AGENCY FOR INTERNATIONAL DEVELOPMENT
WASHINGTON, D. C. 20523

BIBLIOGRAPHIC INPUT SHEET

FOR AID USE ONLY
0067

1. SUBJECT CLASSIFICATION

A. PRIMARY: Agriculture — AF10-0000-G355

B. SECONDARY: Meteorology and climatology--El Salvador

2. TITLE AND SUBTITLE

Investigaciones sobre evapotranspiracion y requerimientos de irrigacion

3. AUTHOR(S)

Hargreaves,G.H.; Christiansen,J.E.

4. DOCUMENT DATE	5. NUMBER OF PAGES	6. ARC NUMBER
1970	26p.	ARC ES631.7.U89

7. REFERENCE ORGANIZATION NAME AND ADDRESS

Utah State

8. SUPPLEMENTARY NOTES *(Sponsoring Organization, Publishers, Availability)*

9. ABSTRACT

10. CONTROL NUMBER

PN-RAA-016

11. PRICE OF DOCUMENT

12. DESCRIPTORS

El Salvador
Evaporation
Evapotranspiration
Water supply

13. PROJECT NUMBER

14. CONTRACT NUMBER

CSD-2167 Res.

15. TYPE OF DOCUMENT

AID 590-1 (4-74)

INVESTIGACIONES SOBRE EVAPOTRANSPIRACION Y REQUERIMIENTOS DE IRRIGACION

Investigations Concerning Evapotranspiration and Irrigation Requirements

APOYO Y COLABORACION DE

LABORATORIO DE RESERVA DE AGUA UNIVERSIDAD DE UTHA
INSTITUTO GEOGRAFICO NACIONAL (EL SALVADOR C A)
SERVICIO GEODESICO INTERAMERICANO
AGENCIA PARA EL DESARROLLO INTERNACIONAL (A I D)
CENTRO INTERAMERICANO DE DESARROLLO INTEGRAL DE AGUAS Y TIERRAS

INDICE CLIMATICO Y REQUERIMIENTOS DE IRRIGACION

PREFACIO

Esta publicación es el resultado de mas de una década de investigaciones sobre evapotranspiración y requerimientos de irrigación, que comenzó en la Universidad de Utah en 1959, cuando el profesor J.E. Christiansen inició un estudio sobre esos requerimientos para los terrenos pantanosos de Utah. En este primer estudio, el profesor Christiansen expresó un tipo diferente de fórmula para calcular la evaporación equivalente al de tanque tipo A y la evapotranspiración. Diecinueve estudiantes graduados participaron en varias de las fases de los experimentos, usando sus estudios para la tesis que les permitió obtener sus títulos de Profesores en Ciencias de la Universidad de Utah. Se publicaron dos revistas profesionales y un boletín.

En 1965, el Centro Interamericano para el Desarrollo Integral de Aguas y Tierras (CIDIAT), se interesó y fomentó estudios de datos obtenidos en América del Sur, especialmente en Venezuela. En esa época el Sr. Hargreaves se asoció con el Prof. Christiansen y desde entonces ambos comparten el interés por este tema. En 1969 presentaron al I.C.I.D. de México en conjunto, un ensayo sobre requerimientos de irrigación.

El Sr. Hargreaves tuvo a su cargo la publicación y el Prof. Christiansen se encargó de las correcciones.

Se agradece por lo tanto a las siguientes entidades, por el apoyo financiero prestado a la investigación, la que culmina con este informe.

Utah Water Research Laboratory, Universidad de Utah.

CIDIAT (Centro de Desarrollo Integral de Aguas y Tierras)

Organización de los Estados Americanos.

Instituto Geográfico Nacional (El Salvador)

Servicio Geodésico Interamericano, División de Recursos Naturales

Agencia de Desarrollo Internacional de los EE.UU., contrato No AID/ csd-2167.

Bruce H. Henderson
Coordinador CIDIAT &
Director del Proyecto en la América Latina
Investigación sobre
administración de aguas
Contrato AID/csd-2167

A. Alvin Bishop, Jefe Departamento
de Ingeniería Agrícola e Irrigación
de la Universidad de Utah & Jefe
del Proyecto, Contrato AID/csd-2167

INTRODUCCION

Este atlas permite calcular los requerimientos de irrigación de El Salvador. La información interesará a quienes tengan a su cargo el planeamiento y la ejecución de proyectos sobre recursos de Agua como también a los encargados del uso y administración de los mismos. La utilización eficaz de los recursos hidráulicos requiere el conocimiento práctico de la evapotranspiración o consumo del agua por las mieses. El informe sirve, por lo tanto, para determinar la cantidad de agua necesaria para irrigar, basándose en estudios sobre las lluvias y sobre factores climáticos que influyen en la evapotranspiración, y el agua necesaria para las cosechas agrícolas.

Nuestro atlas presenta algunas fórmulas nuevas para calcular la evaporación, evapotranspiración potencial y precipitación posible, tomándose en cuenta todo ello para calcular los requerimientos existentes.

REQUERIMIENTOS DE AGUAS PARA IRRIGACION

Están sujetos a muchos factores que se pueden clasificar en tres grupos: 1) los que dependen del clima, 2) los que dependen de los suelos, y 3) los que dependen de los sembrados. Estas relaciones son muy complejas.

Tales factores como pérdidas en los canales, eficacia de la aplicación del agua, requisitos de infiltración, existencia de humedad en el suelo, cantidad de aguas subterráneas que contribuyen a la misma, todos influyen sobre los requerimientos hidráulicos para los proyectos de irrigación. Sin embargo, estos factores son de naturaleza tal, que no pueden incluirse en la tabulación de factores que dependen del clima, por lo tanto no se mencionan en el atlas y se deben considerar por separado.

Los factores climáticos más importantes son: energía disponible (radiación solar recibida), temperatura, humedad y vientos. La evaporación medida con cualquier evaporímetro standard, tal como un recipiente de clase A, o con un evaporímetro de tipo Wild, integra algunos de los factores climáticos y sirve de índice general.

El consumo de agua de las mieses depende de amplitud de la copa de las mismas, área de superficie de las hojas y disponibilidad de la humedad de los suelos.

Los requerimientos de agua también se deben considerar con respecto a la época y a la cantidad necesarias.

Desde el punto de vista administrativo, serán muy inportantes las cantidades necesarias mensualmente, mientras que para el almacenamiento es valiosísima anual y para determinar el tamaño de los canales resulta inapreciable la cantidad máxima.

Esta será mayor que la cantidad máxima mensual.

EXPERIMENTOS EN EVAPORACION Y EVAPOTRANSPIRACION

Se han hecho muchos experimentos para obtener los conceptos básicos teóricos sobre la evaporación. Estos se dividen en dos categorías principales: balance térmico, por el cual ya se considera toda la energía térmica que corresponde a una región, y el paso del vapor, en donde se considera la velocidad de su paso desde una superficie hacia la atmósfera. Algunos investigadores, entre ellos Penman, trataron de combinar esos dos conceptos.

Para calcular la evaporación potencial se desarrollaron muchas fórmulas. La mayoría considera solamente pocos de los numerosos factores climáticos que afectan a la evaporación y a la evapotranspiración. Como por lo general la información climática no incluye los factores que se deben usar en algunas fórmulas, a veces estas resultan difíciles de aplicar y siempre se deben usar coeficientes empiríicos para que los resultados correspondan a los valores medidos.

Las fórmulas usadas en este informe se obtuvieron con experimentos efectuados en un tanque tipo A, y con un lisímetro de 20 pies (6.56m), en la Universidad de California. Las obtuvo el profesor W.O. Pruitt, de Davis, California, además de estudios hechos en las regiones tropicales de la América del Sur. Dichas fórmulas se adaptaron hasta corresponder perfectamente a los valores reales y calculados. Se las considera eficaces en El Salvador, en donde las condiciones climáticas son semejantes. En el apéndice tratamos detalladamente sobre las mismas.

CONCEPTO DE LA EVAPOTRANSPIRACION POTENCIAL

La evapotranspiración potencial es la suma de la evaporación directa de superficies húmedas y de la transpiración de la superficie de hojas de mieses que crecen vigorosamente en suelos cubiertos por las mismas (toda la superficie está sombreada) y útil, porque en ese caso la evapotranspiración potencial se convierte en esencia, en una función del clima y se puede obtener con datos sobre el mismo. En este informe consideramos la evapotranspiración de terrenos cubiertos por pastos cortos y verdes y no será tanta como la de superficies cubiertas de alfalfa o caña de azúcar, que tienen mayor superficie de follaje por unidad de área.

EVAPOTRANSPIRACION REAL

La verdadera evapotranspiración de las mieses como alfalfa, caña de azúcar, etc. puede, por lo tanto, variar desde una mayor que la usada aqui, a una mucho menor en donde la vegetación no cubre completamente el terreno, o en donde la humeda del suelo es tal que limita la transpiración. Para calcular los requerimientos

acuáticos se supone que no debe haber escasez de humedad en el suelo, pero la precipitación podrá ser menor que la esperada.

En cosechas anuales hay siempre un período considerable de espera desde la época de la siembra, pasando por una etapa de emergencia, hasta la cosecha madura. Algunas mieses nunca llegan a un crecimiento completo, solo a un 50%. En huertos de vegetación perecedera, pasarán muchos años antes de alcanzar las condiciones de un 50% de sombreado del suelo aun cuando los árboles estén llenos de hojas. Cuando una cosecha comienza a madurar o llega a cierta etapa de madurez, disminuye la transpiración, aun cuando sus mieses y la humedad existente no sean factores restrictivos.

COEFICIENTES DE COSECHAS

Para calcular la evapotranspiración existente, se acostumbra a aplicar al potencial de evapotranspiración un coeficiente de cosechas calculado. También se aplica a una medida standard de evaporación como la de cuenca de clase A. Por lo tanto resulta importante conocer a que base se aplicará el coeficiente: evapotranspiración potencial o evaporación en tanque tipo A.

Estos valores de evapotranspiración existente a potencial o de tanque Tipo A, dependen de las condiciones ya mencionadas y sólo se pueden generalizar. Los valores de los coeficientes de cosechas que damos en este informe, se obtuvieron en publicaciones diferentes y se consideran seguros. Conciernen a los valores estimados de la evapotranspiración potencial (ETP).

Para confirmar algunos de estos valores, es necesario obtener datos más exactos sobre los valores de diferentes cosechas en condiciones tropicales. Habrá que usarlos con cuidado y modificarlos según lo indique la experiencia y nuevos datos recibidos.

En las Tablas 1 y 2 se incluyen algunos coeficientes (Tabla 1) basados en la evaporación calculada o medida en tanque Tipo A. Esto significa que el tanque está

colocado en un sitio expuesto, con mucha vegetación y que no está sujeta a condiciones de alta energía advectiva. En tanques situados en regiones áridas, o sujetas a las condiciones anteriores, los coeficientes serán menores del 10 al 20% calculado. Los valores de la Tabla 2 se basan en valores ETP calculados para regiones de mucha vegetación y las condiciones de los tanques de exposición no los afectarían.

En sitios aridos la evapotranspiración de campos pequeños o aislados, es mayor que la de los de mucha área de vegetación. Todos los valores se expresan al 5% mas cercano, por la variación de los datos.

En los Estados Unidos los experimentos muestran que con irrigación menos frecuente, permitiéndose un poco menos de humedad, la evapotranspiración se puede reducir del 70 al 80% de los valores normales, reduciendo la producción del 5 al 15% solamente. Donde haya poca provisión de agua, o donde ésta sea muy cara, el uso prudente de la misma hará rendir más por unidad de volumen aplicado, que con la irrigación normal donde se espera mayor rendimiento.

PRECIPITACION SEGURA

Como la necesidad del agua para irrigación depende en cualquier año de la cantidad de lluvia, se estudió mucho el tema de la precipitación segura. Aquí la definimos como el valor más probable de la precipitación mensual que se puede esperar un 75% del tiempo; esto es, tres de cada cuatro años. No significa, sin embargo, que en cuatro años consecutivos, cualquier mes, digamos mayo, tenga menos de las lluvias esperadas, y que en otros años este mismo mes tenga más. En efecto, con frecuencia los estudios indican ciclos de lluvias, tales como varios años consecutivos con menos del promedio de precipitación, seguidos por años de lluvias mayores de lo normal. Durante largos períodos, no obstante, hay un 75% de probabilidad de que la precipitación mensual sea igual o mayor que cierto valor que aquí se llama precipitación segura. Este valor, 75%, se eligió a discre-

ción, porque se cree que la mayoría de las cosechas agrícolas podrá soportar algunas deficiencias de humedad sin mayores consecuencias, y que desde el punto de vista económico se puede idear un sistema de irrigación basado en ese concepto. En las cosechas en las que la calidad es de suma importancia, o en las que sufrirían por causa de deficiencias de humedad, se podría justificar un factor probable mayor del 75%, haciéndose concesiones para dicha condición, usando los valores de precipitación segura y de los déficits de evapotranspiración presentados.

Como la mayoría de los datos de precipitación para El Salvador no son de larga duración, la relación entre el promedio y el mínimo de los valores mensuales se tomaron en un análisis de frecuencia, de más de 50 estaciones en Venezuela. Esta relación sirve para El Salvador porque la caída de las lluvias es semejante en ambos países. En el apéndice damos las ecuaciones de precipitación segura con relación al promedio y al mínimo de la misma.

PRECIPITACION EFICAZ

Toda precipitación que cae no se puede considerar eficaz, si no contribuye a aumentar la humedad del suelo por una u otra de las razones siguientes:

1. Algunas lluvias caen con mayor intensidad que la capacidad de infiltración del suelo y parte se escurre formando corrientes o congregándose en la superficie de sitios bajos. Si cuando llueve el suelo está saturado, casi toda el agua se escurrirá de la superficie.

2. La zona de las raíces puede retener y almacenar la humedad. Siempre que la precipitación exceda la capacidad de almacenar humedad de un suelo desecado, el exceso pasará a la zona de raíces y escapará a través de desagües naturales o artificiales, o crecerá hasta un nivel de saturación (nivel hidrostático) entre dicha zona de raíces. La capacidad de saturación de humedad de un suelo, es un poco mayor que la capacidad de un suelo drenado. Está diferencia se llama capaci

dad de desague, o rendimiento específico de un suelo.

En general se considera que la precipitación eficaz de cualquier mes, no puede exceder de la diferencia entre la capacidad de campo y el contenido de humedad real, más la evapotranspiración mensual. Como la capacidad de infiltración de un suelo, depende de su contenido de humedad y disminuye a medida que ésta aumenta, es difícil determinar que parte de una tormenta fue eficaz. No se hicieron concesiones para valorar la eficacia de las precipitaciones. Se puede calcular bastante bien en regiones específicas donde se conozca la intensidad de las lluvias y las características del suelo, pero los cálculos generales serían de poco valor.

DEFICIT DE EVAPOTRANSPIRACION

El déficit de evapotranspiración ETDF, es la evapotranspiración potencial mensual, ETP, calculada por medio de la información climática, menos la precipitación segura mensual, PD:

$$ETDF = ETP - PD$$

Estos valores son positivos cuando el potencial de evapotranspiración mensual sobrepasa la precipitación segura mensual, y negativos cuando la precipitación segura sobrepasa la evapotranspiración potencial, indicando un exceso de humedad. Estos valores en mm, por cada mes, para 13 estaciones de El Salvador, se dan en la Tabla 3. Indican que en todas estas estaciones hay más precipitación segura en los meses de junio, julio, agosto y septiembre que evaporación segura, pero que en algunos de los otros meses hay deficiencias. En cuatro de las estaciones hay exceso en mayo, y en once estaciones en octubre. Se puede decir en general que en la mayor parte del país hay un déficit de humedad (déficit de evapotranspiración) durante siete meses del año.

EPOCA DE SEQUIA

Comienza en noviembre y termina en abril o mayo, con una duración de seis o siete meses. Esta época es muy importante para la agricultura. En el trópico la ex-

periencia nos muestra que no se puede cultivar la mayoría de los suelos o trabajarlos en otras formas, durante los meses en que el promedio de precipitación pasa de 80 mm. Por lo común en las cosechas anuales, todo lo que se refiere a los cultivos (arado, etc.) debe hacerse durante el mes de abril o en los primeros días de mayo. Para las mieses perennes, los cultivos de control de malezas deben finalizar en esta fecha. La época de la cosecha dependerá de la duración del crecimiento, y la recolección tendrá que hacerse durante la estación de las lluvias, pero en lo posible a principios de la estación seca.

Irrigando el suelo siempre habrá bastante tiempo durante la estación seca para que crezca otra cosecha. Sin irrigación, por lo general esto no es posible. Algunas mieses perennes existen en ese período seco, pero su crecimiento es exiguo si no se las riega. Los pastos maduran o se secan y dan muy poco alimento para ganados.

En esa época resulta muy beneficioso irrigar los terrenos. Las plantas de raíces más profundas soportan mejor la sequía porque el suelo almacena la humedad. Sin embargo algunas mieses pueden crecer durante la estación seca, siempre que haya irrigación. El propósito básico de este atlas es el de indicar los períodos de exceso y deficiencia de humedad y dar una base razonable para calcular la irrigación mensual.

INDICE DE HUMEDAD DISPONIBLE.

La relación de la precipitación segura PD, a la evapotranspiración calculada ETP, se llama índice de humedad disponible. Cuando esta razón pase de 1.0, se supone que existe una cantidad suficiente de humedad para la mayoría de las cosechas, con excepción del arroz. Podrá haber escasez de humedad en una proporción de uno de cada cuatro años. Como la evapotranspiración verdadera de la mayoría de las cosechas es menor que la potencial, y como el suelo tiene una capacidad de contener humedad que sirve para satisfacer las necesidades normales de

dos o cuatro semanas, las deficiencias reales podrán ser menores que las indicadas en el déficit de evapotranspiración, o en el índice de humedad disponible. Este se ha usado como índice de climas en los sistemas de clasificación.

TABULACION DE LOS VALORES COMPUTADOS DE LOS PARAMETROS QUE AFECTAN LOS REQUERIMIENTOS ACUATICOS.

Se analizaron los informes de 13 estaciones climatológicas de El Salvador, para determinar la evaporación en tanques, calculada (computada), EVPC, evapotranspiración potencial ETP, precipitación mensual máxima PMX, precipitación mensual media PM, precipitación mensual mínima PMI, precipitación mensual segura PD, déficit mensual de evapotranspiración ETDF y el índice de humedad disponible MAI= PD/ETP. Un valor negativo de ETDF, o un valor del índice de humedad disponible MAI, de unidad (1.0) o mayor, indica que la precipitación es adecuada para las cosechas durante tres de cada cuatro años. Un valor positivo de ETDF, o un valor de MAI menor de 1, indica deficiencia de humedad. La cantidad de exceso de precipitación que cae durante algunos meses de la estación de las lluvias, se indica con la magnitud de los valores negativos de ETDF, o con altos valores de MAI. Estos valores se encuentran en la Tabla 3.

LLUVIAS MENSUALES Y ANUALES Y MAPAS DE DEFICIENCIA DE HUMEDAD

Los mapas isohiéticos sobre lluvias mensuales y anuales se prepararon con los informes existentes. Muestran las regiones y las magnitudes del déficit de evapotranspiración y por lo tanto se pueden usar como guías sobre el desarrollo de los recursos hidráulicos.

Se prepararon gráficos para cada una de las 13 estaciones mostrando valores mensuales de precipitación máxima, mínima, probable un 75% del tiempo, evapotranspiración potencial y valores diarios de la misma.

Los gráficos y mapas isohiéticos se prepararon usando cómputos tomados previamente de la Tabla 3. Se notaron algunas pequeñas discrepancias. Para trabajos

más exactos se recomienda la Tabla 3. Los valores presentados se basan en fórmulas revisadas y mejoradas. Para planeamientos, los mapas y gráficos son adecuados. Esperamos corregir esas pequeñas diferencias en ediciones futuras.

Tabla 1. Coeficientes de cosechas relativos a la evaporación en tanques EVP (medidos o estimados)

COSECHA	Valor del coeficiente. ET/EVP		
	Mínimo antes de surgir (1)	Alcance normal durante la estación	Mes máximo
Cosechas perennes:			
Alfalfa		.70 - .90	.95
Pastos irrigados		.65 - .85	.90
Huertos con pastos		.70 - .90	.95
Huertos de frutos caducos			
sin madurar (2)	.25	.30 - .70	.75
Citrus y aguacates (2)	.35	.40 - .60	.65
Uvas	.30	.30 - .50	.55
Bananas, plátanos	.30	.70 - .90	.90
Cosechas anuales de campo:			
Granos			
Maíz, sorgo	.25	.50 - .80	.90
Algodón			
Papas	.25	.60 - .85	.90
Remolachas			
Melones	.25	.45 - .70	.80
Vegetales			
Otras cosechas			

Caña de azúcar	.30	.60 - .90	.95
Arroz (3)	1.00	1.20 - 1.50	2.00

1) Depende de la frecuencia de las lluvias y de la humedad del suelo

2) Depende de la edad de los árboles.

3) Los requerimientos acuáticos para arrozales dependen en gran parte de la capacidad de infiltración del suelo y de las condiciones del desague. Podrán ser mayores que los indicados para algunas condiciones.

NOTA: todos los valores se llevan al .05 más próximo.

Tabla 2. Coeficientes de cosechas relativos a la evapotranspiración potencial computada, ETP.

COSECHA	Valor del coeficiente, ET/ETP		
	Mínimo o antes de aparece (1)	Alcance normal durante la estación	Mes máximo
Cosechas perennes:			
Alfalfa		.90 - 1.10	1.15
Pastos irrigados		.85 - 1.00	1.10
Huertos con pastos		.90 - 1.10	1.20
Huertos de frutos caducos			
sin madurar (2)	.30	.40 - .90	.95
Citrus y aguacates (2)	.45	.55 - .75	.80
Uvas	.40	.40 - .65	.70
Bananas, plátanos	.40	.90 - 1.10	1.15
Cosechas anuales de campo:			
Granos	.30	.60 - 1.00	1.10
Maíz, sorgo	.30	.60 - 1.00	1.10

Algodón			
Papas	.30	.75 - 1.05	1.10
Remolachas			
Melones			
Vegetales	.30	.55 - .90	1.00
Otras cosechas			
Caña de azúcar	.40	.75 - 1.10	1.20
Arroz	1.25	1.50 - 1.90	2.50

1) Depende de la frecuencia de las lluvias y de la humedad del suelo

2) Depende de la edad de los árboles.

3) Los requerimiento acuáticos para arrozales dependen en gran parte de la capacidad de infiltración del suelo y de las condiciones del desague. Podrán ser mayores que los indicados para algunas condiciones.

NOTA: todos los valores se llevan al .05 más próximo

Tabla 3. Evaporación de cuenca, evapotranspiración potencial y precipitación segura.

En anexo.

APENDICE

Las ecuaciones usadas para calcular (computar) la evaporación en cuenca, evapotanspiración potencial y precipitación segura usadas en este atlas, se formaron analizando información obtenida en todo el mundo. Su forma básica se desarrolló en la Universidad de Utah, por el Prof. Christiansen:

$$E = K\,Rt\;C_T\;C_W\;C_H\;C_S\;C_E$$

en la que E podrá representar a la evaporación en cuenca o a la evapotranspiración potencial; K es una constante sin dimensión, Rt es la radiación teórica o extraterrestre que alcanza a la atmósfera de la tierra, expresada en las mismas unidades de E, y los factores C son coeficientes sin dimensión, que son funciones de los principales parámetros climáticos, temperatura, velocidad del viento, humedad, porcentaje de luz solar y altura de la estación. Usando la relación básica expresada por esta ecuación, las ecuaciones de los coeficientes climáticos se obtuvieron empíricamente de un análisis de evaporación en cuenca y datos climáticos en los EE.UU. y en muchos otros países. Las relaciones básicas entre la evaporación en tanque Tipo A, evapotranspiración potencial y los parámetros climáticos se obtuvieron en la Universidad de California por el Prof. W. O. Pruitt (1960).

Las ecuaciones fueron presentadas por Christiansen (1968) y Christiansen y Hargreaves (1969). Se modificaron para usarlas en El Salvador, usando amplios análisis de información obtenida en regiones tropicales de América del Sur, para que fueran lo más correctas posible. Estas ecuaciones son:

PARA EVAPORACION EN CUENCA

$$EVPC = 0.350 \times Rt \times C_T \; C_W \; C_H \; C_S \; C_E$$

en la cual

EVPC representa la evaporación de un tanque Tipo A en sitios de bastante vegetación, en la que la energía advectiva que influye sobre la evaporación sería mínima.

Los valores de EVPC computados de la ecuación (1) son menores que aquellos de muchas estaciones en las que las condiciones no representan las normas de exposición y operación, recomendadas por U.S. Enviramental Services.

Rt se computa para una constante solar de 2 usando una ecuación de Frank y Lee (1966).

Las ecuaciones para los coeficientes climáticos y de elevación de la evaporación en cuenca, son:

$$C_{TV} = 0.644 + 0.21\ (TM/25.) + 0.146\ (TM/25.)^2 \qquad (1a)$$

$$C_{WV} = 0.70 + 0.36\ (W10/8.) - 0.06\ (W10/8.)^2 \qquad (1b)$$

$$C_{HV} = 1.20 - 0.10\ (HM/.7)^3 \qquad (1c)$$

$$C_S = 0.48 + 0.66\ (S/.5) - 0.14\ (S/.5)^2 \qquad (1d)$$

$$C_E = 0.970 + 0.03\ (EL/305.) \qquad (1e)$$

en la cual

TM es la temperatura mensual media, grados centígrados W10 es la velocidad del viento a una altura de 10 metros sobre la superficie del terreno, en kilómetros por hora.

HM es la humedad relativa mensual media, expresada en decimales (70% = 0.70).

S es el porcentaje de luz solar probable, expresado en decimales (50% = 0.50).

E es la altura de la estación en metros sobre el nivel medio del mar.

PARA EVAPOTRANSPIRACION POTENCIAL

$$ETP = 0.280\ Rt\ C_{TT}\ C_{WT}\ C_{HT}\ C_S\ C_E$$

en la que

ETP es la evapotranspiración potencial de césped de pastos cortos, en buenas condiciones de crecimiento.

Rt es la radiación extraterrestre computada tal como se la usa en la ecuación 1.

Las ecuaciones para los coeficientes climáticos y de elevación de la evapotranspiración potencial son:

$$C_{TT} = 0.670 + 0.193\ (TM/25.) + .137\ (TM/25.)^2 \qquad (2a)$$

$$C_{WT} = 0.750 + 0.310\ (W10/8.) - 0.06\ (W10/8.)^2 \qquad (2b)$$

$$C_{HT} = 1.10 - 0.10\ (HM/.7)^4 \qquad (2c)$$

C_S and C_E como se las define anteriormente

En la Tabla 3 EVPC se expresa en milímetros por mes, y ETP en milímetros por mes y milímetros por día.

PARA PRECIPITACION SEGURA

La precipitación segura es la precipitación mínima que se espera que caiga durante cualquier mes, con un promedio de tres de cada cuatro años. Es por lo tanto la que tiene un 75% de probalidad de caída. Para calcularla, se hicieron análisis frecuentes de los registros de 53 precipitaciones a larga duración, en América del Sur, y se determinó la relación entre el nivel de probalidad de un 75% y el de la precipitación media, y la relación entre el nivel de 75% y la suma de los valores de la precipitación media y mínima mensual. Las ecuaciones son:

$$PD1 = 0.847\ PM - 26 \qquad (3)$$

$$PD2 = 0.550\ (PM + PMI) - 12 \qquad (4)$$

en la cual

PD1 es la precipitación segura mensual calculada con la precipitación media mensual, PM, y

PD2 es la precipitación segura mensual calculada con la suma de las precipitaciones mensuales medias y mínimas, PMI. La precipitación segura usada en la Tabla 3 es el promedio de PD1 y PD2.

así $PD = (PD1 + PD2)/2 \qquad (5)$

REFERENCIAS

Christiansen. J.E. 1968. Pan Evaporation and Evapotranspiration from Climatic Data. American Society of Civil Engineers Proceedings. Journal of Irrigation and Drainage Division Paper 5988.

Frank, Ernest C. and Richard Lee. 1966. Potential Solar Beam Irradiation On Slopes: Tables for 30° to 50° Latitude. Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station. Fort Collins. Colorado.

Pruitt, W. O. 1960. Relation of Consumptive Use of Water to Climate. Transactions American Society Agriculture Engineers. Vol 3 No. 1.

Tabla 3. Evaporación de cuenca, evapotranspiración potencial y precipitación segura.

STA. NO. 1 GUIJA SAN JERONIMO LAT. N. 14.24 LONG. W. 89.48 ELEV. 400.

	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAYO	JUN.	JUL.	AGT.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.
PREC.MAX.	23.	30.	54.	165.	574.	574.	490.	597.	533.	376.	175.	38.
PREC.MIN.	0.	0.	0.	0.	26.	140.	94.	104.	109.	27.	0.	0.
PREC. MEAN	1.	2.	10.	34.	167.	309.	246.	217.	299.	154.	24.	4.
PREC.DEF.	0.	0.	0.	5.	105.	235.	179.	161.	220.	96.	0.	0.
EVPC.MM/MO.	171.	175.	223.	212.	200.	149.	164.	165.	136.	144.	151.	159.
ETP.MM/MO.	132.	136.	171.	166.	161.	126.	137.	138.	115.	119.	121.	125.
ET.DEF..MM.	132.	136.	171.	162.	56.	-110.	-42.	-23.	-104.	23.	120.	125.
ETP.MM/DA.	4.27	4.84	5.53	5.55	5.18	4.19	4.42	4.45	3.85	3.84	4.02	4.03
MAI=PD/ETP.	.00	.00	.00	.03	.65	1.87	1.30	1.17	1.90	.81	.00	.00

STA. NO. 2 CHORRERA DEL GUAYABO LAT. N. 14.00 LONG. W. 88.76 ELEV. 190.

	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAYO	JUN.	JUL.	AGT.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.
PREC.MAX.	12.	36.	51.	196.	380.	530.	554.	417.	605.	522.	188.	42.
PREC.MIN.	0.	0.	0.	18.	78.	225.	247.	213.	185.	34.	0.	0.
PREC. MEAN	2.	4.	8.	80.	247.	370.	364.	310.	366.	250.	49.	4.
PREC. DEP.	0.	0.	0.	42.	175.	301.	303.	256.	288.	165.	15.	0.
EVPC.MM/MO.	183.	184.	230.	214.	181.	143.	160.	159.	131.	145.	147.	163.
ETP.MM/MO.	141.	142.	176.	168.	154.	121.	133.	133.	112.	120.	118.	127.
ET.DEF..MM.	141.	142.	176.	126.	-21.	-181.	-170.	-123.	-176.	-45.	103.	127.
ETP.MM/DA.	4.56	5.07	5.69	5.60	4.97	4.02	4.28	4.29	3.72	3.87	3.93	4.10
MAI=PD/ETP.	.00	.00	.00	.25	1.14	2.50	2.28	1.93	2.58	1.37	.13	.00

Tabla 3. Evaporación de cuenca, evapotranspiración potencial y precipitación segura.

STA. NO. 3 SANTA ANA. LAT. N. 14.00 LONG. W. 89.56 ELEV. 720.

	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAYO	JUN.	JUL.	AGT.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.
PREC. MAX.	17.	44.	38.	231.	474.	561.	559.	632.	552.	404.	117.	49.
PREC.MIN.	0.	0.	0.	0.	46.	122.	152.	140.	122.	23.	0.	0.
PREC.MEAN	1.	2.	5.	67.	221.	330.	331.	324.	368.	193.	32.	5.
PREC. DEP.	0.	0.	0.	28.	148.	245.	254.	246.	272.	122.	3.	0.
EVPC.MM/MO	171.	169.	212.	198.	184.	138.	169.	169.	135.	146.	152.	159.
ETP.MM/MO.	135.	132.	165.	156.	148.	116.	141.	140.	115.	121.	122.	127.
ET.DEF..MM.	135.	132.	165.	128.	1.	-129.	-113.	-106.	-157.	-0.	119.	127.
ETP.MM/DA.	4.36	4.73	5.33	5.22	4.81	3.88	4.53	4.51	3.83	3.92	4.07	4.10
MAI=PD/ETP.	.00	.00	.00	.18	.99	2.11	1.81	1.76	2.37	1.01	.03	.00

STA. NO. 4 LOS ANDES (FINCA EL CARMEN) LAT. N. 13.83 LONG. W. 89.62 ELEV. 1.770.

	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAYO	JUN.	JUL.	AGT.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.
PREC.MAX.	26.	34.	21.	314.	380.	804.	507.	558.	654.	598.	325.	28.
PREC.MIN.	0.	0.	0.	0.	68.	186.	223.	172.	319.	132.	1.	0.
PREC.MEAN	4.	6.	6.	58.	223.	410.	336.	321.	448.	335.	61.	7.
PREC.DEP.	0.	0.	0.	22.	155.	319.	277.	253.	382.	251.	24.	0.
EVPC.MM/MO.	105.	115.	146.	140.	143.	96.	107.	109.	88.	80.	75.	89.
ETP.MM/MO.	87.	94.	119.	115.	121.	83.	92.	94.	77.	69.	65.	75.
ET.DEF..MM.	87.	94.	119.	94.	-34.	-235.	-185.	-159.	-305.	-182.	41.	75.
ETP.MM/DA.	2.81	3.35	3.85	3.85	3.89	2.78	2.97	3.03	2.56	2.24	2.15	2.41
MAI=PD/ETP.	.00	.00	.00	.19	1.28	3.81	3.00	2.69	4.98	3.62	.37	.00

Tabla 3. Evaporación de cuenca, evapotranspiración potencial y precipitación segura.

STA. NO. 5 SAN ANDRES LAT. N. 13.82 LONG. W. 89.41 ELEV. 460.

	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAYO	JUN.	JUL.	AGT.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.
PREC.MAX.	41.	18.	62.	228.	339.	480.	516.	431.	525.	299.	117.	87.
PREC.MIN	0.	0.	0.	8.	71.	168.	202.	164.	165.	54.	0.	0.
PREC.MEAN	6.	2.	8.	66.	198.	286.	332.	272.	303.	173.	41.	8.
PREC.DEP.	0.	0.	0.	29.	139.	227.	268.	216.	238.	117.	10.	0.
EVPC.MM/MO.	166.	160.	200.	182.	166.	128.	149.	155.	121.	134.	140.	152.
ETP.MM/MO.	131.	127.	158.	147.	138.	109.	127.	131.	104.	113.	115.	122.
ET.DEF..MM.	131.	127.	158.	118.	-1.	-117.	-142.	-85.	-134.	-4.	105.	122.
ETP.MM/DA.	4.23	4.55	5.09	4.81	4.44	3.65	4.09	4.21	3.46	3.63	3.83	3.93
MAI=PD/ETP.	.00	.00	.00	.20	1.01	2.07	2.12	1.65	2.29	1.04	.08	.00

STA. NO. 6 IZALCO LAT. N. 13.75 LONG. W. 89.68 ELEV. 390.

	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAYO	JUN.	JUL.	AGT.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.
PREC.MAX.	5.	13.	60.	190.	542.	558.	605.	524.	1016.	867.	284.	39.
PREC.MIN.	0.	0.	0.	4.	151.	214.	108.	153.	205.	202.	0.	0.
PREC.MEAN	1.	3.	11.	64.	232.	314.	316.	320.	419.	337.	56.	8.
PREC.DEP.	0.	0.	0.	27.	185.	259.	231.	247.	330.	272.	20.	0.
EVPC.MM/MO.	165.	157.	193.	175.	160.	127.	147.	148.	124.	131.	143.	155.
ETP.MM/MO.	131.	126.	154.	142.	133.	108.	124.	125.	106.	110.	117.	124.
ET.DEF..MM.	131.	126.	154.	115.	-51.	-151.	-107.	-121.	-224.	-162.	97.	124.
ETP.MM/DA.	4.24	4.50	4.96	4.73	4.30	3.62	4.01	4.04	3.55	3.56	3.90	4.01
MAI=PD/ETP.	.00	.00	.00	.19	1.38	2.39	1.86	1.97	3.10	2.46	.17	.00

Tabla 3. Evaporación de cuenca, evapotranspiración potencial y precipitación segura.

STA. NO. 7 SAL SALVADOR (OBS) LAT. N. 13.71 LONG. W. 89.21 ELEV. 10.

	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAYO	JUN.	JUL.	AGT.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.
PREC. MAX.	40.	53.	80.	511.	380.	617.	492.	471.	611.	505.	130.	57.
PREC.MIN.	0.	0.	0.	0.	29.	154.	117.	82.	148.	25.	0.	0.
PREC.MEAN	5.	5.	9.	54.	184.	320.	315.	296.	318.	231.	40.	10.
PREC.DEP.	0.	0.	0.	19.	117.	247.	233.	210.	244.	149.	9.	0.
EVPC.MM/MO	178.	169.	206.	183.	163.	124.	150.	156.	120.	139.	152.	164.
ETP.MM/MO	139.	133.	162.	147.	135.	106.	127.	132.	103.	116.	123.	130.
ET.DEF..MM.	139.	133.	162.	128.	18.	-141.	-107.	-79.	-141.	-33.	114.	130.
ETP.MM/DA.	4.48	4.75	5.22	4.90	4.36	3.53	4.09	4.25	3.44	3.75	4.09	4.19
MAI=PD/ETP.	.00	.00	.00	.13	.87	2.33	1.84	1.60	2.36	1.28	.07	.00

STA. NO. 8 ILOPANGO AEROPUERTO LAT. N. 13.70 LONG. W. 89.11 ELEV. 615.

	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAYO.	JUN.	JUL.	AGT.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.
PREC.MAX.	14.	28.	36.	202.	295.	552.	556.	451.	529.	468.	118.	61.
PREC.MIN.	0.	0.	0.	1.	39.	145.	183.	216.	201.	139.	0.	0.
PREC.MEAN	2.	4.	7.	53.	169.	286.	353.	308.	341.	267.	35.	8.
PREC.DEP.	0.	0.	0.	18.	110.	221.	278.	256.	274.	206.	5.	0.
EVPC.MM/MO.	168.	166.	205.	185.	163.	125.	148.	149.	120.	127.	134.	149.
ETP.MM./MO.	133.	131.	162.	150.	136.	107.	126.	126.	104.	107.	110.	119.
ET.DEF..MM.	133.	131.	162.	132.	26.	-113.	-152.	-130.	-171.	-98.	104.	119.
ETP.MM/DA.	4.27	4.69	5.22	5.00	4.37	3.57	4.06	4.07	3.45	3.46	3.65	3.84
MAI=PD/ETP.	.00	.00	.00	.12	.81	2.06	2.21	2.03	2.65	1.92	.05	.00

Tabla 3. Evaporación de cuenca, evapotranspiración potencial y precipitación segura.

STA. NO. 9 SANTA TECLA LAT. N. 13.68 LONG. W. 89.29 ELEV. 965.

	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAYO	JUN.	JUL.	AGT.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.
PREC.MAX.	22.	34.	32.	431.	286.	596.	473.	567.	937.	382.	145.	81.
PREC.MIN.	0.	0.	0.	2.	64.	129.	128.	181.	231.	80.	0.	0.
PREC.MEAN	4.	3.	7.	54.	158.	323.	332.	312.	386.	243.	44.	7.
PREC.DEP.	0.	0.	0.	19.	109.	242.	248.	249.	314.	173.	12.	0.
EVPC.MM/MO.	163.	156.	192.	170.	151.	115.	148.	151.	115.	131.	143.	151.
ETP.MM/MO.	130.	126.	154.	140.	128.	102.	126.	129.	100.	111.	117.	123.
ET.DEF..MM.	130.	126.	154.	121.	19.	140.	-121.	-120.	-214.	-62.	106.	123.
ETP.MM/DA.	4.21	4.49	4.97	4.68	4.12	3.41	4.08	4.15	3.35	3.58	3.91	3.96
MAI=PD/ETP.	.00	.00	.00	.14	.85	2.36	1.96	1.93	3.13	1.56	.10	.00

STA. NO. 10 ACAJUTLA LAT. N. 13.60 LONG. W. 89.83 ELEV. 10.

	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAYO	JUN.	JUL.	AGT.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.
PREC.MAX.	24.	33.	43.	248.	401.	740.	540.	496.	686.	667.	397.	38.
PREC.MIN.	0.	0.	0.	0.	19.	116.	56.	81.	63.	28.	0.	0.
PREC. MEAN.	1.	1.	4.	51.	173.	305.	276.	259.	317.	269.	41.	3.
PREC.DEP.	0.	0.	0.	17.	107.	226.	189.	184.	220.	177.	10.	0.
EVPC.MM/MO	154.	145.	172.	156.	147.	127.	142.	145.	117.	126.	136.	152.
ETP.MM/MO.	120.	114.	134.	124.	120.	108.	118.	120.	99.	104.	108.	119.
ET.DEF..MM.	120.	114.	134.	108.	13.	-120.	-71.	-64.	-121.	-73.	98.	119.
ETP.MM/DA.	3.87	4.07	4.33	4.15	3.87	3.54	3.81	3.87	3.30	3.34	3.59	3.85
MAI=PD/ETP.	.00	.00	.00	.13	.89	2.13	1.60	1.53	2.22	1.70	.09	.00

Tabla 3. Evaporación de cuenca, evapotranspiración potencial y precipitación segura.

STA. No. 11 SAN MIGUEL. LAT. N. 13.49 LONG. W. 88.17 ELEV. 105.

	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAYO	JUN.	JUL.	AGT.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.
PREC.MAX.	28.	11.	41.	96.	476.	518.	559.	383.	561.	533.	233.	89.
PREC. MIN.	0.	0.	0.	0.	20.	21.	76.	99.	168.	66.	10.	0.
PREC.MEAN.	1.	0.	3.	25.	204.	303.	242.	251.	367.	280.	43.	6.
PREC.DEP.	0.	0.	0.	0.	129.	188.	171.	184.	284.	185.	11.	0.
EVPC.MM/MO.	185.	179.	226.	206.	190.	146.	170.	174.	135.	143.	151.	170.
ETP.MM/MO.	142.	139.	174.	162.	153.	122.	141.	144.	114.	120.	122.	133.
ET.DEF..MM.	142.	139.	174.	161.	24.	-76.	-30.	-40.	-169.	-75.	111.	133.
ETP.MM/DA.	4.58	4.96	5.60	5.41	4.94	4.07	4.54.	4.63	3.81	3.88	4.05	4.28
MAI=PD/ETP.	.00	.00	.00	.00	.84	1.63	1.21	1.28	2.48	1.62	.09	.00

STA. NO. 12 SANTIAGO DE MARIA (FINCA ALTAMIRA) LAT. N. 13.48 LONG. W. 88.46 ELEV. 920.

	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAYO	JUN.	JUL.	AGT.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.
PREC.MAX.	10.	46.	43.	296.	408.	690.	764.	680.	1028.	657.	147.	43.
PREC.MIN.	0.	0.	0.	0.	34.	166.	165.	152.	220.	80.	0.	0.
PREC.MEAN	1.	2.	6.	45.	162.	324.	346.	306.	384.	221.	28.	2.
PREC.DEP.	0.	0.	0.	12.	104.	253.	268.	237.	310.	157.	2.	0.
EVPC.MM/MO.	174.	169.	206.	181.	157.	121.	161.	160.	120.	131.	145.	160.
ETP.MM/MO.	137.	133.	162.	146.	131.	104.	134.	134.	103.	111.	119.	128.
ET.DEF..MM.	137.	133.	162.	134.	27.	-149.	-134.	-103.	-207.	-47.	117.	128.
ETP.MM/DA.	4.41	4.76	5.24	4.88	4.22	3.46	4.32	4.31	3.43	3.57	3.95	4.12
MAI=PD/ETP.	.00	.00	.00	.08	.79	2.43	2.00	1.77	3.01	1.42	.01	.00

Tabla 3. Evaporación de cuenca, evapotranspiración potencial y precipitación segura.

STA. NO. 13 SANTA CRUZ PORRILLO LAT. N. 13.46 LONG. W. 88.81 ELEV. 30.

	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAYO	JUN.	JUL.	AGT.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.
PREC.MAX.	28.	8.	33.	163.	357.	561.	577.	479.	753.	669.	349.	20.
PREC.MIN.	0.	0.	0.	0.	10.	71.	83.	119.	160.	69.	0.	0.
PREC.MEAN.	1.	1.	6.	32.	177.	302.	277.	260.	351.	282.	52.	4.
PREC.DEP.	0.	0.	0.	3.	107.	211.	197.	195.	270.	197.	17.	0.
EVPC.MM/MO.	190.	182.	223.	201.	182.	144.	169.	170.	134.	149.	162.	178.
ETP.MM/MO.	146.	141.	172.	159.	148.	120.	140.	141.	114.	123.	129.	138.
ET.DEF..MM.	146.	141.	172.	156.	41.	-91.	-58.	-54.	-156.	-74.	112.	138.
ETP.MM/DA.	4.71	5.03	5.56	5.30	4.78	4.01	4.51	4.55	3.80	3.98	4.31	4.46
MAI=PD/ETP.	.00	.00	.00	.02	.73	1.76	1.41	1.39	2.37	1.60	.13	.00