



COMITE EDITORIAL
ESCUELA DE AGRONOMIA
CASILLA 114-D
SANTIAGO - CHILE

CIENCIA E INVESTIGACION AGRARIA

VOLUMEN 4 - Nº 3 - JULIO-SEPTIEMBRE 1977

ISSN 0304-5609

INVESTIGACIONES

- Indice de selección por eficiencia en vacas lecheras. I. Elaboración y validación del algoritmo.
Raúl Cañas, Jaime Bascuñán, Peter Hirsch-Reinshagen y Claudio Aguilar 155
- Cuaja y desarrollo del fruto de tuna (*Opuntia ficus indica*, Mill) y su relación con polinización y con los ácidos giberélico y cloroetil-fosfónico.
Gonzalo F. Gil, Manuel Morales y Alfonso Momberg 163
- Caracterización y génesis de los suelos derivados de sedimentos del cono principal del río Maipo.
Ricardo Honorato, Juan Eduardo Lira y Jorge Narbona 171
- Modelo simulativo para la predicción de la infiltración del agua en el suelo.
Luis A. Gurovich R. 183
- Modelos matemáticos y mediciones experimentales en la determinación de infiltración de agua en el suelo.
Luis A. Gurovich R. y Galo R. Jaramillo J. 197

PUESTA AL DIA

- Resúmenes de tesis presentados por alumnos de la Facultad de Agronomía de la U. C., como parte de sus requisitos para optar al título de Ingeniero Agrónomo 209

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE AGRONOMIA
SANTIAGO DE CHILE

UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE AGRONOMIA

CIENCIA E INVESTIGACION AGRARIA

COMITE EDITOR:

Peter Hirsch-Reinshagen B., Presidente
Patricio Parodi
Domingo Suárez
Alonso Bravo
Hernán Hurtado
Jaime Apablaza

CONSULTORES TECNICOS DE LA REVISTA
"CIENCIA E INVESTIGACION AGRARIA"

Son Consultores Técnicos de esta revista, además de los profesores de la Escuela de Agronomía de la Universidad Católica de Chile, las siguientes personas:

EDMUNDO ACEVEDO	WALDO ESPINOZA	RAFAEL NOVOA
JUAN ACEVEDO	ELISEO GALLARDO	SERGIO OYARZUN
PAUL ALDUNATE	JORGE GARCIA HUIDOBRO	ADRIANA PINTO
MARIO ALVAREZ	GOETZ VON GERSDORF	ALVARO PINTO
HERBERT APPELT	ROBERTO CONZALEZ	MARCELO QUEZADA
FERNANDO ARAOS	ELIAS LETELIER	PATRICIO RAMIREZ
EDUARDO BESOAIN	ANTONIO LIZANA	HERNAN RIQUELME
SERGIO BONILLA	HERNAN LOPEZ	NICASIO RODRIGUEZ
JUAN CARLOS BRESCHIANI	WALTER LUZIO	KLAUS RUSCH
MILAN CAGLEVIC	CARLOS MAGOFKE	JUAN TOSSO
BENE CORTAZAR	AGUSTIN MANDIETA	JORGE URRUTIA
RAUL CORTES	ALPONSO MUJICA	JORGE VALENZUELA
ANTONIO CORVALAN	JOSE NAGEL	EDUARDO VARAS

Toda correspondencia relacionada a la revista debe dirigirse a:

All mail concerning this publication must be addressed to:

Margarita Dell'Oro de Naudon
Oficina Editora
Escuela de Agronomía
Casilla 114-D
Santiago, Chile

SUSCRIPCIONES:

Terms of subscription:

Chile:

\$

\$

Extranjero:

Other countries:

US\$ 4, single number

US\$ 15, anual subscription

Abreviatura recomendada: Cienc. Inv. Agr.
AGRADECEMOS CANJE — WIR BITTEN UN AUSTAUSCH — EXCHANGE
SOLICITED — ON DEMANDE L'ECHANGE — GRADIREMMO CAMBIO

CIENCIA E INVESTIGACION AGRARIA



VOLUMEN 4 - Nº 3 - Julio-Septiembre 1977

INDICE DE SELECCION POR EFICIENCIA EN VACAS
LECHERAS^{1, 2}

I. ELABORACION Y VALIDACION DEL ALGORITMO

SELECTION INDEX FOR EFFICIENCY FOR DAIRY COWS

I ELABORATION AND VALIDATION OF ALGORITHM

RAUL CAÑAS C., JAIME BASCUÑAN N., PETER HIRSCH-REINSHAGEN, CLAUDIO AGUILAR G.

Departamento de Zootecnia, Facultad de Agronomía, Universidad Católica de Chile³

SUMMARY

An algorithm was built with the factors that influence milk production, fat production and animal live weight. These variables, used as correction factors, were calculated from data collected from 1,795,895 lactations of American Holstein cows using polynomial analysis. A sample of 800 cows of the same breed was used to determine the relationship between age and weight of the cow through regression analysis. Milk production was corrected for cow's age, calving time, milkings per day, days of lactation and fat content. The cow's live weight was corrected for age and months of gestation. The quotient between corrected milk and corrected metabolic weight was called Selection Index for Efficiency (SIE). A sensibility test was performed through the computer for each correction factor to examine its effect on SIE.

INTRODUCCION

Tradicionalmente la selección de vacas, en un rebaño lechero, se basa en la producción de leche y grasa o, en el mejor de los casos, en la producción durante una lactancia de 305 días. Sin embargo, cabe preguntarse ¿corresponde la vaca de mayor producción necesariamente al animal que realmente se desea seleccionar? Antes de contestar esta pregunta hay que recordar que un agricultor no debería centrar su interés en la producción de un animal, sino más bien en la transformación más eficiente de sus recursos alimenticios en leche. Si se asume que la calidad de alimentación es la misma para todo el rebaño, la eficiencia de producción de cada vaca podrá ser diferente; por consiguiente, lo que realmente interesa es seleccionar por mayor eficiencia, lo que no corresponde necesariamente a animales de mayor producción.

Brody (1945) distingue dos conceptos al hablar de eficiencia. Uno es la relación que existe entre producción de leche y el total de consumo expresados en energía; lo que corresponde a la Eficiencia Bruta. El otro corresponde a la relación entre producción lechera y el consumo sobre mantención, lo que llama Eficiencia Neta. La eficiencia neta de producción lechera, según Cañas *et al.* (1975), es constante a igual composición de leche.

Brody (1945) indica que la eficiencia económica de producción lechera depende de varios factores, entre los cuales se destacan el mérito lechero que representa la eficiencia biológica de producción de leche en relación al consumo de energía. Asumiendo que un kilo de leche corregida a 4% de materia grasa tiene un contenido de energía de 748 Kcal y que 1 kilo de ENDT (elementos nutritivos digestibles totales) tiene un contenido de energía de 3.991 Kcal, el mérito lechero de un

Se autoriza la reproducción y cita del material que aparece en *Ciencia e Investigación Agraria*, siempre que se indique el nombre del autor(es), año, volumen, número y páginas del cual se obtiene. Las opiniones y afirmaciones expuestas en los trabajos representan exclusivamente los puntos de vista de los autores. La mención de productos o firmas comerciales en la revista no implica una recomendación por parte de la Universidad.

Publicación aprobada por el Comité Editor de la Facultad de Agronomía de la Universidad Católica de Chile con el N° 114-D. Fecha de recepción: 5 de abril de 1977. Este trabajo fue realizado con la ayuda de la Dirección de Investigación de la Vicerrectoría Académica, Universidad Católica de Chile, Proyecto N° 212/75 y el Proyecto OEA-UC titulado: "Cibernética en la Agricultura".

animal es numéricamente igual a la eficiencia bruta de producción de leche de ese animal. La máxima eficiencia bruta expresada en producción lechera es de 50%, considerándose un buen animal aquel que tiene una eficiencia bruta de 30% (Brody 1945). El mismo autor indica que un animal con un mérito lechero de por lo menos un 25%, es un animal que produce utilidades en las condiciones de U.S.A.

El mérito lechero o eficiencia bruta de un animal depende, por consiguiente, de la producción de leche, la que es fácil de determinar. Sin embargo, en condiciones de manejo normal, el consumo de energía es prácticamente imposible de determinar. Es por esto que Gaines (1940) confeccionó un "índice del mérito lechero", como un método indirecto de evaluar el mérito lechero. Este índice es la relación entre producción de leche corregida a 4% de materia grasa y el peso del animal. Este método puede ser aceptado cuando los factores que afectan la producción lechera, tales como número de ordeñas al día, días de lactancia, época de parición, etc.; son constantes y el peso de los animales es homogéneo, lo que en otros términos estaría indicando que el índice de mérito lechero es máximo a mayor producción de leche, sin tomar en cuenta la eficiencia del animal. Cuando los pesos de los animales son muy heterogéneos, Brody (1945) plantea que el mérito lechero debe representarse por unidad de peso metabólico; esto debido a que el consumo de alimento estaría afectado entre otras cosas por el tamaño metabólico del animal.

El objetivo de este trabajo es diseñar un algoritmo, y con las ecuaciones que representarían los factores que afectan tanto a la producción lechera como al peso de los animales, obtener una relación entre leche corregida y peso metabólico corregido, para determinar luego la sensibilidad en la determinación del Índice de Selección por Eficiencia (ISPE).

MATERIALES Y METODOS

Para poder estandarizar la producción de leche por vaca fue necesario ajustar por factores de correlación cada una de las variables que afectan tanto la producción de leche como el peso del animal. Las variables y los factores de corrección se detallan a continuación:

Variable	Factor de Corrección
Producción de leche	Edad de la vaca Epoca de parición de la lactancia controlada Número de ordeñas al día Días de lactancia Estandarización al 4% Materia Grasa
Producción de grasa	Edad de la vaca Días de lactancia
Peso del animal	Edad de la vaca Estado de gestación

En la figura 1 se muestran las funciones de corrección propuestas por Cañas y Neira (1975), para producción de leche, y por Cañas, Bascuñán y Lagos (1975), para peso del animal.

Los índices usados para corregir la producción lechera fueron obtenidos mediante ajuste de una polinomial de una muestra de 1.795.895 lactancias de vacas de la raza Holstein Americana en áreas climáticas semejantes a las de la Zona Central de Chile (Estado de California, USA) (Blanchard, Freeman y Spike, 1966; Gravier e Hickmann, 1966; Mc Daniel Miller y Coroler, 1966 y Syrstad 1965).

Los índices usados para corregir el peso de los animales por edad fueron calculados por métodos de regresión sobre pesos de 800 vacas de la raza Holstein Americana (Cañas y Bascuñán, Lagos 1975). La figura 2 muestra el algoritmo de los factores que afectan al ISPE.

Una vez obtenida la leche corregida por las diferentes variables (LC) y el peso corregido expresado por unidad de peso metabólico (PMC), se calculó la relación entre ambos expresándolo en la siguiente fórmula:

$$\frac{LC}{PMC} = ISPE$$

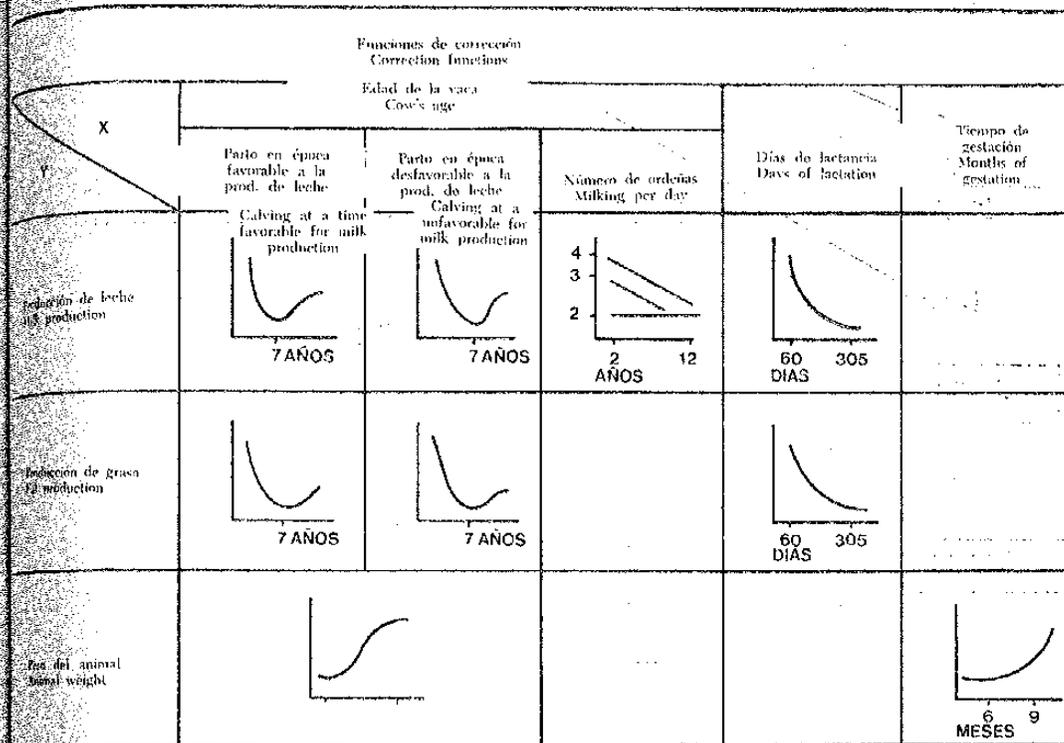
Se desarrolló un programa de computación en FORTRAM IV, que permitió el cálculo del ISPE en forma expedita.

El análisis de sensibilidad para cada factor de corrección se realizó al comparar el ISPE de una vaca tipo que se usó como patrón, con aquellos que se obtuvieron al aplicar las funciones de corrección, sobre una de las variables, cuyos valores se movían dentro de cierto rango lógico, en tanto que el resto de ellas permanecía constante.

FIGURA 1

PRESENTACIÓN GRAFICA DE LAS FUNCIONES DE CORRECCION PARA PRODUCCION DE LECHE, PRODUCCION DE GRASA Y PESO DEL ANIMAL

Correction function presented in graphic form for milk production and animal live weight



la vaca tipo se definió de la siguiente forma:

Época de parición	Septiembre
Días de lactancia	300 días
Número de ordeñas al día	2 ordeñas
Tempo de gestación	4 meses
Peso del animal	500 kilos
Edad de la vaca	7 años
Porcentaje de leche	4.0%
Producción de leche	3.000 kilos

RESULTADOS Y DISCUSION

En el cuadro 1 se presentan los resultados del ISPE para el análisis de sensibilidad del factor "mes de parición".

El uso del factor mes de parición permite comparar producciones de leche de animales que han empezado su lactancia en diferentes

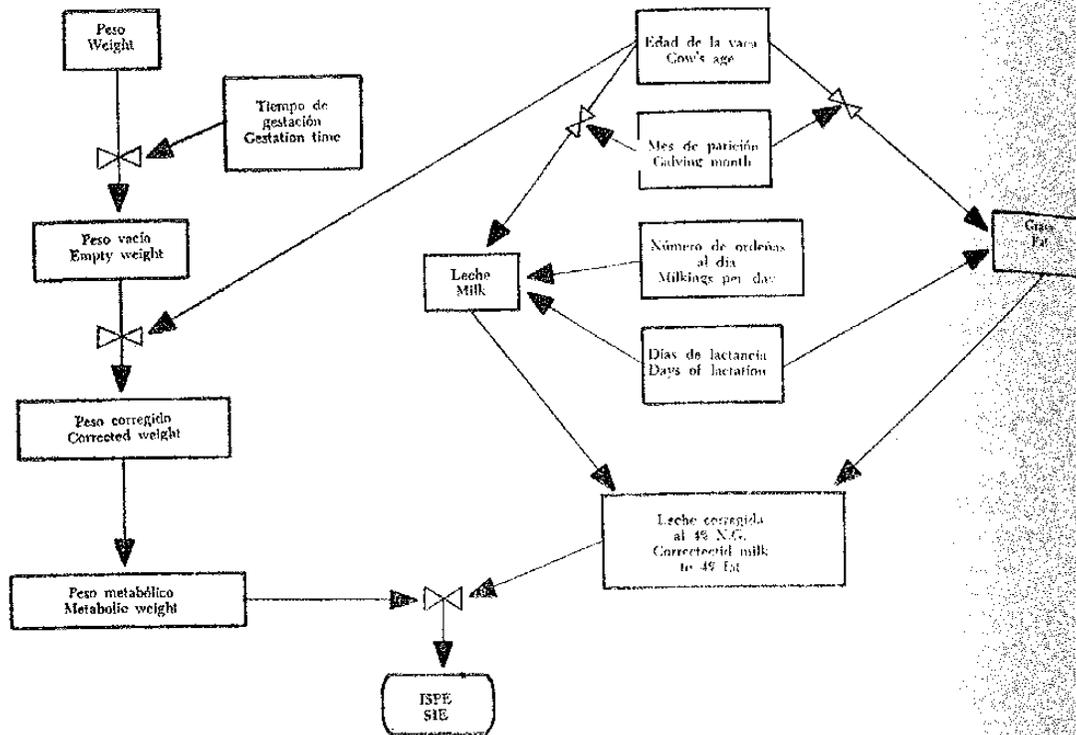
condiciones ambientales. Una misma vaca posee distintos ISPE, según el mes del parto. Esto se debe a que dicho factor corrige las producciones de leche de las vacas que inician su lactancia durante los meses de invierno; mayo, junio, julio y agosto, haciéndolas comparables con aquellas obtenidas por los animales cuyos partos han ocurrido entre los meses septiembre y abril. Esto está indicando que una vaca que pare en los meses de invierno y que produjo 3.000 litros de leche en 300 días de lactancia es una vaca mejor que aquella que produjo igual cantidad de leche, pero parió en una época favorable a la producción de leche. Esto se evidencia en un mayor ISPE.

En el cuadro 2 se presenta el resultado del análisis de sensibilidad para el factor de corrección "edad de la vaca" sobre la producción de leche.

FIGURA 2

ALGORITMO DEL METODO DE CALCULO DEL INDICE DE SELECCION POR EFICIENCIA (ISPE)

Algorithm of the method for calculating the selection index for efficiency (SIE)



CUADRO 1

INFLUENCIA DEL MES DE PARICION EN EL ISPE

Relationship between the month of calving and SIE

Producción lechera no corregida, kilo Not corrected milk prod. Kg	Mes de parición Calving month	ISPE SIE	
Vaca A	3.000	Enero	28.16
Vaca B	3.000	Febrero	28.16
Vaca C	3.000	Marzo	28.16
Vaca D	3.000	Abril	28.16
Vaca E	3.000	Mayo	28.24
Vaca F	3.000	Junio	28.24
Vaca G	3.000	Julio	28.24
Vaca H	3.000	Agosto	28.24
Vaca Tipo	3.000	Septiembre	28.16
Vaca I	3.000	Octubre	28.16
Vaca J	3.000	Noviembre	28.16
Vaca K	3.000	Diciembre	28.16

El uso de la función de corrección para edad de la vaca permite comparar las producciones de leche de vacas de diferentes edades. Así se observa en el cuadro 2 que la vaca B produjo 3.000 litros en 300 días, por lo que puede esperarse una producción de 3.571 litros cuando la edad de ésta sea de 7 años.

El porcentaje de grasa de la leche es dependiente también de la edad de la vaca. La prueba de sensibilidad para dicho factor se presenta en el cuadro 3.

El porcentaje de grasa de la leche aumenta al aumentar la edad de la vaca hasta los 7 años. Pasada dicha edad, el porcentaje de grasa de la leche disminuye al aumentar la edad. En el cuadro 3 se muestra, por ejemplo, que una vaca de tres años de edad, que produce una leche con 4% de materia grasa, deberá producir una leche con 4.72% de grasa al alcanzar la edad de la vaca tipo. Se puede observar, además, que una vaca de 11 años que produce leche con 4% de materia grasa, produce a la edad de la vaca tipo, leche con 4.24%

CUADRO 2

INFLUENCIA DE LA EDAD DE LA VACA EN LA PRODUCCION DE LECHE

Relationship between the cow's age and milk production

Edad, años Age, year	Produc. leche (Kg) Milk prod.	L C (Kg) C.M.	
A	2	3.000	4.015
B	3	3.000	3.571
C	4	3.000	3.283
D	5	3.000	3.111
E	6	3.000	3.025
F	7	3.000	3.000
G	8	3.000	3.013
H	9	3.000	3.052
I	10	3.000	3.019
J	11	3.000	3.180
K	12	3.000	3.271
L	13	3.000	3.389

CUADRO 3

INFLUENCIA DE LA EDAD DE LA VACA EN EL PORCENTAJE DE GRASA DE LA LECHE

Relationship between cow's age and milk fat

Grasa de la leche (%) Milk fat	Edad de la vaca, años Cow's age years	Grasa de la leche correg. por edad* Milk fat corrected by age	
A	4.0	2	5.32
B	4.0	3	4.72
C	4.0	4	4.36
D	4.0	5	4.12
E	4.0	6	4.04
F	4.0	7	4.00
G	4.0	8	4.00
H	4.0	9	4.08
I	4.0	10	4.16
J	4.0	11	4.24
K	4.0	12	4.36
L	4.0	13	4.52

de materia grasa. Esto está indicando que la máxima producción de leche y de grasa se produce a los 7 años y, por consiguiente, el factor de corrección a esa edad es 1.0, aumentando a medida que la edad de la vaca disminuye o aumenta, como lo muestra la figura 1. Al tomar en cuenta el peso de los animales, es necesario corregir por la edad, ya que una vaca de 3 años no ha finalizado su período de crecimiento y, por consiguiente, cuando al-

cance su madurez, su peso será mayor. Para corregir por este factor se mantuvo constante la producción de leche y porcentaje de grasa de la leche. El análisis de sensibilidad para este factor se presenta en el cuadro 4.

CUADRO 4

RELACION DE LA EDAD EN EL PESO DEL ANIMAL

Relationship between cow's age and body weight

Edad, años Age, year	Peso Kg Weight	Corregido Kg Corrected	
Vaca A	2	500	710
Vaca B	3	500	632
Vaca C	4	500	569
Vaca D	5	500	536
Vaca E	6	500	510
Vaca Tipo	7	500	500
Vaca F	8	500	500
Vaca G	9	500	500

Se puede observar que la función usada corrige el peso a los 7 años de edad, momento en el cual los animales alcanzan su máximo desarrollo, estabilizándose posteriormente su peso. Es esencial la corrección de peso por edad en el cálculo de ISPE, puesto que de no llevarse a cabo se estaría obteniendo un ISPE mayor en vacas menores de 7 años de edad.

Otro factor tomado en cuenta para corregir el peso es el estado de gestación.

En el cuadro 5 se presenta el resultado del análisis de sensibilidad para el factor "meses de gestación".

CUADRO 5

RELACION DEL ESTADO DE GESTACION EN EL PESO DEL ANIMAL

Relationship between time of gestation and body weight

Meses de gestación Time of gestation	Peso Kg Weight	Corregido Kg Corrected weight	
Vaca Tipo	4	500	500
Vaca A	5	500	500
Vaca B	6	500	489
Vaca C	7	500	481
Vaca D	8	500	485
Vaca E	9	500	437

El uso del factor meses de gestación permite descontar del peso de la vaca el contenido intrauterino después de seis meses de gestación. A consecuencia de esta corrección, el ISPE es independiente del estado de gestación de la vaca, a partir de los 6 meses de gestación. Sin embargo, esta función no permite corregir por estados de gestación menores de seis meses, lo que constituye una fuente de error que por su magnitud en relación al peso total de la vaca no es cuantitativamente importante.

Otro factor del cual depende la producción de leche es el número de ordeñas diarias. En el cuadro 6 se presenta el resultado del análisis de sensibilidad para el factor de corrección "número de ordeñas diarias".

CUADRO 6

INFLUENCIA DEL NUMERO DE ORDEÑAS DIARIAS EN LA PRODUCCION DE LECHE

Relationship between milkings and milk production

	Nº ordeñas	Prod. leche Kg	Prod. leche corregida, kilo
	Milkings	Milk prod. Kg	Milk prod. correct. Kg
Vaca Tipo	2	3.000	3.000
Vaca A	3	3.000	2.841
Vaca B	4	3.000	2.771

Las producciones de leche de vacas con 3 y 4 ordeñas diarias se hacen comparables a aquellas producidas por vacas ordeñadas dos veces al día. Así, las producciones de las vacas A y B en el cuadro 8 y que produjeron 3.000 kg de leche en 3 y 4 ordeñas al día habrían

producido 2.841 y 2.771 kg, respectivamente, si se hubiesen ordeñado a intervalos iguales a los de la vaca tipo.

La producción de leche de cada vaca se corrigió, además, a 300 días mediante la función de corrección "días de lactancia". El análisis de sensibilidad correspondiente se observa en el cuadro 7.

CUADRO 7

INFLUENCIA DE LOS DIAS DE LACTANCIA EN LA PRODUCCION DE LECHE*

Relationship between days in lactation and milk production

	Días de lactancia	Leche prod. Kg	Leche corregida a 300 días Kg
	Days in lactation	Milk prod. in Kg	300 days milk prod. corrected
Vaca A	50	500	2.165
Vaca B	100	1.000	2.300
Vaca C	150	1.500	2.452
Vaca D	200	2.000	2.604
Vaca E	250	2.500	2.781
Vaca F	280	2.800	2.919
Vaca Tipo	300	3.000	3.000

* Se usó un promedio de 10 kilos diarios de leche producida por vaca.

En el cuadro 7 se presentan producciones de leche registradas para cada vaca a diferentes días de lactancia. Además, se muestra el carácter exponencial de dicha función de corrección al comparar las producciones de la vaca B con la vaca F. Aun cuando las vacas B y F poseen un promedio de producción diaria de 10 kilos de leche, la leche corregida es de 2.300 y 2.919 kilos, respectivamente.

RESUMEN

Se realizó un algoritmo con los factores que afectan el peso de los animales y la producción de leche y grasa. Estas variables, usadas como factores de corrección, fueron calculadas de datos recopilados de 1.795.895 lactancias de vacas Holstein Americano mediante el ajuste de polinomiales. Se usó, además, una muestra de 800 vacas de la misma raza para determinar la relación entre peso y edad de la vaca por medio de análisis de regresión. La producción de leche fue corregida por la edad de la vaca, edad al parto, ordeñas por día, días de lactancia y contenido de materia grasa en la leche. El peso vivo de la vaca fue corregido por la edad del animal y mes de gestación. El cociente entre leche corregida y peso metabólico corregido se llamó Índice de Selección Por Eficiencia (ISPE). Se realizó un análisis de sensibilidad a través del computador, para examinar el efecto de cada uno de los factores de corrección en el ISPE.

LITERATURA CITADA

- OSCARO, R. P.; A. E. FREEMAN y P. W. SPIKE, 1966. Variation in lactation yield of milk constituents. J. Dairy Sc. 49: 953.
- OSCARO, R. P. y C. G. HICKMANN, 1966. Importance of lactation number, age, and season of calving for dairy cattle breed improvement. Pub. Nº 1239, Facultad de Agr. Depto. Agr.
- DANIEL, B. T.; R. H. MILLER y E. L. CORVLEY, 1966. Environmental influence on age correction of lactation yield. (Abst.), J. Dairy Sc. 49: 736.
- OSCARO, R. P., 1965. Studies on dairy herd records. Effect of age and season of calving. Acta Agr. 15: 1.
- OSCARO, R. P.; R. NEIRA R., 1975. Factores de corrección

usados para estandarizar producción de leche. Presentación Departamento de Zootecnia. Facultad de Agronomía, Universidad Católica de Chile.

CAÑAS, R. C.; J. BASCUÑÁN N., G. LAGOS M., 1975. Corrección de peso de vacas Holando Americanas, según edad. Presentación en el Departamento de Zootecnia. Facultad de Agronomía, Universidad Católica de Chile.

GAINES, W. L., 1940. Live weight and milk energy yield in czechoslovak cows. I Dairy Science 23: 71.

CAÑAS, R. C.; J. J. ROMERO, R. L. BALDWIN, L. J. KOONG, 1975. Lactational efficiency complex of rats: Provisional model for energy balance data.

BRODY, 1945. Bioenergety and growth. Rainhold Pub. Corp., New York.

CUAJA Y DESARROLLO DEL FRUTO DE TUNA (*Opuntia ficus indica*, Mill) Y SU RELACION CON POLINIZACION Y CON LOS ACIDOS GIBERELICO Y CLOROETILFOSFONICO¹

FRUIT SET AND DEVELOPMENT IN THE PRICKLY PEAR (*OPUNTIA FICUS INDICA*, MILL) IN RELATION TO POLLINATION AND GIBBERELIC AND CHLOROETHYLPHOSPHONIC ACIDS

GONZALO F. GIL, MANUEL MORALES y ALFONSO MOMBERG²

Universidad Católica de Chile, Facultad de Agronomía, Departamento de Frutales y Viñas

SUMMARY

Two experiments on fruit set and growth were carried out with flowers whose anthesis occurred at an interval of 15 days. One half of the flowers was exposed to open pollination while the other half was emasculated. Except for the controls, all flowers were sprayed with 50 or 100 ppm gibberellic acid (GA_3) at anthesis and one half of these received the same treatment with GA_3 again 35 and 70 days later.

Fruit set occurred only when seeds developed after pollination or when GA_3 was applied to emasculated flowers. In the latter case (parthenocarpic fruits), repeated sprays were necessary to reach normal size but the edible endocarp never developed fully. Size of seeded fruits was increased by GA_3 sprays although fruit maturity was slightly delayed.

Chloroethylphosphonic acid (ethephon) was used to regulate fruit maturation. It was sprayed on fruits 37 and/or 21 days before the normal harvest date at concentrations of 100, 500, and 1.000 ppm. It advanced maturity when applied at 1.000 ppm in the second date. Repeated treatments enhanced the same effect.

INTRODUCCION

La tuna, o nopal, o chumbera (*Opuntia ficus indica*, Mill) es una especie frutal de importancia en sectores de semisecano de Chile central y de amplia potencialidad por la magnitud de la superficie de terrenos con esas condiciones. Muy poco es lo que se ha estudiado sobre ella y existen más bien descripciones monográficas (Lozano, 1958; Ortiz, 1961; Morettini, 1963; Tamaro, 1968).

El fruto de la tuna es una baya ovoidal de epicarpio coriáceo con haces de espinas, que contiene en su interior numerosas semillas distribuidas en la pulpa comestible. Las espinas dificultan grandemente la operación de cosecha manual y las semillas causan una molestia al consumidor y al procesamiento industrial.

Poco o nada se sabe de la cuaja y desarrollo del fruto de tuna, fenómenos relacionados, en general, con la formación y desarrollo de semillas, cuya ausencia provoca corredura o abscisión de frutos (Gil, Griggs y Martin, 1972; Gil, 1974a). En frutos multiseñillados existe una estrecha relación entre número de semillas y el peso final del fruto, como ha sido demostrado en uva (Muller-Thurgau, 1898), fresa (Nitsch, 1950) y manzana (Visser, 1955). Incluso, la distribución desuniforme de semillas dentro del fruto causa deformación por el mayor desarrollo alrededor de las semillas (Nitsch, 1950).

En especies y variedades que dependen de la fecundación del óvulo para poder fructificar ha sido posible la inducción de partenocarpia (desarrollo del fruto sin semillas) mediante fitohormonas, especialmente las gibe-

¹ Publicación aprobada por el Comité Editor de la Facultad de Agronomía de la Universidad Católica, con el N° 129/77.
² Fecha de recepción: 13/7/77.
CIEPLAC, La Serena.

relinas, como se indica en diversas revisiones (Crane, 1964; Gil, 1974a). Estos frutos carentes de semilla crecen muy poco y en estos casos las giberelinas exógenas han sido necesarias para promover el total desarrollo, como en vid (Weaver y McCune, 1959b) y peral (Gil et al., 1972). La vid, cuyo fruto es una baya, no responde al tratamiento si hay semillas normales (Weaver y McCune, 1959a), y su respuesta es progresiva a medida que disminuye el número de semillas (Lavee, 1960).

Por otra parte, la cosecha de tunas se efectúa principalmente entre febrero y marzo, con la variación estacional de precios característica. Por motivos económicos y prácticos de cosecha es conveniente la ampliación del período de cosecha, lo cual puede obtenerse si se regula la maduración de frutos. El regulador ácido cloroetilfosfónico, (ethephon), un portador de etileno, se ha usado en otras especies frutales para acelerar maduración (Crane, Marei y Nelson, 1970; Gil, 1974b).

Los antecedentes expuestos señalan claramente que es interesante y necesario estudiar las características de cuaja, crecimiento y maduración de frutos de tuna, como asimismo su posible regulación con giberelinas y etileno, lo que constituyó el objetivo del trabajo que aquí se presenta.

MATERIALES Y METODOS

Todo el trabajo experimental se llevó a cabo en la parcela 62 de la comuna de Pudahuel, Area Metropolitana.

ESTUDIO DE LA CUAJA Y DESARROLLO DE FRUTOS CON GIBERELINAS

Se efectuó un ensayo totalmente al azar escogiendo botones florales cerrados (pétalos morados), estado de desarrollo alcanzado 15 días antes de la antesis (DAA). Esta selección y su individualización mediante tarjetas se realizó el 15 de octubre de 1974, de tal modo que correspondieran 100 flores a cada tratamiento. La mitad de los botones florales fueron emasculados (eliminación de las anteras y del estigma) con tijera, en esa misma fecha. En ambos grupos de flores los tratamientos fueron: 1) Testigo, sin intervención posterior; 2) Acido giberélico (AG₃) en dosis de 50 ppm en la antesis; 3) AG₃, 50 ppm en la antesis y dos aplicaciones posteriores, una 35 días des-

pués de la antesis (DDA) y la otra 70 días 4) AG₃, 100 ppm en la antesis, y 5) AG₃, 100 ppm en la antesis, a los 35 y a los 70 DDA. Las soluciones de AG₃, con la adición de Regulaid como dispersante, se asperjaron sobre las flores o frutos con bomba manual, teniendo su mojamiento total.

Los frutos fueron cosechados a mediados de febrero de 1975 para determinar el porcentaje de cuaja, el peso unitario, tamaño (pie de metro) externo y de la parte comestible color, sólidos solubles del jugo, y presencia de semillas.

La tuna tiene el hábito de florecer en un largo período, lo que permitió efectuar un segundo ensayo, que se inició 15 días después el 30 de octubre, con la selección de flores más atrasadas. Los tratamientos fueron los mismos excepto que el AG₃ se aplicó solamente a flores emasculadas, y se empleó un diseño de bloques al azar, con paletas de 10 flores, cada una para cada tratamiento, repetidas en 10 plantas diferentes. Este ensayo tuvo por objeto reproducir resultados en corto tiempo con condiciones ambientales algo diferentes en las fechas de aspersión del AG₃.

ESTUDIO DE MADURACIÓN CON ÁCIDO CLOROETILFOSFÓNICO

Se estudió el efecto del ácido cloroetilfosfónico (ethephon) asperjado sobre los frutos en dosis de 100, 500 y 1.000 ppm en cada una de dos épocas: 38 días antes de la cosecha normal (DACN), el 8 de enero de 1975 y el DACN (25 de enero). También se incluyeron tratamientos con los cuales los mismos frutos recibieron el ethephon en ambas fechas, es decir, en forma repetitiva. Todos los tratamientos, como también un testigo, fueron hechos con cinco repeticiones o plantas. En la cosecha se determinó el peso de los frutos, su color, y el contenido de sólidos solubles del jugo.

RESULTADOS Y DISCUSION

POLINIZACIÓN Y GIBERELINAS EN EL DESARROLLO DE FRUTOS DE TUNA

Cuja y desarrollo del fruto

El cuadro 1 contiene la información de la cuaja y del tamaño (peso), alcanzado por los

CUADRO 1

EFFECTO DE LA POLINIZACION Y DEL ACIDO GIBERELICO EN LA CUAJA Y DESARROLLO DEL FRUTO DE TUNA

Effect of pollination and gibberellic acid on fruit set and development of the prickly pear

Tratamiento	Cuaja (%) Set	Peso g/fruto Weight	Proporción Ratio	comestible	
				total	edible
Ensayo Nº 1 Trial Nº 1					
polinización libre (T)	96,87 a	116,40 b		0,82 a	
+ AG ₃ 50 ppm, en antesis	100,00 a	119,19 b		0,83 a	
+ AG ₃ 50 ppm, 3 veces ¹	100,00 a	127,68 a		0,81 a	
+ AG ₃ 100 ppm, en antesis	100,00 a	129,25 a		0,81 a	
+ AG ₃ 100 ppm, 3 veces	100,00 a	128,78 a		0,83 a	
emasculado (EM)	0,00 e		f		
+ AG ₃ 50 ppm, en antesis	48,50 d	49,92 e		0,42 c	
+ AG ₃ 50 ppm, 3 veces ¹	75,00 b	70,15 d		0,45 c	
+ AG ₃ 100 ppm, en antesis	62,76 c	66,90 d		0,58 b	
+ AG ₃ 100 ppm, 3 veces ¹	78,12 b	80,79 c		0,44 c	
Ensayo Nº 2 Trial Nº 2					
polinización libre	92,62 a	112,20 a		0,81 a	
emasculado (EM)	0,00 b		d		
+ AG ₃ 50 ppm, en antesis	95,22 a	75,74 c		0,65 b	
+ AG ₃ 50 ppm, 3 veces ¹	100,00 a	99,74 ab		0,64 b	
+ AG ₃ 100 ppm, en antesis	100,00 a	83,46 bc		0,65 b	
+ AG ₃ 100 ppm, 3 veces	97,14 a	111,30 a		0,65 b	

Las aspersiones: antesis, 35 y 70 días después.
Los ensayos: antesis, 35 and 70 days thereafter.

En cada ensayo los valores de una misma columna seguidos de la misma letra no son significativamente diferentes (P ≤ 0,05).

In each trial means followed by the same letter are not different (P ≤ 0,05).

como también el desarrollo relativo de sus componentes.

Las flores polinizadas libremente, que es la situación natural (testigo), cuajaron en un porcentaje, superior a 92%. Estos frutos alcanzaron un peso de 116,4 g en el primer ensayo y muy poco menos en el segundo, con un menor desarrollo de crecimiento. La parte comestible ocupó el 81% de la anchura total del fruto. Estos valores se consideran los normales en la especie en buenas condiciones de manejo agrícola.

La aspersión de AG₃ a 100 ppm a flores polinizadas libremente dio como resultado un aumento significativo de peso del orden de 10%. La repetición del tratamiento a los 35 días agregó nada a lo anterior. Sin embargo, la aspersión de 50 ppm aumentó el peso de los frutos

en un 9,7% solamente cuando la aspersión floral fue seguida de otra 35 DDA. Todos estos frutos contenían semillas y una proporción de parte comestible del mismo modo que el testigo. La única interpretación de estos resultados es que la tuna por polinización libre no cuajó todas las semillas requeridas para alcanzar su tamaño potencial, y el AG₃ suministrado exógenamente sustituyó el efecto de la ausencia de algunas semillas. Esto se basa en el hecho comprobado en otros frutos como la uva (Müller-Thurgau, 1898), fresa (Nitsch, 1950) y manzana (Viser, 1955), de que existe una estrecha correlación entre número de semillas y tamaño final, y en la uva, además, hay respuesta al AG₃ en forma inversamente proporcional al número de semillas (Lavee, 1960).

Por otra parte, la emasculación de flores in-

maduras evitó completamente el desarrollo del fruto, fenómeno que probó ser absolutamente dependiente de la polinización y fertilización. Sin embargo, el ovario nunca sufrió abscisión y a la fecha de la cosecha tenía el mismo porte que en la antesis, pero sus tejidos estaban degenerados en forma similar a frutos dañados por heladas.

El ácido giberélico indujo la cuaja de flores emasculadas y el crecimiento de frutos. La tuna debe agregarse entonces a la lista de especies que fructifican partenocárpicamente con giberelinas (Gil, 1974a). El efecto del AG_3 fue diferente según la dosis, número y fecha de las aspersiones. Así, en el primer ensayo, al aplicar AG_3 el 30 de octubre, en dosis de 50 ppm, indujo la cuaja permanente de 48,5% de frutos, pero en dosis de 100 ppm subió el porcentaje a 62,76%. Esta diferencia no ocurrió en el segundo ensayo, en el cual la aplicación de AG_3 se efectuó el 11 de noviembre y se llegó, además, a un 100% de cuaja. Evidentemente hay factores que afectan la efectividad de un tratamiento con AG_3 , ya que en las dos fechas es previsible que hubiesen diferencias climáticas, de manejo del tunal, etc., y es sabido que cualquiera de estas variaciones puede alterar la acción de sustancias de tan pequeña concentración endógena o la absorción de las exógenas (Crane, 1964; Gil, 1974a).

La repetición del tratamiento a los 35 y 70 días desde la antesis subió la cuaja a 75% con 50 ppm y a 78,12% con 100 ppm. Para fines de número de frutos cuajados la repetición de la dosis más baja igualó a la más alta. Sin embargo, todavía hubo diferencias entre esos tratamientos en cuanto al peso final adquirido por los frutos. Una sola aplicación floral de 50 ppm de AG_3 no alcanzó a dar un fruto con la mitad del peso normal, siendo ligeramente sobrepasado con 100 ppm. La repetición de la dosis de 50 ppm dio un peso final similar a una sola aplicación floral de 100 ppm. La repetición de 100 ppm dio un fruto más cercano al normal (80,79 g). Estos resultados, nuevamente, variaron al hacerse un segundo ensayo, en el cual el AG_3 fue más eficiente, pero, de todos modos, se confirmó que es imprescindible no sólo el estímulo de cuaja durante la antesis, sino que también el estímulo durante el desarrollo del fruto con una segunda y tercera aplicación de AG_3 . En esta ocasión se llegó a una cuaja y a un peso final igual al testigo polinizado y con semillas.

Después de la antesis, las semillas en desarrollo son órganos que producen giberelinas en manzanas (Nitsch, 1958), uva (Ito *et al.*, 1969), y peras (Gil, Martin y Griggs, 1972). Este hecho fisiológico explica la necesidad de un suministro exógeno de AG_3 después de la cuaja a los frutos partenocárpicos para mantener el crecimiento del mismo modo que en uva Sultanina, como bien saben los viticultores, y en peras Winter Nelis (Gil, Griggs y Martin, 1972).

Es interesante resaltar que en los frutos partenocárpicos, por efecto del AG_3 nunca se desarrolló la parte comestible o endocarpio en forma normal, ni siquiera cuando externamente ellos eran igual al testigo. En el primer ensayo llegó a ser 42 y 58% del fruto, y en el segundo no pasó de 65%. Es decir, se estimuló más la cáscara (exo y mesocarpio) que el endocarpio. Dos hipótesis se pueden adelantar: 1) Existe una mala absorción y translocación del AG_3 , estimulándose más los tejidos cercanos a la aplicación, y 2) El endocarpio sería menos sensible al AG_3 . Por el momento parece más apropiada la primera, por cuanto la tuna posee una superficie bastante impermeable y porque otras bayas, como la uva, responden bien al AG_3 .

También debe destacarse que, si bien los frutos fueron partenocárpicos por no existir embrión ni endosperma, permanecieron los integumentos ovulares endurecidos, indicación de un crecimiento de los óvulos por un tiempo después de la antesis en forma parecida a lo señalado por Griggs, Martin e Iwakiri (1970) en peras Bartlett partenocárpicas.

Madurez de cosecha del fruto

Los índices de madurez evaluados fueron sólidos solubles del jugo y color de la piel (cuadro 2). Los testigos semillados del primer ensayo alcanzaron un contenido de sólidos solubles de 16,06% y un color amarillo anaranjado (nota 3, 5), lo que se consideró como estándar de madurez de cosecha. Los mismos frutos del segundo ensayo según esos índices estaban ligeramente más atrasados, en concordancia con su menor edad de 15 días. En los frutos semillados al AG_3 no afectó claramente a los sólidos solubles, pero sí retrasó la pérdida del color verde, especialmente con la dosis mayor y la repetición de la aspersión.

Esto no quiere decir que la madurez de consumo se haya atrasado, como en el caso de

CUADRO 2

EFFECTO DEL ACIDO GIBERELICO EN DOS INDICES DE MADUREZ DE LA TUNA

Effect of gibberellic acid on two maturity indices of prickly pear fruits

Tratamiento	Ensayo 1 Trial		Ensayo 2 Trial	
	Sólidos solubles %	Color ¹	Sólidos solubles %	Color ¹
polinización libre (T)	16,06 a	3,5 a	15,50 a	3,0 a
AG_3 50 ppm, antesis	15,67 ab	3,5 a	---	---
AG_3 50 ppm, 3 veces ²	15,51 ab	3,5 a	---	---
AG_3 100 ppm, antesis	15,00 b	3,0 b	---	---
AG_3 100 ppm, 3 veces	15,62 ab	2,5 c	---	---
emasculado (EM)	---	---	---	---
AG_3 50 ppm, antesis	12,17 d	2,5 c	14,16 b	2,8 a
AG_3 50 ppm, 3 veces ²	12,39 d	2,5 c	14,65 b	2,6 a
AG_3 100 ppm, antesis	14,21 c	3,0 b	14,50 b	2,5 a
AG_3 100 ppm, 3 veces ²	14,03 c	2,0 d	14,40 b	2,4 a

Color 1 = verde; 2 = verde amarillento; 3 = amarillo; 4 = anaranjado.
green yellowish green yellow light orange

Aspersiones: antesis, 35 y 70 días después.
Aspersions: anthesis, 35 and 70 days thereafter.

Valores de una misma columna seguidos de la misma letra no son diferentes ($P \leq 0,05$).
Values within a column followed by the same letter are not different ($P \leq 0,05$).

(Weaver y McCune, 1959a), sino que la cosecha por el índice práctico (color). En los frutos partenocárpicos por acción del AG_3 en cambio, no es posible hablar de madurez en forma aislada, ya que el primer efecto es la falta de desarrollo total, limita todo lo posterior. En todo caso, a juzgar por el ensayo 2, parece haber un efecto retardador en la acumulación de azúcar.

EFFECTO DEL ETHEPHON

El ethephon aplicado a los frutos de tuna durante el último mes de desarrollo no ejerció ningún efecto en el crecimiento (cuadro 3), y cuando se aplicó temprano, 37 DACN, tampoco afectó la madurez. Sin embargo, la aplicación más tardía, 21 DACN, en dosis de 1.000 ppm provocó un adelanto de la madurez por incremento en los sólidos solubles y un cambio en el color, mientras que la dosis de 500 ppm solamente aceleró el color. Cuando los tratamientos hechos en la primera fecha se repitieron en la segunda, el efecto fue algo más notable, nuevamente en forma especial en el color.

Para que el ethephon cause un efecto espectacular en la maduración al ser aplicado temprano, primero debe estimular el crecimiento (Crane, Marei y Nelson, 1970), cosa

que no sucedió con la tuna; en cambio, su efecto netamente madurante parece ocurrir cuando se aplica muy cerca de la época de cosecha, al tiempo de iniciarse el proceso endógeno de maduración.

Las dosis empleadas que surtieron algún efecto son bastante elevadas y no provocaron ningún daño, lo que refuerza el concepto de una ineficiente absorción de reguladores de crecimiento por la tuna, lo que señala un camino para futuros estudios.

CONCLUSIONES

1. La tuna tiene absoluta dependencia de la polinización y formación de semillas para el desarrollo del fruto, es decir, no tiene partenocarpia vegetativa.

2. El ácido giberélico puede reemplazar el rol del polen y de la semilla, produciéndose así frutos partenocárpicos. Con aspersiones de 50 ó 100 ppm de AG_3 en la antesis, y 35 y 70 días después, se puede obtener frutos de tamaño normal, pero con poco desarrollo del endocarpio carnoso.

3. En condiciones de campo se constató un efecto estimulante del AG_3 en 50 y 100 ppm en el crecimiento de frutos semillados,

CUADRO 3

EFECTO DE ASPERSIONES DE PRECOSECHA CON ETHEPHON EN EL TAMAÑO FINAL Y MADUREZ DE FRUTOS DE TUNA

Effect of preharvest sprays with ethephon on the final size and maturity of prickly pear fruits

Epoca de aplicación Time of spray	Dosis i.a. (ppm)	Peso weight (g/fruto)	Sólidos solubles sol. sol %	Color ¹
Enero/8 37 DAC ²	0	113,5 a	15,04 a	1,03 a
	100	111,8 a	15,46 a	2,20 a
	500	117,6 a	15,64 a	2,20 a
	1.000	109,0 a	15,32 a	2,20 a
Enero/25 21 DAC	0	119,13 a	15,98 ab	1,94 a
	100	116,86 a	15,43 b	2,00 a
	500	120,60 a	16,20 a c	2,33 ab
	1.000	119,66 a	16,86 c	2,66 b
Enero/3 y 25	0	117,95 a	15,67 a	2,06 a
	100	116,50 a	16,22 ab	2,20 ab
	500	118,30 a	16,02 ab	2,80 bc
	1.000	124,58 a	16,36 b	3,00 c

¹ Color: 1 = verde; 2 = verde amarillento; 3 = amarillo; 4 = anaranjado.
green yellowish green yellow light orange

² DAC = días antes de la cosecha - days before harvest.
En cada fecha de aplicación los valores de una misma columna seguidos por la misma letra no son significativamente diferentes ($P \leq 0,05$).

For each spraying date, values within a column followed by the same letter are not significantly different ($P \leq 0,05$).

atribuido a un déficit en el número de semillas.

4. El AG₃ tiene un ligero efecto retardante de la maduración, expresada como color de la piel.

5. El ethephon logra estimular la maduración cuando se usa en dosis elevada (1.000 ppm) 21 días antes de la cosecha normal y no afecta el tamaño del fruto.

RESUMEN

Para estudiar la cuaja y crecimiento de frutos de tuna se efectuaron dos ensayos con flores que diferían 15 días en edad. Se trabajó con flores polinizadas libremente y con flores emasculadas. Excepto los testigos, las flores fueron tratadas con ácido giberélico (AG₃) en dosis de 50 ó 100 ppm, y la mitad de los frutos recibieron repetición del tratamiento a los 35 y 70 días después de la antesis.

La cuaja del fruto sólo ocurrió cuando hubo formación de semillas o cuando se aplicó AG₃ a flores emasculadas; en este último caso, se alcanzó tamaño normal solamente en los casos de aspersiones periódicas, aunque nunca se obtuvo un desarrollo adecuado del endocarpio comestible. Los frutos desarrollados con semilla aumentaron su tamaño cuando se les asperjó AG₃ y, en general, mostraron un pequeño retraso en la madurez.

Para la regulación de la madurez de cosecha se empleó ácido cloroetilfosfónico (ethephon) en dosis de 100, 500 y 1.000 ppm, 37 y/o 21 días antes de la fecha normal de cosecha. Solamente la dosis más alta, aplicada en la última fecha, provocó un adelanto de la madurez y se obtuvo algo más eficiencia con tratamiento repetitivo.

Nuevos trabajos se están realizando para dilucidar las interrogantes que surgieron en esta etapa.

LITERATURA CITADA

- J. C., 1964. Growth substances in fluit set and development. Ann. Rev. Pl. Physiol. 15: 325.
- J. C.; N. MAREI y M. NELSON, 1970. Growth maturation of fig fruits stimulated by 2-chloroethylphosphonic acid. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 95: 370.
- G. F., 1974a. Fitormoni nell'allegazione e la crescita dei frutti. Riv. Ortoflorofruttic. Italia- 1-1-19.
- G. F., 1974b. Evaluación de reguladores de crecimiento para controlar la madurez de guindas. Inv. Agr. (Chile). 1 (4): 187-198.
- G. F., W. H. GRIGGS y G. C. MARTIN, 1972. Gibberellin induced parthenocarpy in Winter Nelis pear. Hort. Science 7: 559-561.
- G. F.; G. C. MARTIN y W. H. GRIGGS, 1972. Parthenocarpy and development in the pear: Extractable endogenous hormones in parthenocarpic and seeded fruit. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 97: 731-735.
- G. F.; W. H.; C. C. MARTIN y B. T. IWAKIRI, 1970. Effect of seedless versus seeded fruit development on flower bud formation in pear. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 95: 243-248.
- H. Y. MOTOMURA, Y. KONNO y T. HATAMAYA, 1969. Exogenous gibberellin as responsible for the seedless development of grapes. Tohoku J. Agric. Res. 20 (1): 1-18.
- LAVEE, S., 1960. Effect of gibberellic acid on seeded grapes. Nature 185: 395.
- LOZANO, M., 1958. Contribución al estudio e industrialización del nopal (*Opuntia* sp.). Tesis, Univ. Coahuila, México.
- MORETTINI, A., 1963. Frutticoltura generale e speciale. R.E.D.A., Roma (Italia). 692 pp.
- MÜLLER-THURGAU, H., 1898. Landw. I. B. Schweiz. 12: 135.
- NITSCH, J. P., 1950. Growth and morphogenesis of the Strawberry as related to auxin. Amer. J. Bot. 37: 1-19.
- NITSCH, J. P., 1958. Presence des gibberellines dans l'albumen immature du pommier. Bull. Soc. Bot. France. 105: 479-482.
- ORTIZ, J., 1966. Tunales, su aprovechamiento integral. Minist. Agr. Chile. Bol. Técn. Nº 19.
- TAMARO, D., 1968. Tratado de fruticultura. Edit. Gustavo Gili S. A., Barcelona (España). 939 pp.
- VISSER, T., 1955. Mededel. Direct. Tuinbouw. 18: 809.
- WEAVER, R. J. y S. B. MC. CUNE, 1959a. Response of certain varieties of *Vitis vinifera* to gibberellin. Hilgardia. 28: 297-350.
- WEAVER, R. J. y S. B. MC. CUNE, 1959b. Effect of gibberellin on seedless *Vitis vinifera*. Hilgardia. 29: 247-275.

CARACTERIZACION Y GENESIS DE LOS SUELOS DERIVADOS DE SEDIMENTOS DEL CONO PRINCIPAL DEL RIO MAIPO¹

GENETIC STUDY OF SOILS DERIVED FROM SEDIMENTS OF THE MAIN MAIPO RIVER ALLUVIAL FAN

RICARDO HONORATO², JUAN EDUARDO LIRA², JORGE NARBONA⁴

Departamento de Suelos. Facultad de Agronomía, Universidad Católica de Chile

SUMMARY

A genetic study of the soils developed from the main alluvial fan of the Maipo river was conducted in the Santiago basin. Nine soil pedons through three radial transects were studied.

No significative variations were found between soil characteristics at various distances from the cone apex and at different relative altitudes.

The soil showed an incipient development, with an ochric epipedon. Profile N° 4, presented an additional cambic horizon.

Chemical weathering of soil materials proved to be low due to a rather low activity of the physico-chemical environment. The maturity indexes were below 1.58.

The soils were classified, as Typic Xerorthent according to the Soil Taxonomy. An exception was profile 4 for which a new Sub-Group of Fluventic Xerochrept is proposed.

INTRODUCCION

En la Zona Central de Chile, descrita en un trabajo anterior (Honorato y Núñez, 1975), se encuentran tres unidades fisiográficas bien definidas: Cordillera de los Andes, Cordillera de la Costa y Depresión Intermedia. En la última se ubica la denominada Cuenca de Santiago, que se extiende por el norte hasta los cerros de Chacabuco, por el sur los cerros de Angostura y como límites este y oeste, la Cordillera de los Andes y la Cordillera de la Costa, respectivamente (Segerstrom, 1964; Lira *et al.*, 1970).

La Cordillera de los Andes está formada por rocas volcánicas y sedimentarias del Mesozoico y probablemente del Cenozoico inferior, producto de volcanes formados por una actividad andesítica (Falcon *et al.*, 1970). Zentovic *et al.* (1958) afirman que fue elevada a sus alturas actuales durante la fase

tectónica del Plioceno superior a Cuaternario inferior.

La Cordillera de la Costa está constituida de rocas volcánicas y sedimentarias Cretácicas y graníticas del Paleozoico y Mesozoico (Falcon *et al.*, 1970); Di Castri (1968) afirma que está formada por diorita andina del Cretáceo medio, flanqueada de formaciones del geosinclinal andino.

La Depresión Intermedia se habría formado a partir de fenómenos tectónicos combinados con procesos de erosión internos que conformaron depresiones y alturas, siendo parcialmente rellenada por sedimentos fluviales, fluvio-glaciales y glaciales, conformando los grandes Conos de deyección de los ríos Maipo y Mapocho (Segerstrom, 1964; Falcon *et al.*, 1970).

El hundimiento de la cuenca habría coincidido con la elevación de la Cordillera de los Andes y el relleno a depósitos cuaternarios.

¹ Publicación aprobada por el Comité Editor de la Facultad de Agronomía de la Universidad Católica de Chile con el número 114-D, Santiago, Chile.

² Fecha de recepción: 19 de mayo de 1977.

acarreados a través de tres períodos glaciales, interrumpidos por interglaciales con sus fases erosivas y de depósito (Karzulovic, 1958). Tricart y Michel (1963) concuerdan con el origen tectónico de la fosa de Santiago, la cual se habría producido desde el Plioceno hasta el Cuaternario más reciente, e indican la importancia de los períodos fríos y periglaciales en términos de sedimentación y relleno de la Cuenca, de los cuales derivan la construcción de los grandes conos de deyección.

En estos períodos se habría depositado el relleno grueso y la depositación de una delgada capa de hidrocineritas sobre los conos, que de acuerdo a Börgel (1966) habrían sido posteriormente retomados por el río Maipo, encontrándose evidencias en algunos sitios protegidos de la cuenca. En cuanto al relleno, indica que la cuenca constituyó el nivel de base local controlando el depósito de los materiales provenientes de la Cordillera andina durante el Cuaternario y probablemente fines del Terciario (Börgel, 1972), coincidiendo con Di Castri (1968).

En esta última unidad fisiográfica analizada se encuentran los suelos de mayor potencial agrícola de la provincia.

Los suelos han sido estudiados desde el punto de vista agrológico (Ministerio de Agricultura, 1958; IREN, 1964; CORFO, 1966) publicándose mapas de series y asociaciones de serie a escala 1:250.000. Consisten principalmente en descripciones morfológicas para establecer la extensión y límite de los suelos, careciendo de determinaciones analíticas, que permitan explicar los procesos de formación, evolución y, por lo tanto, su integración con la Taxonomía de Suelos.

Existen algunos trabajos dispersos con fines más específicos, realizados en el área donde aparece una información analítica más detallada (Moya y Paredes, 1974). Honorato y Núñez (1975) han iniciado el primer estudio sistemático de los suelos de las terrazas fluviales del río Maipo, donde se establecen las relaciones de los suelos, paisaje y geomorfología.

Considerando los grandes conos aluviales como las formas dominantes de la cuenca de Santiago (Honorato y Lira, 1974), se estudia el Cono Principal del río Maipo, para establecer el modelo que rige la variación de los suelos. Se caracterizan morfológica, física, química y mineralógicamente, de manera de establecer su génesis y grado de evolución pa-

ra integrarlos en la Taxonomía de Suelos USDA (1960-1967).

MATERIALES Y METODOS

Se seleccionó como área de estudio el "Cono Principal" del río Maipo, cuyo vértice se encuentra cercano al cerro Las Vizcachas (70° 32'). Tiene como límite por el sur el río Maipo (33° 36' - 33° 38'), coincidiendo por el norte con el Zanjón de la Aguada (33° 29') y los piedmont de Macul (NE), alcanzando por el este hasta Maipú y los cerros de Chena (figura 1).

Se ubicaron nueve pedones en base a los transectos en forma radial a partir del vértice (figura 1).

- Desde el vértice hasta el Zanjón de la Aguada, por el sector nororiente del cono.
- Desde el vértice hasta 10 kms al sureste de Maipú, por el centro del cono, y
- Desde el vértice hasta los cerros de Chena, por el sur del cono.

La descripción morfológica de los perfiles se realizó de acuerdo al Soil Survey Manual (USDA, 1951).

El análisis granulométrico se realizó por el método densimétrico de Bouyoucos (Black, 1965). El pH potenciométricamente en agua 1:2.5. La CIC se determinó por saturación con acetato de sodio a pH 8.2 y desplazamiento con acetato de amonio a pH 7.0, determinándose el Na⁺ por fotometría de llama, Richards (1954). Los cationes de intercambio por desplazamiento con acetato de amonio, Na⁺ y K⁺ determinados espectrofotométricamente, el Mg⁺⁺ complexométricamente con EDTA. El Ca⁺⁺ se determinó de acuerdo a Peech (1965), dados los altos valores obtenidos provenientes de la disolución de los carbonatos durante el análisis. Se asume una saturación del complejo de intercambio por cationes básicos, que por los pH del suelo y la presencia de carbonatos no implica un error superior a un 5%. El Ca⁺⁺ se obtiene deduciendo de la CIC la suma de Mg⁺⁺, Na⁺ y K⁺ de cambio. El nitrógeno total se determinó de acuerdo al método de Kjeldahl modificado (Black, 1965) y el carbono orgánico por el método de Walkley y Black modificado. La conductividad eléctrica se determinó en el extracto de la pasta saturada, USDA (1962). Los carbonatos por el método de Jackson, por neutralización ácida, USDA (1962). El hierro libre

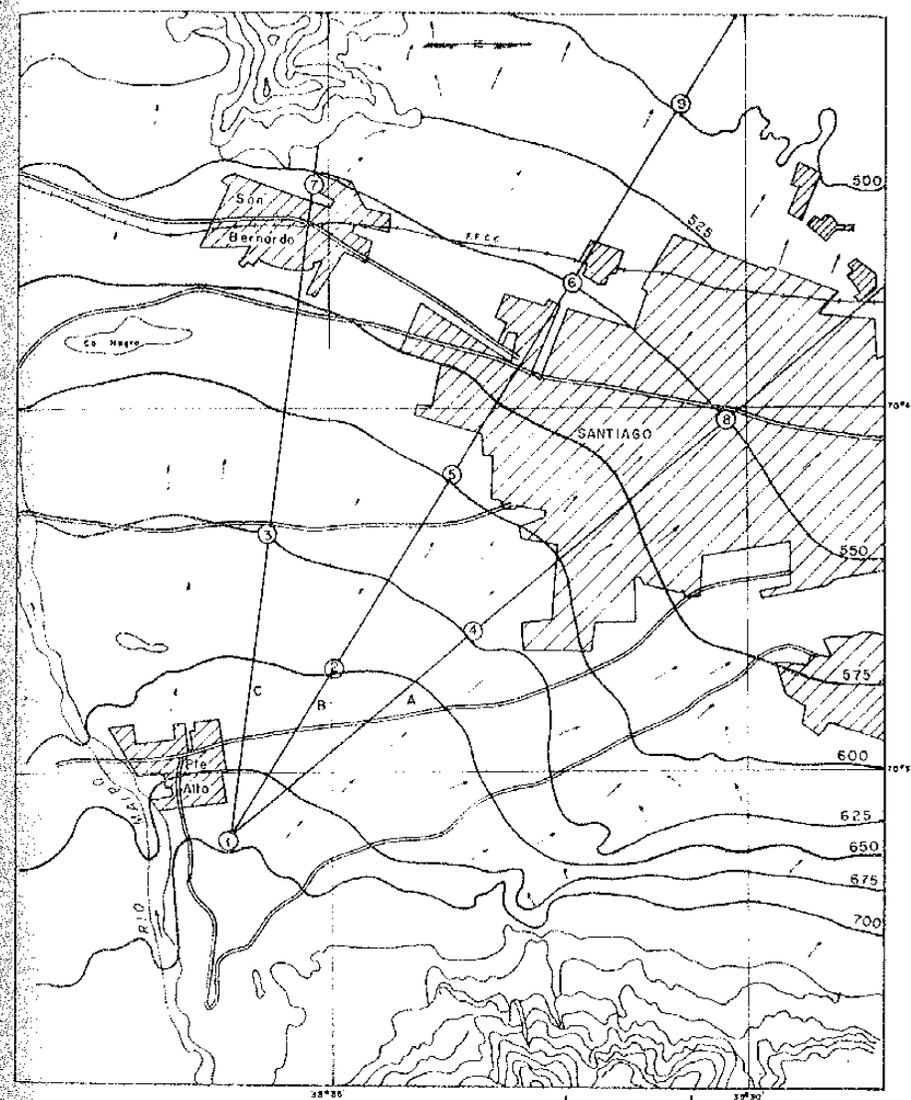


FIGURA 1

UBICACION GEOGRAFICA DEL AREA ESTUDIADA

Geographic location of the studied area

por el método de Duchaufour y Souchier (1968), modificado por Saavedra. El análisis morfológico y mineralógico de la fracción gruesa se realizó semicuantitativamente por observación con la lupa binocular de las fracciones finas (105-250 μ) y gruesa (250-1000 μ). Se determinaron los porcentajes de los grupos de minerales y el grado de redondeamiento y esfericidad como base para determinar la madurez mineralógica e interpretar

los procesos y de meteorización, transporte y depositación de los sedimentos.

El clima del área corresponde, de acuerdo a Papadakis (1973) a un clima mediterráneo templado con cuatro o más meses secos. La diferencia entre la temperatura media del mes más frío (8.0°C) y más cálido (20.6°C) es superior a 5°C y la precipitación anual es del orden de 400 mm (San Bernardo).

La vegetación nativa está formada por una

serie de árboles y arbustos tales como: *Maytenus-boaria* (Maitén), *Quillaja-saponaria* (Quillay), *Salix-chilensis* (Sauce amargo), *Peumus-boldus* (Boldo), *Lithraea-caustica* (Litre), *Acacia-caven* (Espino), *Criptocaria alba* (Peumo), *Proustia reticulata* (Olivillo) y *Proustia purgens* (Olivillo).

Los suelos existentes en el "Cono Principal" corresponden a la serie Santiago, según IREN (1964) con un perfil modal moderadamente profundo, textura moderadamente gruesa, buen drenaje externo e interno y con fases gravosa, delgada y moderadamente profunda.

CORFO (1966) ha descrito en el sector estudiado la serie Maipo, con tipos de textura fina y moderadamente fina y fases moderadamente profunda y profundas, bien drenado, delgado, moderadamente bien drenado, moderadamente profundo y profundo e imperfectamente drenado.

Moya y Paredes (1974) en Antumapu describen los suelos como correspondientes a la serie Santiago.

RESULTADOS Y DISCUSION

La ubicación de los pedones en el Cono Principal del río Maipo aparece esquemáticamente en la figura 1.

Considerando que no hubo diferencias significativas entre los distintos pedones en función de la distancia o de la cota, los resultados serán analizados en conjunto, sin distinción entre transectos.

MORFOLOGÍA Y GRANULOMETRÍA

Una descripción resumida de los pedones aparece en el cuadro 1. La morfología refleja la escasa evolución de los suelos, ya que no es posible observar horizontes de diagnóstico que manifiesten una alteración significativa o fenómenos de eluviación-iluviación.

El pedón Nº 4, sin embargo, posee características del perfil más complejas, con un suelo enterrado a los 60 cm. La estructura es más desarrollada, la incorporación de la materia orgánica más profunda, calificando para un horizonte cámbico incipiente. Estas características permiten asociar este suelo con los Inceptisoles descritos por Honorato y Núñez (1975) en las terrazas fluviales del Maipo en la parte sur del área.

Todos los pedones presentan un epipedón ócrico, que es común a los suelos derivados

de sedimentos fluviales de la cuenca de Santiago (Honorato, Núñez, 1975).

Los suelos son estratificados, presentándose discontinuidades litológicas desde los 20 cm (pedón 8) con la presencia de gravas y a menudo bolones y piedras. Sin embargo, se puede observar en el cuadro 2 que en las arenas, las fracciones finas, de 0.105-0.250 mm y/o media, 0.250-0.500 mm, son dominantes en todos los pedones, con una mayor proporción en los horizontes superficiales, de la fracción más fina de las arenas.

El contenido de arcilla muestra un comportamiento variable en todos los pedones, ligado a causas sedimentarias y no pedológicas. En los pedones 1, 5, 7, 8 y 9 disminuye marcadamente en profundidad, siendo gradual en el 2 y 6, sin tendencia en el 3 y 4, aunque en este último aumenta el contenido de arcilla en el II A₁ enterrado. La fracción arena generalmente aumenta en profundidad.

PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS

Las características físico-químicas de los suelos del cono son muy uniformes, variando dentro de rangos estrechos y siempre con un comportamiento similar.

Los valores de pH en agua y en el extracto de la pasta son más o menos similares, fluctuando, en el primer caso, entre 7.3 y 8.2, siendo comunes valores de 7.7 - 7.8. El pH está estrechamente relacionado con el contenido de carbonatos cuyas variaciones se reflejan en los valores de pH. De esta manera, los pH tienden a ser generalmente mayores en la superficie.

La conductividad eléctrica no excede de 2 mmhos/cm, fluctuando entre 0.41 y 1.76 mmhos/cm, con una ligera tendencia a disminuir en profundidad y con la distancia al vértice del cono.

El contenido de materia orgánica de los horizontes Ap en general es bajo, con la excepción del pedón 5, fluctuando entre 1.2 y 2.6%, para bajar a la mitad en los horizontes AC y C, donde por último disminuye gradualmente en profundidad. En el pedón 4, sin embargo, en el horizonte II A₁b enterrado, ésta se eleva a 1.2%, característico de los horizontes superficiales. Las relaciones C/N son inferiores a 15, indicando condiciones favorables a la mineralización de la materia orgánica.

Los valores de capacidad de intercambio de cationes son muy similares para todos los horizontes y para distintos pedones, variando

DESCRIPCIÓN RESUMIDA DE LOS PEDONES
Summarized pedons descriptions

Pedón	Hor.	Prof. cm	Color	Textura	Pedregosidad	Estructura	Raíces	HCl	Límite
1	Ap	0-20	7.5YR3/2	FAL	-	bsa, fm, md	x	x	AL
	A ₁ ²	20-30	7.5YR3/2	FA	g finas	bsa, f, md-ft	x	x	AL
	II AC	30-45	7.5YR3/2-10YR3/3	FA	g medias	bsa, m-f, db	x	x	CO
	II C ₁	45-68	7.5YR3/2-10YR3/3	F	g y b	-	x	-	CO
	III C ₂	68+	10 YR4/3.5	F	-	-	x	-	-
2	Ap	0-30	7.5YR3/2	FA	-	bsa, fm, md	x	x	CL
	II AC	30-50	7.5YR3/2	FAag	g finas y medias	bsa, f, db	x	x	CL
	III C	50+	10 YR3/3	Fag	-	grano simple	x	-	-
3	Ap	0-30	10 YR3/2	FL	-	bsa, f, db	x	x	CL
	II A ₁ ²	30-50	7.5YR3/2	AL	g finas	bsa, fm, md	x	x	AL
	II C ₁	50-67	7.5YR3/2	F	-	-	x	x	AL
	III C ₂	67+	7.5YR3/2-2.5Y4/0	ripio con matriz A	-	-	x	x	AL
	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	Ap	0-40	10 YR3/2	FAa	-	bsa, m, md	x	x	AL
	B ₂	40-55	10 YR3/2.5 (mot.)	FA	-	bsa, m, ft	x	x	AL
	C	55-60	10 YR3/2 (mot)	a	-	grano simple	x	x	AL
	II A ₁	60-75	10 YR3/2	A	-	bsa, m, ft	x	x	AL
	II AC	75-105	10 YR3/3	FAL	gravas y b	bsa, f, db	x	x	AL
III C	105+	10 YR3/1.5	(ripio)	-	-	-	-	-	-
5	Ap	0-20	7.5YR3/2	A	-	bsa, mf, db	x	x	AL
	AC	20-45	7.5YR3/2-3/4	FA	g	bsa, mf, db	x	x	CL
	II C	45+	5YR3/4	FA	g, p y b	bsa, mf, md	x	-	-
6	Ap	0-35	7.5YR3/2	FA	-	ba, mf, ft	x	x	AL
	II AC	35-65	10 YR3/3	FAa(m)	g y p	ba, m, md	x	x	AO
	II C	65-100	7.5YR3/2	Fag	g, p y b	-	x	-	-
7	Ap	0-24	7.5YR3/2	FA	-	bsa, mf, ft	x	x	CL
	II AC	24-50	7.5YR3/2	FAag	g y b	bsa, mf, md	x	x	CO
	III C	50-100	7.5YR3/2-	aFg	g y p	bsa, mf, db	x	-	AO
	-	100+	10 YR3/2	a	ripio	-	-	-	-

CUADRO 1 (Continuación)

Pedón	Hor.	Prof. cm	Color	Textura	Pedregosidad	Estructura	Raíces	HCl	Límite
8	Ap	0-20	7.5YR3/2	A	-	bsa, mf, md	xx	xx	AL
	II AC	20-60	7.5YR3/2	FAag	g, p, b	bsa, mf, md	xx	xx	CO
	III C	60-100 +	-	a	ripio	-	-	-	-
9	Ap	0-15	10 YR3/2	FA	-	bsa, mf, db	xx	xx	CL
	A ₁₂	15-30	10 YR3/2	FA	-	bsa, f, md a d	xx	xx	AL
	II AC	30-50	7.5YR3.5/2	FAa	-	bsa, mf, db	xx	xx	CL
	III C ₁	50-75	7.5YR3/2	Fag	-	grano simple	xx	xx	CL
	IV C ₂	75 +	-	a	g y p	-	-	-	-

Textura:
 A = arcilloso
 L = limoso
 a = arenoso

Raíces:
 x = escasas
 x x = comunes
 x x x = abundantes

HCl:
 x = débil
 x x = moderada
 x x x = fuerte

Pedregosidad:
 g = gravas
 p = piedras
 b = bolones

Límites:
 A = abrupto
 C = claro
 C = gradual
 L = lineal
 O = ondulado

Estructura:
 bsa = bloques subangulares
 ba = bloques angulares
 gr = granular
 m = medios
 f = finos
 md = moderada
 ft = fuerte

CUADRO 2

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

Particle size analysis

Hor.	Fracciones %							
	Arcilla 0.002	Limo 0.002 - 0.053	0.053-2	0.053 mm	Arenas			
				105	0.250	0.50	1	2
Ap	32	47	21	3.8	22.6	33.7	27.3	12.6
A ₁₂	30	41	29	17.9	35.2	23.3	16.5	7.1
II AC	29	29	42	8.0	28.3	32.3	24.4	7.0
II C ₁	24	30	46	9.6	27.5	31.3	23.9	7.7
III C ₂	16	13	71	3.9	18.0	29.4	33.2	15.5
Ap	29	47	24	17.1	47.5	20.5	11.3	3.6
II AC	24	25	51	9.6	31.3	5.4	35.7	18.0
III C	19	14	67	3.2	24.9	35.9	25.3	10.7
Ap	25	51	24	39.7	48.3	8.3	2.8	0.9
II A ₁₂	40	43	17	2.3	24.9	33.2	32.3	7.3
II C ₁	26	34	40	7.3	22.6	33.1	30.0	7.0
Ap	24	26	50	11.7	52.4	28.3	6.4	1.2
B ₂	27	36	37	13.8	61.1	18.5	5.2	1.4
C ₁	20	23	57	26.5	57.2	11.9	3.2	1.2
II A ₁	32	50	18	26.9	38.4	26.3	7.4	1.0
II AC	24	30	46	2.3	23.3	37.1	30.3	7.7
Ap	40	36	24	2.2	24.9	33.6	32.0	7.3
AC	29	37	34	12.9	28.0	24.6	25.1	9.4
II C	18	21	61	11.2	25.2	25.5	25.8	12.3
Ap	28	31	41	12.4	51.8	22.2	11.7	1.9
II AC	26	18	56	3.4	28.5	40.2	23.7	4.2
II C	20	13	67	8.3	28.9	26.9	20.7	5.2
Ap	34	39	27	-	20.7	42.2	29.2	7.9
II AC	25	21	54	5.0	20.9	30.0	32.6	11.5
III C ₁	10	10	80	2.1	12.7	28.4	38.8	18.0
IV C ₂	20	5	75	2.9	18.2	33.9	31.4	13.6
Ap	42	33	25	11.3	25.0	33.8	24.5	5.4
II AC	22	17	61	2.5	20.2	33.7	31.7	11.9
III C	18	10	72	3.1	15.9	29.1	35.7	16.2
Ap	32	36	32	26.1	43.7	19.0	9.0	2.2
A ₁₂	29	25	46	18.2	42.2	25.3	12.0	2.3
II AC	22	17	61	7.5	44.0	33.0	13.8	1.7
III C ₁	18	10	72	4.4	27.8	33.9	25.8	8.1
IV C ₂	18	9	73	3.1	29.4	31.3	25.0	11.2

de 9 y 24 me/100 g, estrechamente asociado al contenido de arcilla y secundariamente materia orgánica.

En todos los pedones se observa una clara preminencia del calcio entre los cationes de intercambio, alcanzando valores cercanos al 50% de la CIC, sin variar significativamente con la profundidad. Los valores del resto de los cationes básicos son bajos, no excediendo el 1.9 me/100 g; el Na de 1.14 me/100 g y finalmente, el K de 0.8 me/100 g.

Entre los cationes solubles, el calcio domina sobre los demás cationes en todos los pedones pudiendo alcanzar 15 me/litros en el horizonte Ap del pedón 1. Le sigue el sodio, que

puede alcanzar hasta 6 me/litros; posteriormente el magnesio, que no pasa de 2.7 me/litros, y, finalmente, el potasio, con valores inferiores de 0.6 me/litro.

Entre los aniones, los sulfatos son los más importantes, siendo superados en algunos horizontes de algunos pedones por los cloruros; finalmente, los bicarbonatos, con una clara tendencia a disminuir, a medida que aumenta la distancia al vértice del cono.

El hierro libre con un contenido inferior de 3% no presenta variaciones significativas en el perfil, lo que se traduce por los colores pardo oscuros relativamente uniformes en todos los perfiles y con la ausencia de fenómenos de

CUADRO 3
CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS
Physico chemical characteristics

Hor.		pH H ₂ O (1:2.5)	Extrac.	C.E. mmhos/cm	M.O. %	C.O. %	N. %	C/N	Cationes Ca++ Mg++		K+	Aniones solubles			CO ₃ %	Fe ₂ O ₃ libre %	CIC	Cationes intercambio			
									Ca++	Mg++		SO ₄ =	Cl-	H ₂ CO ₃ -				Ca++	Mg++ me/100 g	Na+	K+
Pedón 1	Ap	8.0	7.2	1.78	2.2	1.26	0.12	10.5	15.5	2.06	0.1	14.5	8.52	4.39	4.49	2.6	17.0	14.2	1.38	1.08	0.28
	A ₁₂	8.0	8.1	1.00	1.9	1.13	0.09	11.5	7.5	1.50	0.1	8.5	5.09	3.10	3.53	2.3	18.2	15.2	1.17	1.00	0.23
	II AC	7.3	7.7	1.58	1.4	0.83	0.06	13.4	11.7	2.20	0.1	10.4	12.8	2.78	0.87	3.0	18.5	16.0	1.30	0.92	0.23
	II C ₁	7.7	7.9	1.70	1.2	0.69	0.05	14.7	12.6	2.72	0.1	12.3	13.7	2.94	0.69	3.0	17.2	14.6	1.51	0.85	0.23
	I C ₂	8.1	7.9	1.30	0.8	0.44	0.03	13.8	8.5	1.80	0.1	9.3	7.77	3.37	1.10	2.7	16.2	13.1	1.88	1.08	0.18
Pedón 2	Ap	8.0	8.0	1.12	1.8	1.03	0.10	10.2	8.0	1.45	0.1	10.4	4.56	3.10	3.80	2.9	17.2	14.6	1.39	1.00	0.24
	II AC	7.7	7.8	1.30	1.1	0.65	0.09	6.2	9.2	1.81	0.1	11.1	7.98	2.41	0.96	3.1	16.3	13.9	1.09	0.94	0.27
	III C	7.6	7.8	1.10	0.6	0.34	0.03	10.6	8.8	2.16	0.1	11.5	8.09	2.14	0.89	2.7	16.8	14.6	1.01	0.94	0.18
Pedón 3	Ap	8.2	8.2	0.70	1.6	0.95	0.07	15.3	4.8	0.85	0.1	5.8	2.95	2.94	5.24	2.4	15.5	13.5	0.89	0.84	0.25
	II A ₁₂	8.0	8.1	0.75	1.6	0.95	0.07	13.6	6.5	0.94	0.1	-	5.41	-	3.41	2.5	19.3	16.7	1.39	1.00	0.18
	II C ₁	8.1	8.0	0.80	0.9	0.53	0.05	10.6	5.9	0.85	0.1	5.6	4.02	2.51	1.07	2.6	16.3	13.8	1.44	0.82	0.19
	III C ₂	8.1	8.1	1.30	0.7	0.41	0.03	12.0	13.6	9.30	0.1	14.1	8.31	3.05	1.53	2.5	16.0	13.3	1.42	1.00	0.24
Pedón 4	Ap	7.8	8.0	1.23	1.2	0.69	0.04	15.0	10.1	0.86	0.3	9.4	5.63	3.59	4.28	2.5	12.2	9.8	1.15	0.82	0.40
	B ₂	8.1	8.1	1.10	0.9	0.50	0.04	10.6	8.0	1.35	0.3	8.8	5.63	2.84	3.77	2.5	12.2	10.0	1.93	0.87	0.44
	C	8.2	7.9	0.95	0.6	0.33	0.03	10.3	6.7	1.06	0.3	7.7	5.63	2.41	3.05	2.5	10.0	8.5	0.31	0.82	0.36
	II A1b	8.0	8.0	1.20	1.3	0.75	0.07	9.8	8.6	1.49	0.3	10.1	5.84	2.67	3.44	2.1	17.2	15.5	0.79	0.37	0.56
	II AC	7.9	7.6	1.05	8.8	0.49	0.06	8.3	7.2	0.92	0.2	8.1	6.48	2.67	0.56	3.1	14.5	12.0	1.02	0.87	0.51
Pedón 5	Ap	7.6	7.5	1.00	4.5	2.61	0.26	9.8	7.2	1.21	1.3	4.9	3.70	7.07	3.21	2.6	24.0	20.9	1.77	0.60	0.74
	AC	7.4	7.9	1.58	0.9	0.53	0.05	10.1	11.8	1.90	0.4	9.7	13.1	3.21	0.96	2.9	15.8	13.0	1.47	0.74	0.52
	II C	7.5	7.5	1.45	0.5	0.30	0.02	15.0	11.3	1.81	0.2	10.2	12.1	2.62	0.86	2.5	14.3	12.1	1.09	0.76	0.27
Pedón 6	Ap	7.8	8.1	1.50	1.9	1.09	0.10	10.6	11.9	2.09	0.6	9.5	14.7	4.12	4.91	2.4	14.5	11.2	1.58	1.14	0.57
	II AC	7.7	7.7	1.10	0.8	0.45	0.04	10.2	7.2	1.13	0.1	9.3	6.16	2.62	1.02	2.7	16.0	13.8	0.97	0.98	0.23
	II C	7.7	7.9	1.10	0.7	0.42	0.04	10.4	7.7	0.73	0.1	8.0	8.31	2.67	1.34	2.5	17.8	16.3	0.95	0.38	0.17
Pedón 7	Ap	7.8	7.9	0.85	2.5	1.46	0.12	12.1	8.4	0.83	0.3	5.7	1.34	6.43	4.08	2.1	17.3	14.9	0.96	0.72	0.59
	II AC	7.9	7.8	0.55	1.2	0.69	0.05	13.0	3.3	0.59	0.1	3.4	2.41	3.48	0.96	2.7	17.8	16.4	1.21	0.82	0.31
	III C ₁	8.1	7.7	0.41	0.4	0.25	0.02	10.8	0.9	0.16	0.1	4.6	1.02	2.41	0.87	2.7	8.8	6.5	1.10	1.00	0.12
	IV C ₂	7.7	7.7	0.57	0.8	0.45	0.04	9.5	2.2	0.34	0.1	5.1	1.34	3.32	0.96	2.6	16.0	13.8	0.99	1.05	0.21
Pedón 8	Ap	7.8	8.2	0.67	2.6	1.52	0.11	13.4	5.9	1.45	0.4	3.3	1.13	6.43	2.87	2.7	22.5	19.7	1.38	0.61	0.78
	II AC	7.9	7.6	0.55	1.0	0.59	0.04	14.0	4.2	0.59	0.1	4.7	2.73	3.91	0.72	2.5	17.0	14.6	1.32	0.72	0.33
	III C	7.7	7.8	0.50	0.4	0.24	0.03	6.9	1.8	0.31	0.1	3.1	1.34	3.05	0.95	2.6	15.7	14.3	0.49	0.78	0.16
Pedón 9	Ap	8.1	8.4	1.20	2.5	1.46	0.11	12.9	9.0	1.76	0.4	9.3	5.41	4.82	4.14	2.2	15.8	13.2	1.07	1.00	0.53
	A ₁₂	8.1	8.3	0.77	1.5	0.87	0.06	13.3	5.3	0.91	0.2	5.7	5.09	3.10	2.13	2.3	14.0	11.7	1.06	0.90	0.36
	II AC	7.8	7.2	0.55	0.7	0.44	0.03	13.6	5.4	1.26	0.2	5.6	7.23	3.05	0.68	2.7	14.3	12.1	0.83	0.78	0.50
	III C ₁	7.4	7.4	0.65	0.6	0.34	0.03	11.7	2.9	0.53	0.1	5.9	2.41	1.05	1.07	2.6	14.3	11.4	1.56	0.96	0.32
	IV C ₂	8.0	7.8	0.76	0.6	0.34	0.02	14.7	3.9	0.63	0.1	6.1	2.48	2.14	1.08	2.7	13.5	11.4	1.01	0.87	0.26

eluviación de arcillas, donde el hierro migra asociado a las arcillas (Honorato *et al.*, 1974).

Los carbonatos muestran un comportamiento similar al descrito por Honorato y Núñez (1975) en Entisoles e Inceptisoles derivados de sedimentos fluviales del Maipo, al sur de San Bernardo; con un contenido relativamente alto de los horizontes Ap para disminuir bruscamente a los 20-40 cm y posteriormente

en forma gradual. Este comportamiento estaría ligado al aporte de carbonatos por el agua de riego que tienden a una mayor profundización cuando las texturas son más arenosas.

MORFOSCOPIA Y MINERALOGÍA DE LAS ARENAS

Desde el punto de vista morfoscópico, los granos se presentan débilmente redondeados.

mayor el grado de redondeamiento para la fracción gruesa. Los granos son subangulares con índices de redondeamiento de 0.23 a 0.54 considerados como relativamente buenos para sedimentos de transporte fluvial.

La esterilidad muestra un comportamiento similar al del redondeamiento, con valores que oscilan entre 0.35 y 0.56, correspondientes a arcillas subesféricas.

Al establecer la relación de redondez y esfericidad promedio por perfil versus posición especial dentro del cono, no se observa una relación directa entre distancia al vértice del cono y estos parámetros. Ello puede atribuirse a que las partículas tienen sus características morfoscópicas dadas por el transporte, antes de la formación del cono y que la distancia entre el ápice y la base sería muy corta como

para dar una gradación de redondeamiento y esfericidad (Narbona, 1975).

La mineralogía de la fracción arena es extremadamente uniforme en el cono; igualmente, cada perfil considerado individualmente no presenta variaciones significativas entre los distintos horizontes.

Existen, sin embargo, diferencias en la composición mineralógica entre las dos fracciones observadas: la fracción gruesa está compuesta fundamentalmente por fragmentos de rocas volcánicas, cuarzo, feldespatos y fragmentos de granitoides, y la fracción fina por cuarzo, plagioclasas, feldespatos, anfíboles y biotita.

Considerando los resultados de Honorato y Núñez (1975) y Camus (1965), el índice de madurez de los sedimentos calculado de acuerdo a la fórmula propuesta por Pettijhon (1963) es baja, fluctuando entre 0.60 y 1.58. Estos valores son característicos de sedimentos que han estado corto tiempo expuestos a la meteorización y/o a condiciones ambientales poco favorables a la alteración, viéndose poco alterada la superficie de los fragmentos de rocas y minerales. La madurez mineralógica no tiene una tendencia determinada en el cono, a excepción de los perfiles 2 y 4, cuyos índices son los más altos, coincidiendo el último con el perfil más evolucionado del cono.

FENÓMENOS PEDOGENÉTICOS

La intensidad con que se expresan los fenómenos pedogenéticos es poco notoria, ya que no se observa eluviación o iluviación significativa ni alteración marcada, ya que el medio ambiente fisicoquímico es poco favorable a los fenómenos de alteración.

Coincidiendo con los resultados de Honorato y Núñez (1975), el fenómeno de calcificación superficial de los suelos por el aporte de carbonatos por el agua de riego es un fenómeno generalizado en los suelos del Cono. Este proceso afecta fundamentalmente los pri-

meros 50 cm del perfil, con un aumento del contenido de carbonatos de hasta un 5% re-partido en forma difusa.

La incorporación de la materia orgánica es significativa en los primeros 50 cm del perfil disminuyendo gradualmente en profundidad. El desarrollo estructural es pobre, los límites entre los distintos horizontes son marcados y los colores relativamente uniformes en todo el perfil, con la única excepción del pedón 4, en el cual se aprecia un relativo mayor grado de evolución.

CLASIFICACIÓN

Desde el punto de la clasificación, dadas las características de los suelos y del clima, se han integrado al Subgrupo de los Typic Xerorthent. Se exceptúa el pedón 4, que constituye un intergrado hacia los Inceptisoles, que se manifiesta por un horizonte cámbico, que presenta un mayor desarrollo estructural y de color (Honorato y Núñez, 1975). Sin embargo, como la distribución irregular de la materia orgánica en el perfil no se considera a nivel de un Subgrupo entre los Xerochrept, se sugiere la creación de un Subgrupo Fluventic Xerochrept para asimilar este pedón.

CONCLUSIONES

El estudio de los suelos del Cono Principal del río Maipo no mostró tendencias claras en la repartición de los suelos en base a la distancia del vértice del Cono o de la cota.

Las características de redondeamiento, esfericidad y madurez mineralógica mostraron igual comportamiento, lo que permite deducir que estas características se expresaron antes de la formación del Cono.

Los suelos, en general, presentaron poco desarrollo, calificando, en general, como Typic Xerorthent.

RESUMEN

En la Cuenca de Santiago se realizó un estudio genético de los suelos derivados de los sedimentos del Cono Principal del río Maipo. Se estudiaron nueve pedones siguiendo tres transectos dispuestos en forma radial a partir del vértice.

Los suelos no mostraron variaciones significativas en sus características, en función de la distancia del vértice del Cono o de la cota.

Los suelos se caracterizan por un escaso desarrollo, con la presencia de un epipedón ócrico, y en el caso del pedón 4, de un horizonte cámbico adicional.

El grado de meteorización química de los materiales del suelo es poco marcado, dado la escasa agresividad del ambiente fisicoquímico; los índices de madurez fueron inferiores a 1.58.

Los suelos se clasificaron, de acuerdo a la Taxonomía de Suelos, como Typic Xerorthent, con la excepción del pedón 4, para el cual se propone la creación de un Subgrupo Fluventic Xerochrept.

LITERATURA CITADA

- C. A., 1965. Methods of Soil Analysis. Vol. II, Agronomy Nº 9, Amer. Soc. Agr. Inc. Publ., Madison, Wisconsin, USA.
- R., 1966. Geomorfología cuaternaria de la Cuenca de Santiago. Estudios Geográficos, pp. 41-50.
- R., 1972. Cuaternario de la Cuenca de Santiago. Evidencias geomorfológicas para un intento de datación, 10 pp.
- J. F., 1965. Relaciones genéticas entre los sedimentos de hierro, Desnue Norte y Cristales. Provincia de Coquimbo. Tesis de grado. Universidad de Chile.
- , 1966. Estudio Agrológico. Reconocimiento de Suelos de la provincia de Santiago.
- CASTRO, F., 1968. Biologie de l'Amérique Australe. Vol. IV. Edit. du Centre Nat. de la Recherche Scientifique, 151 Quai Anatole France, Paris.
- CHAMPOUR, Ph. et SOUCHIER, B., 1966. Note sur la méthode d'extraction combinée de l'aluminium et du fer libre dans les sols. Sci. du Sol 1: 18-31.
- CASTILLO Y VALENZUELA, 1970. Hidrología de la Cuenca de Santiago. IIG Publ. especial Nº 1.
- HONORATO, R., M. MILLON y J. E. LIRA, 1974. Estudio de la génesis de los suelos graníticos en el Cono de Constitución. Ciencia e Inv. Agr. Vol. 1 Nº 2.
- HONORATO, R. y J. E. LIRA, 1974. Estudio geomorfológico preliminar de la Cuenca de Santiago. Departamento de Suelos, Facultad de Agronomía, Universidad Católica de Chile (trabajo no publicado).
- HONORATO, R. y R. NÚÑEZ, 1975. Características evolutivas de los suelos derivados de sedimentos fluventes del río Maipo. Ciencia e Inv. Agr. Vol. 2 Nº 3-4.
1964. Suelos. Descripciones Proyecto Aerofotogramétrico. Chile/OEA/BID. IREN-CORFO, Publicación Nº 2.
- KARZULOVIC, J., 1958. Sedimentos cuaternarios y aguas subterráneas en la Cuenca de Santiago. Instituto Geológico, Universidad de Chile, Publicación Nº 10.
- MINISTERIO DE AGRICULTURA, Chile, 1958. Agricultura Técnica, Vol. 18 Nº 2.
- MOYA, J. y PAREDES, R., 1974. Caracterización de la Serie Santiago en el predio Antumapu. Tesis de Grado, Departamento Ingeniería y Suelos, Escuela de Agronomía, Universidad de Chile.
- NARBONA, J., 1975. Estudio genético de los suelos derivados de sedimentos del Cono Principal del río Maipo (Tesis Ing. Agr., mimeo). Departamento de Suelos, Escuela de Agronomía, Universidad Católica de Chile.
- PAPADAKIS, J., 1973. Reconocimiento e Investigación de los suelos. Chile, Regiones ecológicas de Chile. Informe Técnico Nº 3, FAO, Roma, pp. 19.
- PEECH, 1965. Exchange Acidity. In Black, C. (Ed.) Methods of Soil Analysis, Vol. II.
- PETTIJHON, F. J., 1963. Rocas sedimentarias. Ed. Eudeba, Buenos Aires.
- RICHARDS, L. A. (editor), 1954. Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils. U.S.D.A. Handbook Nº 60, Washington D.C.
- SEGERSTROM, K., 1964. Quaternary Geology of Chile. Brief Outline. Geol. Soc. Amer. Bull, Vol. 75, p. 157-170.
- TRICART, J. et MICHEL, M., 1963. Informe sobre la geomorfología de la Cuenca de Santiago y sus relaciones con las aguas subterráneas. I.I.G. (mimeo).
- U.S.D.A., 1960. Soil Classification (A Comprehensive System) 7th Approximation, pp. 265.
- U.S.D.A., 1951. Soil Survey Manual. Handbook Nº 18, 503 pp illus. Washington D.C.
- U.S.D.A., 1967. Supplement to Soil Classification System (7th Approximation), Washington D.C., pp. 207.

MODELO SIMULATIVO PARA LA PREDICCIÓN DE LA INFILTRACIÓN DEL AGUA EN EL SUELO

A SIMULATION MODEL TO PREDICT WATER INFILTRATION INTO THE SOIL

LUIS A. GUROVICH R.

Departamento de Suelos, Escuela de Agronomía, Universidad Católica de Chile

SUMMARY

A model to predict water flow in the soil under the special conditions of one-dimensional, vertical unsteady infiltration into soil, based on the flow equation is presented. The model is implemented with a simulation program in CSMP language (Continuous System Modeling Program), that enables to calculate the soil moisture profile, the infiltration rate and the cumulative infiltration on the soil profile.

The simulation program requires the initial soil moisture profile (it can be non uniform), the water content and hydraulic conductivity under saturated conditions, the $K(\theta)$ and $\phi(\theta)$ functions (not considering hysteretic phenomena), the thickness of soil layers and the total profile depth.

The results obtained through the simulation technique are in good agreement with results obtained under actual field experimental conditions, in three soils of the Central Zone, in Chile. The effect of laboratory and field conditions, to measure the values of some essential parameters needed on the simulation program, is discussed:

The characteristics of the simulative technique to predict the infiltration process, enables to obtain good results on stratified soils with non uniform initial soil moisture profiles, and is independent on the natural variability of soils, because the parameters needed for the simulation program can be measured under constant conditions.

INTRODUCCION

La principal teoría que describe el flujo de agua en suelos no saturados se basa en una ecuación diferencial parcial no lineal que es difícil de resolver, aun para condiciones de borde comparativamente simples. Chiam y Powers (1972) presentan algunas soluciones para esta ecuación, conocida comúnmente con el nombre genérico de "ecuación de flujo".

Para comprender los principios y las soluciones de problemas de flujo de agua en condiciones no saturadas en el suelo, se requiere un conocimiento extenso y profundo de Matemáticas, Física y Computación; sin em-

bargo, existen algunos enfoques, como la simulación de procesos específicos de flujo de agua en el suelo, en los cuales no se requiere un conocimiento avanzado de matemáticas o programación computacional.

La ecuación diferencial parcial, que describe el flujo de agua en suelos no saturados es:

Ecuación 1

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \frac{\partial K}{\partial z} + \nabla \cdot (K \nabla \phi)$$

en que K es la conductividad hidráulica del suelo, ϕ es la succión o tensión con que está

retenida el agua, θ es el contenido volumétrico de agua del suelo, Z es la profundidad del perfil de suelo considerado, a partir de la superficie y t representa el tiempo que transcurre desde que comienza a considerarse un proceso de flujo de agua en el suelo.

La ecuación 1 corresponde a la ecuación de continuidad de Richards (1954), en la que se ha sustituido la ley de Darcy para el caso del flujo de agua en suelos no saturados (Hillel, 1971).

Al estudiar el caso específico de la infiltración del agua en el suelo, durante el riego, el flujo corresponde a un movimiento de agua en condiciones no saturadas con una dirección vertical y sentido hacia abajo. Si se supone que las relaciones entre K y θ y entre ϕ y θ no presentan fenómenos histeréticos, sino que son funciones biunívocas, en este caso específico, la ecuación 1 se transforma en:

Ecuación 2

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \frac{\partial K}{\partial Z} + \frac{\partial}{\partial Z} \left(\frac{K \partial \phi}{\partial Z} \right)$$

Cuando la ecuación 2 puede ser resuelta para condiciones iniciales y de borde específicas, es posible obtener una descripción del la profundidad Z y el tiempo t .

Existen varias soluciones para la ecuación 2, destacándose entre ellas la solución numérica de Hanks y Bowers (1962), basada en el uso de diferencias finitas, que conducen a un sistema de ecuaciones lineales, que se resuelven con el auxilio de un programa de computación comparativamente sencillo. Esta solución permite resolver el problema en la infiltración unidimensional en suelos estratificados u homogéneos, en los cuales no es necesario que exista un contenido inicial de agua uniforme.

Philip (1957) y Parlange (1971), han presentado soluciones analíticas a la ecuación 2, que se adaptan a situaciones de tiempos respectivamente pequeños o grandes de duración del proceso de infiltración; sin embargo, estas soluciones requieren que el suelo sea uniforme en contenido inicial de agua y no sea estratificado. También, en este tipo de soluciones analíticas, debe emplearse programas de computación que permitan resolver las múltiples integraciones de funciones, que consti-

tuyen la solución analítica de la ecuación de flujo.

Se presenta en este trabajo un modelo simulativo que permite resolver la ecuación de flujo, para el caso de la infiltración vertical hacia abajo, en suelos heterogéneos, de contenidos de agua iniciales no uniformes. Este modelo simulativo, basado en un modelo de compartimientos o estratas diferenciales, es implementado con un programa de computación que entrega como resultado el perfil de humedad del suelo después de un tiempo t de iniciado el proceso de infiltración, la velocidad de infiltración y la infiltración acumulada.

EL MODELO

Al dividir el perfil del suelo en cierto número de estratas, que pueden ser de igual o diferente grosor unas de otras, el flujo de agua entre estratas consecutivas puede ser descrito como un conjunto de ecuaciones diferenciales ordinarias, cuya resolución se aproxima a la solución de la ecuación 2.

La figura 1 muestra esquemáticamente estas estratas, y para el caso de la infiltración unidimensional desde la superficie, en un suelo comparativamente seco, que se está regando, el movimiento del agua será hacia abajo. Las estratas consecutivas se designan por e , e , en que los subíndices s , m e i corres-

ponden a superior, medio e inferior, respectivamente. El contenido de agua en cualquier momento en cada estrata será θ_s , θ_m y θ_i .

el centro geométrico de estas estratas, los puntos P, Q y R estarán ubicados a las profundidades Z_s , Z_m y Z_i cm desde la superficie del suelo, en que $Z = 0$; en la descripción del modelo, cada estrata tiene un grosor de 1 cm y una superficie de 1 cm².

Definiremos como potencial total del suelo en cualquier punto de éste, a la resultante de dos componentes

Ecuación 3

$$h = \phi - Z$$

en que h es el potencial total, ϕ el potencial de presión negativo o potencial matricial y Z es la profundidad bajo la superficie del suelo. Debe notarse aquí que $\phi = f(\theta)$ y este potencial de presión negativa puede ser medido

con tensiómetros, o estimado a partir del contenido de agua, θ si se conoce la función, comúnmente llamada "curva característica de humedad".

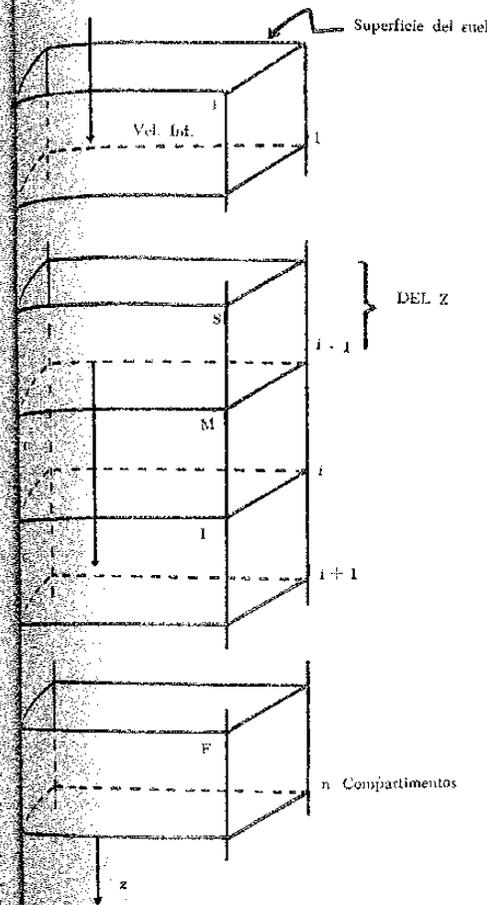


FIGURA 1

PERFIL DEL SUELO

Soil profile

el potencial total en los puntos P, Q y R designan como h_s , h_m y h_i , y se estudia la velocidad que fluya agua entre e y e . De acuerdo a la ley de Darcy, el flujo desde P (o viceversa, de Q a P) será

Ecuación 4

$$q_{s,m} = -K(\theta) \frac{h_m - h_s}{Z_m - Z_s}$$

El signo negativo indica que si el flujo es hacia abajo, $q_{s,m}$ será un valor positivo (infiltración) y será negativo cuando sea en sentido contrario (evaporación).

Tal como en el caso de ϕ , la conductividad hidráulica K depende del contenido de agua del suelo, y como éste puede ser diferente en las estratas e y e , consideraremos $K(\theta)$ como

Ecuación 4

$$K(\theta) = \frac{K(\theta_s) + K(\theta_m)}{2}$$

Como el grosor de las estratas, Z , se hizo igual a 1 cm:

Ecuación 6

$$Z_m - Z_s = Z_i - Z_m = \Delta Z$$

El cambio en el contenido de agua de la estrata e ($(\Delta \theta)_m$) está representado por $(\Delta q)_m$, que es la diferencia entre el flujo que entra en e y el flujo que sale de e (ecuación de continuidad de Richards). Siendo e de volumen unitario $(\Delta q)_m = (\Delta \theta)_m$

Ecuación 7

$$(\Delta \theta)_m = (\Delta q)_m = + q_{s,m} - q_{m,i}$$

Si ΔZ fuera diferente de 1 cm, o la superficie de la estrata diferente de 1 cm², la estrata no tendría un volumen unitario y $(\Delta \theta)_m$ sería:

Ecuación 8

$$(\Delta \theta)_m = \frac{(\Delta q)_m}{V} = \frac{(\Delta q)_m}{A \cdot z}$$

en que A = superficie de la estrata.

$(\Delta \theta)$ no es una constante y varía en el tiempo, por lo que debe estudiarse esta variación en el contenido de agua. Si se conoce (θ) en la estrata e , para el comienzo del proceso de infiltración ($t = 0$), se obtiene (θ) para e y para cualquier tiempo t como:

Ecuación 9

$$(\theta)_t = (\theta)_{t=0} + \int_{t=0}^t (\theta) dt$$

Salvo el caso de la estrata más superficial y de la estrata más profunda, cualquier otra estrata puede ser considerada como e .

Conociendo el valor de (θ) , es posible obtener el perfil de contenido de agua del suelo en cualquier tiempo t después de iniciado el proceso de infiltración, calcular la velocidad de infiltración y computar la infiltración acumulada en el suelo.

MATERIALES Y METODOS

El modelo de simulación propuesto se implementa con un programa de computación en lenguaje CSMP (Continuous System Modeling Program); este programa permite la solución de la ecuación 9.

El CSMP S/360 (Continuous System Modeling Program, sistema S/360) está orientado a la construcción y resolución de problemas que representan modelos matemáticos continuos. Este sistema dispone de un conjunto de sentencias que permiten que los problemas sean preparados directamente, ya sea desde una representación de un diagrama de flujo o desde un conjunto de ecuaciones diferenciales ordinarias.

El programa provee un conjunto básico de bloques fundamentales, con los cuales los componentes de un modelo continuo pueden ser representados, y además acepta sentencias de FORTRAN IV, S/360, que permiten al usuario manejar problemas de mayor complejidad.

El programa dispone, además, de sentencias de "control modelo", que permiten al usuario controlar; la entrada y salida de datos; las iteraciones del modelo; tipos de integraciones y a la variable independiente.

En la entrada y salida de datos, el programa dispone de dos tipos de formatos para impresión de datos de salida:

- a) un "formato tabular", que permite imprimir el nombre de la variable y su valor, a incrementos de tiempo predeterminados;
- b) un "formato gráfico", que permite imprimir valores de una variable en función de valores de la variable dependiente (tiempo u otra designada por el usuario) y los puntos que representan estos valores en un sistema de eje de coordenadas.

El sistema permite la ejecución de varias "corridas" de un mismo modelo, para diferentes bloques de datos, que impliquen diferentes condiciones de control del modelo.

CONFIGURACIÓN

- Sistema : CSMP S/360
- Disponibilidad : IBM-360/40 U. de Chile Sistema operativo OS/360 disco recide CSMP MPS 001.
- Memoria usada : Aprox. 102 KBYTE CSMP
- Tiempo de proceso : Es directamente proporcional a la cantidad de agua que el suelo vaya a infiltrar e inversamente proporcional al flujo neto de agua en el suelo.

PROCEDIMIENTO

El procedimiento de llamado del programa CSMP es por medio de tarjetas, siguiéndose la siguiente secuencia (para el caso de la U. de Chile):

```
id-usuario JOB id-programa,
CSMP EXEC CSMP 360
SYSIN DD N°
```

El modelo CSMP que se desea ejecutar debe estar básicamente construido en la siguiente secuencia:

```
Sentencias que representan el modelo
Sentencias que representan datos RUN1 y
permanentes
END
```

sentencias que representan datos RUN2

JOB

SENTENCIAS DE CONTROL DEL MODELO

El conjunto de sentencias que permiten controlar las condiciones con que el modelo se ejecutará, para el caso de infiltración en el suelo Maipo, por ejemplo, es el siguiente:

Una sentencia que permite determinar el modelo usará el método de integración Simpson:
METHOD SIMP.

Una sentencia que determina que la variable INFACU será impresa en "formato gráfico" versus la variable TIEMP. Además, incluye en el plot la variable VELINF tabulada en TIEMP.

La sentencia que permite escribir el encabezamiento del proceso, para la impresión de variables en forma tabular es:
TABLE INFILTRACION UNIDIMENSIONAL EN SUELO MAIPO.

La sentencia que permite imprimir un encabezado para el plot del punto 2 es:
TABLE INFILTRACION ACUMULADA EN SUELO MAIPO.

El conjunto de sentencias que permite generar las tablas que contienen pares de datos de contenido volumétrico de humedad en sujeción, para cada una de las estratas (seis en este caso) son:

```
FUNCTION THEAD 1 = ... pares de valores estrata 1 ...
FUNCTION THEAD 2 = ... pares de valores estrata 2 ...
FUNCTION THEAD 6 = ... pares de valores estrata 6 ...
```

El conjunto de sentencias que permite imprimir las tablas que contienen pares de datos de contenido volumétrico de humedad y conductividad hidráulica, para cada una de las estratas (seis) son:

```
FUNCTION CAPK 1 = ... tabla estrata 1 ...
FUNCTION CAPK 2 = ... tabla estrata 2 ...
```

FUNCTION CAPK 6 = ... tabla estrata 6 ...

En cada uno de estos conjuntos de sentencias, la aparición de ... indica que la tabla continúa en la tarjeta siguiente.

Es importante señalar que para el caso de ambas funciones, siempre deben incluirse las seis sentencias FUNCTION respectivas; aunque el problema considere un menor número de estratas, puede asignarse cualquier valor a las que sobren, ya que no serán usadas por el modelo.

6. La sentencia que permite ingresar los valores de contenido inicial de humedad en cada compartimento, al vector XXWC, es: TABLE XXWC (1-47) = 9*0.2656,7*0.2384... donde se determina que en los 47 compartimentos del suelo Maipo el contenido de humedad se distribuye de la siguiente manera: los 9 primeros compartimentos tienen un contenido inicial de humedad de 0.2656, los 7 siguientes 0.2384 y así sucesivamente hasta llegar al compartimento 47.

7. El número que identifica a la estrata a que pertenece cada compartimento es ingresado en el vector XXEST de la siguiente manera:

TABLE XXEST (1-47) = 9*1.0, 7*2.0... donde se determina que los 9 primeros compartimentos pertenecen a la estrata 1, los 7 siguientes a la estrata 2, y así sucesivamente hasta llegar a tener la totalidad de los compartimentos.

8. Las sentencias PARAMETER permiten ingresar valores que controlan el modelo; éstos son:

- COM = 47.0 indica el número de compartimentos en que se subdivide la columna.
- DELZ = 2.0 ancho de cada compartimento, 2 cm.
- VELINI = 0 velocidad de infiltración cuando T = 0.
- HS = 0.0 potencial total en la superficie de la columna es 0 cm. (a saturación).
- KS = 0.307 indica que la conductividad hidráulica de saturación en la superficie de la columna es 0.307 cm/h.
- WS = 0.5509 es el contenido volumétrico de humedad en estado de saturación en la primera estrata.

9. La sentencia PRINT permite determinar cuáles son las variables que se imprimen en "formato tabular"; en este caso corresponde al contenido de humedad para cada uno de los 47 compartimentos (WC1-WC47).

10. La sentencia más importante, por el control que establece sobre la variable independiente tiempo es:

TIMER FINTIM = 8., OUTDEL = 0.10, PRDEL = 0.20, DELT = 0.0004 en el cual se establece que: la simulación será de 8 horas (FINTIM); el incremento de tiempo para los efectos de imprimir el plot será de 0,10 horas (OUTDEL); el incremento de la variable tiempo para los efectos de imprimir las variables en formato tabular es de 0,20 horas (PRDEL), y el incremento de la variable tiempo para los efectos de la simulación será de 0,0004 horas (DELT).

OBSERVACIONES AL PROGRAMA

1. El programa sólo acepta subdividir la columna de suelo en un máximo de 50 compartimentos y tenga un máximo de esta columna de 6 estratas.

2. El método de integración más aconsejable es el Simpson, dada la complejidad del modelo y los gastos de tiempo de computador; esto implica tener que efectuar el cálculo del incremento de tiempo DELT apropiado para que funcione correctamente el programa.

El cambio en el contenido volumétrico de agua en cada estrata, durante un incremento de tiempo DELT es

$$DLWC(j) = (q_{s,m} - q_{m,i}) / DELZ$$

El nuevo contenido de agua para $T = T + DELT$ en la estrata j es

$$WC(j)_{T+DELT} = WCIN(j) + \int_0^T DELWC(j) dT \quad (a)$$

La ley de Darcy permite determinar el flujo de agua que sale y entra de la estrata m de la siguiente manera:

$$q_{s,m} = - \left[\frac{K_m + K_s}{2} \right] \frac{h_m - h_s}{DELZ} \quad (b)$$

$$q_{m,i} = - \left[\frac{K_i + K_e}{2} \right] \frac{h_i - h_m}{DELZ} \quad (c)$$

en que K_s, K_m y K_i son respectivamente las conductividades hidráulicas no saturadas de las estratas e_s, e_m y e_i ; h_s, h_m y h_i son respectivamente los potenciales totales de las estratas e_s, e_m y e_i .

El cambio de contenido volumétrico de humedad en cada compartimento, durante un incremento de tiempo DELT es:

$$DELWC(i) = (q_{U,M} - q_{M,L}) / DELZ \quad (d)$$

El nuevo contenido de humedad al tiempo $T + DELT$ del compartimento (i), de acuerdo a la ecuación (a) es:

$$WC(i)_{T+DELT} = WCIN(i) + \int_0^T DELWC(i) dT \quad (e)$$

Por lo tanto, el contenido volumétrico de humedad en cada compartimento en un tiempo T está representado por:

$$ZWC = INTGRL(ZWCIN, ZDELWC, n)$$

donde: ZWC es el contenido volumétrico de humedad en cada compartimento al tiempo T.

ZWCIN es el contenido volumétrico de humedad inicial en cada compartimento.

ZDELWC es la variación del contenido de humedad en cada compartimento durante un incremento de tiempo DELT.

n es un número entero que representa el número de compartimentos de la columna.

Hay que señalar que n es manejable por el usuario, pero puede fijarse en 50 compartimentos (el máximo número de compartimentos soportados por este programa), corriéndose el peligro de caer en gastos excesivos de tiempo de computador.

El flujo de agua entre la superficie y el punto medio del primer compartimento representa la velocidad de infiltración en la superficie de la columna. La ley de Darcy entrega este valor:

$$VELINF = \left[\frac{-(MK + KS)}{2} \right] \frac{(MH - HS)}{(0.5 \cdot DELZ)} \quad (f)$$

donde: VELINF es la velocidad de infiltración durante un incremento de tiempo T.

K_s son el potencial total y la conductividad hidráulica en la superficie del suelo, que se supone está saturado.

La infiltración acumulada para un tiempo T dada por:

$$VACU = INTGRL(VELINI, VELINF)$$

VELINI es la velocidad de infiltración a un tiempo $T = 0$.

Los valores de conductividad hidráulica no saturada se obtienen desde interpolaciones lineales de tablas de pares de valores de este parámetro en función del contenido de humedad (volumétrico). Estas tablas de valores son encontradas en las secuencias de valores: FUNCTION CAP $K_n \dots$, que son consideradas para cada una de las estratas del suelo (en este caso, hasta un máximo de seis estratas). La conductividad hidráulica no saturada se obtiene mediante la interpolación lineal del tipo:

$$K = AFGEN(CAP K_n, WC(j))$$

es la conductividad hidráulica no saturada en la estrata j.

K_n es la tabla de valores que corresponde a la estrata j.

$WC(j)$ es el contenido de humedad en la estrata j.

El potencial total para el flujo vertical está compuesto de dos elementos:

$$h = \phi - z$$

es el potencial total.

es el potencial matricial.

es la profundidad del punto considerado.

Los potenciales totales son calculados desde:

$$TH_s = (j - 1.5) \cdot DELZ$$

$$TH_m = (j - 0.5) \cdot DELZ$$

$$TH_i = (j + 0.5) \cdot DELZ$$

TH_s y TH_i son los potenciales mátricos de los compartimentos U, M, y L, respectivamente, en sus puntos medios.

Los valores TH_s, TH_m y TH_i son obteni-

dos previamente desde interpolaciones lineales a tablas de valores de potencial mátrico versus el contenido volumétrico de humedad (curvas de retención de humedad). Estas tablas de valores son encontradas en las secuencias de valores: FUNCTION THEAD $_n = \dots$, construidas para cada una de las estratas del suelo (máximo seis estratas). El valor del potencial mátrico es obtenido mediante la interpolación lineal del tipo:

$$TH = AFGEN(HEAD_n, WC(j))$$

donde THEAD $_n$ es la tabla de valores que corresponde a la estrata j.

WC(j) es el contenido volumétrico de humedad en la estrata j.

CÁLCULO DE DELT

Si se tiene que: $ZWC = INTGRL(ZWCIN, ZDELWC, n)$ Para la primera iteración en el primer compartimento tendremos por el método de integración rectangular que:

$$WC(1) = WCIN(1) + DELWC(1) \cdot DELT$$

Despejando DELT tendremos que:

$$DELT = \frac{WC(1) - WCIN(1)}{DELWC(1)}$$

DELWC(1) para la primera iteración siempre será el más grande DELWC que se encuentra en la simulación, lo que implica que nos entrega el límite de error del cálculo DELT.

Para la primera iteración:

$$DELWC(1) = \frac{-MK + KS}{2} \frac{MH - HS}{0.5 \cdot DELZ} + \frac{LK + MK}{2} \frac{LH - MH}{DELZ}$$

La cantidad de humedad en el compartimento 1 cuando se ha infiltrado un p% de lo que se debe infiltrar es:

$$WC(1)_p = \frac{p \cdot WS - WCIN(1)}{DELWC(1)}$$

PROGRAMA (EMPLEADO PARA EL SUELO MAIPO)

CECICO JOB CSMP, L. Gurovich;
 CSMP EXEC CSMP 36Ø
 SYSIN DD *
 Dimensión WC(5Ø), DELWC(5Ø), WCIN
 (5Ø)
 Equivalence (ZWC, WC(1)), (ZDELWC
 (ZDELWC (1)), (ZWCIN, WCIN (1))
 STORAGE XXWC(5Ø), XXEST(5Ø)
 FIXED I, NCOM, N, LEST

Infiltración unidimensional en suelos heterogéneos

Métodos simulación compartimentalizado

Initial
 Nosort

VELINF = Ø
 NCOM = COM
 DO 1Ø I = 1, NCOM
 WCIN(I) = XXWC(I)
 DELWC(I) = Ø
 1Ø CONTINUE

Dinamic
 Nosort

Contenido volumétrico de agua en cada compartimento
 Número indica cantidad de comp. -
 Manejado por usuario

ZWC INTGRL (ZWCIN, ZDELWC, 5Ø)
 Infiltración acumulada
 INFACU = INTGRL (VELINI, VELINF)

Cambio en el contenido volumétrico de agua en el suelo

Primer compartimento (en la sup. de la col.)
 Variables M... corresponden al comp. 1
 Variables L... corresponden al comp. 2

N = NCOM - 1
 DO 3Ø i-2, N
 Tensión, potencial total y capacidad capilar (comp I - 1*I)

UTH = MTH
 MTH = LTH
 UH = MH
 MH = LH
 UK = MK
 MK = LK

Según estrata determina: tensión, cap. capilar (comp. I + 1)

EST = XXEST(I)
 XWC = WC(I + 1)
 GO TO (11, 12, 13, 14, 15, 16) EST
 11 LTH = AFGEN (THEAD1, XWC)
 LK = AFGEN (CAPK1, XWC)
 GO TO 2Ø
 12 LTH = AFGEN (THEAD2, XWC)
 LK = AFGEN (CAPK2, XWC)
 GO TO 2Ø
 13 LTH = AFGEN (THEAD3, XWC)
 LK = AFGEN (CAPK3, XWC)
 GO TO 2Ø
 14 LTH = AFGEN (THEAD4, XWC)
 LK = AFGEN (CAPK4, XWC)
 GO TO 2Ø
 15 LTH = AFGEN (THEAD5, XWC)
 LK = AFGEN (CAPK5, XWC)
 GO TO 2Ø
 16 LTH = AFGEN (THEAD6, XWC)
 LK = AFGEN (CAPK6, XWC)
 2Ø Continue
 Potencial total comp. I + 1
 LH = LTH - (i + Ø.5)*DELZ

Variación en contenido de humedad (com. I)
 $DELWC(i) = -((MK+UK)/2) * (MH-UH) / DELZ + ((LK+MK) / 2) * (LH-MH) / DELZ / DELZ$

3Ø Continue

Ultimo compartimento (no hay flujos entre éste y el fondo):

Variables U... corresponden comp. NCOM-1

Variables F... corresponden comp. último

UTH = MTH
 FTH = LTH
 UH = MH
 FH = LH
 UK = MK
 FK = LK
 $DELWC(NCOM) = -(FK + UK) / 2 * (FH - UH) / DELZ / (DELZ * AREA)$

Contenidos volumétricos de agua en cada compartimento:

WC1 = WC(1)
 WC2 = WC(2)
 WC3 = WC(3)

WC(49)
 WC(5Ø)

Datos generales para todos los RUN ***
 Las funciones THEAD contienen pares de valores de conten. de humedad vs. suction tension head).

Las funciones CAPK. contienen pares de valores de contenido de humedad vs. conductividad capilar.

Las unidades manejadas son para:
 tiempo en horas; profundidad en cm; conductividad capilar en cm/h; potencial total en cm; suction head en cm; infiltración acumulada en cm; cont. vol. humedad en cc/cc.

Datos RUN1 y permanentes:

abod simp.
 PLOT INFACU (VELINF)

1. infiltración unidimensional en Suelo Mai-

2. infiltración acumulada para el Suelo

ACTION THEAD1
 (0.24, - 1000.), (0.27, - 560.), ...
 (0.5509, 0.)

ACTION THEAD2

ACTION THEAD6
 (1, 1.), (2, 2.), (3, 3.)

ACTION CARPI
 (0.2656, 0.0000076), (0.28, 0.0000168), ...

ACTION CAPK2

ACTION CAPK6
 (1, 1.), (2, 2.), (3, 3.)

XXWC(1 - 47)
 0.2656.7*0.2384, 11*0.2319, 20*0.2438

XXEST(1 - 47)
 1.0.7*2.0, 11*3.0, 20*4.0

COMP = 47., DELZ = 2

Parameter Velini = 0., HS = 0.0, KS = 0.307,
 WS = 0.5509
 Print WC1, WC2, WC3,

WC46, WC47

Timer Fintim = 8., OUTDEL = 0.1, PRDEL = 0.20, DELT = 0.0004

End
 Stop
 End job

Salida de resultados

Este programa de simulación proporciona los siguientes resultados:

1. AVANCE DEL FRENTE DE HUMEDAD

Este programa imprime en forma tabular el avance del frente de humedad en la siguiente forma:

Infiltración acumulada en Suelo Maipo; Simp integration:

Time 0.0 WC1 = 2.6560E-01 WC2.....
 ...
 Time .0.2 ...
 ...
 Time 8.0 WC1 =
 ...
 WC47 = 2.4380E-01

2. INFILTRACIÓN ACUMULADA Y VELOCIDAD DE INFILTRACIÓN

Este programa nos entrega resultados de infiltración acumulada en forma tabular y en forma gráfica en función de la variable tiempo. Además, nos entrega la velocidad de infiltración instantánea.

Time	Infacu	Pilot de Infacu vs. Time	Velinf
0.0	0.0		9.6022E 01
1.0 E-01	6.5711E-01		3.4268E 00
...
8.0 E 00	6.1445E 00		4.7397E -01

Los resultados obtenidos con el modelo de simulación fueron comparados con determina-

ciones experimentales de infiltración en tres suelos de la zona central de Chile; las características de estos suelos y la metodología experimental utilizada en las determinaciones de infiltración han sido descritas por el autor (Gurovich y Jaramillo, 1977), y no se reproducen aquí.

RESULTADOS Y DISCUSION

Se comparan los valores de infiltración acumulada obtenidos a través del modelo de simulación descrito, con resultados experimentales en condiciones de campo, de pruebas de infiltración con cilindros infiltrómetros dobles, en los suelos Agua del Gato, Maipo y Santiago.

a) Modelo de simulación

Para predecir valores de infiltración acumulada, por medio de este modelo, no se requiere de pruebas experimentales de infiltración en el campo. Este modelo de simulación requiere de la determinación de los siguientes valores:

- contenido de humedad del suelo para $T = 0$, para cada estrata del perfil
- contenido de humedad en estado de saturación por estrata
- conductividad hidráulica de saturación
- conductividad hidráulica en función del contenido de humedad del suelo, por estrata
- curvas de retención de humedad por estrata
- espesor de cada estrata y profundidad del suelo considerado

La conductividad hidráulica como función del contenido de agua del suelo ($K = f(\theta)$), se determinó a partir de la curva de retención de humedad, aplicando la ecuación descrita por Campbell (1974):

$$K_c = K_s \left(\frac{\theta - 2b + 2 + p}{\theta_s} \right)^2$$

donde:

- K_c es la conductividad hidráulica no saturada
- K_s es la conductividad de saturación (L/T)
- θ es el contenido volumétrico de humedad
- θ_s es el contenido volumétrico de agua en estado de saturación

b es una constante de interacción de poros, término definido por Jackson (1974), cuyo valor es aproximadamente 1 (uno)

p es una constante empírica equivalente a la pendiente de la curva de retención de humedad

Para el caso especial de la conductividad hidráulica de saturación se utilizó el procedimiento descrito por Klute (1965).

Las funciones de conductividad hidráulica no saturada en relación al contenido de humedad en el suelo, para cada estrata y para cada suelo, se presentan en el cuadro 1.

En este cuadro se puede observar que la conductividad hidráulica en flujo no saturado disminuye a medida que decrece el contenido de humedad del suelo. Estas variaciones en la conductividad hidráulica en flujo no saturado son significativamente menores con respecto a la conductividad hidráulica de saturación a medida que decrece el contenido de humedad en el medio poroso. Variaciones de un 10% del contenido de humedad del suelo con respecto al estado de saturación, en la primera estrata del suelo Agua del Gato, produce resultados de conductividad hidráulica 20 veces menor que el K de saturación. En cambio, variaciones en el contenido de humedad del suelo de un 30%, en el mismo suelo, produce resultados 100.000 veces menor que la conductividad hidráulica de saturación.

Los valores de conductividad hidráulica no saturada para suelos que tengan un contenido de humedad muy cercano al punto de marchitez permanente son demasiado pequeños, ya que los poros conductores de agua han disminuido en tamaño y número, y la viscosidad del agua absorbida aumenta; para observar un flujo de agua en el suelo en estas condiciones se hace necesario gradientes de succión muy grandes o períodos de tiempo muy largos (Gurovich, 1975).

El suelo Agua del Gato presenta valores mayores para la conductividad hidráulica no saturada, en comparación con los otros suelos para un mismo contenido de agua en el suelo. Esto indicaría que los suelos de texturas finas son los que ofrecen menor resistencia al flujo de agua en condiciones no saturadas, debido a que los poros de menor tamaño, característicos de estos suelos de texturas finas, son utilizados para el flujo no saturado, ya que los de mayor tamaño se vacían primero. Hay que señalar que para estudios posteriores sería con-

CUADRO 1

VALORES DE CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA EN RELACION AL CONTENIDO DE HUMEDAD

Hydraulic conductivity values in relation to water content

	Agua del Gato		Maipo		Santiago	
	θ	K_c	θ	K_c	θ	K_c
	28,94	2,10 E-6	26,56	7,60 E-6	25,56	3,5 E-6
	35,00	4,25 E-5	34,00	2,81 E-4	31,00	5,29 E-5
	41,00	6,32 E-4	40,00	2,96 E-3	37,00	6,30 E-4
	47,00	6,52 E-3	46,00	2,25 E-2	43,00	5,17 E-3
	53,00	5,09 E-2	50,00	7,53 E-2	49,00	3,22 E-2
	60,00	4,25 E-1	54,00	2,26 E-1	55,00	1,62 E-1
	63,40	1,09	55,09	3,07 E-1	58,11	3,50 E-1
	29,53	8,20 E-8	23,84	1,80 E-6	29,79	5,60 E-3
	35,00	3,20 E-6	28,00	2,97 E-5	31,00	9,47 E-3
	41,00	1,02 E-4	32,00	2,96 E-4	33,00	2,16 E-2
	47,00	2,12 E-3	36,00	2,24 E-3	35,00	4,70 E-2
	53,00	3,05 E-2	40,00	1,37 E-2	37,00	9,79 E-2
	60,00	3,30 E-1	44,00	7,07 E-2	39,00	1,96 E-1
	63,40	1,09	47,92	3,07 E-1	40,75	3,50 E-1
	38,16	4,63 E-3	23,19	1,49 E-6	30,09	5,37 E-3
	41,00	2,02 E-2	28,00	3,49 E-5	32,00	1,29 E-2
	43,00	5,35 E-2	32,00	3,34 E-4	34,00	3,04 E-2
	45,00	1,86 E-1	36,00	2,44 E-3	36,00	6,85 E-2
	47,00	3,32 E-1	40,00	1,45 E-2	38,00	1,48 E-1
	49,00	7,79 E-1	44,00	7,26 E-2	39,00	3,06 E-1
	49,81	1,09	47,92	3,07 E-1	40,38	3,50 E-1
	38,56	2,50 E-3	24,38	3,60 E-6		
	41,00	8,18 E-3	29,00	6,84 E-5		
	43,00	2,05 E-2	33,00	6,17 E-4		
	45,50	6,10 E-2	37,00	4,32 E-2		
	48,50	2,09 E-1	41,00	2,47 E-2		
	51,00	5,52 E-1	45,00	1,20 E-1		
	52,83	1,09	47,55	3,07 E-1		

mente el uso de la difusividad, para la resolución de este modelo o de cualquier enfoque analítico que se base en la ecuación de Darcy, ya que los valores de conductividad hidráulica varían en varios órdenes de magnitud en el rango de humedades del suelo que se presentan en condiciones de campo; la difusividad varió, en este rango, solamente en un orden de magnitud.

El potencial de presión negativo o potencial hídrico, en función del contenido de agua del suelo ($\psi = f(\theta)$), corresponde a la curva característica de humedad del suelo y fue determinada según el método propuesto por Richards (1954).

En la elaboración de la curva característica de humedad se emplearon los contenidos de agua correspondientes al equilibrio con 0,3 y

15 atmósferas. Para la determinación de los puntos intermedios se interpolaron los valores de la función obtenida, al expresar los valores de tensión y contenido de agua en forma logarítmica. Los valores de contenido de humedad, que se encuentran en equilibrio con valores menores a 0,3 atmósferas de tensión, se determinaron en ollas de presión.

Las curvas características de humedad que relacionan el contenido de agua del suelo y la tensión a que está retenida el agua, para cada una de las estratas de los perfiles de suelo empleados en este estudio, se presentan en la figura 2.

Se puede observar que las estratas del suelo Agua del Gato presentan los mayores contenidos de humedad tanto a 0,3 como a 15 atmósferas de tensión, en comparación con las es-

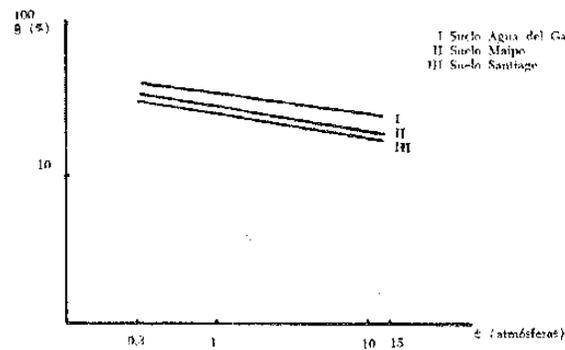


FIGURA 2

CURVAS DE RETENCION DE HUMEDAD (CONTENIDO DE HUMEDAD EN BASE A VOLUMEN Y TENSION EN BARES)

Water retention curves (volumetric water content and tension in bars)

tratas de los otros suelos empleados en este estudio. Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Ruz (1974), indicándose que los suelos de texturas finas, como el suelo Agua del Gato, en este caso, retienen conteni-

dos de humedad mayores a iguales tensiones en comparación con los otros suelos empleados en este trabajo.

Con todos los parámetros necesarios para el modelo de simulación, se estimó los valores de infiltración a través del uso de un programa de computación en lenguaje CSMP (Continuous System Modeling Program), cuyas características han sido descritas anteriormente. En la tabla N° 2 se presentan los resultados de infiltración acumulada obtenidos con el modelo de simulación.

Los resultados de infiltración acumulada obtenidos por medio de este programa de simulación, se ajustan en forma moderada a los determinados en forma experimental en el campo. Un mejor ajuste de los resultados de infiltración estimados, con observaciones experimentales, se obtendría si se comparan estos valores, determinando los parámetros usados en el modelo, principalmente la conductividad hidráulica de saturación en la misma situación en que se realiza la determinación experimental.

Para comparar las determinaciones experimentales de infiltración en el campo, los parámetros físicos necesarios para la estimación de infiltración por medio del modelo de si-

mulación se pueden determinar en esa misma condición. La conductividad hidráulica de saturación se determinaría midiendo la velocidad de infiltración básica, cuando el flujo de agua está completamente estabilizado; el contenido de humedad y las curvas de retención de humedad por estrata se pueden determinar con tensiómetros elaborados para conteniendo así resultados que, usados en el modelo de simulación, permitirían estimar mejor forma los valores de infiltración.

En el cuadro 2 se observan diferencias en los resultados estimados por el modelo, con respecto a los valores experimentales de infiltración obtenidos en el campo de hasta un 23% en el suelo Agua del Gato, de 90% para el Maipo y de 50% para el suelo Santiago, en los primeros cinco minutos. En cambio, para tiempos mayores (tres horas) las variaciones en los resultados de infiltración estimados respecto a los experimentales son menores (30 y 20% para los suelos Agua del Gato, Maipo y Santiago, respectivamente).

Las diferencias observadas en los primeros minutos después de iniciado el proceso de infiltración se deberían, probablemente, a que la conductividad hidráulica de saturación usa-

da en este estudio es el valor promedio de todo el perfil de cada suelo, y como en los primeros minutos el proceso de infiltración está directamente controlado por lo que sucede en los primeros centímetros del perfil, este valor de conductividad subestima los valores reales en condiciones de campo, ya que el laboreo de los suelos altera la estructura mecánica de los primeros centímetros del perfil, dando lugar a una mejor capacidad de conducción de agua en el medio poroso en la parte superior del perfil.

Como este programa es una solución a la ecuación de flujo de agua en el suelo, permite extrapolar resultados de infiltración a situaciones totalmente diferentes a los que podría obtenerse en forma experimental; para esto solamente hay que introducir en el programa las variables que toman valores distintos, dependiendo de la situación considerada.

Para un mejor uso y una mayor seguridad en los resultados, este programa de computación debe ser comprobado en un mayor número de experimentos, ciñéndose estrictamente a todas las observaciones señaladas en esta discusión.

RESUMEN

Se presenta un modelo de flujo de agua en el suelo para el caso de la infiltración vertical hacia abajo, basado en la ecuación de flujo, implementado con un programa de simulación en lenguaje CSMP (Continuous system modeling program), que permite calcular el perfil de humedad del suelo, la velocidad de infiltración y la infiltración acumulada en el perfil.

El programa de simulación requiere el perfil de humedad inicial del suelo, que puede ser no uniforme, el contenido de agua y la conductividad hidráulica de saturación, las relaciones $K(\theta)$ y $\phi(\theta)$ sin considerar fenómenos histeréticos, el espesor de cada estrata y la profundidad del suelo considerado.

Los resultados de la técnica simulativa son comparables con los resultados obtenidos en condiciones experimentales de campo, en tres suelos de la Zona Central de Chile. Se discute el efecto de la medición de algunos parámetros necesarios para el programa de simulación en condiciones de laboratorio y en condiciones de campo.

Las características de esta técnica simulativa para predecir el proceso de infiltración permiten obtener resultados en suelos estratificados con contenidos iniciales de agua no uniformes y no está basada en parámetros que deban medirse directamente en condiciones de campo, por lo que se independiza de la variabilidad natural de los suelos.

LITERATURA CITADA

- GUROVICH, L. A. y JARAMILLO, G., 1977. Modelos Matemáticos y mediciones experimentales en la determinación de infiltración de agua en el suelo. Ciencia e Investigación Agraria (En prensa).
- GUROVICH, L. A., 1975. Curso de Física de Suelos. Programa de Postgrado en Manejo de Suelos y Suelos. Santiago, Chile. Universidad Católica de Chile. Facultad de Agronomía.
- HANKS, R. I. y BOWERS, S. A., 1962. Numerical so-

CUADRO 2

VALORES DE INFILTRACION ACUMULADA, CALCULADOS SEGUN EL MODELO DE SIMULACION (en cm)

Cumulative infiltration, calculated through the simulation model

Tiempo (min.)	Agua del Gato		Exper.	Maipo		Exper.	Santiago	
	Exper.	Simulación		Exper.	Simulación		Exper.	Simulación
5	1,6	1,30	1,1	0,56	1,2	0,76		
10	2,1	1,80	1,5	0,85	1,6	1,13		
15	2,6	2,26	1,7	1,03	1,9	1,35		
20	3,0	2,48	1,9	1,20	2,1	1,53		
25	3,3	2,75	2,1	1,31	2,3	1,69		
30	3,5	2,99	2,3	1,42	2,5	1,81		
40	4,0	3,45	2,5	1,62	2,9	2,06		
50	4,4	3,85	2,7	1,81	3,2	2,30		
60	4,9	4,25	2,9	1,99	3,5	2,50		
90	6,1	5,28	3,5	2,44	4,1	3,05		
120	6,9	6,20	3,9	2,83	4,5	3,52		
150	7,8	7,04	4,2	3,18	4,8	3,95		
180	8,7	7,81	4,6	3,51	5,2	4,34		
210			4,8	3,82	5,5	4,71		
240			5,1	4,11	5,8	5,06		
270			5,3	4,39	6,1	5,33		
300			5,5	4,66	6,3	5,72		

- lution of the moisture flow equation for infiltration into layered soil. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 26: 530-534.
- HILLEL, D., 1971. Soil and Water. Physical Principles and Processes. Academic Press, N. York. 288 p.
- KIRKHAM, D. and POWERS, W. L., 1972. Advanced Soil Physics. John Wiley & Sons, Inc. N. York. 288 p.
- PARLANCÉ, J. Y. Theory of water movement in soil: 2. One Dimensional infiltration. Soil Sci. 111: 170-174.
- PHILIP, I. R., 1957. The theory of infiltration: I. The infiltration equation and its solution. Soil Sci. 83: 345-357.
- RICHARDS, L. A., 1954. Diagnóstico y Rehabilitación de suelos salinos y sódicos, Washington D. C. Departamento de Agricultura de los EE. UU. de América, pp. 22-23, 115-119.
- RUIZ, E., 1974. Caracterización hídrica de nueve series de suelos de la Provincia de Santiago. Santiago, Chile. U. Católica de Chile. Tesis. 95 p.

MODELOS MATEMATICOS Y MEDICIONES EXPERIMENTALES EN LA DETERMINACION DE INFILTRACION DE AGUA EN EL SUELO¹

MATHEMATICAL MODELS AND EXPERIMENTAL DETERMINATIONS ON WATER INFILTRATION INTO THE SOIL

LUIS A. CUROVICH R. y GALO R. JARAMILLO J.

Departamento de Suelos, Escuela de Agronomía, Universidad Católica de Chile

SUMMARY

The description and determination of the infiltration process is of outstanding importance for irrigation planning and design. The experimental methodology used to determine the infiltration parameters and values leads to a comparatively wide variability on the results obtained; for this reason, there is a definite tendency to find mathematical models to estimate or predict the process, that enable to apply it to conditions different to the experimental procedures, and which are more related to the physical characteristics of the soil.

In this study six mathematical approaches were compared to estimate the accumulated infiltration values: three of them are empiric (Kostiakov, Holtan and Horton), two semianalytic (Green and Ampt and a Simulation Model) and one, analytic (the solution of the flow equation proposed by Philip.) The results of accumulated infiltration calculated through these equations, were compared with experimental values obtained under field conditions with double infiltrometers on three soils of Chile's Central region (soil series Agua del Gato, Maipo and Santiago).

It was concluded that the semianalytic approaches (Green and Ampt equation and a Simulation Model) are the most suitable ways to describe the infiltration process, because the results obtained through the use of these approaches are in good agreement with experimental data, obtained under actual field conditions, and also, because it is possible to use these approaches to situations different to field conditions. The Simulation Model, has the definitive advantage that it does not require experimental determinations of infiltration.

In order to use these semianalytic approaches to describe the infiltration process it is required precise determinations of: saturated hydraulic conductivity of the soil, water retention functions for each soil layer, water content and hydraulic conductivity functions for each soil layer, initial and saturated soil water contents, soil layer depths and total soil profile depths.

INTRODUCCION

El proceso de la infiltración del agua en el suelo, en que ésta penetra al perfil del suelo a través de la superficie, es una de las etapas principales del ciclo hidrológico (Espíndora,

1975; Libardi *et al.*, 1974; Gurovich, 1975).

La velocidad de infiltración determina la cantidad de agua de escurrimiento superficial, y con ello el peligro de erosión hídrica y, además, determina los tiempos óptimos de riego y los diseños de los sistemas de riego en rela-

ción al tamaño de las unidades superficiales y los caudales que deben utilizarse (Booher, 1974; Davis, 1963; Israelsen *et al.*, 1965; Moreno *et al.*, 1974).

Las determinaciones de la velocidad de infiltración en el campo han demostrado que ésta decrece en el tiempo. Por este motivo, la infiltración acumulada, que es la proporción del agua de riego que infiltra a través de la superficie del suelo, durante el período que dura esta práctica, es una función no lineal en el tiempo (Hillel, 1971; Israelsen, 1965).

El flujo de agua en el suelo es proporcional a la gradiente de potencial, o carga hidráulica, y es afectado por las propiedades conductivas de los poros del suelo, a través de los cuales se produce el flujo. Por lo tanto, todos los factores que se relacionan con estas propiedades y con el gradiente de potencial afectan la velocidad de infiltración (Baver *et al.*, 1973; Norero *et al.*, 1974; Philip, 1969).

Para medir la velocidad de infiltración se utilizan varios métodos, tratando siempre de usar una aproximación del método de riego que se ha de emplear en la zona o cultivo que se desea regar. El grado de confianza de estas mediciones, con respecto a la velocidad de infiltración real, está relacionado con la superficie que se pretende representar y con la variabilidad del perfil, ya que la heterogeneidad de los suelos, incluso dentro de un área comparativamente pequeña, origina un rango amplio de resultados en las mediciones experimentales (Díaz, 1974; Osorio, 1974; Tosso, 1975).

La variabilidad de los resultados de campo, que resulten de la heterogeneidad del suelo, de las condiciones iniciales de contenido de agua y gradiente, son sólo aplicables para superficies pequeñas y para esas condiciones iniciales. Por esta razón, se ha intentado representar en alguna forma el proceso de la infiltración, relacionándolo con parámetros físicos del suelo, enfocando el problema a través del uso de modelos matemáticos, empíricos, semianalíticos y analíticos (Childs, 1969; Kirkham *et al.*, 1972).

Los enfoques empíricos que se han desarrollado son, en general, sencillos, y se adaptan a condiciones generales de suelo, pero no proporcionan ninguna interpretación física del fenómeno. Los enfoques semianalíticos y analíticos, en cambio, permiten describir e interpretar cuantitativamente las pruebas experimentales de infiltración, con la limitación en

algunos enfoques, en las suposiciones de homogeneidad e isotropismo del perfil, o en la elaboración de las resoluciones numéricas. Estas últimas permiten interpolar o pronosticar resultados a otras situaciones diferentes a las experimentales (Philip, 1975; Swartzendruber, 1974).

En general, todos los métodos usados para medir la infiltración de agua en el suelo en condiciones de campo dan una variabilidad de resultados para un mismo lugar, e incluso cada método produce resultados puntuales, que no representan a toda el área considerada. Por esta razón, su aplicación e interpretación no siempre son apreciados y se ha intentado relacionar el proceso de infiltración con parámetros físicos del suelo y enfocar el problema mediante modelos matemáticos (empíricos, semianalíticos y analíticos), que ayuden a la comprensión de este fenómeno.

Entre los enfoques empíricos más usuales destacan: la ecuación de Kostiakov (1932), que supone una función exponencial en el tiempo para la velocidad de infiltración de la forma $I = K T^n$ ($-1 < n < 0$); la ecuación de Horton (1940), que se basa también en una función exponencial en el tiempo de la forma $I = I_b + (I_0 - I_b) \exp(-BT)$, y la ecuación de Holtan-Creitz (1969) estudiada por Skaggs basada en algunos parámetros físicos del suelo, como el potencial de almacenamiento. Esta ecuación es de la forma $I = a (St - D)^m + I_b$.

Los enfoques semianalíticos, utilizados en este trabajo, son la ecuación de Green y Ampt (1911), de la forma

$$I = \frac{\phi s n - \phi f}{\sum r}$$

y una modificación al modelo de simulación propuesto por Van der Ploeg (1974) para la infiltración vertical en suelos estratificados.

El enfoque analítico estudiado en este trabajo es la solución de Philip a la ecuación de flujo (Philip, 1957) para la infiltración de agua en un suelo homogéneo con un contenido uniforme de agua. La solución analítica a la ecuación de flujo, propuesta por Philip, es de la forma $I = \frac{1}{2} S T^{-1/2} + A$.

En este trabajo se han comparado valores de infiltración medidos en condiciones de campo, para tres suelos de la Zona Central de Chile, con diferentes enfoques de estimación y cálculo, con el fin de establecer un procedi-

CUADRO 1

PARAMETROS DETERMINADOS PARA CADA UNO DE LOS ENFOQUES

Parameters determined for each approach

Enfoque	D(T) (1)	f (2)	θ (3)	p (4)	z (5)	$\phi - \theta$ (6)	K (7)	L(T) (8)	Kc - θ (9)	S (10)	hf (11)
Kostiakov	X										
Horton	X			X							
Holtan-Creitz	X	X	X	X	X	X	X	X			X
Green y Ampt	X	X	X	X	X	X	X		X		
Skaggs	X	X	X				X			X	
Infiltración acumulada en función del tiempo								(L)			
Densidad del suelo por estrata											
Contenido de humedad inicial por estrata, en el perfil de infiltración											
Profundidad del perfil del suelo considerado								(L)			
Espesor de cada estrata								(L)			
Curva de retención de humedad por estrata											
Conductividad hidráulica de saturación								(L/T)			
Profundidad de avance del frente de mojado								(L)			
Función de conductividad hidráulica y contenido de humedad del suelo											
Sorptividad								(L/T) ^{1/2}			
Potencial mátrico en el frente de humedecimiento								(L)			

de determinación de infiltración, que define los valores estimados de los efectos de heterogeneidad del perfil del suelo.

MATERIALES Y METODOS

Para comparar los resultados calculados a través de la aplicación de los diferentes enfoques matemáticos, que permiten describir el proceso de infiltración, con datos experimentales obtenidos en el campo, se eligieron tres suelos ubicados en la Zona Central de Chile. Las determinaciones experimentales fueron realizadas por métodos y cálculos, cuya confiabilidad ha sido comprobada anteriormente en otros suelos, dando buenas correlaciones. Las series de suelos estudiadas son Agua del Maipo y Santiago. Sus características físicas y mecánicas han sido descritas por los autores (Ruz, 1974).

Para determinar la lámina de agua infiltrada en función del tiempo, se emplearon seis enfoques matemáticos: tres empíricos (Kostiakov, Horton, Holtan *et al.*), dos semianalíticos (Green y Ampt y Modelo de Simulación) y un analítico (solución de Philip). Los parámetros determinados en cada uno de los enfoques de estimación de los valores de infiltración aparecen en la Tabla N° 1.

La metodología empleada en la determinación de los parámetros señalados en el cuadro es la siguiente:

a) *Infiltración acumulada, en condiciones de campo*

Uso de cilindros infiltrómetros dobles (Richards, 1954; Haise, 1956). Para cada suelo se hicieron tres repeticiones y se usaron los valores promedios resultantes.

b) *Densidad aparente*

Para determinar la densidad aparente por estrata se construyó una calicata en cada suelo, cercano al lugar donde se realizó la prueba de infiltración. El procedimiento usado fue el sugerido por Blake (1965), que consiste en tomar muestras de suelo, en cilindros diseñados para tal efecto, con un volumen conocido. Posteriormente, en el laboratorio se determinaron los valores por estrata.

c) *Espesor de la estrata y profundidad efectiva del perfil*

En la misma calicata, utilizada en la descripción del perfil, se midió el espesor de cada estrata con una regla graduada en centímetros. Como profundidad máxima, se consideró aquella en que aparecen condiciones físicas que limitan significativamente la penetración de raíces.

d) *Avance del frente de mojado*

El avance del frente de mojado en función del tiempo se determinó con un barreno,

muestreando el suelo a diferentes tiempos, durante la prueba de infiltración. El muestreo se realizó en un lugar distante 15 cm del cilindro central, donde se determinó la infiltración de cada suelo. Simultáneamente, se empleó un electrodo de platina múltiple, con terminales cada 5 cm, por medio del cual se determinó el avance del frente de mojado en el tiempo. Los resultados obtenidos con ambos métodos son prácticamente coincidentes.

e) *Contenido de humedad del suelo*

El contenido de humedad del suelo, en el momento previo a la prueba de infiltración, se hizo tomando muestras con barrenos (ocho muestras alrededor de cada cilindro instalado), considerando el espesor de cada estrata. Posteriormente, se analizó según el método gravimétrico descrito por Gardner (1965).

f) *Conductividad hidráulica de saturación*

Para la determinación de la conductividad hidráulica de saturación, se trabajó con muestras disturbadas tamizadas a 2 mm, que se dispusieron en permeámetros de carga constante (4 permeámetros por cada suelo). En estos permeámetros se fue colocando el suelo hasta obtener una densidad aparente similar a las determinadas en el campo por medio de vibración; luego las muestras fueron saturadas en contracorriente durante 24 horas.

Para mantener la carga de agua constante en los permeámetros, se utilizaron botellas de Mariotte. La determinación de la conductividad hidráulica de saturación se hizo usando agua de iguales características a las empleadas en riego en los diferentes lugares muestreados. Esta determinación se hizo siguiendo el procedimiento descrito por Klute (1965).

g) *Curvas de retención de humedad*

Para determinar esta función por estrata, se utilizó el método propuesto por Richards (1954) en platos y ollas de presión. En la elaboración de la curva característica de humedad se emplearon los contenidos de agua correspondientes al equilibrio con 0.3 y 15 atmósferas. Para la determinación de los puntos intermedios se interpolaron los valores de la función obtenida al expresar los valores de tensión y contenido de agua en forma logarítmica. Los valores de contenido de humedad, que se encuentran en equilibrio con valores

menores a 0.3 atmósferas de tensión, se determinaron en ollas de presión.

b) *Porosidad total*

Este parámetro se determinó en base al método señalado por Vomocil (1965), que expresa la porosidad como:

$$f = 1 - \frac{D_b}{D_r}$$

donde:

- f es la porosidad total,
- D_b es la densidad aparente (M/V)
- D_r es la densidad real (M/V)

La densidad real o de sólidos fue supuesta como un valor constante de 2,65 gr/cm³ para los tres suelos (Skaggs, 1969).

i) *Función de conductividad hidráulica en relación al contenido de humedad*

Esta relación se determinó en base a la curva de retención de humedad, aplicando la ecuación descrita por Campbell (1974):

$$K_c = K_s \left(\frac{\theta}{\theta_s} \right)^{2b + 2 + p}$$

donde:

- K_c es la conductividad hidráulica no saturada.
- K_s es la conductividad de saturación (L/T).
- θ es el contenido volumétrico de humedad,
- θ_s es el contenido volumétrico de agua en estado de saturación.
- b es una constante de interacción de poros, cuyo valor es aproximadamente 1 (uno).
- p es una constante empírica equivalente a la pendiente de la curva de retención de humedad.

j) *Sorptividad*

Este parámetro, que se usa en la ecuación de Philip, fue determinado en base a la ecuación propuesta para tal efecto por Youngs (1968).

$$S = [2(\theta_s - \theta) (S_s - S_n)]^{1/2}$$

donde:

$$D = \frac{(S_s - S_n)}{2(\theta_s - \theta) T}$$

- es la infiltración horizontal acumulada.
- es el contenido de humedad volumétrico en estado de saturación.
- es el contenido de humedad del suelo.
- es el tiempo.
- es la sorptividad.

La sorptividad fue determinada usando varios promedios de las diferentes estratas, ponderadas por profundidad, considerándose únicamente los valores extremos de infiltración.

Potencial mátrico en el frente de mojado

Para el uso de la ecuación de Green y Ampt, es necesario estimar el valor del potencial mátrico en el frente de mojado (h_f). Para el cálculo de este parámetro, se siguió el procedimiento propuesto por Norero y Andrade (1974), cuya relación es:

$$h_f = \frac{1}{(\theta_s - \theta)} \int \phi \, d\theta$$

donde:

- es el potencial mátrico promedio en el frente de mojado.
- se refiere a la estrata considerada.
- φ es la función que está dada por la curva de retención de humedad.

La integración de esta ecuación se realizó analíticamente.

Programa de computación

La solución del modelo de simulación se obtuvo a través de una modificación al programa de computación en lenguaje CSMP (Continuous system modeling program), propuesto por Van der Ploeg (1974). Los detalles de

este programa y su utilización son presentados por Gurovich (1977).

RESULTADOS Y DISCUSION

Los parámetros físicos, usados indistintamente en los diferentes enfoques matemáticos, para descubrir la infiltración acumulada, se presentan en un análisis general. Las mediciones experimentales de infiltración se analizan para los tres suelos estudiados. Asimismo, se comparan estos valores con los resultados obtenidos por los diferentes enfoques, considerando en esta parte los parámetros específicos para cada enfoque.

El cuadro 2 presenta los valores promedio de los parámetros físicos principales de los tres suelos estudiados.

Uno de los factores que más influencia tiene en los valores de velocidad de infiltración es el contenido de agua de los suelos (Phillip, 1957), ya que variaciones de humedad en la prueba original en un 10% producen resultados con un rango de diferencia del orden de 70 a 85%. Es fácil prever que si las determinaciones de infiltración se efectúan con una humedad distinta a la que se encuentra en general en la práctica de riego, se puede incurrir en errores importantes.

En el laboratorio se determinaron los valores de conductividad hidráulica de saturación para cada perfil de suelo. En el cuadro 2 se presentan los resultados, observándose que el suelo Agua del Gato tiene la conductividad hidráulica de saturación más alta, comparativamente con los otros suelos (1,09 cm/h). El suelo Maipo, con un valor de conductividad hidráulica de saturación de 0,307 cm/h fue el que presentó mayor resistencia al flujo de agua en este estudio.

CUADRO 2

VALORES PROMEDIOS DE LOS PARAMETROS FISICOS DE LOS TRES SUELOS

Average values for the physical characteristics of the soils

Suelo	P (cm)	D _b (gr/cc)	f (%)	θ (%)	K _s (1) (cm/h)	I _b (2) (cm/h)
Agua del Gato	60	1,13	57,40	32,93	1,090	0,984
Maipo	94	1,35	49,14	24,44	0,307	0,384
Maipo	50	1,58	47,58	28,19	0,350	0,472

Conductividad hidráulica de saturación.
Velocidad de infiltración básica.

Teóricamente, en base a las definiciones de infiltración básica y de conductividad hidráulica de saturación (Gurovich, 1975; Hillel, 1971), estos dos valores deberían ser iguales en condiciones de campo. En este caso, se observaron variaciones en los resultados del orden del 10, 20 y 25% para los suelos Agua del Gato, Maipo y Santiago, respectivamente, entre los dos parámetros físicos. La infiltración básica fue mayor que la conductividad hidráulica de saturación para los suelos Maipo y Santiago; en cambio, en el suelo Agua del Gato se produjo lo inverso, probablemente debido a que la conductividad hidráulica de saturación se determinó en el laboratorio en muestras de suelo disturbadas tamizadas a 2 mm pertenecientes a cada suelo, no así la velocidad de infiltración básica determinada directamente en el campo.

Los valores de infiltración acumulada en función del tiempo para los suelos Agua del Gato, Maipo y Santiago fueron determinados experimentalmente en el campo y se presentan en la figura 1.

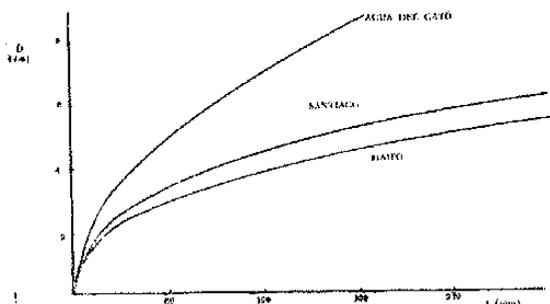
Los valores experimentales de infiltración acumulada presentados anteriormente se comparan con valores estimados de infiltración a través del uso de los modelos empíricos, semi-analíticos y analíticos mencionados en la introducción.

Para la ecuación de Kostiaikov, la infiltración acumulada es de la forma $d = CT^b$ ($0 < b < 1$), y para los suelos estudiados se determinaron las siguientes ecuaciones de infiltración acumulada.

FIGURA 1

CURVAS DE INFILTRACION ACUMULADA. DETERMINACIONES EXPERIMENTALES

Cumulative infiltration curves. Experimental data



Ecuación 1.a
Suelo Agua del Gato $D = 0.72 T^{0.420}$
Ecuación 1.b
Suelo Maipo $D = 0.59 T^{0.342}$
Ecuación 1.c
Suelo Santiago $D = 0.63 T^{0.407}$

El enfoque empírico de Holtan considera algunos parámetros físicos del suelo, como son:

1. El potencial de almacenamiento de agua en el suelo, o sea, aquella carga de agua en centímetros que pueda almacenar el suelo hasta saturación, a partir de la humedad actual en el momento de comenzar el proceso de infiltración.

2. Infiltración básica del suelo. Asimismo, requiere de la determinación del valor de a , que es una constante que depende del tipo de suelo, cultivo y del proceso de humedecimiento, parámetro que se determina ajustando los valores de infiltración medidos en el campo, a los otros parámetros conocidos.

La ecuación general de Holtan es de la forma:

$D = (m+1)a (St - w)^{m+1} + T1b$. El parámetro m tiene un valor de 1.4 para una amplia gama de suelos (Skaggs, 1969) y la expresión $(St-w)$ corresponde al potencial de almacenamiento de agua definido anteriormente, por lo que las ecuaciones específicas para cada suelo dependen del contenido inicial de agua del suelo antes de comenzar el proceso de infiltración.

Para los suelos estudiados y las condiciones iniciales de contenido de agua, las ecuaciones de infiltración según el enfoque de Holtan son:

Suelo Agua del Gato $D = 1519.75a + 0.984T$
Suelo Maipo $D = 4569.59a + 0.384T$
Suelo Santiago $D = 559.66a + 0.472T$

siendo el coeficiente a el parámetro fundamental que determina la infiltración acumulada.

Inicialmente, el parámetro a está definido como una constante para cada suelo, pero los resultados de infiltración obtenidos experimentalmente no se ajustan a esa situación, ni a ninguna función exponencial, razón por la cual se consideró al parámetro a como una variable en función del tiempo.

En los tres suelos $a = f(t^{-\lambda})$, presentando por lo tanto el valor más alto al primer minuto después de iniciado el proceso de infil-

tración. Los valores de a calculados para los suelos estudiados se presentan en el cuadro 3.

CUADRO 3

VALORES DE a USADOS EN LA ECUACION DE HOLTAN ET AL., EN FUNCION DEL TIEMPO, PARA LOS TRES SUELOS

Values used on Holtan et al., equation, as a function of time

Suelo	Agua del Gato ($\times 10^{-3}$)	Maipo ($\times 10^{-3}$)	Santiago ($\times 10^{-3}$)
1	8,6000	2,7900	11,6200
2	3,1110	0,9870	3,8630
3	2,6640	0,5386	2,9450
4	2,1300	0,5181	2,5860
5	1,8660	0,4972	2,4420
6	1,5600	0,4756	2,2850
7	1,4770	0,2388	2,2020
8	1,3700	0,2276	1,7630
9	1,2470	0,2160	1,8830
10	1,2580	0,2099	1,0950
11	0,8472	0,1104	0,9161
12	0,7895	0,0922	0,6071
13	0,7058	0,0448	0,5975
14		0,0406	0,5641
15		0,0344	0,5216
16		0,0175	0,4835
17		0,0071	0,0957

La ecuación de Horton corresponde a un enfoque empírico que tiene una frecuente aplicación en hidrología; permite describir la infiltración acumulada en función de parámetros que se deducen a partir de determinaciones experimentales de infiltración.

La ecuación de Horton es de la forma:

$I = I_0 - \frac{I_0 - I_b}{B} (1 - \exp - BT)$, y para

los suelos estudiados, los valores de los parámetros I_0 y B permiten representar la infiltración acumulada, según el enfoque de Horton a través de las siguientes ecuaciones:

Agua del Gato $D = 0.984T - 15.514 (1 - \exp 0.42T)$
Maipo $D = 0.384T - 15.900 (1 - \exp 0.24T)$
Santiago $D = 0.472T - 15.426 (1 - \exp 0.30T)$

Los valores de I_0 y B se obtienen gráficamente de la curva $I = f(\log T)$, cuya pendiente corresponde al valor de B , e I_0 es el correspondiente a $T = 1$.

El enfoque semianalítico de Green y Ampt (1911) considera varios parámetros físicos del suelo para estimar los resultados de infiltración acumulada de agua en los suelos:

1. Conductividad hidráulica saturada (Ks).
2. Contenido de humedad inicial del suelo (θ).
3. Espesor de cada estrata (z).
4. La curva de retención de humedad de cada estrata, para calcular el potencial matricial en el frente de mojado (hf).

Las curvas características de humedad que relacionan el contenido de agua del suelo y la tensión a que está retenida el agua, para cada una de las estratas de los perfiles de suelo empleados en este estudio, se presentan en la figura 2.

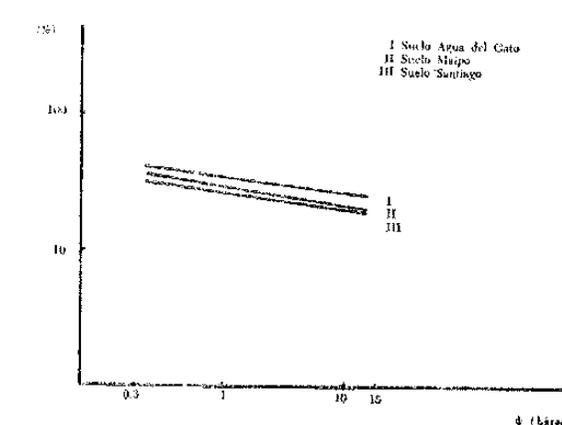


FIGURA 2

CURVAS DE RETENCION DE HUMEDAD (CONTENIDO DE HUMEDAD EN VOLUMEN Y TENSION EN ATMOSFERAS)

Soil moisture retention curves (volumetric water content and tension in atmospheres)

Usando todos los valores calculados, se determinaron los valores de infiltración acumulada, siguiendo el procedimiento sugerido por Norero y Andrade (1974) para la ecuación de Green y Ampt; estos valores resultan del desarrollo de la expresión

$D = D_n + (\theta_s - \theta) L$

donde:

D_n es la infiltración necesaria para saturar las n estratas, para lo cual ha transcurrido el tiempo T_n .

T_n corresponde al tiempo transcurrido para humedecer las n estratas que se encuentran sobre L .

Para predecir los valores de infiltración acumulada, a través del modelo de simulación, no se requiere de pruebas experimentales de infiltración en el campo. Este modelo de simulación requiere de la determinación de los siguientes valores:

1. Contenido de humedad del suelo para $T = 0$, para cada estrata.
2. Contenido de humedad en estado de saturación por estrata.
3. Conductividad hidráulica de saturación.
4. Conductividad hidráulica en función del contenido de humedad del suelo, por estrata.
5. Curvas de retención de humedad por estrata.
6. Espesor de cada estrata y profundidad del suelo considerado.

La función de conductividad hidráulica no saturada, en relación al contenido de agua del suelo, se determinó de acuerdo con el método propuesto por Campbell (1974) y resulta del desarrollo de la expresión:

$$K_c = K_s \left(\frac{\theta}{\theta_s} \right)^{2b + 2 + p}$$

es que b es una constante de interacción de poros, cuyo valor es aproximadamente 1 (uno).

Los parámetros señalados permiten estimar los valores de infiltración acumulada, a través del uso de un programa de computación en lenguaje CSMP (Gurovich, 1977).

La solución de Philip para la ecuación de flujo, en las condiciones iniciales y de borde que representan la infiltración vertical en suelo no estratificado y con un contenido inicial de agua uniforme, es la forma $D = ST^{1/2} + AT$, en que S , la sorptividad, es una constante que está en relación con el contenido inicial de agua del suelo, y A es una constante definida en base a la conductividad hidráulica de saturación (Philip, 1969; Youngs, 1968).

Para los suelos estudiados, las ecuaciones de infiltración acumulada, según el enfoque analítico de Philip, son:

Suelo Agua del Gato

$$D = 8.75 \times 10^{-2} T^{1/2} + 1.520 \times 10^{-4} T$$

Suelo Maipo

$$D = 4.96 \times 10^{-2} T^{1/2} + 0.426 \times 10^{-4} T$$

Suelo Santiago

$$D = 5.59 \times 10^{-2} T^{1/2} + 0.486 \times 10^{-4} T$$

El parámetro A ha sido objeto de muchas

sugerencias de cálculo o estimación (Youngs, 1968). La mayoría de ellas dan valores a la constante A en relación a la conductividad hidráulica de saturación; así tenemos:

$$A = 1/3 K_s \quad A = 1/2 K_s \quad A = 2/3 K_s$$

Para efectos de este estudio se consideró aquel valor de mayor uso en la bibliografía ($A = 1/2 K_s$) (Parlange, 1971; Philips, 1969; Youngs, 1968).

DISCUSIÓN GENERAL

En la figura 3 se presentan las curvas de infiltración acumulada, obtenidas por medio de los enfoques matemáticos usados en este estudio y las obtenidas por medio de experimentación con cilindros infiltrómetros dobles en el campo, para los suelos Agua del Gato, Maipo y Santiago.

En estas figuras se hacen constar solamente curvas de infiltración acumulada, obtenidas por cuatro enfoques matemáticos:

1. Ecuación de Horton (empírica).
2. Enfoque semianalítico de Green y Ampt.
3. Modelo de Simulación.
4. Solución a la ecuación de flujo propuesta por Philip.

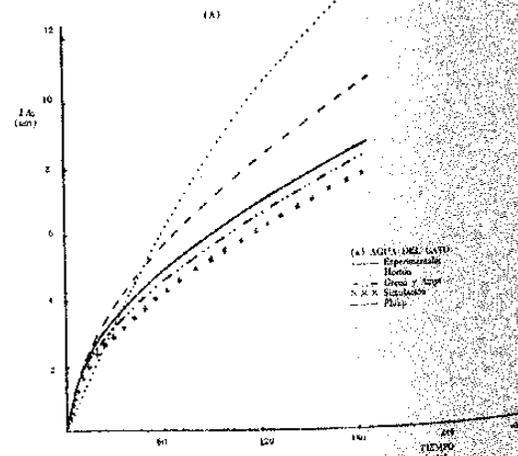


FIGURA 3

CURVAS DE INFILTRACION ACUMULADA ESTIMACIONES POR ENFOQUE

Cumulative infiltration curves obtained through different approaches

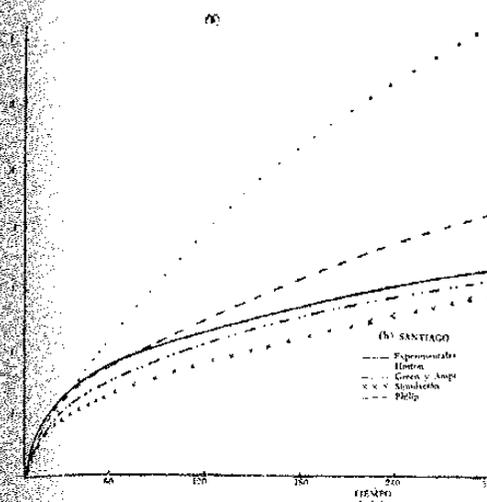


FIGURA 4

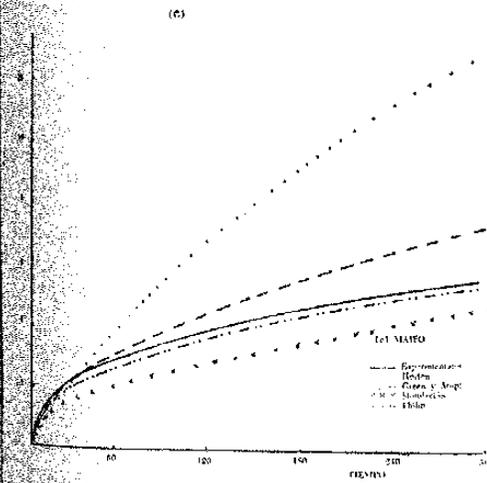


FIGURA 5

Las curvas de infiltración acumulada, obtenidas por las ecuaciones empíricas de Kostiaikov y de Holtan *et al.*, no se presentan gráficamente, ya que el ajuste de los resultados obtenidos por Kostiaikov es casi similar a los experimentales de campo; en cambio, los de-

terminados por medio de la ecuación de Holtan *et al.*, considerando uno de sus parámetros como una variable en función directa del tiempo, no se presentan en forma gráfica, debido a que su ajuste es muy ineficiente.

De los seis enfoques matemáticos usados para estimar valores de infiltración acumulada, solamente dos de ellos no se ajustan a las determinaciones experimentales de campo:

- 1) La ecuación empírica de Horton.
- 2) La ecuación analítica de Philip diseñada para suelos homogéneos. La ecuación de Holtan, de acuerdo a la concepción del autor, tampoco se ajusta a los valores de infiltración acumulada determinados experimentalmente en el campo, pero haciendo las consideraciones de que la constante a sea considerada como una variable en función del tiempo, los resultados se ajustan en buena forma con los experimentales.

La ecuación de Horton no se ajusta, probablemente, debido a que el autor de la función (Baver *et al.*, 1973; Horton, 1940) estima los valores de infiltración acumulada como una función semilogarítmica en el tiempo; esto hace que la determinación de la velocidad de infiltración en el primer minuto y la pendiente de esa curva ($I = f(\log T)$) sea deficiente, ya que la infiltración acumulada o la velocidad de infiltración de agua en el suelo se acerca más a una función logarítmica como se vio en el enfoque de Kostiaikov.

La ecuación de Philip, en cambio, fue propuesta por el autor para describir el proceso de infiltración en suelos completamente homogéneos. Los perfiles de suelo usados en este estudio son perfiles estratificados con variaciones: en espesor, contenido de humedad inicial, contenido de humedad de saturación, conductividad hidráulica, lo que hace que los valores de infiltración acumulada estimados por medio de este enfoque matemático no se ajusten a los experimentales de campo.

Las curvas de infiltración acumulada obtenidas por medio de la ecuación de Kostiaikov son comparables a las obtenidas experimentalmente en el campo para los tres suelos. Este ajuste en los resultados se debe a que la ecuación de Kostiaikov sirve para expresar matemáticamente los resultados experimentales, y las constantes necesarias para la ecuación se obtienen a partir de estos resultados. Es importante señalar que la ecuación empírica de Kostiaikov no permite extrapolar resultados de infiltración acumulada a otras situaciones

diferentes a las experimentales de campo, e incluso, no permiten inferir resultados para tiempos superiores a los determinados experimentalmente, debido a que la estructura o concepción de esta ecuación no considera en forma directa ningún parámetro físico del suelo que controlen el proceso de infiltración.

Los enfoques semianalíticos para determinar la infiltración acumulada:

1) Ecuación de Green y Ampt.
2) Modelo de Simulación, presentan curvas que se ajustan moderadamente bien a las obtenidas a partir de las determinaciones experimentales de infiltración acumulada en el campo. Un mejor ajuste de los resultados experimentales se obtiene si se determinan todos los parámetros requeridos en los enfoques semianalíticos (conductividad hidráulica de saturación, curvas de retención de humedad) en las mismas condiciones en que se realiza la experiencia, o sea, si se hacen determinaciones de laboratorio para los parámetros físicos, se debe comparar con resultados experimentales obtenidos en esa misma situación.

La ecuación propuesta por Green y Ampt requiere para el cálculo de tiempos de infiltración de una determinada lámina de agua en pruebas de infiltración. En cambio, el modelo de simulación no necesita de valores experimentales de campo.

Estos enfoques semianalíticos permiten extrapolar valores de infiltración acumulada en el suelo en situaciones diferentes a las experimentales, debido a que su resolución se basa en parámetros físicos del suelo (contenido de humedad del suelo o estructura del perfil reflejada en la conductividad hidráulica y porosidad total), que influyen directamente en el proceso de infiltración en un medio poroso.

Es importante señalar que para una mayor seguridad en el uso de los enfoques semianalíticos y fundamentalmente el modelo de simulación, se requiere un mayor número de experimentos, ya sea en el campo o en el laboratorio, considerando las recomendaciones discutidas anteriormente.

CONCLUSIONES

En base a los resultados obtenidos en este estudio, para lo cual se emplearon seis enfoques matemáticos para estimar valores de infiltración acumulada y se comparan con determinaciones de infiltración experimentales

de campo, en tres suelos de la Zona Central de Chile, se derivan las siguientes conclusiones:

De los tres enfoques empíricos usados en este estudio, el que mejor se ajusta a los valores experimentales de infiltración en el campo es la ecuación de Kostiaikov. Las otras dos ecuaciones empíricas (Holtan *et al.* y Horton) no se ajustan a las determinaciones experimentales de campo.

De las tres ecuaciones empíricas estudiadas, ninguna permite extrapolar a otras situaciones diferentes a las experimentales de campo, ya que sus parámetros resultan a partir de los valores de infiltración medidos.

Los dos enfoques semianalíticos utilizados en este estudio permiten obtener resultados que se ajustan moderadamente bien a las determinaciones experimentales de campo. Es recomendable utilizar un mayor número de experimentos para su evaluación final.

Los enfoques de Green y Ampt y el modelo de simulación permiten hacer extrapolaciones a otras situaciones diferentes a las experimentales. El modelo de simulación no requiere, para ello, de pruebas de infiltración en el campo.

El modelo de simulación, para describir el proceso de infiltración de agua en el suelo, requiere de la determinación de los siguientes parámetros:

- 1) Conductividad hidráulica de saturación.
- 2) Contenido de humedad inicial del suelo por estrata.
- 3) Contenido de humedad en estado de saturación por estrata.
- 4) Curvas de retención de humedad por estrata.
- 5) Espesor de cada estrata y profundidad del perfil del suelo considerado.

El rollo de simulación resulta el enfoque más ventajoso para este tipo de estudios, ya que con la determinación de los parámetros físicos señalados, es posible estimar la infiltración de agua de un suelo sin necesidad de realizar experiencias de campo, tan sujetas a variabilidad debido a la heterogeneidad de los perfiles de suelo.

La solución a la ecuación de flujo, propuesta por Philip para suelos homogéneos, no se ajusta a los valores experimentales de infiltración, determinados en el campo en los tres suelos estudiados que tienen características heterogéneas.

RESUMEN

La determinación y descripción del proceso de infiltración es de mucha importancia para la planificación del riego en la agricultura. Los métodos usados para la determinación de valores de infiltración presentan una gran variabilidad de sus resultados, razón por la cual se planteó la necesidad de encontrar un enfoque matemático que permita estimar o pronosticar los resultados de este proceso y, además, permita extrapolar a otras situaciones diferentes a las experimentales, en base a las características físicas del perfil del suelo.

En este estudio se utilizaron seis enfoques matemáticos para estimar valores de infiltración acumulada: tres empíricos (Kostiaikov, Horton y Holtan *et al.*), dos semianalíticos (Green y Ampt y modelo de simulación) y un enfoque analítico (solución de la ecuación de flujo propuesta por Philip). Los resultados de infiltración acumulada estimada por estas ecuaciones se compararon con valores obtenidos experimentalmente en el campo con cilindros infiltrómetros dobles, para tres suelos de la Zona Central de Chile (Series Agua del Gato, Maipo y Santiago).

Los parámetros físicos o empíricos usados en los diferentes enfoques se determinaron en el campo, en el laboratorio y por cálculos matemáticos, tratando, en todo caso, de seguir procedimientos que han sido comprobados en otros estudios en forma satisfactoria.

De este estudio se concluyó que los enfoques semianalíticos de Green y Ampt y el modelo de simulación (Gurovich, 1977) son los más adecuados para describir el proceso de infiltración, permitiendo, además, extrapolar resultados a situaciones diferentes a las experimentales de campo, recalcando la importancia del modelo de simulación de no requerir de pruebas experimentales de infiltración.

Estos enfoques semianalíticos para describir el proceso de infiltración requieren de una determinación precisa de:

- a) Conductividad hidráulica de saturación.
- b) Curvas de retención de humedad para cada estrata de suelo.
- c) Funciones de conductividad hidráulica en relación al contenido de humedad del suelo por estrata.
- d) Contenido de humedad del suelo inicial y en estado de saturación por estrata.
- e) Espesor de cada estrata y profundidad del perfil de suelo considerado.

LITERATURA CITADA

- DÍAZ, F., 1974. Corporación entre métodos para determinar velocidad de infiltración. Chillán, Chile. U. de Concepción. Tesis. 112 p.
- ESPÍNDORA, B., BROWN, E., CABRERA, G. y ISENSE, P., 1975. Elementos de Hidrología. Centro de Recursos Hidráulicos, U. de Chile.
- GARDNER, W. H., 1965. Agronomy Nº 9.
- GREEN, W. H. and AMPT, G. A., 1911. Studies on soil physics I: Flow of air and water through soils. I. Agr. Sci 4: 1-24.
- GUROVICH, L., 1975. Curso de Física de Suelos. Santiago, Chile. Universidad Católica. Programa de Postgrado en Manejo de Suelos y Riego.
- GUROVICH, L., 1977. Modelo simulativo para la predicción de la infiltración del agua en el suelo. Ciencia e Investigación Agraria. Vol. 4, Nº 3.
- GARDNER, W. H. and GARDNER, W. R., 1973. Soil Physics John Wiley & Sons, N. York.
- PHILIP, G., 1965. Agronomy Nº 9: 373-377.
- FAO, 1974. El riego superficial. FAO. Cuadernos de Fomento Agropecuario, Roma, Italia. 100 p.
- PHILIP, G., 1974. A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data. Soil Sci. 117: 311-314.
- PHILIP, F., 1969. An Introduction to the Physical Basis of the Soil Water Phenomena. John Wiley & Sons, N. York.
- PHILIP, F. and FRAY, A., 1963. Measurement of infiltration rates in irrigation furrows. Transaction of ASAE. C: 318-319.

- HASSE, H. R., 1956. The use of cylinder infiltrometers to determine the intake characteristics of irrigated soils U.S. Department of Agriculture. Pub. ARS 41-47.
- HILLEL, D., 1971. Soil and water. Physical principles and processes. Academic Press, N. York.
- HORTON, L., 1940. An approach towards a physical interpretation of infiltration capacity. Soil. Sci. Soc. Amer. Proc. 5: 399-417.
- ISRAELSEN, O. W. and HANSEN, V. E., 1965. Principios y aplicaciones del riego. Ed. Reverté. S. A. Barcelona, España.
- KIRKHAM, D. and POWERS, W. L., 1972. Advanced Soil Physics John Wiley & Sons, N. York.
- KLUTE, A., 1965. Agronomy N° 9: 210-220.
- KOSTIAKOV, A. N., 1932. On the dynamics of the coefficient of water percolation in soils and on the necessity for studying it from a dynamic point of view for purposes of amelioration. Trans Comm Inter. Soil Sci. Soc. Mosoow 6th part. A: 17-21.
- LIBARDI, P. y REICHARDT, K., 1974. Generalizacáo do movimento do agua no solo. I. Infiltraçao Horizontal; II. Infiltraçao Vertical. Boletín científico. CENA, Piracicaba, S. P. Brasil.
- NOREHO, A. y ANDRADE, R. 1974. Consideraciones sobre la infiltración y sus implicancias técnicas. CIDIAT, Mérida, Venezuela.
- OSORIO, A., 1974. Comparación entre el método del cilindro y de la parcela infiltrómetro y efecto de algunos factores que inciden sobre la velocidad de infiltración del suelo. Santiago, Chile. U. de Chile. Tesis. 91 p.
- PARLANGE Y. Y., 1971. Theory of water movement in soil 2. One dimensional infiltration. Soil Sci. 111: 170-174.
- PHILIP I. R., 1957. The theory of infiltration. I. The infiltration equation and its solution. Soil Sci. 83: 345-357.
- , 1969. Theory of infiltration. Advances in Hydroscience 5: 216-296.
- , 1957. Stability analysis of infiltration Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 39: 1042-1049.
- RICHARDS, L. A., 1954. Diagnóstico y Rehabilitación de suelos salinos y sódicos. Manual de Agricultura N° 60. U.S.D.A.
- RUIZ, E., 1974. Caracterización hídrica de nuevas series de suelos de la Provincia de Santiago, Santiago, Chile. U. Católica. Tesis. 95 p.
- SKAGGS, R. W., 1969. Experimental evaluation of infiltration equations. Transactions of the ASAE 12: 822-828.
- SWAITZENDRUBER, D. and YOUNGS, E. A. Note on a comparison of Physically-based infiltration equations. Soil Sci. 117: 165-167.
- TOSCO, I. y TONDREAU, I., 1975. Velocidad de infiltración para diseños de métodos de riego. INIA. 44 p.
- VANDER PLOEG R. R., 1974. Simulation of moisture transfer in soils: one dimensional infiltration. Soil Sci. 118: 349-357.
- VOMOCIL, I. A., 1965. Agronomy N° 9: 299-314.
- YOUNGS, E. C., 1968. An estimation of sorptivity for infiltration studies from moisture movement considerations. Soil Sci. 106: 157-163.

RESUMENES DE TESIS PRESENTADOS POR ALUMNOS DE LA FACULTAD DE AGRONOMIA DE LA U. C., COMO PARTE DE SUS REQUISITOS PARA OPTAR AL TITULO DE INGENIERO AGRONOMO

CREDITO ORIENTADO DE CAPITALIZACION DETERMINACION DE SU COSTO REAL PARA EL USUARIO

AGUSTIN GREZ ECHEVERRIA

La agricultura, igual que el resto de las actividades económicas, requiere del crédito para su desarrollo. En nuestro país, que se ha caracterizado por tener altas tasas de inflación, hubo que buscar algún sistema que asegurara al Banco o institución Crediticia recuperar la misma cantidad prestada más sus respectivos intereses, para poder otorgar créditos a largo plazo. Uno de estos sistemas fue expresar la suma prestada en Unidades de Fomento, las que serían reajustables una vez cada tres meses, de acuerdo al alza que experimentara el Índice de Precios al Consumidor.

Uno de estos créditos en Unidades de Fomento reajustables fue el COC, programa crediticio especial para la agricultura, llamado Crédito Orientado de Capacitación, financiado con fondos del BID y del Banco del Estado de Chile.

Sin embargo, la inflación fuerte y sostenida existente en el país hizo pensar que el sistema de reajustabilidad empleado permitiría otorgar a sus usuarios un subsidio a través de este crédito.

Para verificar esta hipótesis, se expresaron para una muestra representativa de la población estudiada todos los flujos de dinero en moneda de un mismo mes, el cual para los efectos de este trabajo fue el de octubre de 1974. Luego, tales flujos se descontaron a la tasa de interés pactada en el crédito, encontrándose que el Valor Presente del Flujo de Pagos era bastante inferior al Valor Presente de los montos otorgados a Crédito. Tanto los pagos como el crédito se expresaron en escudos, y la diferencia entre ambos valores correspondió al Subsidio Implícito otorgado a través del crédito, originado en el sistema de reajustabilidad trimestral de la Unidad de Fomento, comprobándose de esta forma la hipótesis mencionada.

El monto del Subsidio determinado fluctuó en promedio para cada uno de los miembros de la población estudiada, con un margen de error de un 5%, entre los 3,50 y los 5,20 millones de escudos del 31 de octubre de 1974. Montos que para toda esa población pueden variar entre los 1.236 y los 1.837 millones de escudos de esa fecha, cifras que expresadas en porcentajes del total de los recursos colocados a créditos entre los miembros de esa población corresponden a un 32 y un 48%, respectivamente.

Se determinó también la tasa de interés real de este crédito, encontrándose que para el promedio de la muestra, esta tasa es negativa e igual a -10,40% anual. Al ser la muestra representativa de la población, podría decirse que la tasa de interés real del COC es un promedio igual a ese valor.

EFFECTO DEL TAMAÑO DE PARCELAS EXPERIMENTALES SOBRE COMPONENTES DE RENDIMIENTO Y RENDIMIENTO EN TRIGO (*Triticum aestivum* L.)

CARMEN CABRERA VALENZUELA

RESUMEN

Efecto del tamaño de parcelas experimentales sobre componentes de rendimiento y rendimiento en trigo (*Triticum aestivum* L.).

Nueve genotipos de trigo (*Triticum aestivum* L.) fueron sembrados bajo diferentes tamaños de parcelas, para determinar la precisión estadística y eficiencia experimental de parcelas de 2 m de largo a 30 cm de distancia, 2 m a 20 cm de distancia, 1 m a 30 cm de distancia y 1 m a 20 cm de distancia. El material se distribuyó en bloque completos al azar con cuatro repeticiones, midiéndose rendimientos, componentes de rendimiento y altura de planta adulta.

La precisión y eficiencia se evaluó mediante: a) coeficientes de variación; b) cuadrados medios del error; c) consistencia en el orden del comportamiento de los genotipos; d) comparación de los promedios, y e) capacidad de diferenciar comportamientos a través de la nueva prueba de rango múltiple de Duncan.

La precisión experimental de los surcos largos fue superior a la de los surcos cortos. El espaciamiento entre surcos afectó la altura de las plantas. El rendimiento fue más alto en los surcos más espaciados, posiblemente debido a una más alta expresión de los componentes número de granos por espiga y peso de los granos.

Las parcelas con surcos de 2 m de largo espaciados a 30 cm resultaron experimentalmente más eficientes, puesto que presentaron una precisión experimental superior, a la vez que permitieron una mejor expresión del potencial de rendimiento de los cultivares.

VALOR NUTRITIVO DEL CENTENO CON Y SIN SUPLEMENTACION DE PENICILINA PROCAINA EN LA ALIMENTACION DE CERDOS EN CRIANZA Y ENGORDA

LIVIA GARCÍA CARRINCHELLI, JUAN GOICORCHEA RICHARDSON

El presente ensayo se realizó con el fin de evaluar el valor alimenticio del centeno como grano base en raciones para cerdos y el efecto de la suplementación de penicilina procaína en dichas raciones.

El ensayo se llevó a cabo en las instalaciones de la Estación Experimental de la Universidad Católica de Chile, en Pirque. Para tal efecto se dispuso de 48 cerdos Landrace, machos y hembras, con un peso inicial promedio de 27 kg, los cuales fueron sorteados a seis grupos y mantenidos en corrales con piso de concreto, con agua y alimentos a discreción. Los tratamientos dispuestos a la siguiente forma:

	I	II	III	IV	V	VI
Centeno (%)	0	0	50	50	100	100
Penicilina procaína (50 ppm)	no	sí	no	sí	no	sí

El período de ensayo se dividió en dos etapas; una de crianza, en la que se formularon raciones isoproteicas (16% de proteína), con un tenor de energía metabolizable entre 3.257 y 3.025 Kcal/kg, y una de engorda en que las raciones contenían 13% de proteína y aportaban una cuota de energía metabolizable entre 3.229 y 3.017 Kcal/kg.

Cuando los cerdos alcanzaron un peso promedio de 60 kg se realizó un ensayo de digestibilidad basado en el método del indicador del óxido de cromo.

Los cerdos fueron sacados del ensayo individualmente cuando alcanzaron un peso promedio de 95 ± 2 kg y se procedió a determinar en vivo el espesor de grasa dorsal.

Los resultados indicaron que al suministrar niveles medios (50%) y altos (100%) de centeno en las raciones, se produjo una disminución en el crecimiento. Sin embargo, las ganancias diarias de peso se incrementaron al adicionar penicilina procaína a las raciones.

	I	II	III	IV	V	VI
Centeno (%)	0	0	50	50	100	100
Penicilina procaína (50 ppm)	no	sí	no	sí	no	sí
Consumo/día (kg)	2.7	2.2	2.6	2.6	2.4	2.4
Ganancia/día (gr)	717	545	698	712	618	746
Ganancia/consumo	265	248	268	278	257	310

El consumo tendió a disminuir al incrementarse los niveles de centeno en las raciones.

La digestibilidad de la energía bruta y de la proteína cruda de las raciones con centeno y penicilina procaína fue mayor que aquellas que no aportaban antibiótico.

TESIS UN MODELO ECONOMETRICO PARA LA GANADERIA BOVINA EN CHILE

CESAR BARROS MONTERO

El objetivo de esta tesis fue estudiar la estimación de elasticidades de respuesta a precios en el mercado del ganado bovino. La metodología que se usó fue la estimación econométrica simultánea de las funciones de demanda por carne de bovino y de las ofertas de los diferentes tipos de animales (machos y hembras).

Los resultados validaron para el caso chileno la ya conocida teoría creada por Jarvis e Yver, en el sentido de que la oferta de corto plazo de carne responde en forma "perversa" ante cambios en los precios. Esta situación, sin embargo, se corrige en el largo plazo.

Las estimaciones mostraron que los ganaderos chilenos responden racionalmente a los cambios de precios, siendo su respuesta aun más rápida que la de su contraparte argentina.

NORMAS PARA LA PUBLICACION DE ARTICULOS

La Revista aparecerá en cuatro números anuales que formarán un volumen. Cada número tendrá las siguientes secciones:

1. *Investigaciones:* Serán trabajos originales, que usando el sistema lógico, adopten las normas establecidas por el Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la OEA (IICA). Estas investigaciones serán agrupadas por materias específicas: Desarrollo Rural, Economía Agraria, Fitotecnia, Frutales y Viñas, Suelos, Zootecnia, Misceláneos.
2. *Notas de Investigación:* Comunicaciones cortas y originales sobre un tema específico que no se ciñan a las normas establecidas para un trabajo científico.
3. *Puesta al Día:* Revisiones bibliográficas, traducciones, resúmenes o comentarios de artículos científicos, libros y otras publicaciones nacionales o extranjeras, que pueden ser de interés para los lectores de la publicación.
4. *Crónica:* Información de actividades de la Facultad y/o Universidad, o de eventos de carácter extranjero que puedan ser de interés.

La Revista estará abierta a recibir colaboraciones de autores de otras universidades o institutos de investigación. Los trabajos enviados deberán ceñirse a las normas de publicación de la Revista y estarán sujetos a revisión por el Comité Editor o la persona que éste designe, antes de ser publicados.

Cada artículo debe constar de las siguientes partes:

- a) Título; b) Autor; c) Institución o unidad académica en que se realizó el trabajo; d) Summary; e) Introducción; f) Materiales y Métodos; g) Presentación de resultados y discusión; h) Conclusiones; i) Resumen; j) Literatura citada.

Los trabajos deben ser mecanografiados a doble espacio, numerándose todas las páginas, incluso las de cuadros y figuras, debiéndose entregar un original y dos copias. Los cuadros deben ser lo más simples posibles, sólo con los datos esenciales. Cada cuadro debe ser entregado en hoja aparte, con los pesos y medidas expresados en sistema métrico decimal y las temperaturas en grados Celsius. La leyenda debe ser mecanografiada en hoja aparte. Las fotografías deben ir con su título respectivo. El aumento correspondiente a las microfotografías debe indicarse en la leyenda. Figuras, cuadros, gráficos, etc., deben ser dibujados en cartulina con tinta china negra (no se aceptará escritura a máquina sobre este material).

NORMAS A APLICARSE EN CADA SECCION DEL MANUSCRITO

Título: En mayúscula y con su traducción en inglés.

Autor: Nombre de pila y primer apellido. No se usarán títulos ni grados académicos. La información adicional puede hacerse en notas al pie de la página. Primera letra del nombre y del apellido en mayúsculas. Los nombres de los autores separados por coma.

Introducción: No debe exceder de 200 palabras. En ella se indicará la interrogante o problemática y las razones por las cuales se plantea.

Notas al pie de página: Deben enumerarse en forma continua a través de todo el artículo. Las correspondientes a los cuadros serán identificadas con letras en forma individual para cada uno. Significancia de estadísticos se indica usualmente con asteriscos.

Título de Texto: Habrá tres tipos de títulos de texto. Sólo la primera letra de cada sustantivo será en mayúsculas.

1. Título principal: aparecerá al centro de la página.
2. Primer subtítulo: aparece al margen izquierdo de la página en letra bastardilla (se señala subrayando en el manuscrito), al principio del párrafo en líneas aparte.
3. Segundo subtítulo: aparece en el margen izquierdo en letra bastardilla al principio del párrafo y separado por punto del resto del párrafo. Usar el tipo 3 preferencialmente.

Citas en Literatura: Como normas generales se usarán las indicadas por el Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas (IICA) de la OEA (Redacción de Referencias Bibliográficas). Se harán en el texto de dos formas, dependiendo de la estructura de la frase.

1) Brown (1948) demostró en la cabra montés y Archibald y Mc Clintock (1949 a, b) y Best *et al.* (1951) en bovinos, que...

2) Se ha demostrado en la cabra montés (Brown 1948) como también en bovinos (Archibald Mc Clintock, 1949 a, b; Best *et al.* (1951), que...

Literatura citada: La literatura no publicada no se incluye en la lista de la literatura citada. Se coloca en el texto como comunicación personal o datos no publicados. En la lista de literatura citada se tomarán en cuenta las siguientes normas:

Se posponen las iniciales de los nombres de los autores sólo para citar al primero de cada referencia. La lista de citas se hará por orden alfabético. Se usa el orden cronológico cuando existen varias publicaciones de los mismos autores, siempre que el nombre de los autores esté dado en el mismo orden. Sólo la primera palabra y los nombres propios comienzan con letras mayúsculas. En caso de letras que comienzan con mayúsculas todos los sustantivos o adjetivos sustantivados. También se anota la edición, la editorial y la ciudad de publicación. La abreviación de una revista citada no es seguida de coma.

Material gráfico: Debe emplearse siempre que lo explicado no pueda expresarse fácilmente en el texto. El gráfico debe reemplazar al texto y no duplicarlo. Cuando se utilizan gráficos, cuadros, etc., deben ser claros, simples, concisos. Se debe seleccionar el mínimo de datos necesarios para mostrar los puntos que se desea enfatizar y así pueda ser analizado con facilidad. Los títulos principales irán en mayúsculas, no seguidos de punto y con su traducción al inglés. Esto deberá subrayarse. Cada columna tendrá su encabezamiento, e irá también traducido al inglés. Sólo la primera letra de estos títulos irá con mayúscula. Los asteriscos se usan solamente para indicar significancia y deben ir acompañados de notas al pie de la página. Para marcar otras notas al pie del cuadro deben usarse letras minúsculas elevadas. Evítense el uso de líneas verticales y de signos especiales. Las desviaciones estándares de promedio (errores estándares) se pueden agregar a los valores con un signo más o menos, pero para ello es conveniente usar una columna o líneas separadas. Las desviaciones estándares (de observaciones) no deben agregarse a los valores, pero deben aparecer en una columna o línea separada. Las técnicas estadísticas para hacer test de significancia entre varios valores se indican en Snedecor (1965), p. 251 y sig. y Steel y Torrie (1960), p. 106 y sig.

Figuras: Mapas y figuras íntegramente dibujados con tinta china. Los originales no deberán ser más grandes que 21,5 x 27,5 cm, debiendo enviarse dos ejemplares de cada uno. Las fotografías deben tener buenos contrastes. Los mosaicos fotográficos deben presentarse montados sobre una hoja de papel, totalmente terminados, con leyendas y numeración. Deben entregarse en hojas separadas marcadas con: Figura y su respectiva traducción al inglés, subrayada.

Material de estadísticas: Las tablas deben ser usadas cuando los lectores necesitan números exactos o cuando el material no puede ser graficado. Los datos deben ser resumidos y analizados con métodos estadísticos que usen eficientemente la información de que se dispone.

Otros: Usar sólo sistema métrico decimal. No usar mayúsculas en las palabras cuadro o figura dentro del texto. Usar números arábigos. Las abreviaciones siempre en singular. Agradecimientos deben aparecer en la primera página como nota al pie del autor. Por cada número se considerarán 10 separatas (apartados) en forma gratuita. Cada separata adicional deberá pagarse de acuerdo a los costos del momento.