de agricultura tropical; de 1957 a 1958 prestó servicios en calidad de asistente forestal en la Misión FAO en el Ecuador, y en 1959 fue designado profesor de Silvicultura en la Escuela de Agronomía de la Universidad de Loja.

A partir de Julio de 1960, en goce de una beca concedida por la O. E. A., realizó estudios posgraduados en el Centro Tropical de Investigación y Enseñanza para Graduados en Turrialba, Costa Rica, bajo el Departamento de Recursos Renovables.

CONTENIDO

	<u>Página</u>
AGRADECIMIENTOS	iv
BIOGRAFIA	v
INTRODUCCION	1
REVISION DE LITERATURA	2
La evapotranspiración. Métodos de estimación	2
La relación: evapotranspiración real y potencial	9
La humedad del suelo y métodos de medición	11
Algunos datos experimentales	13
MATERIALES Y METODOS	17
Localización del área de estudio	17
Toma de muestras y determinación de la humedad	20
RESULTADOS	23
Comparación de la humedad entre áreas	23
Comparación de la humedad dentro de cada área	28
DISCUSION Y CONCLUSIONES	33
RESUMEN	39
SUMMARY	41
LITERATURA CITADA	43
APENDICE	47

LISTA DE CUADROS

Cuadro Nº		<u>Página</u>
1	Análisis mecánico del suelo	18
2	Otras características de los suelos	19
3	Datos climatológicos del I.I.C.A.	20
4	Datos climatológicos del I.I.C.A. en los meses de estudio	21
5	Correlaciones y ecuaciones de regresión del contenido de humedad entre áreas y a distintas profundidades	24
6	Coefficiente de determinación para el contenido de humedad entre áreas y a distintas profundidades .	25
7	Cuocientes de: almacenamiento/evapotranspiración dentro de cada área	26
8	Cuocientes de almacenamiento y evapotranspiración entre áreas	27
9	Coefficiente de determinación para el contenido de humedad entre dos profundidades de muestreo	32

LISTA DE FOTO Y GRAFICAS

Foto N°		<u>Página</u>
1	Vista del área de estudio, con los tipos de vegetación bajo los cuales se midieron los cambios de humedad del suelo. En primer plano la asociación de zacates y al fondo el bosque secundario	x
 Gráfica N°		
1	Relación entre el factor F y la humedad del suelo, según diferentes autores	49
2	Esquema representativo de las áreas y los puntos de muestreo. A la izquierda se representa el tipo de vegetación y las profundidades de muestreo	50
3	Humedad del suelo y lluvia en las fechas de observación, expresada en mm de agua	51
4	Déficit de humedad acumulado en cada área, obtenidos de la diferencia entre la observación y la capacidad del campo. La línea de cruces representa el déficit asumiendo que el bosque hubiera tenido la capacidad de campo de zacate	52
5	Cantidad de agua almacenada y evapotranspirada en las áreas de estudio. En la profundidad total y en las profundidades de muestreo	53
6	Regresiones lineales del contenido de humedad entre áreas. Para el total de observaciones (invierno + verano) y para cada estación climática	54
7	Humedad del suelo en mm encontrada en profundidades similares de cada área en las fechas de observación	55
8	Almacenamiento y evapotranspiración por estaciones. En la profundidad total y en las profundidades de muestreo	56
9	Evapotranspiración acumulada en cada área de estudio	57

Gráfica N ^o		<u>Página</u>
10	Humedad del suelo en mm en cada profundidad de muestreo, dentro de su respectiva área ...	58
11	Déficit acumulado de humedad en cada profundidad de muestreo	59
12	Almacenamiento y evapotranspiración en las profundidades de muestreo dentro de cada área. Las barras de la izquierda pertenecen al área de zacate (Z) y a la derecha, al área de bosque (B). La escala vertical en mm de agua ..	60
13	Humedad del suelo en el área del bosque, observada y calculada mediante fórmulas de evapotranspiración. El primer nombre corresponde a la fórmula empleada y el segundo al factor F utilizado	61



Foto N°1. Vista del área de estudio, con los tipos de vegetación bajo los cuales se midieron los cambios de humedad del suelo. En primer plano la asociación de zacates y al fondo el bosque secundario.

INTRODUCCION

La evapotranspiración, o sea la cantidad de agua que se va a la atmósfera por evaporación y transpiración, ha despertado interés en los últimos tiempos, especialmente porque no se ha podido explicar el papel que desempeñan las plantas en ese proceso.

Se reconoce que bajo la influencia de ciertos factores, la evapotranspiración puede alcanzar un valor máximo o potencial; en la realidad, ese valor se alcanza cuando el suelo tiene agua suficiente para el aprovisionamiento; cuando escasea, la cantidad que se evapotranspira, es inferior a la potencial. La discrepancia entre autores consiste en evaluarla en condiciones reales, bajo la influencia de la vegetación; esa discrepancia puede resumirse en dos planteamientos:

1. La evapotranspiración real es un fenómeno físico dependiente de los factores climáticos, en el cual las plantas desempeñan un papel secundario.
2. La evapotranspiración real es controlada por el tipo de vegetación.

Cuando dicho proceso se realiza utilizando la humedad del suelo en un mismo hábitat, cualquier tipo de vegetación debería consumir igual cantidad de agua según el primer planteamiento, y distinta cantidad, de acuerdo al segundo.

Tal razonamiento sirvió de base para la realización del presente trabajo, que consiste en medir y comparar las variaciones del contenido de humedad del suelo, ocasionado por el consumo de dos tipos de vegetación que crecen en condiciones climáticas similares y teniendo como objetivos encontrar las diferencias y similitudes que arrojen algunas ideas en favor de los planteamientos expuestos.

REVISION DE LITERATURA

La evapotranspiración. Métodos de estimación.

El agua en la naturaleza está en constante movimiento, formando lo que se denomina "el ciclo hidrológico" que puede expresarse matemáticamente así (13):

$$RO = P - (T + E) \pm S$$

donde:

- RO es la escorrentía
P es la precipitación
T es la transpiración
E es la evaporación
S es la humedad del suelo y el agua almacenada.

El conjunto (T + E) se denomina "evapotranspiración" y representa la cantidad de agua que va a la atmósfera por medio de la transpiración y la evaporación del agua que cayó en el suelo o sobre las plantas.

Dada la importancia que tiene el agua en la naturaleza, el ciclo hidrológico y sus componentes son objeto de estudio en todas partes, por lo cual se han desarrollado teorías que explican el proceso y fórmulas para su evaluación y también instrumentos y dispositivos de comprobación.

Entre los métodos para medir la cantidad de evapotranspiración, Angus (3) señala cinco:

1. Métodos que usan el balance hídrico.
2. Diseños estandar, como los evaporímetros, atmómetros, etc.
3. Métodos que usan ecuaciones empíricas o semiempíricas.

4. Métodos que usan el principio del flujo de vapor (teoría de Dalton).

5. Métodos que utilizan el balance de energía superficial.

Existen además otros métodos que no son citados, por ejemplo la medición del cambio de humedad en el perfil natural del suelo, o en muestras intactas o alteradas (4).

Carter (10), ha señalado tres métodos empíricos o semiempíricos que estiman la evapotranspiración potencial y que son mas utilizados en el mundo: el de Thornthwaite, el de Penman y el de Blaney y Criddle. Además de los indicados, hay otros métodos que persiguen el mismo fin (17, 43).

A continuación se indican algunos métodos, llamados empíricos, y la concepción de cada autor sobre el asunto tratado.

El método de Thornthwaite. Según este autor (10, 36, 37, 38, 39), la evapotranspiración depende de las siguientes circunstancias:

- a) Del suministro exterior de energía a la superficie evaporante, en particular de la radiación solar.
- b) De la capacidad del aire para remover el vapor.
- c) Del tipo de vegetación, especialmente en la capacidad de reflejar la radiación incidente (albedo), área que cubren las hojas, la profundidad de las raíces.
- d) De la naturaleza del suelo y la cantidad de agua aprovechable en la zona de raíces.

Se considera que el suministro de energía es el factor dominante o principal, y que diferentes tipos de vegetación evapotranspiran cantidades distintas, debido a su albedo, en forma tal que, a mayor albedo, menor será la evapotranspiración y viceversa. Pese a lo indicado,

el cálculo de la evapotranspiración potencial (e) se hace con la siguiente fórmula:

$$e = 1.6 L (10t/I)^a$$

donde:

L es un ajuste para el número de horas de luz y días del mes.

t es la temperatura media del aire en el período especificado, en °C.

I y a son coeficientes que varían con la temperatura.

I se denomina "índice de calor" y se deriva de la suma de temperaturas durante el año.

Para facilitar el cálculo, se han construido tablas que dan valores para distintos lugares del mundo (40).

Algunos resultados obtenidos de diferentes latitudes hacen resaltar el hecho de que, al compararlos con los datos reales, la fórmula indicada tiende a dar valores muy altos en verano y muy bajos en invierno.

El método de Penman. Según este autor, la evapotranspiración depende de las condiciones climáticas y no de la altura o rapidez de crecimiento de las plantas, siempre que éstas permanezcan verdes y con agua suficiente (33); cuando el agua en el suelo es el factor limitante, la evapotranspiración depende de la profundidad de raíces y de la habilidad del suelo para transmitir agua hacia la zona de raíces (25).

La transpiración sería un caso particular de evaporación natural o sea un fenómeno controlado por el clima en el cual la planta juega un papel menor (26); por lo tanto, puede calcularse a partir de datos atmosféricos que incluyan la cantidad de energía para transformar el agua en vapor y el mecanismo de transporte de ese vapor (26, 27, 28). En forma simplificada, esos datos serían: 1) la duración del brillo solar; 2) la temperatura del aire; 3) la humedad del aire; y 4) la

velocidad del viento (27). El valor obtenido correspondería a la cantidad de evaporación de una superficie de agua y podría transformarse en valor de evapotranspiración, utilizando un factor que variase con las estaciones del año.

En resumen, el método de Penman para calcular la evapotranspiración potencial consta de tres pasos:

1. La estimación de la evaporación de una superficie de agua, combinando la teoría de la turbulencia de Dalton y la teoría del balance de energía (28); se tiene así:

$$E_o = (\Delta H + 0.27 E_a) / (\Delta + 0.27)$$

donde:

E_o es la evaporación de una superficie de agua, en mm/día.

H es la cantidad de energía que se emplea en calentar el aire y el material que se evapora. Se calcula a base de la energía incidente y reflejada.

Δ es la gradiente de tensión de vapor, a la temperatura media del aire.

0.27 es una constante higrométrica, a veces representada por (γ).

E_a es un término que se calcula a base de la velocidad del viento y la diferencia de tensión de vapor cerca del suelo. Representa la evaporación ocasionada por estos factores.

2. El segundo paso consiste en multiplicar el valor de E_o por un factor empírico f , para convertirlo en valor de la evapotranspiración E_t .

$$E_t = E_o f$$

3. El tercer paso se aplica para períodos de sequía y para controlar la irrigación. Consiste en corregir el valor de E_t de acuerdo a la profundidad de raíces y a la curva de desecamiento del suelo (25).

Las conclusiones anteriores son aplicables a pastos y algunos cultivos de poca altura. Cuando se trata de estimar la evapotranspiración de árboles, Penman (26) hace referencia de que la mayor superficie de exposición aumentaría la transpiración; la pérdida causada por el viento se reduciría en un bosque, pero no en forma compensada al aumento indicado. Por lo tanto, el bosque evapotranspira una cantidad de agua mayor que el pasto.

Se han hecho conjeturas en el sentido de que ese aumento se debería a que el bosque es más oscuro, por lo tanto absorbe más energía y que la diferencia frente al pasto no debería ser más de un 5% (20).

Como observación adicional, hay que indicar que el método descrito es algo largo para hacer los cálculos y que requiere mediciones que no se toman en todas las estaciones meteorológicas.

El método de Blaney y Criddle. Este método ha sido usado para determinar el requerimiento de agua de los cultivos, en Estados Unidos de Norte América (10). Supone que la evapotranspiración varía con la temperatura, horas de luz, humedad disponible y tipo de cultivo (6).

La cantidad de agua consumida por un cultivo se determina con la siguiente fórmula:

$$U = K F$$

donde:

U es la cantidad de agua consumida o evapotranspiración, con abastecimiento suficiente de agua.

K es un coeficiente empírico, según el cual unos cultivos usan más agua que otros.

F es la suma de factores mensuales que producen la evapotranspiración, o sea el producto de la temperatura en QF y el porcentaje de horas de luz diaria por año.

En esta fórmula, los valores de K deben determinarse para cada cultivo y serían constantes para cualquier lugar que se considerase. Algunos de esos valores han sido determinados (6).

El método de Holdridge. Se basa en la bio-temperatura media anual, esto es, la suma de las temperaturas medias mensuales superiores a $0^{\circ}C$, dividida por 12, cuando las plantas realizan actividad biológica. También incluye unos factores para modificar la unidad de tiempo que se considere (18).

La evapotranspiración potencial Etp. se calcula con la siguiente fórmula:

$$\text{Etp.} = 58.93 \frac{\text{unidad de tiempo o período}}{\text{N}^{\circ} \text{ de unidades de tiempo en 1 año}} \text{ bio-temperatura media anual en grados C.}$$

Los valores obtenidos para la Etp. deben corregirse para conocer la evapotranspiración real, la misma que varía de acuerdo con la pluviosidad del lugar que se considere.

Otros métodos. Existen otros métodos con sus respectivas fórmulas para la determinación de la evapotranspiración, algunos de ellos son citados por Angus (3).

En la Unión Soviética, se han empleado diferentes fórmulas para calcular la evaporación de la superficie del suelo, aunque, según indica Vitkevich (43), ninguna de ellas ha probado ser satisfactoria. A

vía de ejemplo se citarán tres fórmulas que indican los componentes que se han tomado en cuenta.

1. La fórmula atribuida a Shantskii (43):

$$I = 0.06 (15 \pm t) (100 - e)$$

donde:

I es la evaporación del suelo con vegetación o sin ella.

t es la temperatura.

e es la humedad relativa.

2. La fórmula atribuida a Kostyakov (43):

$$C = Kt \left(1 - \frac{e}{100} \right)$$

donde:

C es la "evaporación convencional"

t es la temperatura del aire

e es la humedad relativa

K es un coeficiente que depende de la velocidad del viento.

3. La fórmula de Kostin (43):

$$\text{Evap.} = \frac{D}{4} (1 + 0.004 t)^2$$

en esta fórmula, D es la deficiencia mensual de humedad, en promedio.

En resumen, se ha criticado a estas fórmulas porque ninguna estima la cantidad real de evapotranspiración, ya sea porque consideran que este fenómeno ocurre sobre una superficie homogénea, o porque no incluyen todos los factores determinantes del proceso, o porque le dan a un factor más importancia que a otros, cosa que no puede aplicarse en cualquier lugar del mundo.

Los métodos que utilizan fórmulas, tratan de estimar la evapotranspiración potencial y para llegar a determinar la cantidad real,

utilizan correcciones de acuerdo al contenido de "agua disponible" en el suelo. No hay unanimidad de criterios en cuanto a la evaluación de la cantidad de humedad del suelo que produce una reducción en la intensidad de evapotranspiración, como se explicará mas adelante.

La relación entre la evapotranspiración real E_t y la potencial E_p
(factor F)

Se conoce con el nombre de "agua disponible" a la cantidad existente en el suelo, y que las plantas pueden tomarla antes de morir por marchitez; esta cantidad varía de acuerdo con la capacidad de retención del suelo, pudiendo determinarse si se conocen los valores de la capacidad de campo y del punto de marchitez.

Si se establece la relación $\frac{E_t}{E_p} = F$

en la que E_t representa el valor de la evapotranspiración real (variable), y E_p representa la evapotranspiración potencial (constante); el valor de F , indicaría la corrección que debe aplicarse a E_p , para igualar a E_t . Si los valores sin corregir fueran iguales, F sería igual a la unidad. Como se cree que la E_t varía con el porcentaje de "agua disponible", habrán ocasiones en que E_t sea igual o diferente a E_p .

Según Thornthwaite (39) F varía linealmente con la cantidad de agua disponible en el suelo, en la zona de raíces. A la capacidad de campo, la E_t es igual a la E_p , por lo tanto $F = 1$; con un 50 por ciento de agua disponible, la E_t sería la mitad de E_p , por lo tanto $F = 0.5$; al punto de marchitez (0 por ciento de agua disponible) no hay evapotranspiración, $E_t = 0$, por lo tanto, $F = 0$.

Veihmeyer y Hendrickson (41, 42) opinan que desde la capacidad de campo hasta el punto de marchitez, el agua se encuentra disponible para la evapotranspiración; esto indica que $F = 1$ a la capacidad de campo,

y $F = 1$ al punto de marchitez; en otras palabras, la E_t es igual a la E_p mientras exista cualquier cantidad de "agua disponible" en el suelo. La E_t bajaría bruscamente a cero, al llegar al punto de marchitez.

Penman (25), opina que las raíces ocupan una profundidad de suelo que dará a las plantas una cantidad definida de agua para ser transpirada al máximo; después que esta cantidad haya sido transpirada, la E_t empieza a ser menor que la E_p . Smith (35) ha calculado los valores de F , según la concepción de Penman; de esos valores se deduce que $F = 1$ desde que el agua disponible se encuentra al 100 por ciento (capacidad de campo), hasta que llega al 20 por ciento; de aquí empieza a disminuir, pero no llega a cero en el punto de marchitez. (Ver Gráfica Nº 1).

Alvim (1, 2), indica que hay una relación entre la apertura de estomas y la cantidad de agua disponible en el suelo; esta deducción la hace aplicable al cacao. La apertura de estomas llega al máximo mientras exista más del 70 por ciento de agua disponible; se reduce sensiblemente al llegar al 50 o 60 por ciento, pero las estomas se cierran totalmente al llegar al punto de marchitez. Si se pudiera relacionar la apertura de estomas con la cantidad de evapotranspiración, se tendrían valores de F , como se indican en la Gráfica Nº 1.

Gulidova (16), en base a estudios realizados sobre la transpiración en hojas de árboles de diferentes especies, deduce que la intensidad máxima de transpiración ocurre cuando el agua se encuentra entre la capacidad de campo y el "punto de ruptura de la continuidad capilar", que es más o menos el 70 - 75 por ciento de agua disponible; de este punto hasta la marchitez permanece más o menos constante y oscila cerca del 50 por ciento de la transpiración máxima.

Las suposiciones anteriores difieren unas de otras, en la evaluación

de F de acuerdo con el contenido de humedad del suelo. Para mayor claridad, se presentan en la Gráfica N^o 1.

Cada autor defiende sus puntos de vista respecto del valor de F, pero hace falta más investigación para llegar a conclusiones definitivas.

La humedad del suelo y métodos de medición

Se denomina "humedad del suelo" a la cantidad de agua que se encuentra en distintas formas de adherencia con las partículas del suelo. Para expresar la relación suelo - agua, se emplean las denominadas "constantes de humedad del suelo". Baver (5) señala cuatro "constantes": 1) coeficiente de higroscopicidad; 2) punto de marchitez o porcentaje de marchitez; 3) capacidad de campo; y 4) el equivalente de humedad. Según la disponibilidad de agua para las plantas, el mismo autor establece tres categorías:

- I. Humedad excesiva, sujeta a drenaje, cuyo intervalo se encuentra entre la capacidad de campo y el punto de saturación del suelo.
- II. Humedad fácilmente disponible para las plantas, después que el exceso se ha drenado. El intervalo se encuentra entre la capacidad de campo y el porcentaje de marchitez permanente.
- III. Humedad del suelo demasiado baja para el normal funcionamiento de las plantas, cuyo intervalo está entre cero y el porcentaje de marchitez permanente.

Por otra parte, Rode (30) ha establecido 10 constantes de humedad del suelo, y respecto a la disponibilidad para las plantas establece las siguientes categorías:

- I. No disponible, se encuentra entre el intervalo de cero al máximo de saturación de "humedad adsortiva".

- II. Disponible con gran dificultad, entre el extremo anterior y la "humedad de marchitez permanente".
- III. Agua disponible con dificultad; entre la marchitez permanente y la "humedad al punto de ruptura de la continuidad capilar".
- IV. Agua disponible en forma corriente; entre la humedad de ruptura capilar y la capacidad de campo.
- V. Agua fácilmente disponible, volviéndose excesiva; entre la capacidad de campo y el punto de saturación.

Estas constantes pueden determinarse por distintos métodos, pero tienen interés por la posible influencia que pueden ejercer sobre la evapotranspiración. Por ahora lo que interesa es la determinación de la humedad del suelo y ubicarla dentro del intervalo apropiado.

Se han ideado diferentes métodos para la determinación de la humedad del suelo. Lull (21) señala 13 métodos e indica que los más usados son tres: el método gravimétrico, el que utiliza el principio de resistencia eléctrica y el método del tensiómetro.

Smith (34) clasifica los métodos en dos grandes grupos:

1. Métodos directos, o sea los que miden la humedad del suelo en el terreno o en muestras extraídas. Los métodos indicados por Lull (21) caerían dentro de esta clasificación.
2. Métodos indirectos, o sean aquellos que utilizan los datos meteorológicos para evaluar la cantidad de agua almacenada en el suelo. Estos métodos se basan en que el proceso de la evapotranspiración se realiza utilizando el agua del suelo; por lo tanto, conociéndose la cantidad de evapotranspiración, se conoce la cantidad tomada de la fuente de aprovisionamiento.

Un método que puede considerarse como intermedio es el de los

lisímetros que estiman la humedad del suelo, aplicando la fórmula del ciclo hidrológico; este método también se aplica para determinar la evapotranspiración (4).

Se considera que los métodos directos son lentos y a veces difíciles o costosos; por esta razón se ha buscado un método indirecto que permita estimar la humedad del suelo en cualquier tiempo y con exactitud. Los métodos que estiman la evapotranspiración a base de datos meteorológicos se prestan para esta finalidad, pero, como lo indica anteriormente Smith (35), ninguno de los tres mencionados (Thorntwaite, Penman y Blaney & Criddle) han demostrado ser eficaces.

Algunos datos experimentales

Aparte de las consideraciones que se han hecho, referentes a los métodos para estimar la evapotranspiración, se presentan a continuación algunos estudios experimentales relacionados con el tema y que demuestran la influencia de los factores externos y algunas controversias en cuanto a la interpretación.

Fritschen (14) relacionó la evapotranspiración de un cultivo de maíz y encontró que aquella varía con el desarrollo del vegetal, y que, posiblemente, esa relación pueda aplicarse a los cultivos anuales.

En trabajos realizados por Bavel (4), utilizando lisímetros, se encontró que la evapotranspiración no varía mayormente en condiciones diferentes de localidad y clima, cuando se trata de una cobertura de pasto, y que tampoco se ha encontrado diferencia significativa al comparar la evapotranspiración entre cultivos de maíz, trigo o pradera.

Thorntwaite (37) comparó la evapotranspiración en diferentes condiciones de cobertura vegetal y sus conclusiones fueron que la E_t era menor en una superficie cubierta con pasto, 14 por ciento mayor que ésta

en un bosque de roble (Quercus), 20 por ciento mayor en un bosque de pino y 30 por ciento mayor en un suelo arenoso húmedo y desnudo.

Zahner (44) comparó el consumo de agua en la estación seca, de un bosque de coníferas frente a otro de hoja ancha, en áreas similares. La comparación de los resultados indicó que no había diferencia, y concluyó que la evapotranspiración no dependía de las especies, sino del clima; esta conclusión la respaldó también al comparar los resultados con datos obtenidos a base del método de Thornthwaite (de evapotranspiración).

Gulidova (16), comparando los resultados de medición de transpiración en hojas de árboles, clasifica la intensidad de aquella en dos etapas: la primera, cuando hay más del 75 por ciento de agua disponible, en que la transpiración se realiza al máximo de intensidad y bajo la influencia de los factores atmosféricos, como luz y temperatura. La segunda etapa, cuando el agua es escasa y en la cual la intensidad de transpiración se reduce en más o menos un 50 por ciento, este valor permanece constante cuando subsiste el factor limitante, y el fenómeno no depende de los agentes atmosféricos. La diferencia de transpiración entre especies sólo se nota en la primera etapa.

Rowe (32), midió la humedad restante en el suelo, bajo chaparral y bajo pasto, durante el período de verano y a una profundidad de 12 pies. Los resultados obtenidos condujeron a la conclusión de que la evapotranspiración era mayor en el área de chaparral, debido a que tiene raíces profundas que le permiten transpirar durante la estación seca, en cambio el pasto transpiraba menos, pero almacenaba mas agua durante esa estación. *¿Será que el pasto almacenaba mas m.o. por lo tanto mas agua?*

Pereira (29) relata que, al cambiar la vegetación natural para conocer el uso por otras plantas, encontró ahorro de agua al cambiar el

bambú con maderas suaves; los cipreses de 15 a 20 años consumieron más o menos una cantidad igual al bambú; los pinos de más de 30 años consumieron más agua que los anteriores. Esto indica que las plantas jóvenes consumen menos agua que las maduras.

Experimentos llevados a cabo en Coweeta en Estados Unidos de Norte América (23), empleando pequeñas áreas de captación, demuestran que la evapotranspiración disminuye al eliminar la vegetación. Al regenerarse el bosque, la evapotranspiración va en aumento, más o menos de acuerdo con la edad del rodal, hasta adquirir valores iguales a los que tenía antes del tratamiento. Cortando el sotobosque, hay una disminución pequeña de la evapotranspiración.

Bochkov (8), en base a observaciones realizadas en Rusia, concuerda con las conclusiones emanadas de los experimentos de Coweeta, pero siempre que se trate de cuencas pequeñas. Cuando las cuencas de captación son grandes, de 100 Km.² y más, una área boscosa puede rendir más agua que otra sin bosque; los datos indican hasta un 50 a 60 por ciento más de rendimiento de la primera respecto de la segunda; por lo tanto, el punto de vista generalizado de que el bosque transpira más que un campo abierto no está demostrado por los hechos (7). Estas diferencias se deberían principalmente a la escorrentía subterránea, que es más alta en áreas boscosas.

Varios de los trabajos mencionados se han basado en el balance anual, con estaciones secas que pueden provocar diferencias marcadas a causa de que las plantas tienen raíces de diferente profundidad. Para comparar la evapotranspiración de diferentes plantas, deben buscarse condiciones similares. En el trópico los trabajos relacionados con este tema son escasos, de ahí la necesidad de mayores estudios que

permitan un mejor conocimiento de la hidrología del suelo con respecto a la vegetación, y en las condiciones de nuestro medio ecológico.

MATERIALES Y METODOS

Localización del área de estudio

Las muestras de suelo, para determinar su humedad, se tomaron de dos áreas adyacentes (ver Foto N^o 1); la primera cubierta con zacate y la segunda cubierta con bosque secundario.

Estas áreas se encuentran dentro de la propiedad del Instituto. El área de bosque secundario es parte del bosque de Florencia, en donde han realizado trabajos González de Moya (15), Budowski (9) y Rosero (31). El área adyacente, cubierta con zacate, se encuentra bajo la administración del Departamento de Ganadería y es utilizada para alimentar el ganado, en un sistema rotativo.

Ecológicamente, las dos áreas están dentro de la formación "Bosque subtropical muy húmedo", de la clasificación de Holdridge (17).

Respecto a la vegetación, el suelo y el clima del lugar, se puede anotar lo siguiente:

El bosque secundario ha provenido de la regeneración natural de un terreno agrícola abandonado hace 40 años o más. Actualmente la vegetación tiene una altura irregular, que se puede clasificar en dos estratos, como se indica a continuación:

Estrato dominante (de 10 - 20 m.), compuesto por:

Goethalsia meiantha

Cecropia obtusifolia

Cedrela mexicana

Lauraceae sp.

Estrato inferior (de 2 a 10 m.), compuesto por:

Croton reflexifolius

Siparuna sp.

Inga sp.

Bunchosia sp.

Cordia alliodora

Lauraceae spp.

El área cubierta con zacate está separada de la anterior por una cerca que permite una delimitación abrupta de los tipos de vegetación; sobre ella crece una asociación de Melinis minutiflora, Panicum maximum y Homolepus aturensis, cuya altura oscila entre 10 y 30 cm.

El suelo de las áreas pertenece al grupo de "suelos lateríticos" de la serie Ventura, según la clasificación de Dondoli y Torres (12).

El análisis mecánico realizado para la profundidad de muestreo se da en el Cuadro N^o 1 y no revela diferencias marcadas en cuanto a su textura. Se encontraron diferencias en cada profundidad de muestreo, especialmente en lo que se refiere a la densidad aparente, la porosidad, etc., como se puede ver en el Cuadro N^o 2.

Cuadro N^o 1. Análisis mecánico del suelo

Componentes	Zacate	Bosque
Arena mayor de 2 mm.	5.04 %	5.09 %
Arena fina, menor de 2 mm.	5.21 %	5.72 %
Limo	11.71 %	9.10 %
Arcilla	77.78 %	80.88 %

Cuadro No 2. Otras características de los suelos

Especificación:	Zacate			Bosque				
	Profundidad							
	0-6"	6-12"	12-18"	0-18"	0-6"	6-12"	12-18"	0-18"
Por ciento materia orgánica	4.69	2.48	1.67	5.10	5.24	1.07		
Densidad aparente	0.80	0.78	0.77	0.78	0.72	0.74	0.71	
Densidad real	2.50	2.55	2.50	2.51	2.63	2.50	2.53	
Por ciento porosidad	68.00	69.40	69.20	68.86	72.24	70.40	71.83	
Agua disponible	26.50	22.02	18.67	67.19	16.11	17.60	55.14	

El clima del lugar, puede clasificarse como subtropical ya que la temperatura media anual es de 22.6°C. Los datos climatológicos resumidos, que corresponden a Turrialba, se dan en el Cuadro Nº 3. En el Cuadro Nº 4, se incluyen los datos climatológicos de importancia durante los meses en los cuales se realizaron las observaciones, motivo del presente estudio. La estación meteorológica estuvo situada a aproximadamente 2.000 m. del área experimental.

Cuadro Nº 3. Datos climatológicos del I.I.C.A.

		<u>Período observado</u>
Lluvia	2.851 mm.	1944 - 60
Temperatura media	22.6 °C	1957 - 60
Máxima media	28.7 °C	
Mínima media	16.9 °C	
Humedad relativa	86.94 %	1958 - 60
Evaporación al sol	1.345.80 mm.	1958 - 60
Promedio diario	3.58 mm.	
Brillo solar (año)	1,665 h.	1958 - 60
Promedio por día	4.55 h.	

Toma de muestras y determinación de la humedad

Como se indica en la Gráfica Nº 2, cada área de 900 m² fue dividida en 9 secciones iguales, y se extrajeron muestras de la parte central de cada una. Las muestras de suelo fueron extraídas con un barreno de 2" de diámetro y a tres profundidades diferentes: de 0 - 6", de 6 - 12" y de 12 - 18". En el mismo lugar se mezclaron las muestras obtenidas

Cuadro Nº 4. Datos climatológicos del I.I.C.A. en los meses de estudio^{*}.

Meses	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto
Lluvia en mm.	56.90	145.10	361.50	359.80	166.50
Días con lluvia	9	23	27	24	23
Temperatura media en °C	22.54	22.50	22.41	22.71	23.06
Máxima media	28.58	28.00	27.54	27.11	27.54
Mínima media	16.24	17.00	17.27	18.30	18.58
Evaporación al sol en mm.	140.10	107.30	77.50	96.00	102.60
Humedad relativa % promedio diario	81.52	88.43	90.99	88.80	86.75
Brillo solar, total mensual en horas	164.45	120.25	66.50	105.50	114.10

* Instrumentos usados: 1. Pluviómetro regular; 2. Termómetros Lambrecht; 3. Evaporímetro Lambrecht; 4. Higrotermógrafo Bush; 5. Heliógrafo Lambrecht.

a profundidad similar, y de cada mezcla, se tomó una submuestra de 80 a 120 gr. de peso para la determinación del contenido de humedad. En esta forma se obtuvieron 3 submuestras por área cada una representativa de la profundidad considerada en la fecha de observación. El muestreo se hizo en las horas de la mañana y se controló la pérdida de agua por evaporación en la recolección y transporte de las muestras, utilizando recipientes de lata apropiados.

El contenido de humedad de las submuestras obtenidas en el campo se realizó por el método gravimétrico que consiste en determinar la pérdida de peso después de haber sido desecada en un horno a 105°C, durante 24 horas. Esta pérdida se expresó en porcentaje del peso de la muestra seca, aplicando la siguiente fórmula (21):

$$\text{Porcentaje de humedad en peso} = \frac{\text{peso perdido por desecación}}{\text{peso de la muestra desecada}} \times 100$$

Para encontrar el equivalente de este porcentaje de humedad, en mm. de agua, se hizo en primer lugar la determinación de la densidad aparente del suelo, en todos los puntos y profundidades, con el empleo de un tubo de bronce de 4.32 cm. de diámetro (los datos obtenidos se encuentran en el Cuadro N^o 2). Conocido el valor de la densidad aparente, a continuación se calculó el porcentaje de humedad en volumen, de la manera siguiente:

$$\% \text{ de hum. en vol.} = \% \text{ de hum. en peso} \times \text{densidad aparente del suelo}$$

Este nuevo valor se transformó en contenido de humedad, en mm. de profundidad, aplicando la fórmula.

$$\text{Contenido de hum. en mm. de profundidad.} = \% \text{ de hum. en vol.} \times \text{Prof. del suelo en mm.} \times \frac{1}{100}$$

Los valores correspondientes a la capacidad de campo de cada área se determinaron midiendo la humedad después de 24 horas de haber cesado un fuerte aguacero.

Para tener una idea del contenido de humedad en el punto de marchitez, se cultivó maíz en recipientes de lata de 1 litro de capacidad y se hicieron las determinaciones después de que hubo ocurrido el marchitamiento de las plantas.

La cantidad de "agua disponible" se obtuvo por diferencia entre los valores de capacidad de campo y punto de marchitez, y se indican en el Cuadro N^o 2.

RESULTADOS

La humedad del suelo fue calculada en mm. de agua y representa la cantidad encontrada en cada observación. Estos valores están representados en las Gráficas Nos. 3, 4, 6, 7, 10 y 11.

Para tener una base de comparación del consumo de agua, se calcularon las fluctuaciones, que son los cambios en el contenido de humedad entre las observaciones y están representados en las Gráficas Nos. 5, 8, 9 y 12.

Los análisis comparativos se presentan a continuación, divididos en dos secciones:

Comparación de la humedad entre áreas.

Comparación de la humedad a distinta profundidad, dentro de cada área.

Comparación de la humedad entre áreas

En la Gráfica Nº 3 se representa la humedad encontrada en cada área de observación, en la profundidad de 0-18"; el análisis estadístico comprobó que los valores que representan esas líneas, fueron diferentes. En cambio las oscilaciones de cada línea (fluctuaciones) no alcanzaron el nivel de significancia.

Las fluctuaciones, expresadas en forma de ganancia de agua (almacenamiento) y pérdida (evapotranspiración), en la profundidad de 0-18", están representadas en la Gráfica Nº 5, en las dos primeras barras; el análisis indicó que no había diferencia significativa entre esas dos barras.

Como las observaciones se tomaron en parte durante el verano (período seco) y parte durante el invierno (período lluvioso), y a

diferentes profundidades, en adelante se harán comparaciones que incluyan dichas observaciones (Gráfica Nº 7).

Una forma de comparar la similaridad del contenido de humedad entre las áreas estudiadas, puede conseguirse mediante la correlación y la ecuación de regresión.

Cuadro Nº 5. Correlaciones y ecuaciones de regresión del contenido de humedad entre áreas y a distintas profundidades.

a) En la profundidad total de muestreo. (0-18").			
1) Total de observaciones	$r = 0.91$	$Y = 1.55 + 1.204X$	
2) Observaciones en la estación seca	$r = 0.77$	$Y = 15.78 + 0.560X$	
3) Observaciones en la estación lluviosa	$r = 0.90$	$Y = -3.86 + 1.275X$	
b) En cada profundidad de muestreo.			
4) Observaciones a 0-6"	$r = 0.90$	$Y = -14.37 + 1.349X$	
5) Observaciones a 6-12"	$r = 0.84$	$Y = 6.56 + 1.116X$	
6) Observaciones a 12-18"	$r = 0.90$	$Y = -5.47 + 1.093X$	

r = coeficiente de correlación
 Y = humedad del suelo bajo zacate
 X = humedad del suelo bajo bosque

En el cuadro anterior se destaca:

- a) las correlaciones son altas en invierno y al considerar los totales (invierno y verano juntos). En cambio las correlaciones de verano son bajas.
- b) En invierno, al incremento de 1 mm. de agua en el bosque, le

sigue un incremento mayor en el zacate. Lo inverso se observa en verano.

Las líneas de las regresiones 1, 2 y 3, están representadas en la Gráfica Nº 6, en la que se puede apreciar la distribución de las observaciones.

Para conocer el porcentaje de asociación entre la variabilidad del contenido de humedad de las áreas estudiadas, se calcularon los coeficientes de determinación, obteniéndose los siguientes resultados:

Cuadro Nº 6. Coeficientes de determinación para el contenido de humedad entre áreas y a distintas profundidades.

a) En la profundidad total de muestreo (0-18").	
1) Para el total de observaciones	82.91 %
2) Para la estación seca	59.29 %
3) Para la estación lluviosa	81.00 %
b) En cada profundidad de muestreo.	
4) Observaciones en 0-6"	81.00 %
5) Observaciones en 6-12"	70.56 %
6) Observaciones en 12-18"	81.00 %

Los valores del coeficiente de determinación, expresan el porcentaje de asociación de la variabilidad; por lo tanto indican también la influencia simultánea de los factores responsables de los cambios del contenido de humedad.

En el Cuadro anterior, se destaca:

- a) Alta asociación entre la variabilidad observada en invierno

(coef. N^o 3) y baja asociación en verano (coef. N^o 2).

- b) Mayor asociación en la variabilidad a 0-6" y 12-18" de profundidad.

Como los valores que representan a las fluctuaciones no tuvieron diferencia significativa, se pueden comparar en un plano de igualdad, completando la diferencia observada en la realidad.

Esta comparación puede hacerse mediante el cuociente obtenido de la siguiente relación:

agua almacenada (o recibida entre observaciones)

agua perdida por evapotranspiración entre las observaciones

Los cuocientes deben ser iguales en caso de que las fluctuaciones en cada área hubieran sido similares. Los valores obtenidos de este cálculo se indican a continuación:

Cuadro N^o 7. Cuocientes de: almacenamiento/evapotranspiración dentro de cada área.

	<u>Bajo zacate</u>	<u>Bajo bosque</u>	
1) Para el total de observaciones en 0-18" de profundidad	1.213	1.290	
2) Para la estación seca (0-18")	1.292	1.563	?
3) Para la estación lluviosa (0-18")	1.153	1.110	
4) Para 0-6" de profundidad	1.245	1.206	
5) Para 6-12" de profundidad	1.167	1.144	
6) Para 12-18" de profundidad	1.186	1.222	

Se ha puesto un signo de interrogación (?) donde los cuocientes están bastante alejados al compararlos entre áreas, lo que indica que

las diferencias son marcadas. En el resto de los casos, los cuocientes están bastante próximos, pero se nota una tendencia en el zacate a almacenar mas agua (proporcionalmente) que el bosque.

Las diferencias marcadas ocurren en la estación seca, donde se nota que proporcionalmente el bosque almacena más agua que el zacate, en la zona de raíces (0-18").

En las Gráficas Nos. 5 y 8 se representan los valores de almacenamiento y evapotranspiración, en forma de barras. En ningún caso se obtuvieron cuocientes iguales, aunque algunos muy próximos, especialmente en la estación lluviosa.

Para conocer cuál de las dos áreas de estudio evapotranspiró o almacenó mas agua, se dividieron los datos correspondientes a observaciones similares, obteniéndose cuocientes para las relaciones que siguen:

$$\frac{\text{almacenamiento de agua bajo zacate}}{\text{almacenamiento de agua bajo bosque}} = \text{cuociente de almacenamiento}$$

$$\frac{\text{pérdidas por evapotranspiración en zacate}}{\text{pérdidas por evapotranspiración en bosque}} = \text{cuociente de evapotransp.}$$

Los resultados de estas relaciones fueron los siguientes:

Cuadro N° 8. Cuocientes de almacenamiento y evapotranspiración entre áreas.

	<u>Cuoc. de alm.</u>	<u>Cuoc. de Et.</u>
1) Para el total de observaciones en 0-18"	1.131	1.203
2) Para la estación seca en 0-18"	1.080 zb	1.203
3) Para la estación lluviosa en 0-18"	1.175	1.134
Entre profundidades similares de cada área		
4) Para 0-6"	1.537	1.367
5) Para 6-12"	0.916 b	0.897 b
6) Para 12-18"	0.900 b	0.918 b

La letra b, indica las ocasiones en que el bosque almacenó o evapotranspiró mas agua que el zacate. Las letras zb indican que los valores fueron casi iguales.

Del Cuadro anterior, se destacan los siguientes hechos:

- a) Al considerar los totales, el almacenamiento y la evapotranspiración son mayores en el área de zacate. La evapotranspiración acumulada, se representa en la Grafía N^o 9, donde puede apreciarse que fue siempre mayor en el área de zacate.
- b) La causa para que se observe mayor almacenamiento y evapotranspiración en el área de zacate, se debe a la influencia de las primeras 6" de profundidad (cuociente 4), ya que en la profundidad de 6 a 18", se ve claramente que es el bosque el que almacena y evapotranspira más agua que el zacate (cuocientes 5, 6).

Comparación de la humedad dentro de cada área

Para esta comparación se hicieron análisis de variancia, de la humedad encontrada en cada profundidad de muestreo; lo mas importante de ellos fue lo siguiente:

- a) El contenido de humedad en cada profundidad muestreada tuvo diferencia significativa en el área de zacate. En el área de bosque estas diferencias fueron menos marcadas, ya que no alcanzaron el nivel de significancia.
- b) Al realizar el análisis similar por estaciones, los resultados fueron como en el caso anterior.

Una mejor interpretación se consigue observando la Gráfica N^o 10; los análisis estadísticos indicaron que hay diferencia entre las líneas que corresponden a la profundidad de 0-6", 6-12" y 12-18" del área de

zacate. En cambio, en el área de bosque, no hay constancia estadística de que las líneas allí representadas, fueran diferentes.

Igual interpretación a la anterior, se tiene observando las Gráficas que representan los déficits de humedad, en cada profundidad (Gráfica N° 11). Claramente se destaca que la diferencia anotada en el área de zacate se debe a la influencia del contenido de humedad en la profundidad de 0-6".

Al analizar los valores de las fluctuaciones dentro de las profundidades de cada área, los resultados principales fueron:

- a) Comparando el total de observaciones, no se encontró diferencia significativa entre los cambios de humedad de cada profundidad estudiada.
- b) En el análisis por estaciones sucede algo parecido al caso anterior, pese a que el contenido de humedad fue diferente en cada profundidad.

Lo que se ha dicho, puede interpretarse mejor observando las barras de la Gráfica N° 12; en el cual se representan los valores de almacenamiento y evapotranspiración en cada profundidad adyacente. El análisis indicó que no hay diferencia significativa entre esas barras.

Para evaluar cuantitativamente la proporción de los cambios de humedad a distinta profundidad, dentro de cada área, y para deducir el movimiento de la misma durante las estaciones climáticas, se calcularon las regresiones múltiples que se indican a continuación:

a) En la estación seca

Ecuaciones de regresión múltiple del contenido de humedad, bajo zacate:

$$Y = - 47.67 + 0.523X_1 + 0.908X_2 \quad 1.43$$

$$X_1 = - 22.63 + 0.441Y + 1.08X_2 \quad 1.52$$

$$X_2 = 39.03 + 0.21Y \quad 0.21$$

Ecuaciones de regresión múltiple del contenido de humedad, bajo bosque.

$$Y = 2.82 + 0.585X_1 + 0.32X_2 \quad 0.90$$

$$X_1 = - 12.55 + 0.32Y + 0.91X_2 \quad 1.23$$

$$X_2 = 40.42 - 0.015X_1 + 0.244Y \quad 0.23$$

Siendo:

$$Y = \text{humedad en 0-6"}$$

$$X_1 = \text{humedad en 6-12"}$$

$$X_2 = \text{humedad en 12-18"}$$

Los números de la derecha representan la proporción de incremento total, en la profundidad considerada, proveniente de las otras dos. De las ecuaciones anteriores en el área de zacate, se destaca lo siguiente:

Y se incrementa por la influencia de X_1 y X_2 .

X_1 se incrementa en proporción muy similar a Y debido a la influencia de la humedad de las profundidades adyacentes.

X_2 no es incrementado por X_1 , sino por Y.

En el área de bosque, se destaca lo siguiente:

Y, recibe influencia de X_1 y X_2 .

El mayor incremento se realiza en X_1 , especialmente por la influencia mayor de X_2 .

Un aumento en X_1 , produce una disminución en X_2 ; en cambio un aumento en Y, produce un pequeño aumento en X_2 ; por lo tanto hay intercambio e influencia entre Y y X_2 .

b) En la Estación lluviosa

Ecuaciones de regresión múltiple del contenido de humedad bajo zacate.

$$Y = - 31.38 + 1.17X_1 + 0.426X_2 \quad 1.60$$

$$X_1 = 13.70 + 0.20Y + 0.58X_2 \quad 0.78$$

$$X_2 = - 10.88 + 0.91X_1 + 0.22Y \quad 1.13$$

Ecuaciones de regresión múltiple del contenido de humedad bajo bosque.

$$Y = - 24.97 + 1.17X_1 + 0.11X_2 \quad 1.28$$

$$X_1 = 9.23 + 0.07Y + 0.76X_2 \quad 0.84$$

$$X_2 = - 27.90 + 0.47X_1 + 0.08Y \quad 0.55$$

Los números de la derecha indican el incremento total debido a la influencia de las profundidades adyacentes, al aumentar éstas el contenido de humedad en una unidad.

Se destaca en el área de zacate la tendencia al incremento mayor en las profundidades de 0-6" y de 12-18".

En el área de bosque se nota la tendencia al incremento en la parte superior (0-6"), más que en la parte inferior del suelo.

Se calcularon los coeficientes de determinación, que tienen por objeto indicar el grado de asociación entre la variabilidad de dos variables, en este caso, entre dos profundidades dentro de la misma área.

En el Cuadro Nº 9 se nota alta asociación en la variabilidad de invierno, especialmente entre profundidades contiguas. Esto es indicio de la influencia de los factores climáticos en grado más o menos similar en toda la profundidad estudiada.

En verano, la asociación es baja, especialmente al aumentar la profundidad.

Cuadro Nº 9. Coeficiente de determinación para el contenido de humedad entre dos profundidades de muestreo.

<u>En verano</u>	
a) Area de zacate	
1) Entre 0-6" y 6-12"	61.78 %
2) Entre 0-6" y 12-18"	56.85 %
3) Entre 6-12" y 12-18"	35.04 %
b) Area de bosque	
4) Entre 0-6" y 6-12"	73.96 %
5) Entre 0-6" y 12-18"	49.00 %
6) Entre 6-12" y 12-18"	36.00 %

<u>En invierno</u>	
a) Area de zacate	
7) Entre 0-6" y 6-12"	87.23 %
8) Entre 0-6" y 12-18"	86.11 %
9) Entre 6-12" y 12-18"	96.43 %
b) Area de bosque	
10) Entre 0-6" y 6-12"	86.67 %
11) Entre 0-6" y 12-18"	76.21 %
12) Entre 6-12" y 12-18"	85.19 %

DISCUSION Y CONCLUSIONES

Las bases de comparación en el presente trabajo son:

1. Se tienen dos áreas de igual superficie pero con vegetación diferente (zacate y bosque).
2. En ambas áreas actúan los factores del macroclima en forma similar.
3. Los suelos de cada área son más o menos similares en textura, pero de distinta porosidad, densidad aparente, contenido de materia orgánica y capacidad de retención de agua.
4. Se toman muestras para analizar el contenido de humedad a una profundidad de 0-18" en cada área, o sea donde se encuentran las raíces del zacate en mayor proporción que las del bosque. Por lo tanto, la discusión y conclusiones sólo son válidas para las condiciones expuestas.

Los cambios de humedad en el suelo dependieron de varios factores y no fueron el resultado exclusivo de la influencia climática en todo el tiempo, especialmente en verano, período en el cual esa influencia se redujo notablemente por la escasez de agua en la zona de raíces.

Los datos recopilados demuestran que al considerar las observaciones de verano e invierno en conjunto, las diferencias tienden a desaparecer porque ciertas deficiencias de una estación, son compensadas en la otra; igual sucede cuando se compara la profundidad total y sus partes, ya que las diferencias encontradas en las partes tienden a equilibrarse unas con otras, dando un total menos diferenciado.

Según los análisis estadísticos, a pesar de que el contenido de humedad fue diferente en cada área, las pérdidas o ganancias de agua entre las observaciones (fluctuaciones), no alcanzaron nivel de diferen-

cia significativa, con lo cual se puede pensar que esos cambios (almacenamiento y evapotranspiración) podrían ser similares.

Al comparar los valores de las fluctuaciones en un supuesto plano de igualdad, se obtienen resultados bastante próximos en el período de invierno (cuociente 3 del Cuadro Nº 7), pero en ningún caso iguales; esto se debe a que no siempre las fluctuaciones fueron simultáneas en cada área ni iguales en intensidad.

Los cambios de la humedad del suelo, se realizaron en forma diferente según la estación climática; como lo indica Mohr (24), en el verano la humedad se encontró cerca del punto de marchitez y en invierno cerca de la capacidad de campo. Esta característica, tiene importancia desde el punto de vista del abastecimiento y consumo.

Los cambios de humedad a distinta profundidad, fueron regulados por el movimiento del agua en la zona radical; este movimiento tuvo dos direcciones (según se deduce de las ecuaciones de regresión múltiple):

a) ascendente, que predominó en verano en ambas áreas y en invierno en el área de bosque, y b) descendente, que se observó en invierno, especialmente en el área de zacate.

Se ha indicado que el movimiento ascendente se realiza a causa de diferencias de presión y temperatura y que en el trópico, ese movimiento no se refleja mas allá de un metro de profundidad (24); también deben tener importancia el nivel de agua freática, la profundidad de las raíces, la textura, y la estructura del suelo. En el caso estudiado, se puede dar la siguiente explicación:

Al caer la lluvia, el suelo se satura y el exceso se drena o se pierde por escorrentía. En el área de zacate se retuvo una mayor cantidad de agua en la parte superior (0-6"); esta cualidad se debió a la

compactación sufrida por el pastoreo y al mayor contenido de materia orgánica (% en volumen) en esa parte. A una profundidad similar en el bosque la capacidad de retención fue menor.

Al empezar la evapotranspiración, el agua de la parte superior (zona de raíces) es rápidamente consumida en ese proceso; el consumo deseca pronto las primeras seis pulgadas de profundidad, por lo tanto, para reponer ese consumo aparece un movimiento ascendente de la parte inferior del suelo; este movimiento puede hacerse rápidamente mientras exista la "continuidad de agua capilar"; al romperse esa continuidad sigue el movimiento ascendente, pero en menor intensidad que antes, produciendo un desequilibrio entre demanda y abastecimiento; en esta parte, las plantas reaccionan cerrando parcialmente los estomas, como lo indica Alvim (1, 2). Se puede pensar que el agua disponible estimula o controla la intensidad de evapotranspiración, pero se debe recordar que el movimiento ascendente, al escasear el agua, a veces se hace en forma de vapor, especialmente durante el día por la influencia del calor que penetra en el suelo; ese vapor puede condensarse por la noche debido a la influencia de temperaturas bajas, y ser utilizado por las plantas al día siguiente; algo parecido reporta Chernoukov (11) al referirse al movimiento del agua y su disponibilidad para las plantas.

Una forma de interpretar la proximidad y la relación entre la humedad encontrada en cada área de estudio puede hacerse mediante las correlaciones y ecuaciones de regresión. Si las regresiones del Cuadro No 5 hubieran tenido la forma de $Y = 0 + 1X$, significaría que la humedad y los cambios fueron idénticos; en el caso presente ninguna ecuación tuvo la forma mencionada. Es posible juzgar en parte por la proximidad de las ecuaciones a los valores indicados y con esta base se puede afirmar

que la humedad y los cambios fueron más similares en invierno, y a la profundidad de 12-18" (ecuaciones 3 y 6 del Cuadro Nº 5).

Los coeficientes de determinación (Cuadro Nº 6) indican el porcentaje de asociación entre la variabilidad del contenido de humedad en cada área. Si los cambios hubieran sido simultáneos todo el tiempo, esos coeficientes deberían tener un valor de 100, o deberían mantenerse constantes en todos los casos. Si dichos cambios en la profundidad de 0-18" se debieran exclusivamente a los factores climáticos, la variación en cada área debería ser simultánea y de igual intensidad. Los coeficientes de determinación calculados, están indicando que esa variación simultánea fue alta en invierno y baja en verano (Cuadro Nº 6); consecuentemente, los factores climáticos controlaron la variabilidad simultánea en más del 80 por ciento en invierno y en menos del 60 por ciento en verano; la diferencia se debió a la influencia de otros factores, tales como la profundidad de raíces, movimiento interno del agua a causa de la diferente estructura del suelo, etc.

Dentro de cada área, a pesar de que las fluctuaciones no variaron mucho (según análisis estadístico), la influencia de los factores climáticos no fue simultánea en toda la profundidad estudiada. Los coeficientes de determinación calculados para la variación entre profundidades (Cuadro Nº 9) indicaron una asociación alta en invierno y muy baja en verano, esa asociación se va reduciendo notablemente conforme aumenta la profundidad; se podría pensar que la influencia del clima, especialmente la temperatura, se reduce en verano a causa de la existencia de otros factores que ejercen influencia al escasear el agua en la zona de raíces. En otras palabras el movimiento del agua en el suelo está controlado en alto grado en invierno por los factores climáticos y en

menor escala en verano. Si se hubiera considerado la profundidad total de raíces en ambas áreas, es posible que se hubieran obtenido porcentajes mas altos.

Según los datos acumulados en la Gráfica N^o 9 y en los Cuadros Nos. 7 y 8 se ve que en el área de zacate se consumió mas agua; este hecho se debió en parte a la mayor capacidad de almacenamiento en la profundidad de 0-6" (Cuadro N^o 2) que le permitía disponer de una cantidad mayor de agua frente a la profundidad similar del bosque. En la Gráfica N^o 9 se nota que la evapotranspiración del zacate fue mayor en verano; en invierno se nota un paralelismo que induce a sospechar que las cantidades podrían ser iguales si la capacidad de almacenamiento fuera también igual.

Se ha reportado que el zacate tiende a consumir la humedad de la parte superior antes de tomarla de la parte inferior, mientras el bosque consume simultáneamente el agua de toda la profundidad de sus raíces (18); es posible que lo mismo haya sucedido en el caso estudiado ya que en la profundidad de 0-6" el zacate tendió a consumir agua con mayor intensidad que el bosque (Gráfica N^o 5). Si se hubiera considerado la profundidad total de raíces en este último, es posible que los resultados habrían sido iguales, o muy próximos.

Parece que el contenido de materia orgánica a determinada profundidad favorece el almacenamiento de agua en la estación seca (verano). Como puede verse, en la Gráfica N^o 12, hubo mayor almacenamiento y evapotranspiración a la profundidad de 6-12" del área de bosque, en verano; en cambio, en invierno sucedió lo contrario, a esa profundidad hubo menor almacenamiento y evapotranspiración. Por las ecuaciones de regresión múltiple se vio que en verano, a dicha profundidad, había una

tendencia a incrementarse por la influencia de las profundidades adyacentes, como si fuera el punto de coincidencia entre el movimiento ascendente y descendente del agua. En invierno, las ecuaciones indicaron que desde ese punto se distribuía el agua hacia las partes adyacentes. En esta observación también deben tener importancia las capacidades de retención de las profundidades, que como se puede ver en la Gráfica Nº 2, son diferentes, aún dentro de la misma área.

La evapotranspiración, observada a través de los cambios de humedad del suelo, fue mas o menos constante cuando hubo humedad suficiente; al volverse escasa, el aprovisionamiento de agua para la evapotranspiración se realizó en proporción diferente en cada área, de aquí se deduce que las fórmulas para calcular la evapotranspiración, deben considerar esta circunstancia en el período de verano, o sea la forma de abastecimiento según el suelo y vegetación; esto se probó en parte mediante un intento de evaluación de fórmulas, como se indica en el apéndice.

RESUMEN

Para comparar el consumo de agua por distintos tipos de vegetación y relacionarlo con la evapotranspiración, se midieron los cambios de humedad en la zona radical (0-18" de profundidad), ocasionados por una asociación de zacates y una asociación de bosque secundario. Las observaciones se tomaron durante el mes de Abril (estación seca) y en los meses de Mayo-Agosto (estación lluviosa) de 1961, en un terreno del Centro Tropical de Investigación y Enseñanza para Graduados en Turrialba, Costa Rica.

El análisis de los resultados obtenidos, demostró que los cambios de humedad en cada asociación estudiada, fueron muy similares en la estación lluviosa y diferentes en la estación seca.

En la estación lluviosa, hubo una correlación mayor de 0.90 entre la humedad de las áreas y un coeficiente de determinación de 90 por ciento, lo cual se interpretó como resultado del efecto de la influencia de los factores climáticos y a la dependencia de la evapotranspiración de esos factores, independiente de la asociación vegetal, siempre que haya "agua disponible" cerca de la capacidad de campo.

En verano, la correlación fue de 0.77 y el coeficiente de determinación fue de 59 por ciento. Las diferencias se debieron a la influencia de otros factores tales como la estructura del suelo, capacidad de retención de humedad, profundidad de raíces, etc., que influyen cuando hay humedad escasa, cerca del punto de marchitez.

Dentro de cada asociación, los cambios de humedad del suelo no fueron uniformes en toda la profundidad estudiada; se encontraron pequeñas diferencias en invierno y grandes diferencias en el verano; estas

diferencias se debieron al movimiento del agua, que no fue simultáneo en toda la zona radical.

Se encontró que en la profundidad estudiada (0-18"), el zacate consumió más agua que el bosque, principalmente por dos razones: 1) la mayor capacidad de retención encontrada en el suelo bajo zacate, y 2) la distribución del sistema radical de cada asociación, que pasó las 18" de profundidad en el bosque.

SUMMARY

Water use by different vegetation types was assessed through the measurements of soil moisture variations within the "root room" (0-18 inches of depth) from a grass association and a forest of secondary nature. Observations were made during April (dry season) and in May-August (wet season) on the property of the Tropical Center for Research and Graduate Training, in Turrialba, Costa Rica.

The analysis of the results shows that soil moisture changes of both associations were very similar during the wet season but different during the dry season.

For the wet season there was a correlation coefficient of 0.90 between soil moisture content under each association and a determination coefficient of 90 per cent. These high values were found independently of vegetation cover, because of the tendency of evapotranspiration to depend on current weather conditions whenever available water in the soil is close to field capacity.

For the dry season, a correlation coefficient of 0.77 was found while the determination coefficient was 59 per cent. The difference was due to the influence of other factors, such as soil structure, water holding capacity, root room, etc. which exert influence whenever the available water is short, close to wilting point.

Within each association, soil moisture changes were not uniform. Little differences were found during the wet season while large differences were common during the dry season. These were originated by the water movement within the soil, which was not uniform for the whole range of root room.

Grass used more water than forest from the compared depth (0-18 inches), principally for two reasons: 1) the higher water holding capacity found under grass, and 2) the root distribution of each association, being deeper than 18 inches for the forest.

LITERATURA CITADA

1. ALVIM, PAULO DE T. Las necesidades de agua del cacao. Turrialba (Costa Rica) 10(1):6-16. 1960.
2. _____ Stomatal opening as a practical indicator of moisture deficiency in cacao. In Séptima Conferencia Interamericana del Cacao. Palmira, Colombia, 13-19 de Julio, 1958. Bogotá, 1958.
3. ANGUS, D. E. Agricultural water use. Advances in Agronomy 11:19-35. 1959.
4. BAVEL, C. H. M. VAN. Lysimetric measurement of evapotranspiration rates in the Eastern United States. Soil Science Society of America Proceedings 25(2):138-141. 1961.
5. BAVER, L. D. Soil physics. 3a ed. New York, J. Wiley & Sons, 1959. 489 p.
6. BLANEY, HARRY F. Climate as an index of irrigation needs. Water. Yearbook of Agriculture 1955. Washington, D. C., U. S. Government Printing Office, 1955. pp. 341-345.
7. BOCHKOV, A. P. The elements of the water balance in the forest and on the field. In Water and Woodlands (Publication de l'Association Internationale d'Hidrologie Scientifique, Gentbrugge) 1(48):164-173. 1959.
8. _____ The forest and the river runoff. Water and Woodlands (Publication de l'Association Internationale d'Hidrologie Scientifique, Gentbrugge) 1(48):174-181. 1959.
9. BUDOWSKI, GERARDO. Studies on forest succession in Costa Rica and Panama. Unpublished Ph.D. thesis. New Haven, Yale University, 1961. 189 p. (typewritten)
10. CARTER, DOUGLAS B. Alternate methods of estimating potential evapotranspiration. In Three water balance maps of Southwest Asia. Centerton, New Jersey, Laboratory of Climatology. Publication 11(1):40-57. 1958.
11. CHERNOUKOV, A. M. & NUZHDIN, A. V. Movement of soil moisture and its availability to plants. Pochvovedenie (Russia) no. 4: 481-484. 1959.
12. DONDOLI, C. & TORRES, A. Estudio geagrónómico de la región oriental de la Meseta Central. San José, Costa Rica, Ministerio de Agricultura e Industrias, 1954. 180 p.
13. FORBES, REGINALD. Forest handbook. New York, The Ronald Press, Co., 1956. Section 10.

14. FRITSCHEN, LEO J. & SHAW, R. H. Evapotranspiration for corn as related to pan evaporation. *Agronomy Journal* 53(3):149-150. 1961.
15. GONZALEZ DE MOYA, MIGUEL. Ordenación de un bosque subtropical de crecimiento secundario en Costa Rica. Tesis sin publicar. Turrialba, Costa Rica, Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas, 1955. 140 p. (mecanografiado)
16. GULIDOVA, I. V. & AFANASS EVA, E. A. The influence of soil moisture on the intensity of transpiration of the tree and bush species. *Pochvovedenie (Russia)* no. 8:46-53. 1957. (OTS 60-21883).
17. HOLDRIDGE, L. R. Principios de ecología. *Agronomía (Perú)* 27(3):256-285. 1960.
18. _____ Simple method for determining potential evapotranspiration from temperature data. *Science* 130(3375):572. 1958.
19. KOSHI, PAUL T. Soil moisture trends under varying densities of oak understory. U. S. Department of Agriculture, Southern Forest Experiment Station. Occasional Paper # 169. 1959. 12 p.
20. LAURIE, M. V. The effect of forests in water catchment areas on the water losses by evaporation and transpiration. *Empire Forestry Review* 36(1):55-58. 1957.
21. LULL, H. H. & REINHART, K. G. Soil moisture measurements. U. S. Department of Agriculture, Southern Forest Experiment Station. Occasional Paper # 140. 1955. 56 p.
22. MATHER, JOHN R. The measurement of potential evapotranspiration. Seabrook, New Jersey. Publication in *Climatology* 7(1):225. 1954.
23. MEGINNIS, H. G. Increasing water yields by cutting forest vegetation. *Water and Woodlands (Publication de l'Association Internationale d'Hydrologie Scientifique, Gentbrugge)* 1(48): 59-68. 1959.
24. MOHR, E. C. J. & VAN BAREN, F. A. Tropical soils. New York, Interscience Publishers Inc., 1954. 498 p.
25. PENMAN, H. L. The dependence of transpiration on weather and soil conditions. *Journal of Soil Science* 1(1):74-89. 1949. *
26. _____ The physical bases of irrigation control. In Report of the 13th International Horticultural Congress, 1952. Vol. 2. London, 1953. pp. 913-924.
27. _____ Estimating evaporation. *Transactions, American Geophysical Union* 37(1):43-50. 1950.

28. PENMAN, H. L. Some aspects of evaporation in nature. Royal College Science Journal no. 16:117-129. 1946.
- *29. PEREIRA, H. C. Study of the streamflow effects of land use changes in catchment areas. In Proceedings of the Third Formal Conference of Hydrologists of the British East and Central Africa territories on Hydrology and Water Resources. Nairobi, Government Print. 1959. pp. 5-11.
30. RODE, A. A. The moisture properties of soil and underground strata. Moscow, Academy of Sciences of the USSR. 1955. 117 p. (OTS 60-51187).
- *31. ROSERO, PABLO G. Selección de algunas especies forestales a base de su crecimiento y regeneración natural. Tesis sin publicar. Turrialba, Costa Rica, Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas, 1960. 159 p. (mecanografiada).
32. ROWE, P. B. & REIMANN, L. F. Water use by brush, grass, and grassforb vegetation. Journal of Forestry 59(3):175-181. 1961.
33. SCHOFIELD, R. K. & PENMAN, H. L. The concept of soil moisture deficit. Reprint from Proceedings of Second International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. 1951. 6 p.
34. SMITH, G. W. The estimation of soil moisture with particular reference to tropical conditions. Unpublished Thesis. St. Augustine, Trinidad, Imperial College of Tropical Agriculture, 1956. 116 p.
35. _____ The determination of soil moisture under a permanent grass cover. Journal of Geophysical Research 64(4):477-483. 1959. *
36. THORNTWHAITE, C. W. The determination of potential evapotranspiration. The measurement of potential evapotranspiration. Seabrook, New Jersey. Publication in Climatology 7(1): 218-223. 1954.
37. _____ A reexamination of the concept and measurement of potential evapotranspiration. The measurement of potential evapotranspiration. Seabrook, New Jersey. Publication in Climatology 7(1):200-209. 1954.
38. _____ & HARE, F. K. La clasificación climatológica en Dasonomía. Unasyuva 9(2):55-63. 1955.
39. _____ & MATHER, J. R. The water budget and its use in irrigation. Water. Yearbook of Agriculture 1955. Washington, D. C., Government Printing Office, 1955. pp. 346-358.

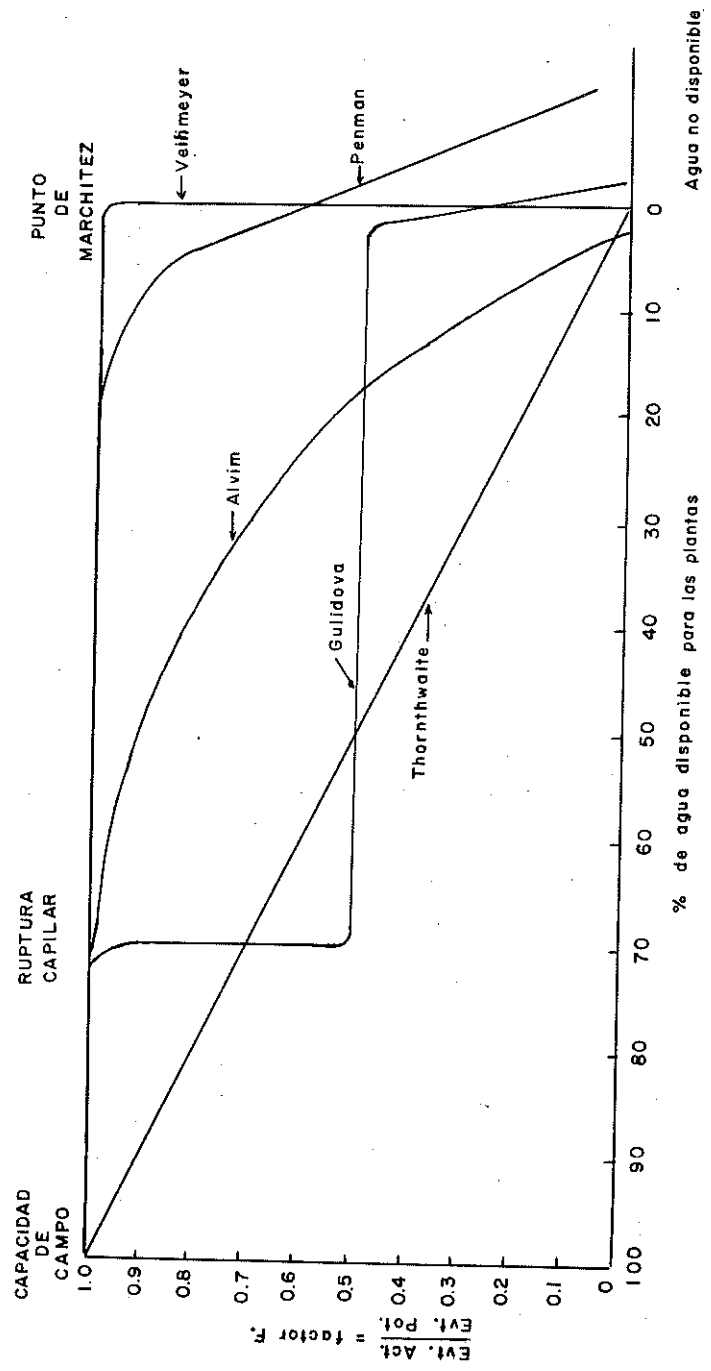
40. THORNTHWAITTE, C. W. & MATHER, J. R. Instruction and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. Centerton, New Jersey. Publication in Climatology 10(3):311. 1957.
41. VEIHMEYER, F. J. & HENDRICKSON, A. H. Soil moisture in relation to plant growth. In Annual Review of Plant Physiology 1:285-304. 1950.
42. _____ Rates of evaporation from wet and dry soils and their significance. Soil Science 80(1):61-67. 1955.
43. VITKEVICH, V. I. Determining evaporation from the soil surface. Timiryazesvskaya Selskokhoz. Akad. Izvestiya (Russia) 5(24):237-250. 1958. (OTS 60-51023).
- + 44. ZAHNER, ROBERT. Soil water depletion by pine and hardwood stands during a dry season. Forest Science 1(4):258-264. 1955.

APENDICE

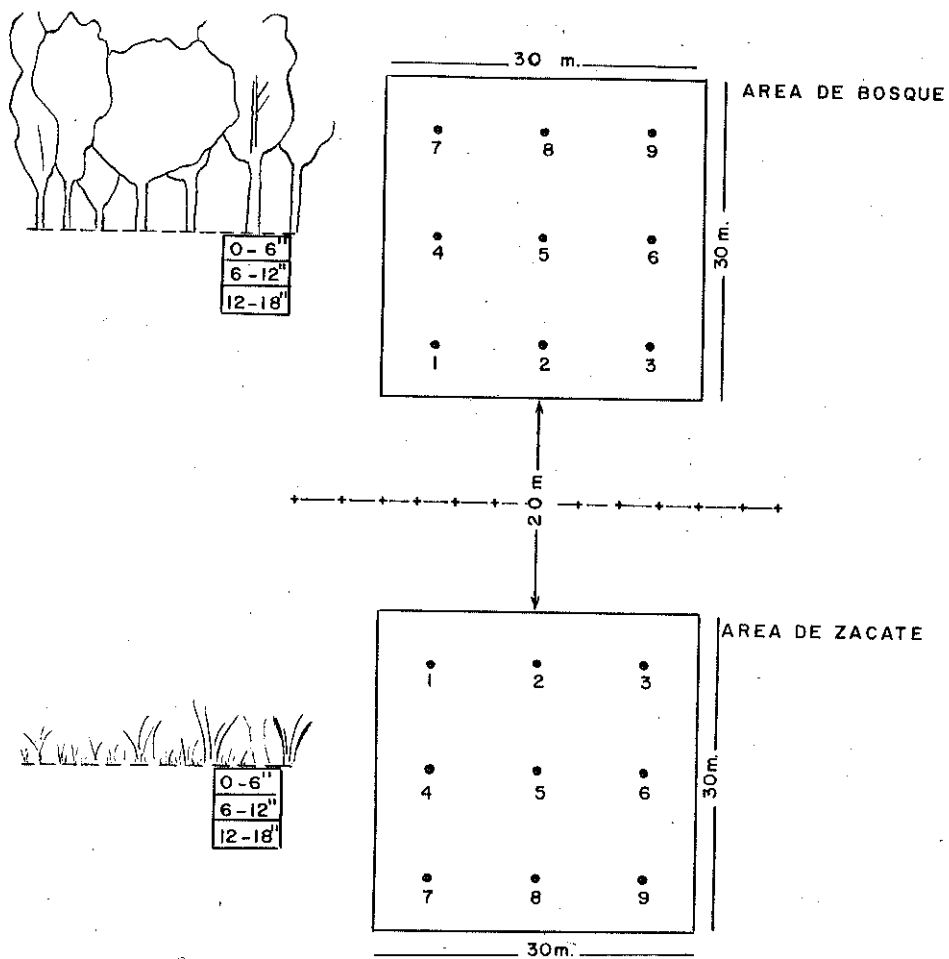
DETERMINACION INDIRECTA DE LA HUMEDAD DEL SUELO

Como trabajo adicional, se presentan en la Gráfica Nº 13, algunos resultados sobre la determinación indirecta de la humedad del suelo, utilizando fórmulas de evapotranspiración de Holdridge y Thornthwaite, y el factor F de Veihmeyer y Gulidova. No se ha profundizado este punto, porque los datos meteorológicos no fueron tomados en el área de estudio; solamente vale destacar las siguientes observaciones que se desprenden de la Gráfica.

- a) Los valores obtenidos con la fórmula de Thornthwaite son muy similares a los obtenidos utilizando la fórmula sencilla de Holdridge, especialmente en la estación lluviosa.
- b) En general los datos de la Gráfica coinciden con lo que se ha encontrado en otros lugares del mundo, esto es, que las fórmulas tienden a dar valores de evapotranspiración altos en verano y bajos en invierno.
- c) Las fórmulas suponen un desecamiento continuo del suelo, desde la capacidad de campo, hasta el punto de marchitez; en este caso no se considera la ganancia de humedad en la zona de raíces, proveniente del movimiento ascendente, en la estación seca, principalmente.
- d) A causa del movimiento ascendente de humedad en el suelo, las observaciones deben hacerse con cuidado en lo que respecta a la hora del día, así es posible encontrar más humedad en la madrugada y poca humedad en las horas de la tarde.
- e) Como se indicó en la revisión de literatura, existen otras fórmulas e ideas sobre la evapotranspiración que podrían probarse mediante una investigación especialmente diseñada para este caso.

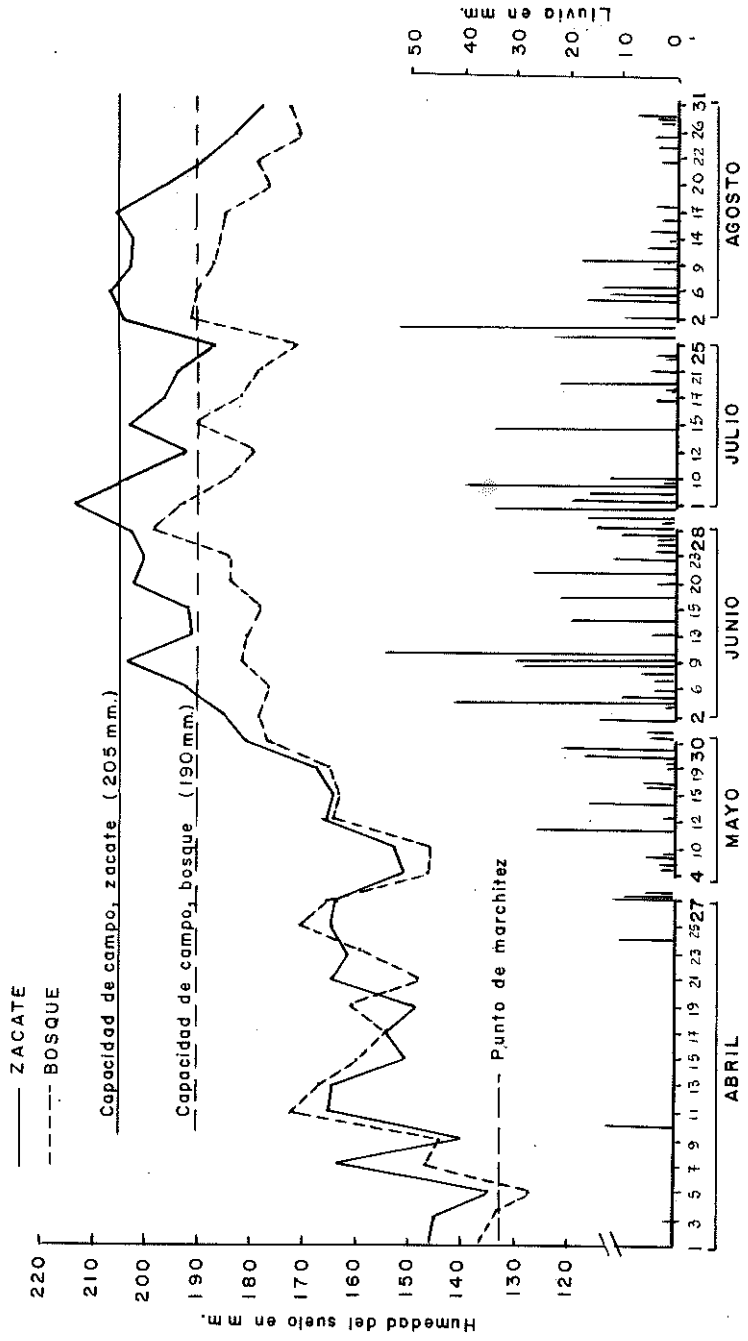


GRAFICA No 1 Relación entre el factor F y la humedad del suelo, según diferentes autores.

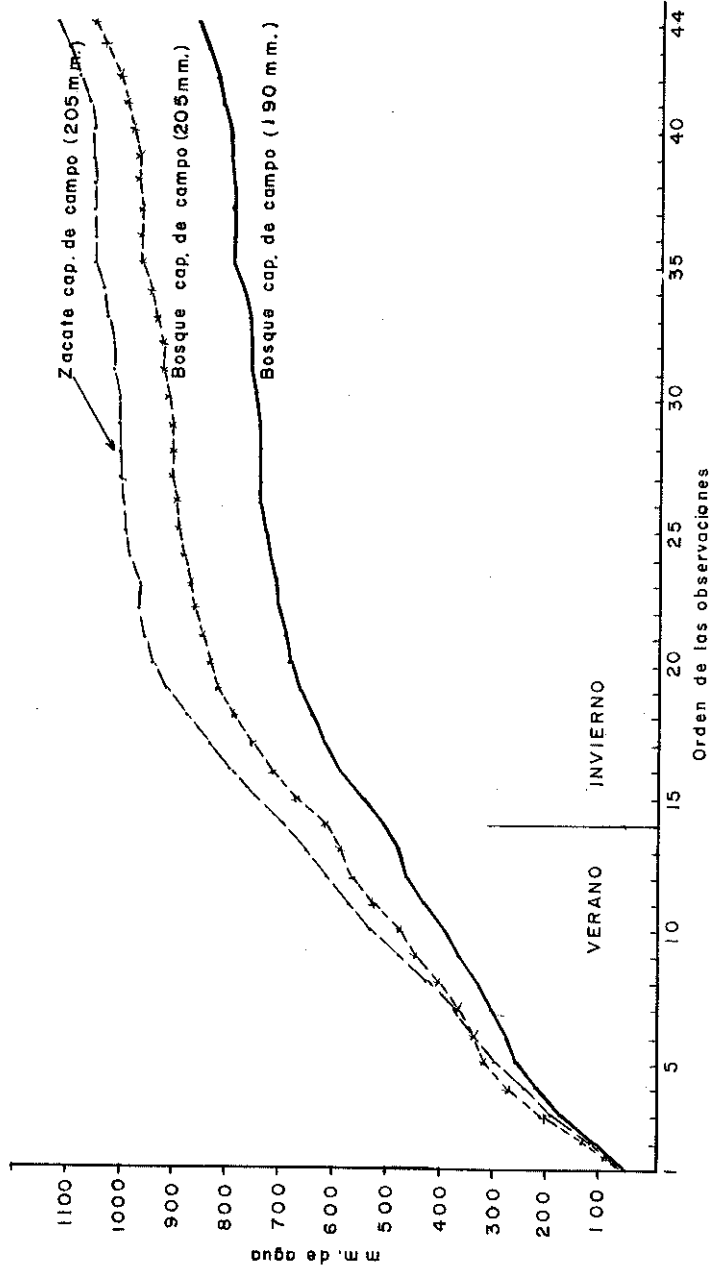


GRAFICA Nº 2

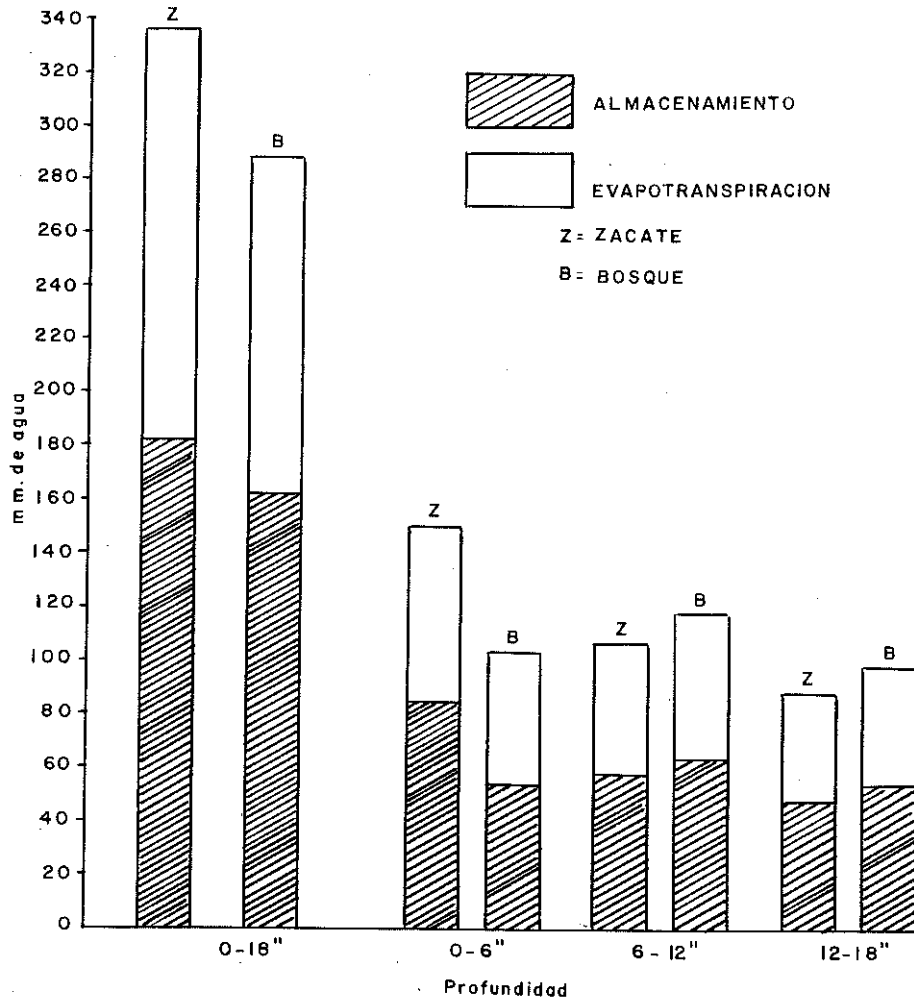
Esquema representativo de las áreas y los puntos de muestreo. A la izquierda se representa el tipo de vegetación y las profundidades de muestreo.



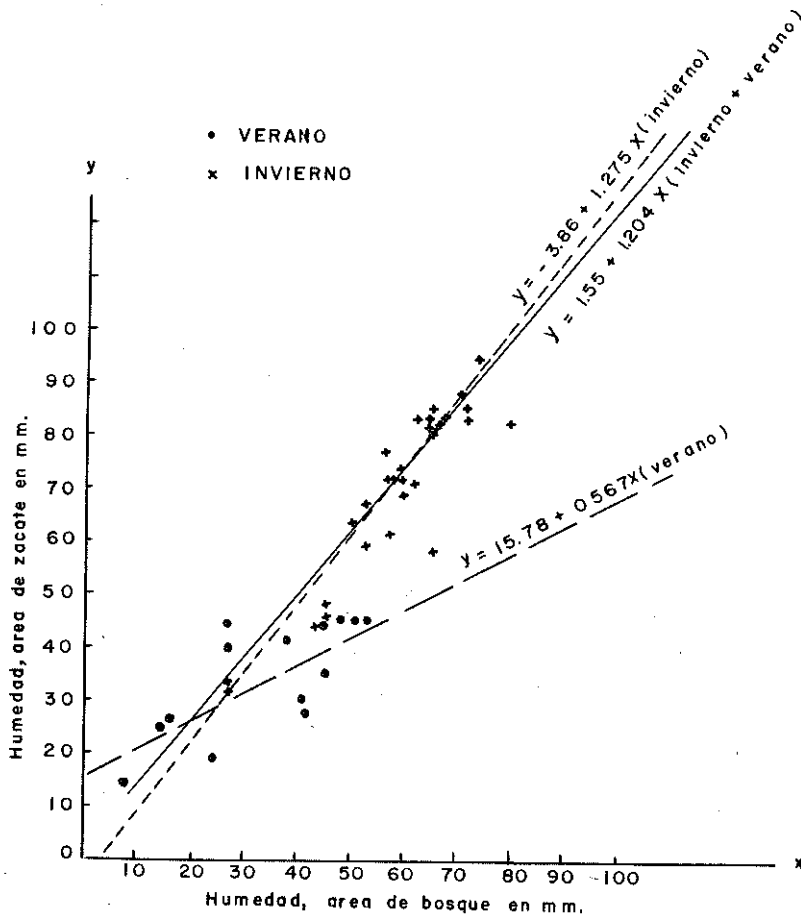
GRAFICA No 3 Humedad del suelo y lluvia en las fechas de observación, expresada en mm de agua.



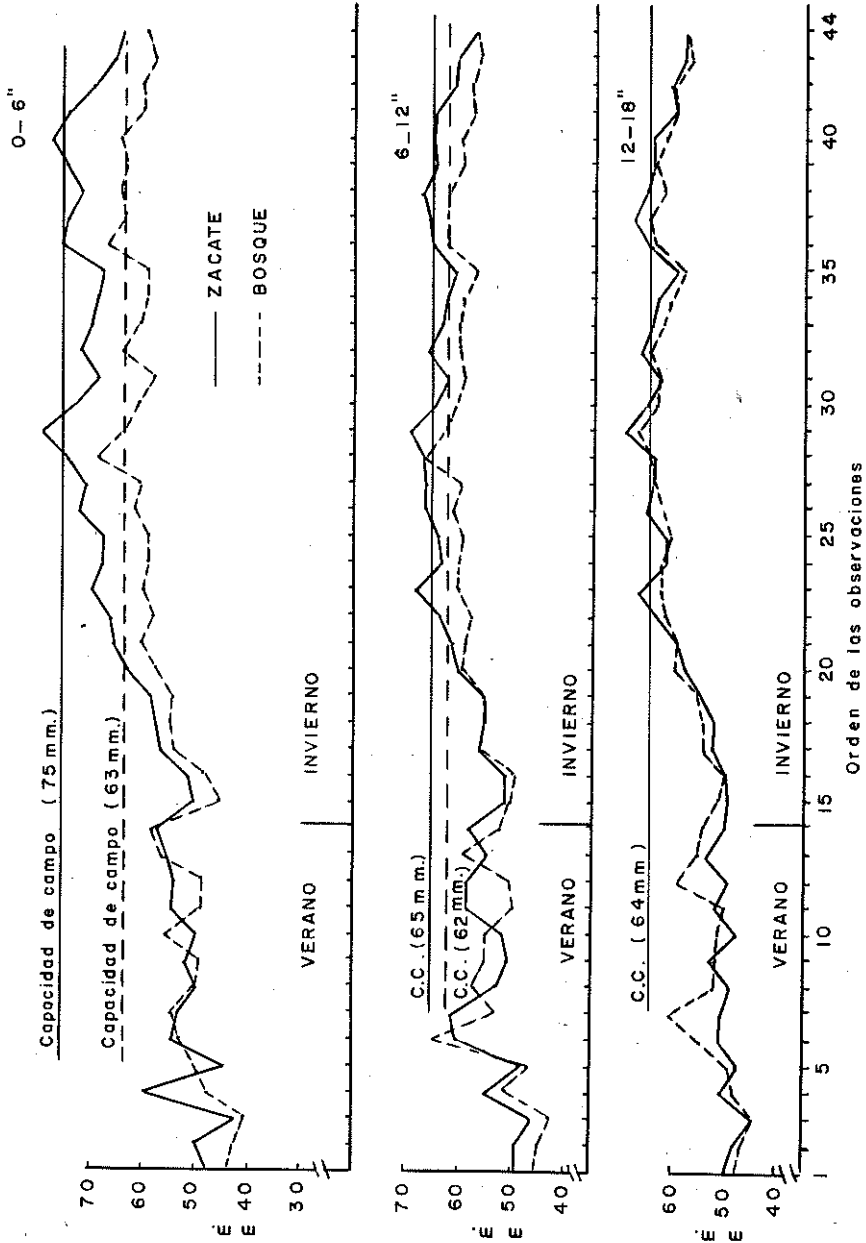
GRAFICA NO 4 Déficit de humedad acumulado en cada área, obtenidos de la diferencia entre la observación y la capacidad del campo. La línea de cruces representa el déficit asumiendo que el bosque hubiera tenido la capacidad de campo del zacate.



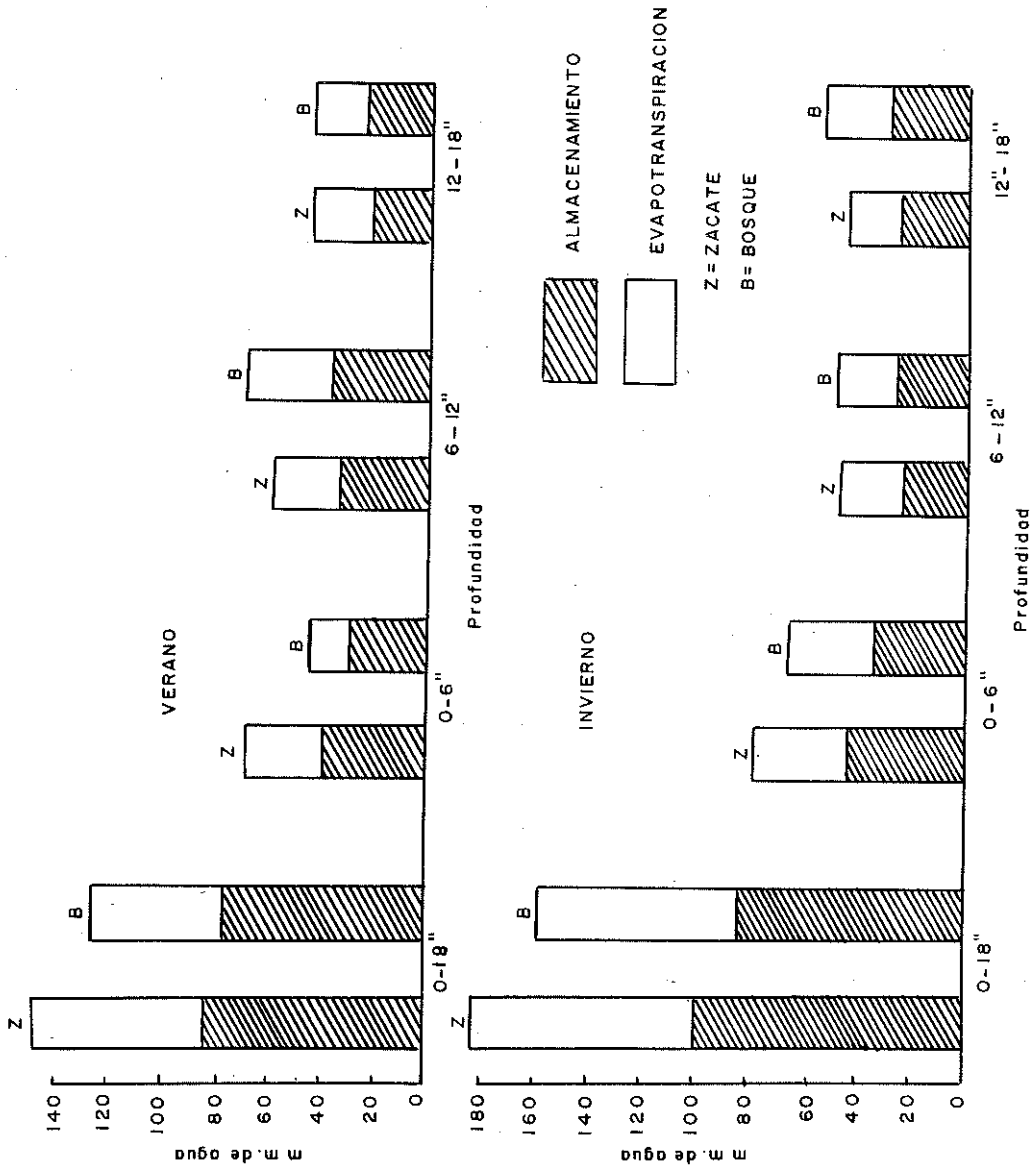
GRAFICA Nº 5 Cantidad de agua almacenada y evapotranspirada en las áreas de estudio. En la profundidad total y en las profundidades de muestreo.



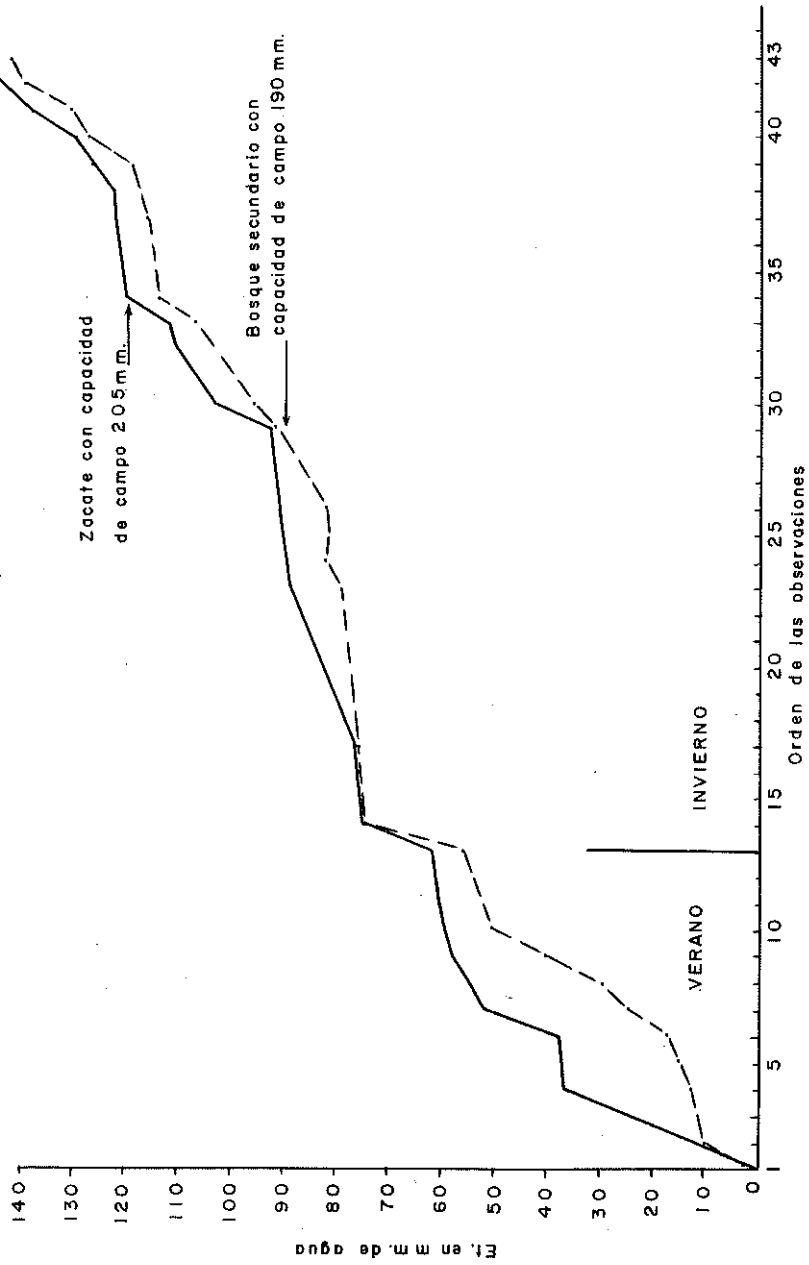
GRAFICA Nº 6 Regresiones lineales del contenido de humedad entre áreas. Para el total de observaciones (invierno + verano) y para cada estación climática.



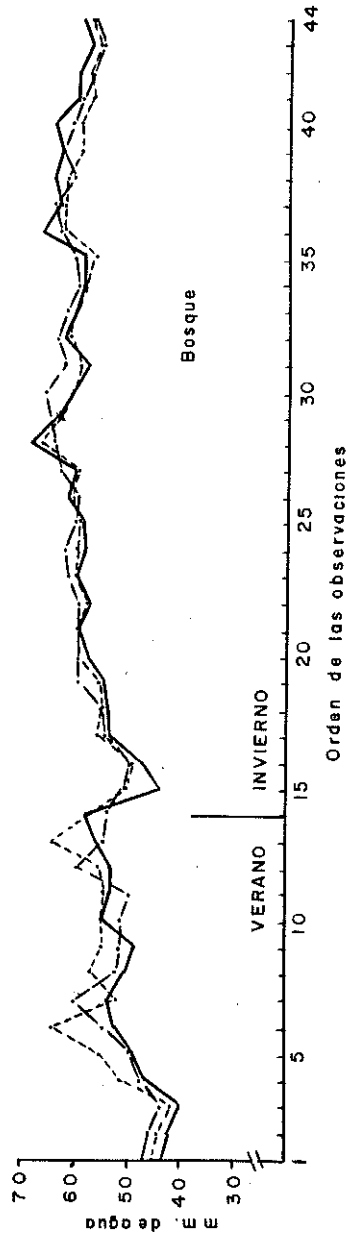
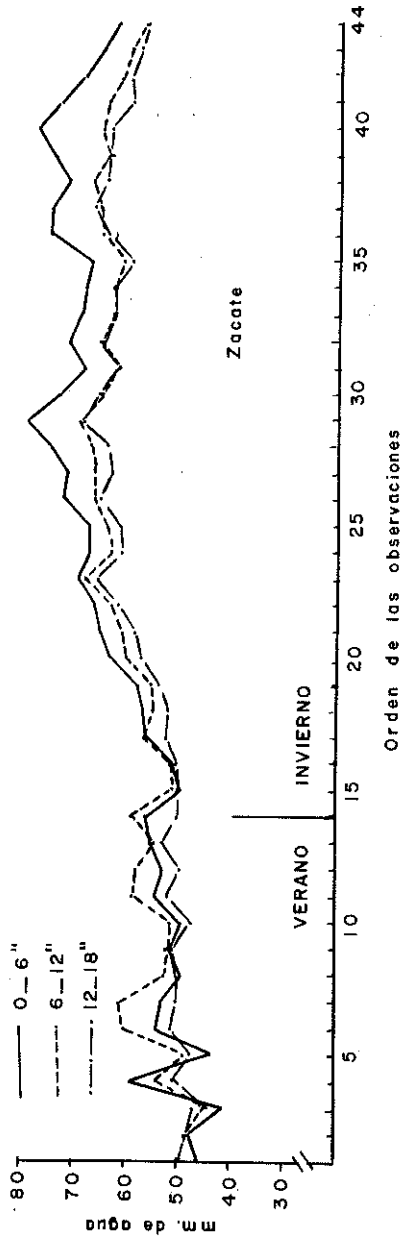
GRAFICA No 7 Humedad del suelo en mm encontrada en profundidades similares de cada área en las fechas de observación.



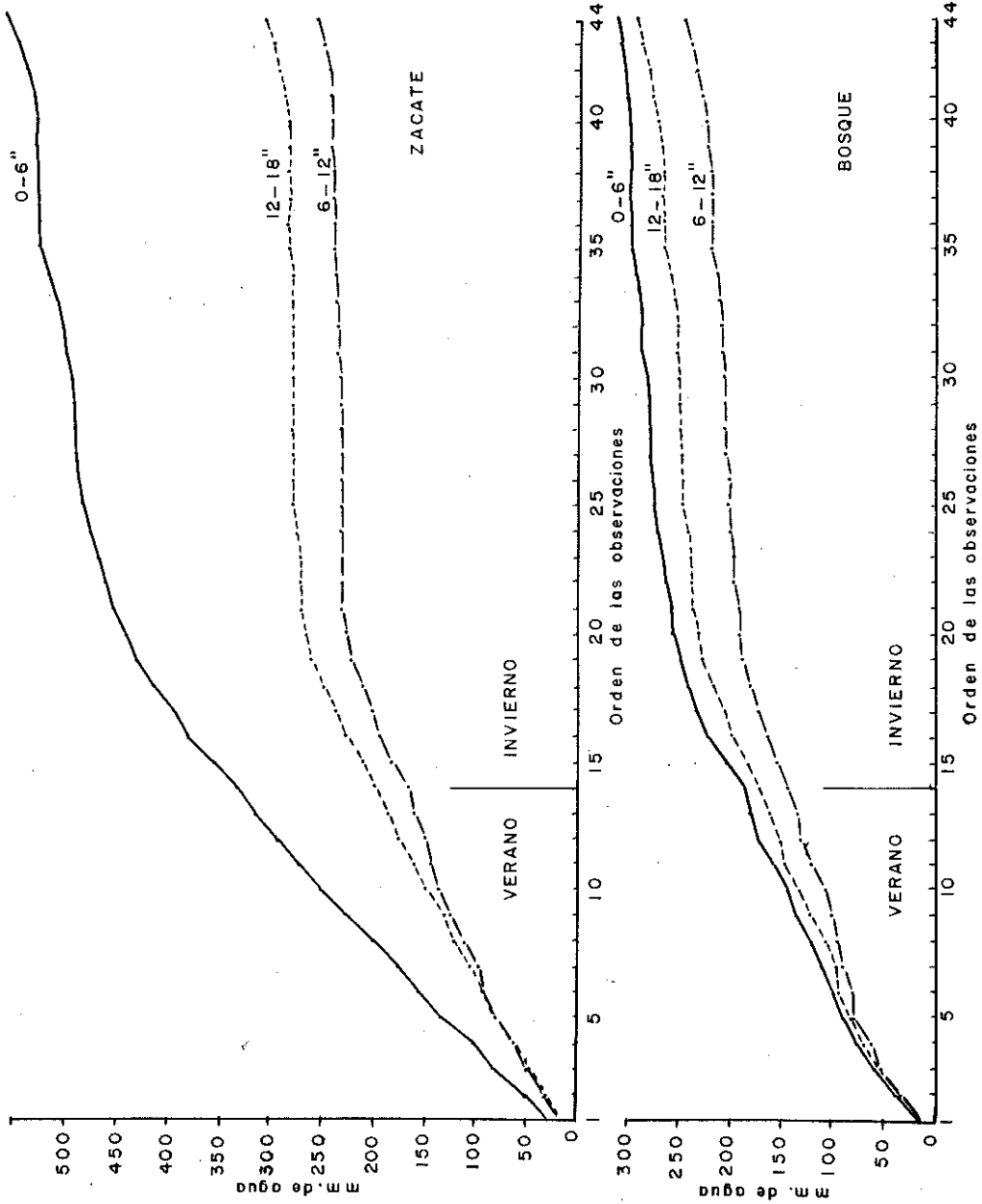
GRÁFICA N° 8 Almacenamiento y evapotranspiración por estaciones. En la profundidad total y en las profundidades de muestreo.



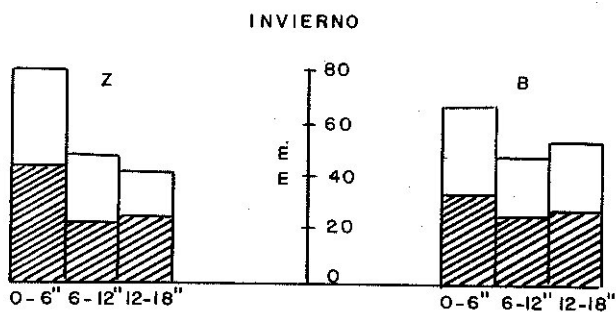
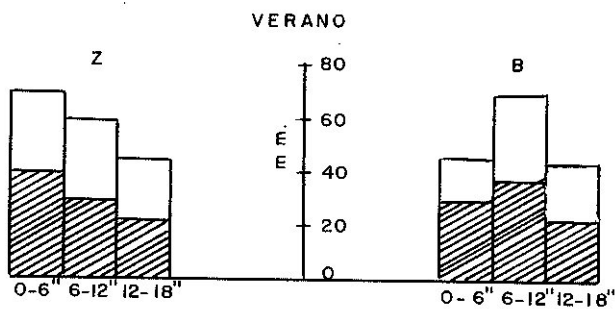
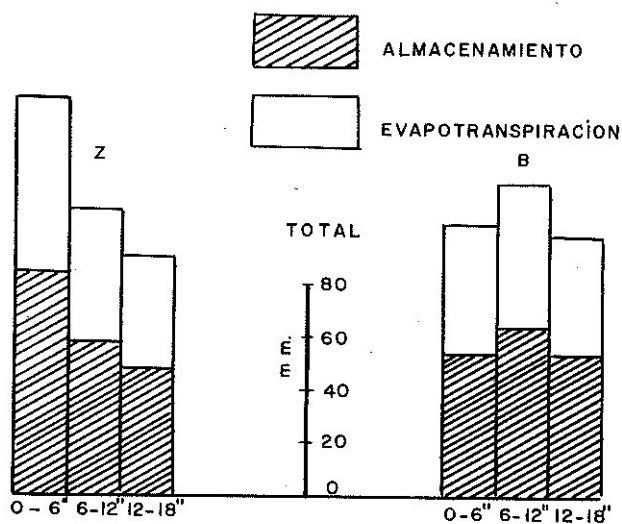
GRAFICA Nº 9 Evapotranspiración acumulada en cada área de estudio.



GRAFICA No 10 Humedad del suelo en mm en cada profundidad de muestreo, dentro de su respectiva área.



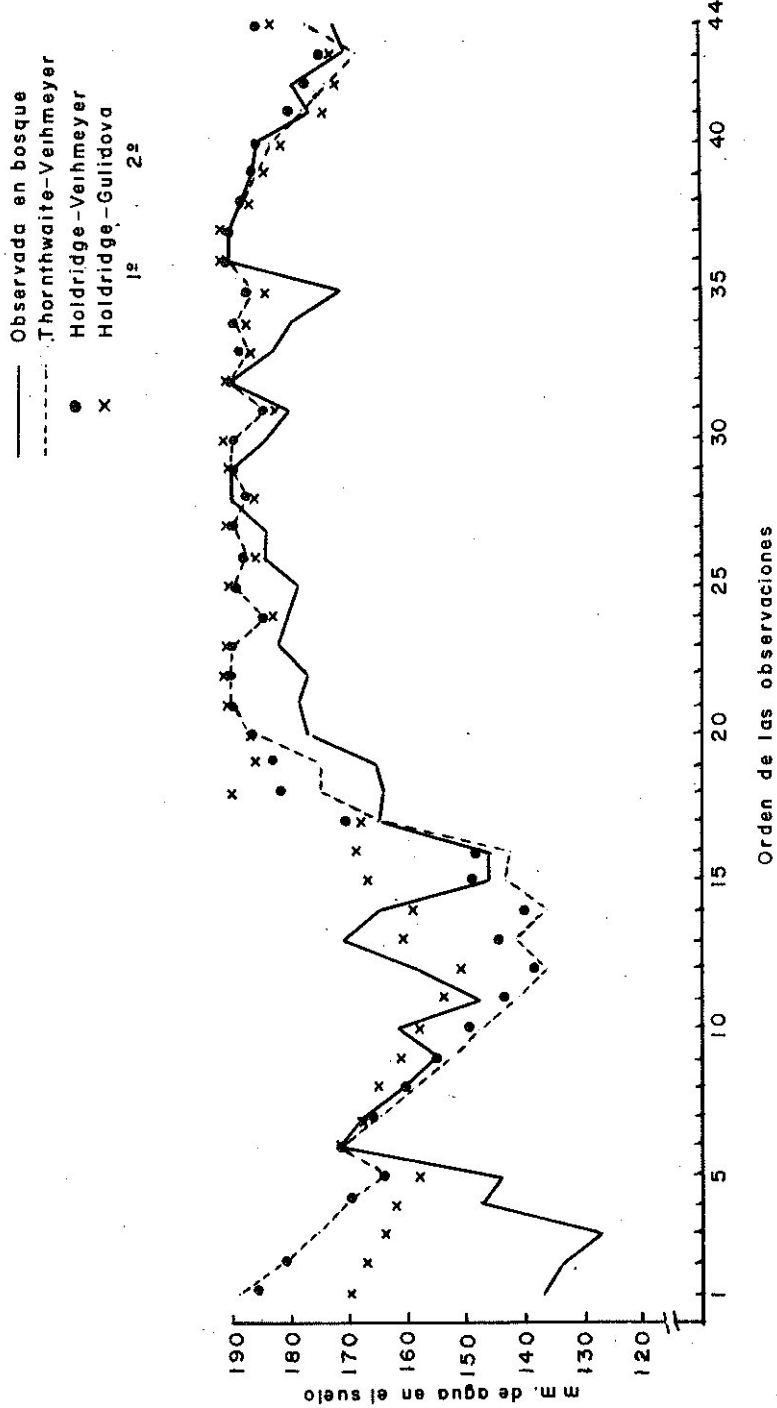
GRAFICA Nº 11 Déficit acumulado de humedad en cada profundidad de muestreo.



GRAFICA Nº 12

Almacenamiento y evapotranspiración en las profundidades de muestreo dentro de cada área. Las barras de la izquierda pertenecen al área de zacate (Z) y a la derecha, el área de bosque (B). La escala vertical en mm de agua.





GRAFICA Nº 13 Humedad del suelo en el área del bosque, observada y calculada mediante fórmulas de evapotranspiración. El primer nombre corresponde a la fórmula empleada y el segundo al factor F utilizado.