

INVESTIGACIONES

ESTIMACIÓN DE LA VARIACIÓN DIARIA DEL AGUA DEL SUELO, ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL E INFILTRACIÓN, MEDIANTE EL USO DEL MODELO COMPUTACIONAL HIDROSUELO¹

Estimation of daily soil moisture variation, surface runoff and infiltration, using HIDROSUELO computer model

Patricio Novoa Q.² y Patricio Sepúlveda N.³

S U M M A R Y

A mathematical model referred to the universal water balance formula is presented to estimate the daily soil moisture variation, infiltration, runoff and the efficiency of water accumulation caused by runoff storage techniques. The model allowed to estimate with precision the annual variation of moisture contents of surface Horizon in a semiarid area, and allowed to measure the water recharge caused by contour furrows in the lower soil Horizon. Also the model estimated surface runoff.

The model had some restriction specially in estimating soil moisture during the desiccation period, in dry years. This limitation was caused by inactivation in crop coefficient estimations in years with small rainfall. This restriction was observed also in soil having thin A Horizons soil, with little water retention capacity.

Key words: contour furrows, rangeland evapotranspiration, runoff simulation, water balance.

INTRODUCCIÓN

Aspectos generales

El ciclo hidrológico es una descripción fenomenológica del camino del agua en una unidad geográfica. El hidrólogo puede definir esa unidad y escribir la ecuación que define los procesos de acumulación y traslación de agua.

En la Figura 1 se presenta una descripción gráfica del movimiento del agua en un suelo de pradera natural durante un año, de acuerdo con los procesos de acumulación y traslación de agua.

Este sistema de ciclo hidrológico supone suelos desprovistos de vegetación arbustiva o arbórea, por lo cual la intercepción no es significativa.

Antecedentes

Una aproximación al conocimiento del movimiento del agua en el suelo es a través del uso de la ecuación universal de balance hídrico, la que, evaluada diaria y consecutivamente permite estimar curvas de variación anual de contenido de humedad, escurrimiento superficial e infiltración. Por otra parte, el método puede ser utilizado en distintas condiciones de suelo y clima y permite evaluar la recarga hídrica que producen obras de retención de escurrimiento, denominadas también técnicas de cosecha de agua lluvia.

Baier y Robertson (1966), realizaron con éxito modelos de sistemas de movimiento de agua, probando la posibilidad de realizar abstracciones de los procesos físicos del comportamiento del agua en el suelo.

A su vez, Holtan y López (1971), sostienen que, un modelo matemático de movimiento hídrico en el suelo, debe ser posible de usar bajo una amplia gama de condiciones, puesto que en él se establecen relaciones entre las variables, de carácter universal, dentro del proceso en estudio. Un cambio de condiciones altera el estado de agua en el sustrato, pero no las relaciones universales que rigen el sistema.

¹Recepción de originales: 3 de enero de 1996.

Parte de la tesis de grado del autor principal para optar al título de Ingeniero Forestal de la Universidad de Chile.

Se agradece a don Jorge García Huidobro por su contribución en el diseño del modelo analítico.

²Corporación Nacional Forestal, VI Región, Casilla 447, Rancagua, Chile.

³Oficina de Informática Corporación Nacional Forestal, VI Región, Casilla 447, Rancagua, Chile.

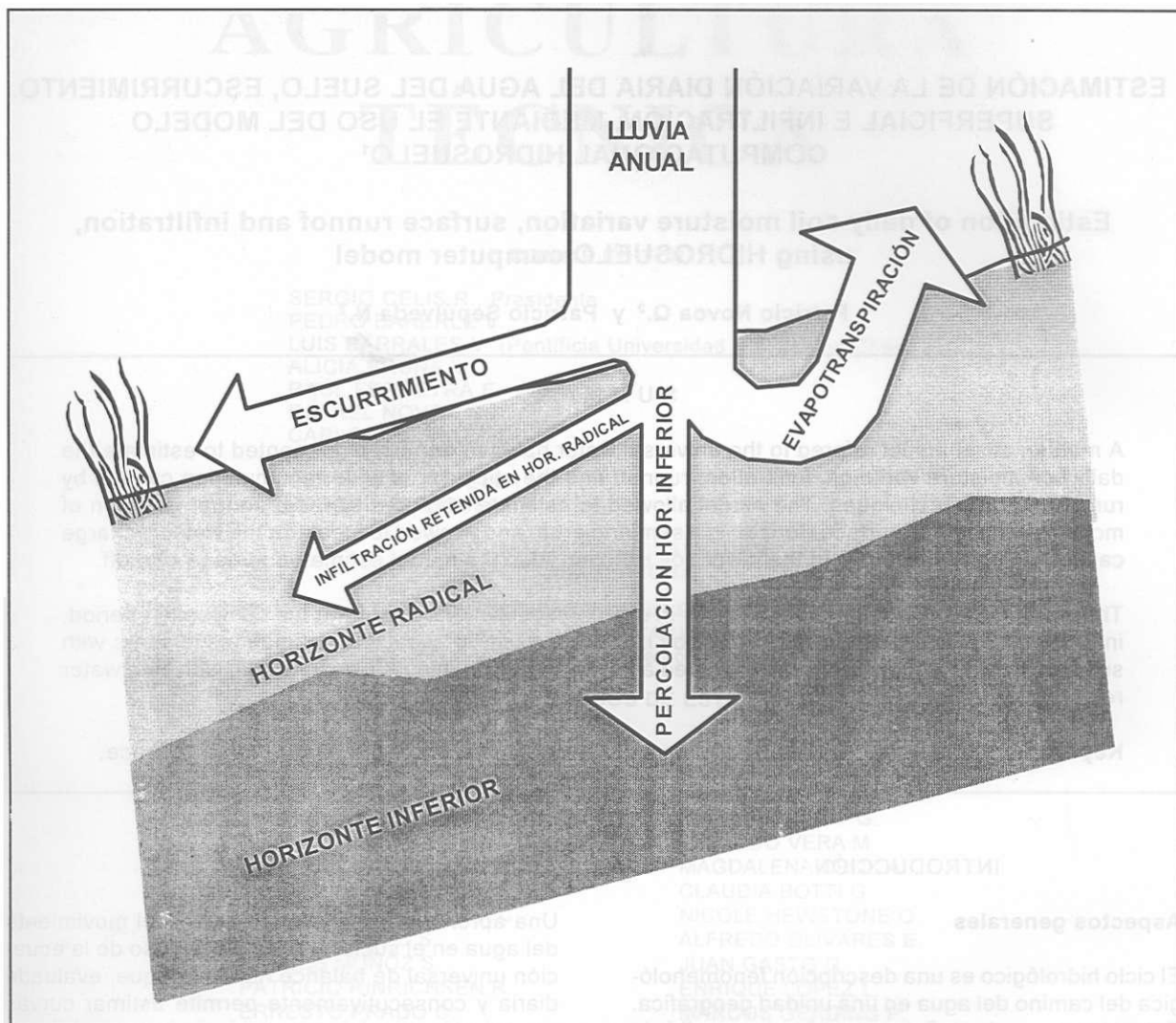


FIGURA 1. Descripción del movimiento del agua en un suelo de pradera natural, durante una temporada completa de lluvias.

FIGURE 1. Description of water movement in a natural rangeland soil, during a complete rain season.

England (1977), simuló la marcha del contenido de agua de dos estratos de un suelo cubierto con Post Oak-Shorteaf Pine al este de Texas, utilizando un modelo originalmente desarrollado por Holtan y Stiltner (1975), para predecir drenajes permanentes en cuencas agrícolas. Los componentes que estiman la humedad del suelo en este modelo, son dos estratos definidos por la descripción de los perfiles y la capacidad de retención de agua de cada Horizonte. La precipitación, primero, es almacenada en las depresiones del terreno. La infiltración se computa como una función exponencial declinante del volumen de poros llenos de aire. El agua en exceso al volumen que puede contener las depresiones del terreno más el volumen infiltrado al suelo corresponde al escurrimiento. La evapotranspiración

se estima como función de la evaporación de bandeja tipo A, ajustada por coeficientes que dependen del cultivo, su estado fenológico, el clima y la disponibilidad de agua del suelo. Cada estrata es subdividida en dos capacidades de almacenamiento, la primera constituida por el volumen de poros entre la capacidad de campo y la porosidad total, y la segunda por el volumen de agua disponible para las plantas.

Baier y Robertson (1966), describieron una técnica para estimar la humedad diaria del suelo en una zona en base a datos agrometeorológicos. La extracción de agua se hace a través de diferentes perfiles definidos por su capacidad de retención, en relación a una proporción de la evapotranspiración y al agua disponible en cada horizonte de suelo. Incluye modifi-

caciones por infiltración, drenaje y en diferentes tipos de curvas de secado. El escurrimiento se estima como la diferencia entre la precipitación y la capacidad de infiltración, siempre que la precipitación exceda a una pulgada en 24 hr. El modelo supone que el contenido de humedad del suelo es el principal factor que afecta la infiltración, lo que ha sido ampliamente demostrado. Supone que si el agua infiltrada en el suelo aumenta el contenido de humedad hasta la capacidad de campo, el resto infiltra hasta la próxima estrata hasta que la capacidad de todas éstas es llenada. Los excesos de agua se consideran drenaje profundo. El método puede ser usado para muchos cultivos y tipos de suelo y en diferentes condiciones meteorológicas.

MATERIALES Y MÉTODOS

HIDROSUELO es un modelo bidimensional sin salida gráfica, analítico (la ecuación universal y las fórmulas pueden ser resueltas exactamente para cualquier valor de los parámetros) y determinístico (para un valor de los parámetros existe sólo un valor de resultados), el cual evalúa diariamente la ecuación de balance hídrico, que adquiere diferente formato según existan o no eventos de lluvia, el monto de ésta y el estado del agua en el suelo. En la Figura 2 se presenta el diagrama de flujo del modelo, indicándose los procesos con y sin almacenamiento de resultados, las decisiones, salidas, conectores y el terminal.

La ecuación universal de balance hídrico en ausencia de riego se expresa como:

$$PP - ES - ETA - P \pm \Delta\theta = 0 \quad \text{Ecuación (1)}$$

donde:

- PP = precipitación (mm/unidad de tiempo).
- ES = escurrimiento superficial (mm/unidad de tiempo).
- ETA = evapotranspiración actual (mm/unidad de tiempo).
- P = percolación al Horizonte inferior, cuando el Horizonte radical llega a capacidad de campo (mm/unidad de tiempo).
- $\Delta\theta = \theta_f - \theta_i$: variación del contenido de agua del Horizonte radical, entre dos mediciones (mm).
- θ_f = Contenido de agua del Horizonte radical al final del período de tiempo considerado, el valor máximo que puede alcanzar es la capacidad de campo del Horizonte radical (mm).
- θ_i = Contenido de agua del Horizonte radical al inicio de un período de tiempo considerado (mm).

La unidad de tiempo es un día.

En general, los Horizontes del suelo presentan un comportamiento hidrológico distinto, debido a las características físicas y principalmente por la presencia y actividad de las raíces, a través de las cuales se inicia el proceso de transpiración, por ello, las variaciones hídricas se simulan por Horizontes de suelo definidos fundamentalmente por la presencia de raíces de las especies vegetales que cubren el suelo como criterio principal, Holmes y Robertson (1959) y England (1977).

Los "inputs" son la precipitación y la evapotranspiración actual. Respecto de la primera, se utiliza un registro anual de precipitaciones de la estación agrometeorológica más cercana al lugar en que se aplicará el modelo. La evapotranspiración actual diaria puede ser obtenida a través de alguna de las metodologías existentes. En este caso se propone la metodología de Doorenbos y Pruitt (1975), ampliamente usada en proyectos de riego. El método utiliza la siguiente fórmula:

$$ETA = ETP \times K_c \quad \text{Ecuación (2)}$$

donde:

- ETP = evapotranspiración potencial del día i, mes j.
- K_c = coeficiente de cultivo del mes j.

Para estimar la ETP diaria se propone el método de la bandeja, de fácil aplicación y suficiente exactitud. Se expresa según la siguiente fórmula:

$$ETP = EB \times K_b \quad \text{Ecuación (3)}$$

donde:

- EB = evaporación de bandeja tipo A, del día i, mes j.
- K_b = coeficiente de bandeja del mes j.

Los coeficientes de bandeja, obtenidos empíricamente, representan la relación que existe entre la evapotranspiración potencial y la evaporación de una superficie libre de agua. Están tabulados mensualmente según humedad relativa, velocidad del viento, el tipo de bandeja y su medio circundante. En el Cuadro 1 se indican los coeficientes de bandeja clase A, rodeada de barbecho de secano o de un área de escaso desarrollo agrícola, para la humedad relativa media mensual, vientos promedio mensual en km/día y distancia a barlovento del terreno inculto alrededor de la bandeja, de la zona de Los Vilos, según Doorenbos y Pruitt (1975).

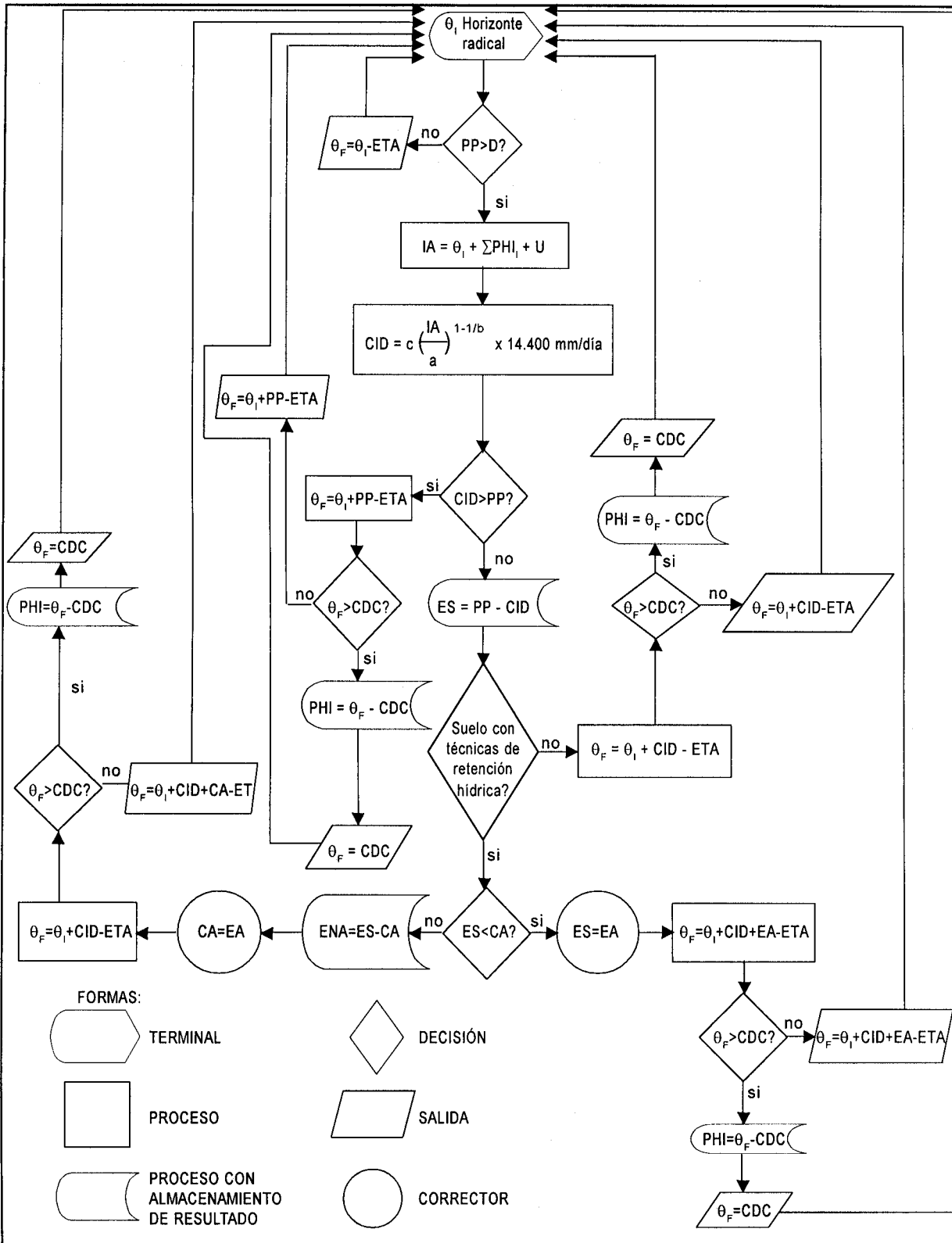


FIGURA 2. Diagrama de flujo del sistema HIDROSUELO.

FIGURE 2. Flow diagram of HIDROSUELO system.

CUADRO 1. Coeficientes de bandeja para Los Vilos, según Doorenbos y Pruitt (1975)

TABLE 1. Los Vilos pan coefficient according to Doorenbos y Pruitt (1975)

Mes	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
K_c	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,65	0,75	0,75	0,75	0,75	0,65	0,55

El coeficiente de cultivo K_c , representa la relación que existe entre ETA y ETP y refleja el efecto de las características del cultivo como su ritmo de desarrollo, duración del período vegetativo, condiciones climáticas y especialmente, durante la primera fase de crecimiento, la frecuencia de las lluvias, en los requerimientos de agua y dependen de la disponibilidad real de agua en el suelo. Los K_c están tabulados para las distintas fases de desarrollo del cultivo y condiciones climáticas. Como la información de las fases de desarrollo de praderas naturales es muy escasa, ésta se obtiene dibujando la curva de crecimiento acumulado de la pradera con los datos de producción de materia seca acumulada expresados en porcentaje, existentes en los Centros Regionales de Investigación del Instituto de Investigaciones Agropecuarias. En la Figura 3 se presenta la curva de acumulación anual de materia seca de una exclusión de 7 años del Centro Experimental Los Vilos, que presentó una producción anual de 2.960 kg m.s./ha, en ella se determinaron los estados de desarrollo de la pradera natural. La curva, que abarca todo el período vegetativo de la pradera, se divide en cinco estados de desarrollo, interpretando la forma de la curva: crecimiento inicial, crecimiento activo, detención del crecimiento activo y comienzo de la estabi-

lización, estabilización propiamente tal, y madurez. Luego, en el mismo gráfico se dibuja una segunda abscisa para el rango de valores de K_c de los estados de desarrollo. Como no existen K_c para las fases de desarrollo de praderas naturales de secano se probó un K_c de 0,04 para las fases de crecimiento inicial y madurez. Doorenbos y Pruitt (1975), indican que los valores de K_c divergen grandemente durante la primera fase del período vegetativo con respecto a superficies secas y húmedas, en climas semiáridos con veranos secos, como Los Vilos, donde el inicio del crecimiento de la pradera viene precedido por seis o siete meses de sequía, los K_c son prácticamente cero en todo este período de tiempo. Doorenbos y Pruitt (1975) proponen un método para estimar K_c mensuales para suelos no cultivados o desnudos, que podría asimilarse al tipo de pradera natural degradada de secano de Los Vilos, en base a un gráfico que relaciona ETP media, expresada en mm/día, con frecuencia de lluvias, sin embargo, los valores son erráticos y no relacionan bien la ETP con la ETA porque los eventos de lluvia en la zona son erráticos también y la ETP, estimada por el método de la bandeja varía mucho en función de los fuertes vientos que se presentan en algunos meses.

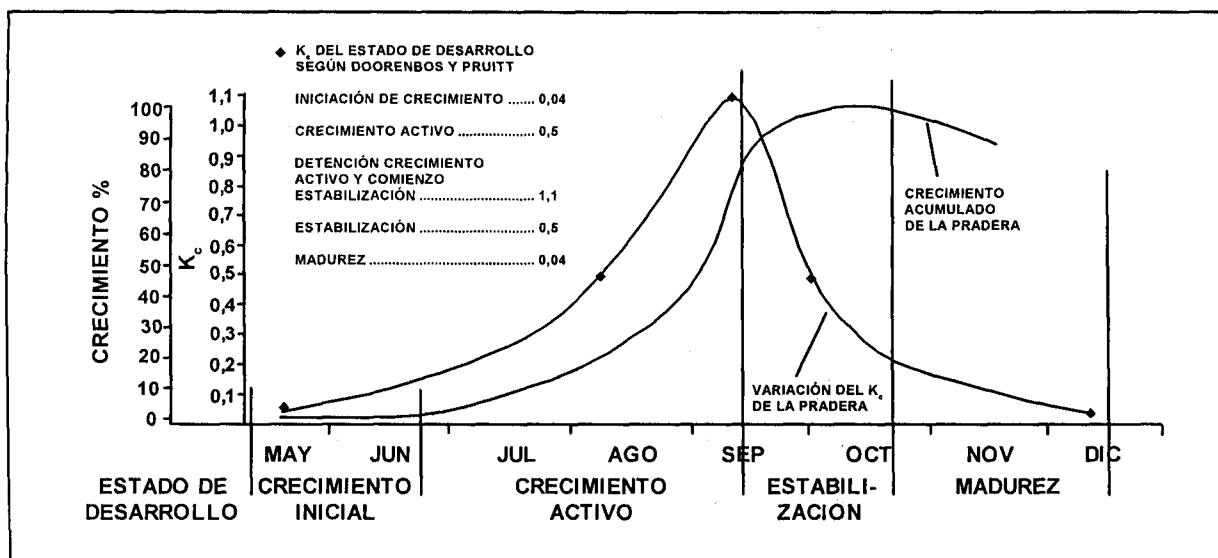


FIGURA 3. Curvas de K_c de los estados de desarrollo de la pradera natural de Los Vilos.

FIGURE 3. K_c development stages curves of Los Vilos natural prairie.

Se probaron K_c similares a los de gramíneas y pastos de climas secos con vientos moderados, en los estados crecimiento activo (K_c 0,5), detención del crecimiento activo y comienzo de la estabilización (K_c 1,1), y estabilización propiamente (K_c 0,5) para la pradera natural de Los Vilos. Finalmente se unieron los puntos de los K_c de cada estado con una curva suavizada tratando de representar la variación natural de los coeficientes y de ella se leyeron los K_c mensuales de la pradera natural, los cuales se indican en el Cuadro 2.

Obtenidos los valores de K_c y K_b se procede a calcular la evapotranspiración actual diaria, ETA de acuerdo al siguiente procedimiento matemático:

$$\text{ETA día } i, \text{ mes } j, (\text{mm/día}) = K_c \text{ mes } j \times \text{ETP día } i, \text{ mes } j (\text{mm/día}) \quad \text{Ecuación (4)}$$

pero;

$$\text{ETP día } i, \text{ mes } j, (\text{mm/día}) = K_b \text{ mes } j \times \text{EB día } i, \text{ mes } j (\text{mm/día}) \quad \text{Ecuación (5)}$$

reemplazando (5) en (4);

$$\text{ETA día } i, \text{ mes } j, (\text{mm/día}) = K_c \text{ mes } j \times K_b \text{ mes } j \times \text{EB día } i, \text{ mes } j, (\text{mm/día}) \quad \text{Ecuación (6)}$$

y haciendo $K_c \text{ mes } j \times K_b \text{ mes } j = KC \text{ mes } j$, tenemos:

$$\text{ETA día } i, \text{ mes } j = K_c \text{ mes } j \times \text{EB día } i, \text{ mes } j (\text{mm/día}) \quad \text{Ecuación (7)}$$

El proceso de secado de cada Horizonte es distinto. El o los Horizontes radicales de la pradera natural, se secan como resultado del proceso de evapotranspiración, es decir, si se aplica un método preciso de cálculo de evapotranspiración, ésta se puede usar como un estimador muy exacto del secado del horizonte de suelo donde crece el mayor volumen de raíces.

Se entiende que puede haber más de un Horizonte textural superficial donde crecen las raíces de la pradera natural y que, por lo tanto, se secan por evapotranspiración, y así mismo más de uno inferior que recibe agua por saturación de o los Horizontes radicales superficiales. En zonas semiáridas los Ho-

rizontes inferiores de acumulación hídrica son generalmente de texturas arcillosas. Las raíces pivotantes de árboles y arbustos que se observan en los horizontes inferiores producen algún grado de evapotranspiración por mecanismos hasta la fecha poco estudiados, pero ella no está explicada ni forma parte de la evapotranspiración estimada para la pradera natural por el método de coeficientes de cultivo.

Los "output" del modelo son la variación de humedad del horizonte superficial, la infiltración y el escurrimiento superficial.

A partir de la ecuación universal de balance hídrico, Ecuación (1), se obtiene la ecuación que estima la variación diaria del contenido de agua del Horizonte radical.

Si θ_i es el contenido de humedad del Horizonte radical el día $i + 1$, mm; y θ_i es el contenido de humedad del Horizonte radical el día i , mm, entonces:

$$\theta_F = \theta_i + PP_i - ES_i - ETA_i \quad \text{Ecuación (8)}$$

donde:

PP_i = precipitación en mm del día i .

ES_i = escurrimiento en mm del día i .

ET_i = evapotranspiración actual en mm del día i .

Durante períodos sin precipitación PP_i y ES_i son iguales a cero, entonces:

$$\theta_F = \theta_i - ET_i \quad \text{Ecuación (9), Slatyer (1968)}$$

El contenido de humedad del Horizonte radical aumenta, iniciado el período de lluvias, hasta alcanzar la capacidad de campo del mismo. Toda agua retenida en este Horizonte, por sobre la capacidad de campo, percola al Horizonte inferior.

Naturalmente los Horizontes de suelo se comportan como reservorios de agua de distinta capacidad ubicados unos sobre otros como una columna de reservorios. El volumen de agua que es capaz de retener un Horizonte, depende de su densidad aparente, profundidad y capacidad de campo, de tal forma que cuando el Horizonte radical se satura, el agua en exceso percola al Horizonte inmediatamente

CUADRO 2. Coeficientes de cultivo (K_c) mensuales para pradera natural de secano, en Los Vilos

TABLE 2. Monthly incrop coefficient (K_c) for dryland natural rangeland in Los Vilos

Mes	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
K_c	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,12	0,26	0,61	1,06	0,27	0,10	0,04

inferior, que tiene una capacidad distinta, generalmente mayor, de contener agua y así sucesivamente.

La percolación se estima como la diferencia entre θ_r del Horizonte radical y su capacidad de campo. Es decir, la percolación que se registra como "output" del modelo, es el agua que recibe el Horizonte inferior y que corresponde al exceso de agua del Horizonte radical por sobre la capacidad de campo del mismo. Por esta razón, no se considera "a priori" en la Ecuación (1), sino que se deduce de ella.

La fórmula utilizada para estimar la capacidad de infiltración diaria, se deduce de las ecuaciones de infiltración acumulada y velocidad de infiltración, obtenidas de los registros de un cilindro infiltrómetro de la siguiente forma:

$$IA = at^b \tag{Ecuación (10)}$$

donde:

- IA = infiltración acumulada, cm.
- t = tiempo en min.
- a y b = constantes dependientes del tipo de suelo.

Haciendo la infiltración acumulada igual al contenido de humedad de todo el perfil de suelo en el día i, tenemos:

$$IA_i = \theta_i + U + \sum PHI_{i-1} \tag{Ecuación (11)}$$

donde:

- IA_i = infiltración total acumulada hasta el día i.
- U = contenido de humedad del Horizonte inferior el primer día de aplicación del modelo.
- $\sum PHI_{i-1}$ = sumatoria de las percolaciones al Horizonte inferior desde el primer día de aplicación del modelo hasta el día i-1.

Reemplazando la Ecuación (11) en la (10) y despejando t, tenemos:

$$t = \left[\frac{\theta_i + U + \sum PHI_{i-1}}{a} \right]^{1/b} \tag{Ecuación (12)}$$

por otra parte:

$$\text{Velocidad de infiltración} = c t^d \text{ cm/min} \tag{Ecuación (13)}$$

donde:

- c = ab
- d = b - 1

Reemplazando la Ecuación (12) en la (13), tenemos:

$$\text{Velocidad de infiltración en el día } i = c \left[\frac{\theta_i + U + \sum PHI_{i-1}}{a} \right]^{1/b} \tag{d}, \text{ cm/min}$$

pero d = b - 1, entonces:

$$\text{Velocidad de infiltración en el día } i = c \left[\frac{\theta_i + U + \sum PHI_{i-1}}{a} \right]^{1-1/b}, \text{ cm/min}$$

tal que, capacidad de infiltración diaria, CID, en el día i:

$$CID = c \left[\frac{\theta_i + U + \sum PHI_{i-1}}{a} \right]^{1-1/b} \times 14.400, \text{ mm/día} \tag{Ecuación (14)}$$

La capacidad de infiltración diaria se evalúa en cada evento de lluvia. Si el monto de la lluvia, en mm/día, es menor que la CID, infiltra al Horizonte radical y es retenida en él hasta que la capacidad de campo es alcanzada en otro evento de lluvia; cuando ello ocurre, el exceso de agua infiltra al Horizonte inferior. Si el monto de la lluvia es mayor que la CID, ésta infiltra en el Horizonte radical en el monto correspondiente a la CID y la diferencia corresponde a escurrimiento superficial, de igual forma, el monto correspondiente al CID que infiltra en el Horizonte radical puede o no hacer llegar el Horizonte a su capacidad de campo, si ello ocurre, el exceso de agua infiltra al Horizonte inferior.

El escurrimiento, por último, según se indicó en el punto anterior, es estimado como la diferencia entre, la precipitación diaria y la capacidad de infiltración diaria del suelo, según Slatyer (1968) y Pascale (1972).

Uso del modelo para estimar recargas hídricas producidas por técnicas de cosecha de escurrimiento superficial

Se puede evaluar el efecto de técnicas de cosecha de agua lluvia o retención de escurrimiento, en los movimientos de traslación y acumulación de agua en el suelo.

Estas técnicas, como surcos en contorno, por ejemplo, almacenan el agua de escurrimiento en cantidades que dependen de la separación entre ellos y la sección del surco, (capacidad de almacenamiento, CA), luego el agua almacenada se infiltra en el suelo. Esta infiltración será retenida por el Horizonte radical y evapotranspirada, o hará que el Horizonte radical se sature y el exceso percole al horizonte inferior o escurra si, la capacidad de infiltración del suelo ese día, es menor que la

precipitación diaria. Escurrimientos menores o iguales a la capacidad de almacenamiento de los surcos, (escurrimiento almacenado, EA), son contenidos íntegramente por ellos e infiltrados en el suelo; de igual forma, escurrimientos superiores a la capacidad de los surcos son acumulados hasta dicha capacidad y el resto escurre (escurrimiento no almacenado, ENA). Para determinar la capacidad de almacenaje de escurrimiento de los surcos se convirtió la capacidad de acumulación de agua de surcos en contorno construidos con arado surqueador de tracción mecánica, de 45 cm de ancho en el nivel superior, 22 cm de ancho en la base del canal y 17 cm de profundidad, y separaciones de 3, 6 y 9 m, de L/m lineal de surcos a L/ha y de L/ha a mm, mediante la relación 1 mm: 1 L/m². Las capacidades de almacenaje, determinadas se indican en el Cuadro 3.

CUADRO 3. Capacidad de almacenamiento en mm, de surcos en contorno separados 3, 6 y 9 m

TABLE 3. Water storage capacity, in mm, of contour furrows 3, 6 and 9 m separated

Separación	3 m	6 m	9 m
Capacidad almacenamiento, mm	18,98	9,49	6,33

La pendiente no influye directamente en la capacidad de almacenamiento de los surcos, aunque sí afecta la infiltración del agua porque la pendiente está relacionada con la profundidad de los horizontes, la velocidad del escurrimiento y por consiguiente con la capacidad de infiltración del suelo en general.

En términos del modelo, la evaluación del efecto de surcos en contorno procede de la siguiente manera: cuando ocurre un evento de escurrimiento superficial, éste es retenido por los surcos e ingresa al sistema como si fuera un evento de precipitación, siguiendo el camino normal. La retención de un evento de escurrimiento ocurre hasta que la capacidad de los surcos es llenada. Eventos de escurrimiento superiores a la capacidad de los surcos son retenidos en la porción almacenable y, la diferencia, se registra como escurrimiento propiamente tal no almacenado.

El grado de precisión del modelo, se midió mediante una prueba de t para las medias de las observaciones pareadas de los registros experimentales, de variación de humedad de suelo con y sin surcos y las estimaciones del modelo en el mismo día.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Variación de humedad de suelos

En la Figura 4 se presenta la variación anual del contenido de agua del Horizonte radical de 32 cm, en condiciones naturales, del Centro Experimental Los Vilos para el año 1977, y en la Figura 5 la variación del mismo suelo pero con tratamiento de surcos en contornos separados 3 m.

La mayor precisión de las estimaciones se observa en el periodo de desecación del suelo, lo que se debe a la exactitud en la estimación de la evapotranspiración actual.

Los resultados del análisis estadístico de las estimaciones del modelo respecto a la variación de contenido de agua del Horizonte radical con y sin surcos,

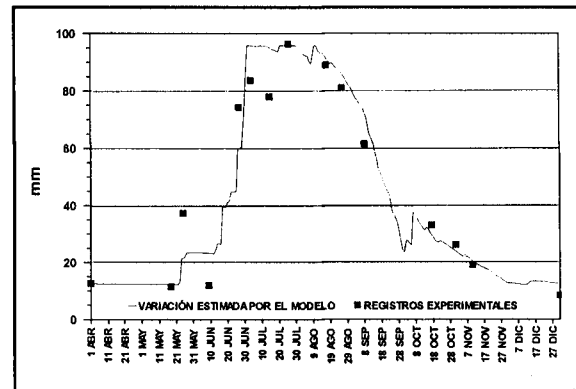


FIGURA 4. Variación del contenido de agua de un Horizonte radical de 32 cm, en condiciones naturales. Los Vilos 1977, precipitación anual 254,9 mm. Promedio 222,8 mm.

FIGURE 4. Moisture variation in root Horizon, 32 cm depth, in natural conditions. Los Vilos 1977, annual rainfall: 254.9 mm, average rainfall: 222.8 mm.

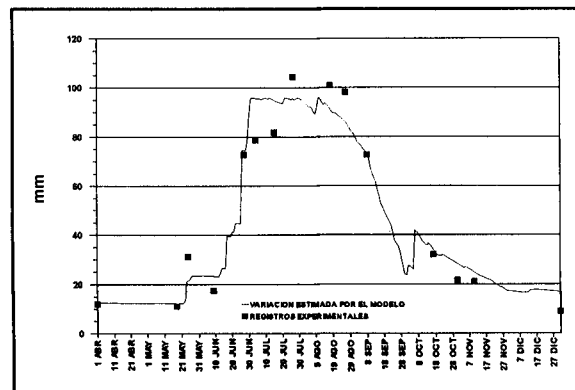


FIGURA 5. variación del contenido de agua de un Horizonte radical de 32 cm, con surcos en contorno separados 3 m. Los Vilos 1977.

FIGURE 5. Moisture variation in root Horizon, 32 cm depth, with contour furrows, 3 m separated. Los Vilos 1977.

indican que no hubo diferencias entre las medias de los registros experimentales de variación de humedad del Horizonte radical de fase gruesa y las medias de las estimaciones del modelo, según se observa en el Cuadro 4.

En el período de humectación la precisión fue menor, posiblemente debido a imprecisiones en la estimación del escurrimiento, lo cual se ve corroborado por Slatyer (1962), quien sostiene que en zonas áridas y semiáridas, los incrementos o decrementos relativamente pequeños del escurrimiento pueden ejercer profundos efectos en el almacenamiento del agua en el suelo.

Situación similar se observa en el período de saturación del suelo, debido a que es posible registrar retención de agua sobre la capacidad de campo por más de 24 hr (Thorntwaite, 1955), citado por Pascale (1972), en cambio, el modelo infiltra al Horizonte inferior todo exceso de agua sobre la capacidad de campo del Horizonte radical, el mismo día en que éste se produce.

El modelo es inexacto en la estimación del proceso de secado del Horizonte radical de fase delgada (Figura 6), ya que extrae toda el agua cuando la pradera aún está en crecimiento; a partir de ese momento, la evapotranspiración actual, estimada según la metodología de Doorenbos y Pruitt (1975) hace que el modelo calcule extracciones negativas de humedad, como se observa en la Figura 6. Esta divergencia se produce debido a que, los coeficientes de cultivo usados para la estimación de la evapotranspiración actual, están calculados para situaciones promedio de suelo y condiciones climáticas, es decir, Horizon-

tes radicales de profundidad media, donde se desarrollen completamente los sistemas radicales de la pradera natural, y precipitación anual tal, que permita un normal crecimiento de la misma. Un suelo con Horizonte radical muy delgado, no permite un completo desarrollo de la pradera, aún con precipitación promedio o cercana a ella y, por lo tanto, los coeficientes de cultivo, usados en este tipo de suelo, debieran ser menores a los establecidos en la metodología de Doorenbos y Pruitt y, muy probablemente, en cualquiera de las metodologías existentes.

Igual situación se observa en año seco, cuando no hay un completo desarrollo de la pradera natural. La curva de variación anual del contenido de humedad del Horizonte radical, sin surcos en la fase gruesa del suelo Los Vilos, estimada por el modelo para el año seco de 1985 en la cual se registraron 56,3 mm de precipitación anual (Figura 7), es anómala. Por las mismas razones indicadas en el párrafo anterior el modelo extrae toda el agua del Horizonte el 30 de agosto, una fecha aproximada a la ocurrida en la fase delgada el año 1977 con 254,9 mm de precipitación anual.

Estimación del escurrimiento

Los valores estimados de escurrimiento anual indicados en el Cuadro 5, concuerdan con las evaluaciones de Dastane (1974), quien sostiene que en zonas áridas y semiáridas el escurrimiento superficial anual puede fluctuar entre 0 y 200 mm. La tasa de escurrimiento diario estimado en suelo natural varió entre 1,3 y 30,9 mm/día, según Dastane ésta debiera fluctuar entre 12 y 40 mm/día.

CUADRO 4. Resultados del test de comparación de medias de los registros experimentales y las estimaciones del sistema HIDROSUELO, en la variación de humedad de un Horizonte radical de 32 cm, y otro de 18 cm con y sin surcos en contorno. Los Vilos, 1977

TABLE 4. Test result, of average comparison between experimental registers and estimation of HIDROSUELO model in moisture variation of root Horizon, 32 cm and 18 cm depth with and without contour furrows. Los Vilos 1977

Profundidad horizonte radical, cm	Separación surcos, m	t estimado	Valor t*	Conclusión
32	3	-0,341	2,16	Sin diferencias
32	6	+0,177	2,16	Sin diferencias
32	9	-0,712	2,16	Sin diferencias
32	condición natural	-0,649	2,16	Sin diferencias
18	3	0,135	2,228	Sin diferencias
18	6	-0,558	2,228	Sin diferencias
18	9	-0,246	2,228	Sin diferencias
18	condición natural	0,967	2,228	Sin diferencias

*En 32 cm de profundidad se usó $t_{0,05}$ para 12 grados de libertad y en 18 cm, $t_{0,05}$ para 10 grados de libertad.

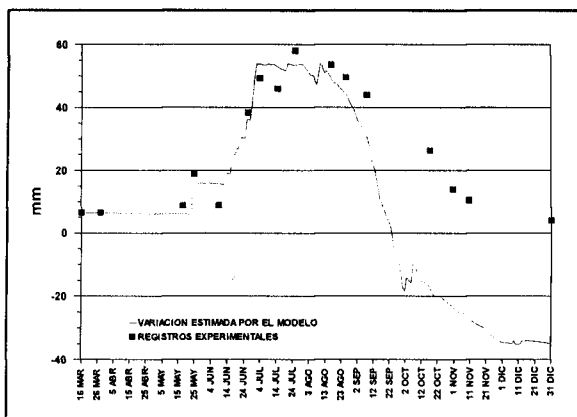


FIGURA 6. Variación del contenido de agua de un Horizonte radical de 18 cm, en condiciones naturales. Los Vilos 1977.

FIGURE 6. Moisture variation in root Horizon, 18 cm depth, in natural conditions. Los Vilos 1977.

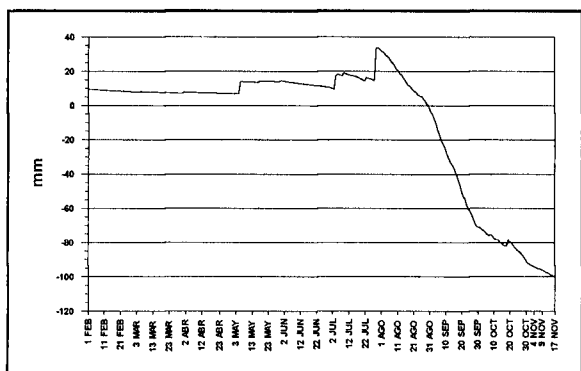


FIGURA 7. Variación del contenido de agua de un Horizonte radical de 32 cm, estimada usando HIDROSUELO, en condiciones naturales y año seco. Los Vilos 1985. Precipitación anual: 56,3 mm.

FIGURE 7. Moisture variation in root Horizon, 32 cm depth, estimated using HIDROSUELO, in natural conditions and dry year. Los Vilos 1985. Annual rainfall: 56.3 mm.

El escurrimiento estimado en suelos con surcos en contorno, es mayor que el estimado en suelo natural porque los surcos aumentan la entrada de agua al sistema; el Horizonte radical recibe más agua, se satura más rápidamente, y, por lo tanto, su capacidad de infiltración diaria disminuye durante el periodo de lluvias aumentando el escurrimiento, en comparación al suelo natural. El proceso es una suerte de espiral en que los surcos cosechan escurrimiento que se infiltra en el suelo, lo cual produce más escurrimiento, que también se cosecha e infiltra, y así sucesivamente hasta que disminuyen las lluvias.

El modelo estimó que los surcos separados 3 metros en suelos con Horizonte radical de distintas profundidades almacenaron en promedio el 89,4% del escurrimiento del año 1977, los surcos separados 6 y 9 m almacenaron el 66,9 y el 50,8%, respectivamente.

Es posible captar el 100% del escurrimiento anual en separaciones pequeñas (3 metros) variando las dimensiones del canal del surco, en función del máximo escurrimiento diario esperado que se desee almacenar.

Se debe señalar, sin embargo, que el modelo no estima el escurrimiento con exactitud, debido a restricciones propias en la estimación de la infiltración. Algunos autores sostienen que induce a error utilizar los resultados obtenidos de mediciones indirectas o puntuales de infiltración, como cilindro infiltrómetro, en evaluaciones extensivas de balance hídrico, debido a la variación de la profundidad de los horizontes, cambios de estructura y agrietamiento, el microrrelieve, tipo de cobertura, y a la imposibilidad de registrar variaciones debidas a intensidad de precipita-

CUADRO 5. Escurrimiento superficial estimado por HIDROSUELO, en suelos con Horizonte radical de 32 y 18 cm, con y sin tratamiento de surcos en contorno. Los Vilos 1977

TABLE 5. Surface runoff estimated by HIDROSUELO, in soil with root Horizon, 32 and 18 cm depth, with and without contour furrows treatment. Los Vilos 1977

Separación de surcos, m	Escurrimiento, mm			
	Total	Almacenado	No almacenado	En 24 horas
Horizonte radical de 32 cm e inferior de 46 cm				
3	83,3	75,5	7,8	4,2 - 26,7
6	80,7	56,3	24,4	3,7 - 26,5
9	78,6	40,9	37,7	3,4 - 26,3
Suelo sin surcos	72,9	-	-	
Horizonte radical de 18 cm e inferior de 61 cm				
3	154,9	136,6	18,3	1,3 - 31,9
6	152,4	97,5	54,9	1,3 - 31,7
9	151,1	75,0	76,1	1,3 - 31,6
Suelo sin surcos	142,7	-	-	1,3 - 30,9

ción. Mayor precisión se obtendría con simuladores de lluvia, lisímetros, infiltrómetros tipo North Fork y otros (National Academy of Sciences, 1962; Pascale 1972).

Según lo anterior, es necesario tomar el mayor número posible y necesario de registros de cilindros infiltrómetros, a fin de poder obtener una curva de infiltrometría lo más representativa posible. En todo caso, las variaciones en la estimación del escurrimiento por este efecto, alteran el valor de la percolación al horizonte B, pero no el valor de variación de humedad del Horizonte radical, en un suelo de profundidad media, debido a que este Horizonte tiene una capacidad máxima de retención de agua determinada por su capacidad de campo y, a la exactitud del método utilizado en la estimación de la evapotranspiración actual en el suelo de Horizonte radical de fase gruesa.

Al utilizar una ecuación de capacidad de infiltración diaria que sobreestime el escurrimiento, se producirá una subestimación de la infiltración al Horizonte inferior, sin alterar en forma significativa la variación del contenido de humedad del Horizonte radical y viceversa.

Análisis de la recarga hídrica producida por surcos al Horizonte radical e inferiores

En la Figura 8 se presenta la variación anual del contenido de agua del Horizonte radical de 32 cm, en condiciones naturales y con surcos en cortonos separados 3 m.

Los surcos en contorno no ejercen una influencia marcada y continua sobre la acumulación hídrica

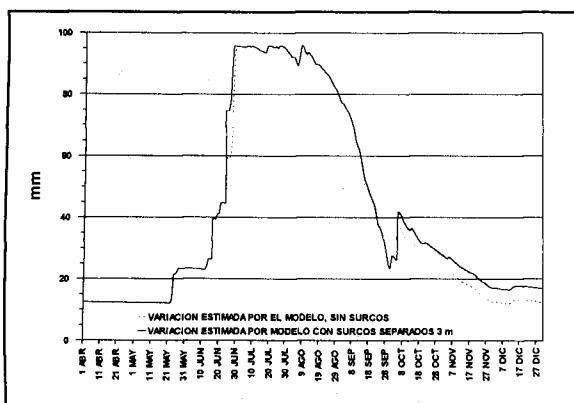


FIGURA 8. Variación del contenido de agua de un Horizonte radical de 32 cm, estimada usando HIDROSUELO, en condiciones naturales y con surcos separados 3 m. Los Vilos 1977.

FIGURE 8. Moisture variation in root Horizon, 32 cm depth, estimated using HIDROSUELO, in natural conditions and contour furrows treatment, 3 m separated. Los Vilos 1977.

del Horizonte radical, como se constata en el análisis de varianza del Cuadro 6. Las escasas diferencias se observan cuando ocurren escurrimientos durante el período de desecación. Este efecto es menor aún, si el Horizonte radical es poco profundo y de texturas livianas, lo cual implica menor capacidad de retención de agua, causando que gran parte del agua que entra a un Horizonte radical delgado, por efecto de los surcos, percole al Horizonte inferior por una rápida saturación del superficial.

Se observa un escaso efecto de los surcos en los primeros escurrimientos de la temporada. Posteriormente la humedad del Horizonte radical se iguala, con y sin surcos, cuando el suelo llega a la capacidad de campo. A partir de entonces, toda el agua que entra al Horizonte radical durante el período de concentración de lluvias, aumenta la humedad que ha disminuido desde la lluvia anterior por evapotranspiración, hasta saturar nuevamente el Horizonte y el exceso de agua percole al Horizonte B.

Posteriormente, se observa efecto de surcos en el último escurrimiento de la temporada, durante octubre. Este efecto permanece durante el período de desecación.

El incremento del desarrollo pratense, que se obtiene con surcos, sería respuesta de un efecto combinado de la remoción de suelo y el incremento hídrico causado por escurrimientos ocurridos durante el proceso de desecación.

En el Horizonte inferior, bajo el radical, el efecto de surcos es significativo. En el gráfico de la Figura 9 se observa la infiltración estimada en las fechas que el modelo registró percolación al Horizonte inferior, para suelo con surcos separados 3, 6, 9 m y condiciones naturales. Dichos puntos están unidos por líneas a fin de representar de mejor manera, el efecto. En el gráfico de la Figura 10 se presentan los mismos datos, pero acumulados. En ambos gráficos se observa el marcado efecto de los surcos sobre la percolación al Horizonte inferior, el que se incrementa a medida que disminuye la separación de los surcos.

Las cantidades de agua infiltrada al Horizonte inferior por efecto de surcos, incluso para separaciones de 9 m son significativamente mayores que la infiltración sin surcos, según se observa en los cuadros 7 y 8. Estas cantidades de agua pueden ser la diferencia entre un año normal y uno húmedo en zonas semi-áridas.

La construcción de surcos en contorno fue una técnica diseñada, originalmente, para el mejoramiento de tierras de pastoreo. Esto fue así hasta hace algunos años. Actualmente los surcos son más

CUADRO 6. Análisis de varianza de las estimaciones de HIDROSUELO en la variación de humedad del Horizonte radical, con surcos separados 3 m, 6 m, 9 m y en condiciones naturales. Los Vilos. 1977

TABLE 6. Variance analysis data of HIDROSUELO estimation in moisture variation of root Horizon with contour furrows 3, 6, 9 separated m and natural conditions. Los Vilos 1977

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F
Horizonte radical de 32 cm de profundidad				
Tratamiento	3	438,03	146,01	F est. 0,148
Error	1.096	1.080.246,5	985,60	F _{0,05} = 2,38
Total	1.099	1.080.684,5		
Horizonte radical de 18 cm de profundidad				
Tratamiento	3	135,11	45,037	F est. 0,114
Error	760	299.789,74	394,46	F _{0,05} = 2,61
Total	763	299.924,85		

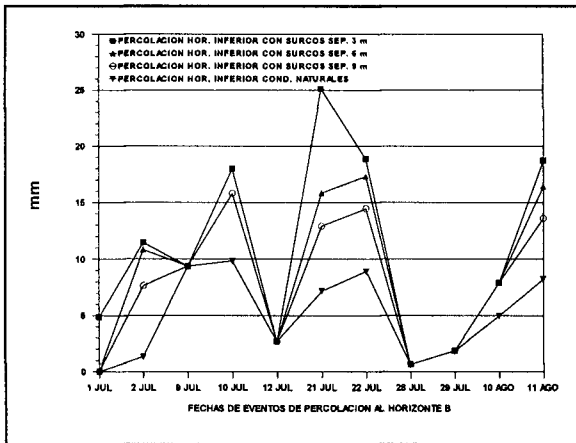


FIGURE 9. Percolation event at lower Horizon, estimated using HIDROSUELO, in soil with root Horizon, 32 cm depth, in natural conditions and contour furrows treatment, 3, 6 and 9 m separated. Los Vilos 1977.

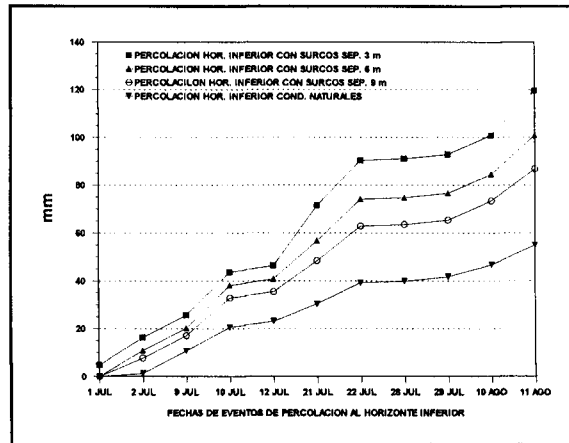


FIGURE 10. Accumulated percolation at lower Horizon, estimated using HIDROSUELO, in soil with root Horizon, 32 cm depth, in natural condition and contour furrows treatment, 3, 6 and 9 m separated. Los Vilos 1977.

CUADRO 7. Percolación al Horizonte inferior estimada por HIDROSUELO. Los Vilos 1977

TABLE 7. Lower Horizon percolation estimated by HIDROSUELO. Los Vilos 1977

Profundidad horizonte radical	Separación 3 m, mm	Separación 6 m, mm	Separación 9 m, mm	Sin surcos mm
46	120,1	103,5	90,2	58,9
61	145,4	111,0	92,6	29,8

CUADRO 8. Prueba de comparación de las estimaciones de HIDROSUELO en la percolación al Horizonte inferior, en condiciones naturales y con tratamiento de surcos en contorno. Los Vilos. 1977

TABLE 8. Statistical analysis data of HIDROSUELO estimation at lower Horizon percolation, in natural conditions and contour furrows treatment. Los Vilos 1977

Profundidad horizonte inferior, cm	Diferencia de percolación suelo sin surcos respecto a suelo con surcos separados	t estimado	t _{0,05}	Resultado
Horizonte radical de 32 cm				
46	3 m	- 3,184	2,228 10 g. de l.	difer. signific.
46	6 m	- 3,210	2,228 10 g. de l.	difer. signific.
46	9 m	- 3,712	2,228 10 g. de l.	difer. signific.
Horizonte radical de 18 cm				
61	3 m	- 4,940	2,145 14 g. de l.	difer. signific.
61	6 m	- 4,715	2,145 14 g. de l.	difer. signific.
61	9 m	- 3,972	2,145 14 g. de l.	difer. signific.

bien una técnica de mejoramiento de cultivos forestales, como ha sido la experiencia chilena. La gran recarga hídrica que producen los surcos a los Horizontes bajo el radical, benefician las especies arbustivas y arbóreas que presentan una gran actividad radical en estos Horizontes.

Evaluación anual de la ecuación de balance hídrico

Si la ecuación universal de balance hídrico se evalúa con sus parámetros en unidades de tiempo anual, o de un período prolongado, es posible una comprobación adicional del modelo:

$$\sum PP_i - \sum ES_i - \sum ETA_i - \sum P_i + \theta_1 - \theta_n = 0$$

donde:

$\sum PP_i$ = sumatoria de los eventos de precipitación ocurridos entre el día 1 y n del período evaluado, mm.

$\sum ES_i$ = sumatoria de los eventos de escurrimiento estimados entre el día 1 y n del período evaluado, mm.

$\sum ETA_i$ = sumatoria de la evapotranspiración actual diaria desde el día 1 al n del período evaluado, mm.

$\sum P_i$ = sumatoria de los eventos de percolación al Horizonte inferior estimados desde el día 1 al n del período evaluado, mm.

θ_1 = contenido de humedad del Horizonte radical el primer día del período evaluado, mm.

θ_n = contenido de humedad del Horizonte radical el último día del período evaluado, mm.

Esta comprobación es más bien didáctica que de funcionamiento, ya que toda el agua que entra al modelo tiene una salida matemática y el resultado siempre es cero, pero su lectura permite una comprensión de conjunto del movimiento del agua en el suelo durante todo el período de ejecución del modelo.

RESUMEN

Se presenta un modelo de simulación basado en la fórmula universal de balance hídrico para estimar la variación diaria del contenido de agua del suelo, escurrimiento, percolación y recarga hídrica, producida por técnicas de retención de escurrimiento. El modelo permite estimar con precisión la variación anual del contenido de agua del Horizonte radical cuando tiene una profundidad tal, que permita un completo desarrollo de la pradera natural, y estima

la percolación producida con surcos en contorno, en el Horizonte inferior. También entrega una estimación útil del escurrimiento superficial.

El modelo presenta restricciones en las estimación de la variación del contenido de agua del suelo durante el período de desecación en años secos, debido a limitaciones en el uso de los coeficientes de cultivo para la estimación de la evapotranspiración

actual en años con escasa pluviometría. Esta restricción se observa también en suelos con Horizontes radicales muy delgados, con escasa capacidad de retención de agua.

Palabras claves: balance hídrico, evapotranspiración actual praderas, simulación escurrimiento, surcos en contorno.

LITERATURA CITADA

- BAIER, W. and ROBERTSON, 1966. A new versatile soil moisture budget. *Journal of Plant Sciences* 46: 299-315.
- DASTANE, N.G. 1974. Irrigation and drainage; effective rainfall in irrigated agriculture. (FAO). Paper 25. 61 p.
- DOORENBOS, J. and PRUITT, W.O. 1975. Las necesidades de agua de los cultivos. (FAO). Paper 24. 179 p.
- ENGLAND, C.B. 1977. Modeling soil water hidrology under a post oak (*Quercus stellata*, Wanghen) - shortleaf pine (*Pinus echinata* Mill.) stand in Texas. *Water Resources Research* 13(3): 683-686.
- HOLMES, J.W. and ROBERTSON, G.W. 1959. A modulated soil moisture budget. *Monthly Weather Review* 87(3): 1-5.
- HOLTAN, H.N., and LÓPEZ, N.L. 1971. USDAHL-70 model of watershed hydrology. U.S. Departament of Agriculture. Technical Bulletin 1.435.
- HOLTAN, H. N. and STILTNER, G. H. 1975. USDAHL-74 revised model of watershed hydrology. U.S. Departament of Agriculture. Technical Bulletin 1.518.
- NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES. 1962. Range Research; basic problems and techniques. National Research Council. Publication and techniques 890. Washington D.C. p.: 139-147.
- PASCALE, A.J. 1972. Methods of computing the water balance. In agricultural meteorology proceedings of the WMO seminar on agricultural. Barbados, Nº 310. 25 p.
- SLATYER, R.O. 1962. Methodology of a water balance study conducted on a desert woodland (*Acacia aneura* F. Muell) community in central Australia. In: Plant-water relationship in arid and semiarid conditions. Proceedings of the Madrid symposium/échange hydriques des plants en milieu aride ou semi-aride. Paris, Actes du college du Madrid, UNESCO. p.: 15-26.
- SLATYER, R.O. 1968. The use of soil water balance relationships, in agroclimatology. In: Agroclimatology Methods. Proceedings of the readings symposium. Natural Resources Reserarch III. UNESCO. p.: 15-26.