

PD-ABH-127

XID 8.337

ISA 85125

FINAL REPORT

Submitted to the Office of the Science Advisor  
U.S. Agency for International Development

## WATER OPTIMIZATION OF RAINFED TROPICAL CROPPING

Principal Investigator: Ricardo Radulovich  
Grantee Institution: University of Costa Rica

Project Number: 8.337  
Project No. 936-5542.12 (AID/Costa Rica)

A.I.D. Grant Project Officers:  
Jaime Correa (Costa Rica)  
Raymond Meyer (Washington, D.C.)

CC: ROSTID + CD 12  
Project Duration: 9/1988 to 6/1992

**FINAL REPORT**

Submitted to the Office of the Science Advisor  
U.S. Agency for International Development

**WATER OPTIMIZATION  
OF RAINFED TROPICAL CROPPING**

Principal Investigator: Ricardo Radulovich  
Grantee Institution: University of Costa Rica

Project Number: 8.337  
Project No. 936-5542.12 (AID/Costa Rica)

A.I.D. Grant Project Officers:  
Jaime Correa (Costa Rica)  
Raymond Meyer (Washington, D.C.)

Project Duration: 9/1988 to 6/1992

## Table of Contents

1. Executive Summary.....	1
2. Administrative Aspects.....	2
2.1 Overall Project Administration.....	2
2.2 Contribution of the University of Costa Rica..	3
3. Research Objectives.....	4
4. Methods and Results.....	5
4.1 Field Work.....	5
4.2 Computer Work.....	6
5. Impact, Relevance and Technology Transfer.....	7
6. Project Activities/Outputs.....	8
7. Project Productivity.....	10
8. Future Work.....	10
9. Annexes.....	11

## 1. EXECUTIVE SUMMARY

The Overall Aim and Specific Objectives of the project (page 2 of Proposal) were satisfied in the following manner, according to the Technical Work Plan (page 12 of Proposal):

Field work: extensive field work was conducted during four years, with over 150 plantings of three replications each established to test the main hypotheses of the model for optimizing rainfed cropping throughout the year. Results were very rewarding, since it was shown consistently that the regions chosen for work have a much larger potential for rainfed cropping than it is actually utilized. Two publications on field results have been produced, others are still in progress. It is expected that through 1993 three other publications will be produced based on field results and modeling efforts. One Licenciado thesis was conducted studying soil-water relations at field level.

Modeling work: several modeling exercises were conducted throughout the life of the Project, including the evaluation of field results to validate model components. Two publications were produced which address the main assumptions and simulation capabilities of the model. The publications being prepared on field results include an important component of modeling. Two theses (one Master's, one for Licenciado degree) were conducted using the model.

Version 1.0 of the model AQUA was produced together with a 150 page user's manual. The model is for distribution free of charge. It is strongly believed that the contribution the model represents will have a large impact on the range of applications for which it was created. Even at this early stage of distribution, the model has been sent for their use to scientists at Guatemala, Nicaragua, Costa Rica, Mexico, Chile, Brazil, and there are requests from Rome (FAO), Belgium, Mozambique and Argentina, among others. The model has been granted an award from the Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica (March, 1993).

It is expected that once all the work is published and the model has circulated for at least one year, the approach to the problem, including field work and modeling, as well as the free distribution of the model, will produce two effects among scientists, extensionists and decision makers:

- 1) they will know that there are alternatives to deal with an old problem that is usually regarded as solutionless--namely, how to deal with water deficits and excesses in rainfed agriculture; and,
- 2) the methodological tools to conduct research and planning regarding this problem will be available.

If this is achieved, besides the results shown here and yet to be produced, the project will have been extremely successful.

## 2. ADMINISTRATIVE ASPECTS

### 2.1 Overall Project Administration.

Although the Project started in September 1st. of 1988, it was not until August 1989 when funds from AID/Costa Rica were transferred to the University of Costa Rica. This delay was due to AID's requirement that an external audit be conducted on the way the University of Costa Rica manages its funds, to determine its fitness to manage Project funds. The University of Costa Rica is the oldest and largest public institution of higher education in Costa Rica, and such precautionary steps were, according to the P.I., unwarranted in this case.

After no little administrative effort, the pick-up truck purchased for Project use was available in mid-December of 1989. It can be said that the Project was fully operational beginning January of 1990 through June, 30 of 1992. However, efforts began in early 1988, thanks to the contribution of the University of Costa Rica, and have continued after June, 30 of 1992 thanks to the spirit of collaboration existing among former Project staff.

Considering the delays in starting, an extension of the Project through June 30, 1992 was negotiated with AID. Early in 1992, and given an effort in saving some funds, an extension of the Project through December 1992 was requested in order to complete some aspects of the model AQUA, also to finish data analysis and preparation of publications. This extension was denied by AID/Costa Rica; it is the P.I.'s belief that this second extension was not approved mainly because of AID's bureaucratic trimming efforts. This thwarted a little Project-closing efforts by substantially decreasing funds needed to complete needed activities (saved funds were retained by AID--a proven bad business for Project leadership). As a result, to this date data analysis and writing of publications is an on-going process that may take all of 1993 because it has become a secondary activity of concerned personnel, who are since July of 1992 formally engaged in other activities.

A final audit, which was paid out of Project funds (not originally intended for this purpose), showed that funds and main project activities were managed adequately and according to the agreement with AID.

Overall, this project proved to be very dynamic and personnel were highly motivated and devoted. Professionals that had relevant involvement in Project activities throughout its life were:

Ricardo Radulovich, Principal Investigator  
Rodolfo Chaves, field operations, administrative aspects  
Fernando Sánchez, modeling  
Reinaldo Pineda, programming  
Ronny Barboza, field activities

Melvin Díaz, field activities  
Sonia Bertsch, data analysis  
Fabio Herrera, field activities  
Maritza Gutiérrez, field activities  
Edwin Solórzano, model testing, administrative aspects

all from the Department of Agricultural Engineering, University of Costa Rica.

Several assistants contributed greatly to activities. Those with larger involvement are: Francisco Aguilar, Eugenia Sánchez, Gilbert Granados.

Thanks are expressed to Dr. Edgar Zúñiga and Ing. Edwin Solórzano, former Director and actual Director, respectively, of the Department of Agricultural Engineering, University of Costa Rica, for their collaboration in supervision and administrative aspects of the Project.

Also, AID's Project Officer in Costa Rica, Mr. Jaime Correa, contributed greatly to the success of the Project. His formal and concerned management style provided many a lesson to Project personnel. Mr. William Baucom, then Chief of the Rural Division of AID/Costa Rica, also helped in many stages, particularly during project initiation. Dr. Raymond Meyer, Office of the Science Advisor, Technical Backstop Officer, provided counsel in several occasions.

Thanks are also expressed to staff from the Fabio Baudrit Station of the University of Costa Rica and the Enrique Jiménez Station of the Ministry of Agriculture.

## 2.2 Contribution of the University of Costa Rica.

The University of Costa Rica contributed to the Project in three main ways:

- a. Assigning through its Department of Agricultural Engineering 1.5 faculty times and a varying number of assistant hours.
- b. Facilitating the use of field and laboratory equipment, field stations, and other material resources existing at the Departments of Agricultural Engineering and Plant Science.
- c. Waiving an overhead, which conservatively is established at 10%.

In order to approximate this contribution, each Interim Progress Report included the contribution of the Department of Agricultural Engineering through personnel allocation. This contribution is summarized below. Also, to account for 'b' above, \$10,000 were added to cover almost four years of Project access to

facilities and equipment. After that, 10% of the sub-total was added as overhead that was not charged.

As seen below, the contribution of the University of Costa Rica to the Project can be estimated to be around \$65,350, which is 45% of the original amount in the Grant Agreement.

Table 1. Approximate financial contribution of the University of Costa Rica to the Project.

Semester	Contribution	Cumulative
1	US\$ 6,400	US\$ 6,400
2	6,000	12,400
3	6,510	18,910
4	6,150	25,060
5	6,400	31,460
6	7,100	38,560
7	6,550	45,110
8	4,300	49,410
Other contribution	10,000	59,410
Overhead (10%)	5,940	65,350

### 3. RESEARCH OBJECTIVES

The project was conducted as an effort to produce information on how to better deal with water shortages and excesses that keep yields of rainfed crop production low and highly variable. As part of the project, an analytical tool in the form of a water balance computer model was to be developed both to analyze project results and to distribute it to future users. Thus, the main project objective (pg. 2 of proposal) was to "develop and test a water-use model based on deterministic components of the soil-crop-atmosphere continuum and on probabilistic rainfall analysis, designed to optimize rainfed crop production in a wide range of tropical agroecosystems.... both water deficits and excesses are considered... making the best feasible use of rainfall and soil water".

As explained in the summary, it is hoped that after a period during which the publications and the computer model will get to be known, researchers and others concerned with the subject will feel more comfortable to deal with the problem, since the example has been given, and will also have both the field procedures as well as the analytical tool to evaluate rainfall conditions for specific locations. The P.I. and former collaborators will continue to promote the focus of the project as well as the use of the model, and thus it is expected that 'school' on the analysis of water relations on rainfed agriculture will have been created.

#### 4. METHODS AND RESULTS

The Technical Work Plan (page 12 of Proposal) indicates that Project work consisted of three major phases:

1. Field work to test and develop hypotheses and cropping schemes to optimize rainfed agriculture;
2. Modeling work based on efforts previous to this project, on the field work conducted, and on hypotheses yet to be developed;
3. Converting the model into a usable and transferable user-friendly and expert system type of model.

A copy of the publication of the model (AQUA, user's manual and diskette containing software) accompanies this final report. Copies of other publications/drafts are also included, as well as selected tables and graphs of other results not included in these. These are included as an Annex, and represent the material submitted for technical evaluation of project performance.

What follows is a description of how the technical work plan was fulfilled in relation to each commitment included in the proposal (6.1.5. Experiments, 6.2. Modeling Work, 6.3. Expert System).

##### 4.1 Field Work.

Most of the field work was conducted at the Fabio Baudrit Station of the University of Costa Rica, in Alajuela, as originally planned (6.1.1. Location of Field Work). One year of field work was conducted at the campus of the University of Costa Rica, in San Pedro, San José. One and a half years of field work was conducted at the Jiménez Núñez Station of the Ministry of Agriculture in Cañas, Guanacaste.

Field results, therefore, are of four years of work at the Alajuela site (1988-89 through 1991-92), one year of work at the San Pedro site (1989-90) and the late planting experiment at the Cañas site (1990-1991). Besides a record of all agronomic practices, data collected for all plantings were: planting and harvest dates, yields, and soil moisture consumption. For selected experiments, more detailed measurements were taken: canopy temperature, standing biomass, plant height, count of reproductive structures, light interception, and leaf water potential. Several moisture release curves were done for all the soils used in the different studies.

Overall, more than 150 plantings, consisting of 3 replications each, were grown during four years of work. Basic crop data are shown in manuscripts and selected results shown after this section.



#### 4.1.1 Side Experiments (6.1.5.3. of proposal).

Four main lines of side experiments were conducted. Since side experiments were optional (page 18 of proposal), side experiment 'a' (using photoperiodic response of soybean) was not conducted. Side experiments 'b' (rain-out shelter to study water excess) and 'c' (field studies simulating veranillos) were conducted, as well as a series of experiments on evaluating early planting dates and intercropping maize with bean. Basic data for the three latter experiments are shown as selected results below, and more detailed analysis is being conducted to produce short research communications on the results. Work with the rain-out shelter is described below.

Two simple, automated rain-out shelters were established in Turrialba, at the CATIE research station, in 1992. Delays in the design and construction of the electronic circuitry forced the use of Turrialba instead of Alajuela, given the earlier beginning and more abundance of rains in Turrialba. Basically, these rain-out shelters are operated by a sensor which activates electric motors that drag them to cover the crops whenever rain wets the sensor. After activation, a blow-drier is activated which dries the sensor as soon as it stops raining; this activates the motors to drag the shelters out of the crops. Thus, crops are under the shelters only while it is raining. Water received by the roof of the shelters was conveyed through pipes to the soil surface between the rows of crops; thus, the difference between sheltered and unsheltered crops was that the former receives no water on the foliage. A study planting a bean crop was conducted, and results indicated a significant difference in disease incidence and yields between sheltered vs. unsheltered crops. This kind of studies are useful to begin separating between water excess effects at the canopy and the soil level. The details of these rain-out shelters are being prepared for publication as a technical note (see 3.3).

#### 4.2 Computer Work.

Computer work consisted of two main and interactive tasks, which were to test the different hypotheses and assumptions of the model through simulation, while incorporating the abilities to do this into a user-friendly model. Both activities were quite successful and some details are given below.

##### 4.2.1 Modeling Work (6.2. of proposal)

The main question being pursued through this line of work was: How can two rainfed crops be grown safely in the target areas? The question is simple; however, the answer is a dynamic combination of different factors, which constitutes the core of the efforts in this section. A variety of topics were addressed through simulation (see page 20-21 of proposal), and the main results are given in

some of the publications produced by the Project (see 3.3). The majority of efforts, however, were used to determine and refine the capabilities of the model being built. Through this effort, it is believed that the model AQUA has the ability to address the type of questions and to serve for the applications outlined in point 6.2 of the proposal.

#### 4.2.2 AQUA (6.3. Expert System of proposal)

After several approximations, version 1.0 of AQUA was produced and it is being released free of cost together with user's manual. The model complies with the objectives for its use as outlined in pages 21-23 of proposal; however, the interaction between user and model requires more the use of the manual and it is less of an expert system as it was originally expected. To refine this we required a no-extra-cost extension of six months which was not granted. However, the model AQUA as it stands, is a very powerful tool, unique in its wide range of applications, and it can have a large impact when a network of users has been established.

Several procedures have been used to assure that the model capabilities are imbeded in the program and are easily accessed by users, including several internal exercises and the use of the model in two theses (one a Master's from CATIE one a Licenciado in Plant Science from the University of Costa Rica).

### 5. IMPACT, RELEVANCE AND TECHNOLOGY TRANSFER

Main project finding was that it is possible to manage annual rainfed cropping better in relation to the distribution of rainfall in the semi-dry regions of Central America. Basically, this means that both sequential- and inter-cropping can be improved by selection of planting and harvest dates, in combination with local factors such as rainfall and soil water storage capacity, and by crop/cultivar selection. This constitutes a line of work poorly developed previously in this region, and as such it is expected that its impact will take years to reach its expected potential. This will occur as more researchers adopt the methodology that has been outlined in several publications/presentations and which is also available through the model AQUA.

In particular, the distribution of the model AQUA is accompanied by copies of the publications on field and modeling work. Thus, as the analytical tool is transferred, so is the field methodology. The distribution of the model so far has been to researchers in: Guatemala, Nicaragua, Costa Rica, Mexico, Brazil, Paraguay. It will soon be sent to workers in other countries, including requests from FAO/Rome and Belgium.

The P.I. and co-workers are actually involved in two aspects giving continuity to the project, besides the analysis of results:

1. Attempting to promote larger-scale field trials in different countries in Central America. This will be achieved after local researchers have tried the model and express willingness to apply the methodology through their extension activities.
2. A proposal will be drafted to continue enhancing the analytical capabilities of the model AQUA. Thus, it is expected that within two years a second version of the model will be available. Funds for this work, however, will not be requested until after the model has been thoroughly tested by researchers in different countries and its strengths and limitations have been made apparent.

All work was conducted by developing country scientists, and thus their capability has been improved in direct relation to all project work and outputs.

## 6. PROJECT ACTIVITIES/OUTPUTS

### Publications:

- Radulovich, R. and F. Sánchez. 1993. AQUA, Modelo de Balance Hídrico para Agricultura Tropical. User's manual and software version 1.0. Editorial Universidad de Costa Rica, San José, 150 p.
- Radulovich, R. 1991. Desarrollo agrícola en el trópico latinoamericano: el caso del pequeño agricultor vs. la economía nacional. *Interciencia*, 16:125-130.
- Radulovich, R. 1990. AQUA, a model to evaluate water deficits and excesses in tropical cropping. II. Regional yield prediction. *Agricultural and Forest Meteorology*, 52:253-261.
- Radulovich, R. 1989. Optimization of rainfed tropical cropping in semi dry areas: a case study. *Agricultural Water Management*, 16:337-352.
- Radulovich, R., G. Vargas, J.R. Chaves and F. Sanchez. 1989. Agua y cultivos secuenciales en zonas semi-áridas: evaluación de campo preliminar. *Agronomía Costarricense*, 13:219-224.

Submitted/in preparation:

Radulovich, R. 1993. Intensifying cropping in wet-dry tropical regions. I. Sequential cropping and yield analysis. Field Crops Research (submitted).

Radulovich, R. and R. Chaves. Intensifying cropping in wet-dry tropical regions. II. Water deficits. Field Crops Research (in final edition).

Radulovich, R., R. Chaves and F. Sánchez. Intensifying cropping in wet-dry tropical regions. III. Water excesses. Field Crops Research (in preparation).

Radulovich, R. Water-based management of sustainable rainfed cropping systems. Tropical Agriculture (in final edition).

Chaves, R. and R. Radulovich. Determinación de la fecha más temprana de siembra con el inicio de lluvias: validación de campo de simulaciones. Agronomía Costarricense (in progress).

Radulovich, R., E. Solórzano and R. Chaves. A simple, automated rain-out shelter for studying effects of rainfall excesses on crops. Agricultural and Forest Meteorology (in preparation).

**Theses:**

Espinoza, A. 1992. Estudio agroclimático de los sistemas de cultivo de maíz, frijol y sorgo en las zonas secas de Estelí, Nicaragua. Master's thesis, CATIE, Turrialba. 136 p.

Sánchez, F. 1991. Un modelo de balance hídrico computarizado. Licenciado thesis, Dept. of Agricultural Engineering, University of Costa Rica, San Jose, 83 p.

Chaves, R. 1990. Caracterización de la dinámica del agua en suelos tropicales. Licenciado thesis, Dept. of Agricultural Engineering, University of Costa Rica, San Jose, 87 p.

Also, a significant portion of the following thesis was completed thanks to the use of AQUA:

Mena, A. 1992. Crecimiento y desarrollo de coyolillo (Cyperus rotundus L.) en dos zonas de Costa Rica. Licenciado thesis, Dept. of Plant Science, University of Costa Rica, San Jose.

## Major Presentations:

Sánchez, F. and R. Radulovich, 1992. El modelo de balance hídrico AQUA. Tercer Seminario Latinoamericano de Agromática, Cartago, Costa Rica.

Radulovich, R. 1990. Water-based intensification of rainfed tropical cropping. In: Symposium on Sustainable Agriculture in the Tropics, Annual Meeting, American Society of Agronomy, San Antonio, Texas.

Muñoz, M. and R. Radulovich. 1988. Water optimization of rainfed tropical cropping: modeling perspectives and potentials. Annual Meeting, American Society of Agronomy, Anaheim, California.

Several other presentations were given at: University of Costa Rica, Cornell University, CATIE.

## 7. PROJECT PRODUCTIVITY

It is believed that the project accomplished all of the proposed goals; however, there was a need for more time for data analysis and preparing publications. Thus, it is expected that more publications will be produced during 1993 and perhaps into 1994.

## 8. FUTURE WORK

Future work will be field-testing of the hypotheses in different environments and at larger-scales, and enhancing the capabilities of the model AQUA.

\* \* \* \* \*

**ANNEXES**

## Optimization of Rainfed Tropical Cropping in Semi-Dry Areas: A Case Study

R.A. RADULOVICH\*

*Department of Agricultural Engineering, University of Costa Rica, San Jose (Costa Rica)*

(Accepted 28 February 1989)

### ABSTRACT

Radulovich, R.A., 1989. Optimization of rainfed tropical cropping in semi-dry areas: a case study. *Agric. Water Manage.*, 16: 337-352.

An approach to upgrading rainfed tropical cropping, based on the optimization of rainfall water use, is presented. As an example, two stations in Costa Rica, with a rainy season of six to eight months and a dry period in the rainy season (veranillo) were used. These stations represent a large portion of the Pacific coast of Central America.

The potential to grow two rainfed crops per year instead of one was evaluated with the model AQUA, which is based on daily water balances using actual precipitation and on rainfall probabilities. Major aspects considered were (a) the earliest safe planting date at the start of the season; (b) the effect of veranillos; (c) prediction of the characteristics of late-season rainfall; (d) analysis of the period for late-season crop growth; and, (e) the length of the dependable rainfed cropping season. These and other considerations were integrated into potential cropping schemes.

The analyses showed that it should be possible to safely grow two rainfed crops per year in these and similar regions that suffer from prolonged periods of water deficit, but exhibit calculated dependable rainfed cropping seasons of over 200 days. The methodology described is applicable to a wide range of tropical conditions; and approaches like the one presented may be an answer to intermediate development needs.

### INTRODUCTION

In the tropics, with its insignificant seasonal variation in mean temperature, water is by far the most important environmental factor which determines crop growth. In Costa Rica, and 58% of the tropical regions elsewhere (Sanchez, 1976), rainy seasons with abundant precipitation ( $P$ ) last from over six to twelve months. In these regions, with prolonged and well defined dry seasons, crop production during the rainy season is usually affected by variable periods of limited precipitation ("veranillos", or little summers), and by the uncertainty associated with the start of rains and with the duration of the last rains of the year. Moreover, yields can also be reduced by water excess during the wet months (Radulovich, 1987a).

\*Present address: Department of Agronomy, Cornell University, Ithaca, NY 14853, U.S.A.

It has been noted that all-year cropping should be a major goal to raise crop production in tropical regions (Sanchez, 1976; Soria, 1976). Perhaps dominated by traditional farming practices and crop varieties, and the uncertainty of rainfall events, in Costa Rica, as in most of Central America, normally only one rainfed crop is grown per year in areas with the Pacific rainfall regime, with an annual  $P$  over 1200 mm. Given the amounts and distribution of precipitation, it should be possible to make better use of available rain water. Therefore, the development and implementation of successful rainfed cropping schemes that optimize the use of rain water is important, particularly in view of the high costs of irrigation and limited water supplies for irrigation during dry seasons.

This article represents an example of the evaluation of several water-limiting factors of rainfed crop production in regions with both a prolonged dry season and mid-season shortages. The methodology presented considers the minimum level of complexity required to confront the problems under study.

#### METHODOLOGY

A case study was developed for two areas with the Pacific rainfall regime of Costa Rica, which covers the North-Central Pacific and Central regions of the country, and resembles the climatic conditions found in millions of hectares throughout Central America (IPGH, 1976). This rainfall regime is characterized by a rainy season of six to eight months, usually from May to November, followed by a clearly defined rainless season. Annual  $P$  values range from around 1200 to over 2000 mm (IPGH, 1976; Rojas, 1985; Radulovich, 1987a). Rainless periods of varying duration and frequency (veranillos) occur between June and August (Ramirez, 1983; Rojas, 1985; Radulovich, 1987a; Carmona and Radulovich, 1988). These periods with little or no rain last from a few to over thirty or more consecutive days depending on the year and the region. Further details on the climatic and agricultural characteristics of these areas can be found elsewhere (Lomas and Herrera, 1984, 1985; Rojas, 1985; Radulovich, 1987a).

Two stations were selected for this study: Alajuela (Estacion Fabio Baudrit, University of Costa Rica) in the Central Region, and Cañas (Ingenio-Taboga) in the North-Pacific region. These stations represent conditions in two major agricultural regions in the country, and are similar to a large portion of the Pacific coast of Central America. Daily rainfall data were obtained from the National Meteorological Institute of Costa Rica. Ten year averages of  $P$  for these stations are 1937 and 1778 mm, respectively. Potential evapotranspiration (ETP) data were obtained from Hargreaves (1975) and Ramirez (1983), and were converted to crop evapotranspiration (ETC) using the crop coefficients ( $k_c$ ) shown in Table 1.

A computerized agrometeorological analysis for these stations was per-



TABLE 1

Crop and soil parameters<sup>a</sup> used in daily calculations with AQUA, for deficit-susceptible and -moderately resistant crops. Values adapted from several sources (Doorenbos and Kassam, 1979; Taylor et al., 1983; Teare and Peet, 1983; Millar, 1985; Radulovich, 1987a)

Days post emergence	$k_c$	DC (%)		RD (m)		CAW (mm)	
		Suscept.	Resist.	Suscept.	Resist.	Suscept.	Resist.
1-15	0.50	50	60	0.20	0.25	10	15
16-30	0.50	50	60	0.40	0.50	20	30
31-60	0.70	60	65	0.60	0.80	36	52
> 60	1.00	60	65	0.80	1.00	48	65

<sup>a</sup> $k_c$  = crop evapotranspiration coefficient; DC = allowable soil water depletion; RD = rooting depth; CAW = crop available water ( $DC \times RD$ , 100 mm  $m^{-1}$  soil AW).

formed with the model AQUA (Radulovich, 1987a), which is based on daily water balance calculations using actual daily  $P$ , daily ETC derived from monthly ETP means and  $k_c$ , and other crop and soil water parameters, shown in Table 1. The model assumes that any precipitation will first replenish the soil water reservoir, with any excess water either percolating or running off. Degree of stress by water deficit is calculated as the cumulative number of days when daily ETC is not met; these number of days with deficit have been found to be directly related to decreases in crop yields at the regional level (Radulovich, 1987a). The model also uses rainfall expectancies as a probabilistic component aiding decision making. Hypothetical crops used represent stress-susceptible short-cycle crops like beans and soybeans, and more resistant longer-cycle crops like maize and sorghum (Table 1).

Whereas rooting depth values varied as shown in Table 1, a fixed value of soil available water (AW) of 100 mm  $m^{-1}$  was used for all crop available water (CAW) determinations (Table 1). This is an important consideration explained elsewhere (Radulovich, 1987a), that limits the range of application of this work to situations where there is a minimum soil water storage capacity.

The work centered around evaluating the potential for increasing the number of crops planted consecutively per year. The following key points are essential for this purpose:

- (1) determination of the earliest safe planting date at the start of the rainy season;
- (2) evaluation of the severity of veranillos and strategies to confront them;
- (3) to search for the possibility to predict some rainfall characteristics of the end of the rainy season; and
- (4) analysis of the duration of the rainfed cropping season, for different combinations of crops and planting schedules.

The results are presented as sets of cropping options for the two stations,

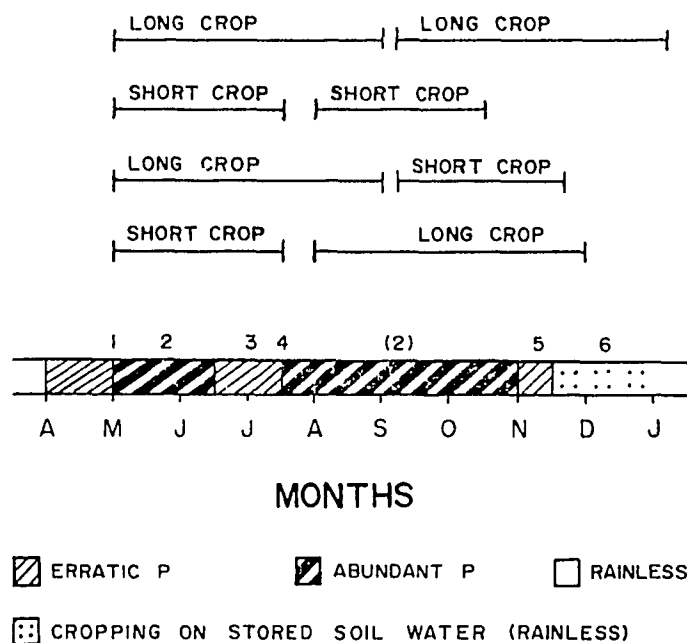


Fig. 1. Water characteristics of a typified rainfed season in the regions considered, and potential cropping schemes studied. (1) Earliest safe planting date; (2) periods of abundant and often excessive  $P$ ; (3) veranillo; (4) re-start of rainy season after veranillo; (5) end-of-season  $P$ ; and, (6) period of rainfed cropping on stored soil water.

and the potentials for optimizing rainfed cropping in semi-arid conditions are discussed. The rainfed season with the key points under study is graphically shown in Fig. 1, including the different cropping schemes proposed. Not shown in the figure are the different levels of stress resistance of crops, which are considered in the analysis (Table 1).

#### *Determination of the earliest safe planting date*

A method to evaluate the earliest safe planting date was developed through AQUA (Carmona and Radulovich, 1988), considering two criteria as major determinants of successful crop germination and early establishment:

- (1) A minimum  $P$  of 30 mm within the previous decade (10 day period) should fall before planting (Frere and Popov, 1979).
- (2) A large probability that this minimum  $P$  will be followed by the formal beginning of the rainy season within a short period.

At least two rainless days, or 3 days with  $P < 5 \text{ mm d}^{-1}$ , are required for planting operations after these criteria are fulfilled.

The second criterion is related to the date of the formal start of the rains, as opposed to earlier rains which are used for planting but may be followed by periods of deficit. The date of the formal start of the rains is characterized by frequent and abundant  $P$  until the first expression of veranillo in June–July. For each year in the data base, the date when the rains formally start is deter-

mined, and the latest date of these is recorded as a limit before which planting should be done in the region.

To avoid water deficits during early establishment, it was considered that not more than one day with deficit should be allowed during the 15 days period following emergence for susceptible and shallow seeded crops, and not more than two days with deficit for more tolerant, deeper seeded crops.

Crops with large seeds and aggressive establishment that are usually planted at depths of 50 mm or deeper, were given more flexible requirements for determining the earliest date than shallow seeded crops. If there is no additional rainfall from planting through emergence (5 days), shallow seeded crops count with  $CAW = 5$  mm at emergence, whereas deeper seeded crops, with deeper and more aggressive rooting systems, count with  $CAW = 8$  mm, leftover from preplant rainfall.

These criteria were incorporated into AQUA, based on the crop and soil data shown in Table 1, and were used for determining the planting date. The model was thus run for fifteen years (1970–1985, with 1985 unavailable for Alajuela, and 1984 missing for Cañas) from the very earliest rains of each season. The date at which the criteria were fulfilled was designed as the earliest safe planting date.

### *Evaluation of veranillos*

An evaluation of the potential effects of veranillos on crop growth, as determined by the number of days with deficit that accumulate through the growth cycle, was made for selected years representative of severe and moderate veranillos. Specific model values used for this analysis are shown in Table 1.

To evaluate the strategy of confronting veranillos with well-established crops against doing it with recently established crops, the model was run from the earliest safe planting date of the year, allowing five days for germination. Cumulative days with deficit (days when  $CAW$  drops below 0) were calculated for two different crop growth cycles of 80 and 100 days, simulating three situations:

- (1) A crop with the characteristics of a recently established crop, susceptible to water deficit, using the values from Table 1 for a 15 day crop as fixed inputs throughout the crop growth cycle.
- (2) A crop susceptible to water deficit, with input values changing through the growth cycle as shown in Table 1.
- (3) A crop more resistant to water deficits, with input values changing through the growth cycle as shown in Table 1.

Basically, what was tested is the effect of different combinations of  $k_c$  and  $CAW$  on accumulating days with deficit for specific years and for different kinds of crops and growth cycles. It is realized that no crop will retain characteristics of a recently established crop throughout its entire growth cycle; however, sim-

ulating such a crop allows for comparisons between crops for any timing and duration of veranillos.

### *End of the rainy season*

The variability encountered at the end of the rainy season was evaluated in several ways using AQUA. The main parameters used to determine the end of the rainy season were daily precipitation in October–November, and the last date in which the soil profile was estimated to be recharged to or close to field capacity (FC). Because during some years unusually late rains may fully recharge the profile after a period of soil water deficit, a criterion for this method was that the last (effective) date of FC had to occur previous to the development of any end-of-year deficits. Rains after that date were considered through AQUA as regular rainfall that contributed to the lengthening of the growing season.

A method to predict some characteristics of the rains during November, based on the amounts of rain of the previous May, developed by Radulovich (1987b), was used to divide rainfed cropping years into long or short, relative to the amount of rainfall expected in November. The relationship and method to separate years according to the end-of-season rainfall expectancy are shown in Fig. 2 for a station in the North-Pacific region of Costa Rica, for which long  $P$  records are available. It is seen that the probability of obtaining low  $P$  in November (short years) is higher for years in which  $P$  in May was high, and vice versa (long years). This relationship was validated for a series of stations

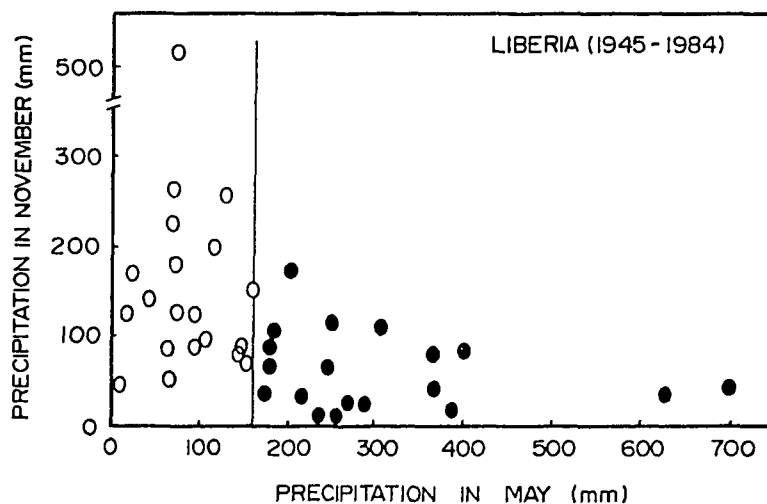


Fig. 2. Example of the relationship between precipitation in May and in November for Liberia, a station of the North Pacific Region of Costa Rica with long records. The method consists of plotting the data and selecting a break point between medium–high  $P_{Nov}$  expectancy (long years, ○) and low  $P_{Nov}$  expectancy (short years, ●), followed by quantitative analysis. After that, for any year in course, according to  $P_{May}$ , some prediction can be made on  $P_{Nov}$ . (Adapted from Radulovich, 1987.)

with the Pacific regime of Costa Rica (Radulovich, 1987b), and it was used here as an aid for the design of cropping schemes.

Twenty years of rainfall data (1965–1985) for each station were evaluated, after separating the years in long or short according to expectancies of  $P$  in November ( $P_{Nov}$ ). The separation between long and short years was done by plotting  $P$  in May ( $P_{May}$ ) versus  $P_{Nov}$  for the 20 years, and deciding arbitrarily a break point, as shown for Fig. 2. This is followed by quantitative analysis of  $P_{Nov}$  for each group of years. To apply the method, the break point in  $P_{May}$  between long and short years must be known for the station and, according to  $P_{May}$  for the year in course, a prediction of expected levels of  $P_{Nov}$  can be made.

The number of rainfed cropping days after the last effective date with the soil profile at FC was calculated using a fixed ETC value of  $4 \text{ mm day}^{-1}$  (Hargreaves, 1975; Ramirez, 1983). The crops were assumed to be growing on water stored in the soil and precipitation received from late rains. Analysis was performed for two hypothetical crops, with dissimilarities in susceptibility to deficit expressed as different CAW values (Table 1). These crops were assumed to be growing at an advanced vegetative stage at that time ( $> 60$  days). With the profile at FC, the deficit-susceptible crop had 48 mm of CAW, and the more deficit-resistant crop had 65 mm (Table 1).

#### *Duration of the rainfed season and cropping systems*

The duration of the rainfed cropping season spans from the earliest safe planting date until the last day the crop can extract water from the soil without suffering continuous deficit from the dry season.

The cropping season was divided in two periods: The first period began with crop emergence (the sixth day after the earliest safe planting date), and lasted 80 or 100 days, representing two different short-cycle crops. The effects of the veranillos are exerted during this first cropping period. Given the shorter rainy season in Cañas, the analysis for the second crop was done only for the short crop (80 days after emergence), while for Alajuela the analysis was done for the 100 days crop. After 80 or 100 days from emergence had elapsed, the following set of criteria were used to determine the second planting date:

- (1) At least five days must have elapsed from the assumed harvest day of the first crop. Within those five days, at least 2 days must be effectively rainless ( $P < 5 \text{ mm day}^{-1}$ ). This criterion intends to cover the minimum time needed for harvesting, planting and other field operations.
- (2) A minimum amount of 10 mm of rain must have fallen within the decade immediately before the second planting date. This is particularly important to avoid planting during a prolonged veranillo.

After the requirements for the second planting date were satisfied each year, five days were allowed for germination. Days from emergence through the last day for rainfed cropping were calculated for the two crops of different water-

deficit susceptibilities. This procedure is similar to the one used for the first crop, except that for the first crop a fixed number of days was used as growing cycle, whereas in the second case the number of days was determined from planting through to the last day of growth afforded by stored soil water and late rains.

## RESULTS AND DISCUSSION

### *Earliest safe planting date*

The earliest safe planting dates for the 15 years evaluated were April 25 for Alajuela and May 6 for Cañas. The latest dates were May 12 for Alajuela and May 23 for Cañas. Thus, a period of 17 days for both stations, within which planting is recommended was obtained. The mean was April 30 for Alajuela (with 9 out of 15 years between April 25–30) and May 15 for Cañas (with 9 out of 15 years between May 6–15). The formal start of the rains was never after May 5 in Alajuela and May 31 in Cañas; this indicates that planting should be done before these dates in any year, regardless of the method used to determine the early planting date.

Mean early planting dates obtained this way are similar for Cañas and 10 days earlier for Alajuela than planting dates based on rainfall probability (Ramirez, 1982). A method based only on a given amount of preplant precipitation (Frere and Popov, 1979; Lomas and Herrera, 1984), yielded earlier planting dates, but in approximately 25% of the cases the crop planted on those dates would have suffered over 5 days with deficit during the first 15 days after emergence.

In the regions under discussion, excessive precipitation often occurs shortly after the formal beginning of the rainy season. If planting is not done on the earliest safe date, the full length of the rainfed season will not be realized, and excessive precipitation may delay planting operations and inhibit germination and early establishment.

The application of this method requires knowledge of both the period within which planting is recommended, and the latest date of the formal start of the rains. Planting is done within the recommended period as soon as the minimum  $P$  requirement (of 30 mm in the previous decade) is fulfilled and field operations are possible. If the minimum  $P$  requirement is not fulfilled, planting should be done before the latest date of the formal start of the rains.

### *Veranillos*

Running the model on fixed input values that represent a recently established crop, gave much larger numbers of days with deficit than for the other crops, which had input values varying with growth stage and different suscep-

tibilities to stress (Table 2). Since most days with deficit accumulated during the last days of growth, the effects of veranillos are largely reduced when the crop confronts them at an advanced stage of growth. This is due to larger CAW values, in spite of larger  $k_c$ . Where the soil permits, veranillos should be confronted with well-established crops instead of with recently planted ones. The latter is actually the case in Costa Rica, where planting occurs from mid- till late June, with severe decreases in yields about every four years.

Simulating growth cycles of 80 days yielded less days with deficit than cycles of 100 days, as also did simulating resistant crops in comparison to the susceptible ones (Table 2). These results indicate that both avoidance and confrontation of the veranillo are strategies that can be implemented. The former by harvesting a short-cycle crop before the full impact of the veranillos is expressed, and the latter by confronting them with deficit-resistant crops. Either strategy or a combination of both will benefit from the earliest possible planting.

As shown by Carmona and Radulovich (1988), methods currently used to assess the severity of veranillos are not based on daily calculations but on five- or ten-day periods, and usually do not consider a minimum soil water holding capacity (e.g., Lugo-Lopez and Antoni, 1981; Ramirez, 1983; Paes de Camargo et al., 1984). These simpler methods in general overestimate the severity of veranillos, and thus might preclude the development of strategies to deal with them.

TABLE 2

Number of days with deficit for different hypothetical crops for selected years with moderate and severe veranillos

Year	Crop 80 days past emergence			Crop 100 days past emergence		
	Recent crop	Suscept. crop	Resist. crop	Recent crop	Suscept. crop	Resist. crop
<i>Alajuela</i>						
1977	28	4	1	33	17	15
1983	17	0	0	23	0	0
Mean	22.5	2.0	0.5	28.0	8.5	7.5
(SD) <sup>a</sup>	(7.8)	(2.8)	(0.7)	(7.1)	(12.0)	(10.6)
<i>Cañas</i>						
1979	33	4	0	46	4	0
1981	25	2	1	28	6	2
1982	33	13	4	55	24	17
Mean	30.3	6.3	1.7	43.0	11.3	6.3
(SD)	(4.6)	(5.9)	(2.1)	(13.7)	(11.0)	(9.3)

<sup>a</sup>SD: Standard deviation.

*End of the rainy season*

The method for predicting some characteristics of the end-of-the year precipitation, a tool developed for these regions (Radulovich, 1987b), was used as an example of the accuracy that can be introduced in this kind of analysis. By knowing some characteristics of the end of the rainy season through the evaluation of early rains, the second planting of the year can be done based on that expectancy. Thus, yield losses associated with a premature end of the rains will be decreased, since precocious and/or deficit-resistant second crops will be planted in years with predicted shorter rainy season.

The relation that exists between the precipitation of May ( $P_{\text{May}}$ ) and that of November ( $P_{\text{Nov}}$ ) is shown in Table 3, in relation to the method described graphically for Fig. 2, and in more detail for several stations in Costa Rica by Radulovich (1987b). The data show that when  $P_{\text{May}}$  is low to medium,  $P_{\text{Nov}}$  is medium to high; whereas when  $P_{\text{May}}$  is high,  $P_{\text{Nov}}$  is usually low to medium, with most values low (Fig. 2, Table 3). This is shown for the stations in this study particularly by the ratio  $P_{\text{May}}/P_{\text{Nov}}$ , which is much larger for years with high  $P_{\text{May}}$  than for those with low  $P_{\text{May}}$  – respectively 4.0 and 5.4 versus 1.2 for Alajuela and Cañas – and by the dependable  $P_{\text{Nov}}$  values (Table 3).

Once we have determined for the year in course whether  $P_{\text{Nov}}$  is expected medium–high or low, measures can be taken regarding the second crop. Interestingly, half of the years evaluated behave as long and the other half as short (Table 3).

The largest differences between long and short years, according to the expected  $P_{\text{Nov}}$ , were found for Alajuela (Table 3). For this station, overall dependable  $P_{\text{Nov}}$ , with no categorization of years as long or short, is 60 mm, while for long years it is 125 mm and for short years 45 mm (Table 3). The difference of 80 mm may represent approximately 20 more days in length of the rainfed

TABLE 3

Relation between monthly precipitation of May and November (1965–1985)

Station	$P_{\text{May}}$ zone <sup>a</sup>	No. of years	Mean $P_{\text{May}}$ (mm)	Mean $P_{\text{Nov}}$ (mm)	$P_{\text{May}}/P_{\text{Nov}}$	Dependable <sup>b</sup> $P_{\text{Nov}}$ (mm)
Alajuela	All	20	284.0	135.7	2.1	60
	Low-medium	10	214.0	183.5	1.2	125
	High	10	354.1	87.9	4.0	45
Cañas	All	20	264.0	90.8	2.9	20
	Low-medium	10	136.2	109.4	1.2	45
	High	10	391.9	72.1	5.4	15

<sup>a</sup>Zones refer to the amount of  $P_{\text{May}}$ , obtained as explained for Fig. 2.

<sup>b</sup>Dependable  $P_{\text{Nov}}$  is the minimum value expected for 85% of the years.



season for long years. For Cañas the difference in dependable  $P_{\text{Nov}}$  between long and short years is 30 mm, roughly a difference of 8 days in length of rainfed season. These differences between long and short years are further evaluated in the following sections.

### *Second crop*

After harvesting the first crop (105 days in Alajuela and 85 days in Cañas from earliest safe planting date), the criteria for determining the second planting date were applied. Calculated second planting mean dates were August 21 (range August 17–30) for Alajuela and August 14 (range August 5–22) for Cañas.

Two years for Cañas (1976 and 1982) exhibited extremely severe veranillos, that lasted through August. The number of days with  $P=0$  from June through August were 68 in 1976 and 71 in 1982. Second planting dates for these years were delayed respectively until August 30 and September 16, and the rainy seasons ended extremely early, in October. Therefore, for Cañas, the following set of analyses and recommendations apply only to 87% of the years considered, whereas for 13% of the years a different strategy must be followed for the second crop. This limitation is clearly evidenced by the severity of the veranillo, which forces a delay in the second planting date.

Total days available for the growth of the second crop, were counted from the second planting date until the last date the soil profile was recharged to field capacity, plus the days of growth afforded by water stored in the soil and by any amounts of late rainfall.

The number of days for growing the second crop are shown in Table 4. The most relevant variables shown are the dependable values, representing the number of days expected with a minimum probability of 80%. These were calculated from the second planting date determined each year, and also from the mean (fixed) second planting date (August 21 for Alajuela and August 14 for Cañas). The dependable number of days from the fixed date are the values that should be referred to as a guidance when the second planting date is approaching, and in regionalization and crop zonification efforts. The other values represent the number of days as affected by the planting date of the first crop and by any delay in the second planting date, for each year considered. In both cases, the differences between long and short years are from 10 to 20 days. The consistency of the differences between long and short years is also evidenced by the small variability between the mean values (all with  $cv < 10\%$ ), and by comparing the ranges of these values (Table 4).

According to the methodology followed, the shortest time for growing a second crop susceptible to water deficits was 90 days for short years in either station (Table 4). All other values ranged from 105 to 120 days, sufficient time to grow a large variety of crops. Evidence discussed below indicates that the

22

TABLE 4

Days available for growth of second crop from second planting date and from fixed date<sup>a</sup> (1970-1985)

Station	Type of year (No.)	Mean No. of days (cv%)		Range (days)		Dependable No. of days <sup>b</sup> (Probability %)			
		Suscept. crop	Resist. crop	Suscept. crop	Resist. crop	Second Date		Fixed date	
						Suscept. crop	Resist. crop	Suscept. crop	Resist. crop
Alajuela	Short (8)	97.1 (9.8)	107.8 (7.5)	81-109	101-123	90 (88%)	105 (100%)	85 (88%)	100 (88%)
	Long (7)	113.1 (6.2)	124.4 (5.8)	103-123	113-133	110 (86%)	120 (86%)	105 (86%)	115 (86%)
					Long-Short=	20	15	15	15
Cañas	Short(8)	97.0 (5.7)	109.7 (5.5)	91-103	101-113	90 (100%)	105 (88%)	90 (100%)	100 (100%)
	Long (7)	107.2 (9.0)	120.8 (9.7)	93-122	103-132	105 (83%)	115 (83%)	105 (83%)	115 (83%)
					Long-Short=	15	10	15	15

<sup>a</sup>Second planting date refers to date after growth of first crop, while fixed date refers to planting August 21 in Alajuela and August 14 in Cañas.

<sup>b</sup>Dependable number of days is the number of days for growth of the second crop that was obtained for at least 80% of the years considered. Shown in parentheses is the percent of years with at least that number of days.

estimations made here may be conservative, and that the number of days for a second crop may actually be larger.

#### *Length of rainfed cropping season*

The total number of days considered suitable for rainfed cropping in the two stations are shown in Table 5. These represent the span from earliest safe planting date, to the last date before deficit sets in after depletion of CAW at the end of the season. The differences between short and long years remain substantial, between 9 and 16 days, in spite of variations introduced through both planting dates. The approximate number of days for a station, a composite average of the means shown, represents a general value to classify a station or a region. This is 220 days for Alajuela, and 200 days for Cañas (Table 5).

#### *Applications to rainfed crop management*

The analysis presented shows theoretically, for two stations, the possibility that exists to improve the use of rain water, through the feasibility of successfully growing two rainfed crops per year.

Precocious varieties and hybrids exist for several agronomic species, and their use should solve some of the time limitations of both yearly plantings. This is particularly important for species with long cycles such as cotton, maize and rice. Planting deficit-resistant species may be required on many occasions. There is sufficient evidence in the literature indicating that about 65% of the optimal yield can be obtained growing maize, sorghum, cotton and sunflower

TABLE 5

Total number of days in season suitable for rainfed cropping (1970-1985)

Station	Type of year	Mean No. of days (CV%)		Generalized No. of days for station	Years with different pattern (%)
		Suscept. crop	Resist. crop		
Alajuela	Short	208.8 (4.7)	224.4 (4.1)	220	0
	Long	224.9 (2.7)	236.1 (2.8)		
	Long-Short=	16	12		
Cañas	Short	190.3 (2.7)	203.0 (2.9)	200	13
	Long	200.0 (5.1)	212.0 (4.9)		
	Long-Short=	10	9		

only on the water stored in a soil profile at field capacity (Hsiao et al., 1976; Faci and Fereres, 1980; Cox and Jolliff, 1987), and there are several current efforts to upgrade deficit-resistance of tropical crops (e.g., Fischer et al., 1984). Furthermore, several techniques may be implemented to make full use of the season, such as: relay intercropping; shortening the crop growth cycle (e.g., transplanting, double cropping, or using photoperiodic responses); or increasing crop tolerance to water deficit such as early defoliation in maize (Crookston and Hicks, 1988). Little emphasis, however, has been placed on resistance to water excess. In general, the approach is to aim at increasing the number of crops grown per year, even if it is not conducive to optimum yield per crop.

Limited evidence from the local literature suggests that the actual rainfed cropping period in these regions may be substantially longer than what was determined by this methodology. Late plantings of soybean up to October 3 (Alfaro, 1977), and of sorghum in September (Castro and Guevara, 1986) yielded adequately, even though an analysis of those plantings through AQUA indicated 15 to 30 days of water deficit.

Underestimation of the length of the rainfed cropping season may be due to a combination of reasons, including: (a) the abilities of some crops to extract water from the soil are larger than what has been considered here; (b) planting is done in deep soils with larger AW; and (c) the methods used to calculate ETP overestimate the real values. Adjustments for soils with AW values substantially larger than the value of  $100 \text{ mm m}^{-1}$  used here are simple to perform. To evaluate the other two parameters requires some extensive research efforts in the Tropics, including lysimetry for adequately adapting the calculation of ETP.

The methodology proposed here, which represents only an example of the many water-based strategies that could be followed to upgrade rainfed tropical cropping, requires not only thorough field testing, local adaptations and economic analysis, but also a dynamic, responsive agriculture. This implies day-to-day climatic monitoring of the regions involved, and of computerized set-ups that timely inform farmers of the steps and type of actions that they should take with their crops. The establishment of such systems may be cost-effective if sufficiently large areas are involved, and considering that there may be no other options available given the high costs of irrigation infrastructure and limited amounts of water available for irrigation. Moreover, it would be an interesting experience to allocate a portion of the large sums actually being invested in tropical countries to develop irrigation projects for limited areas, into evaluating the impact on a much larger area of a dynamic rainfed system like the one proposed here, that includes designing and implementing appropriate cropping systems for two rainfed crops per year, training the farmer, and providing him with adequate extension and marketing services. The benefits of similar investments in each system could then be compared.

The author believes that the next step in agricultural development, at least for small and traditional farmers in developing tropical regions, representing

millions of hectares only in Central America, should be to achieve optimum use of natural rainfall while increasing inputs and better cultural practices to obtain more and higher yielding crops per year. This would represent a more realistic and perhaps more sustainable step in development than some high technology schemes affordable only for small areas.

## REFERENCES

- Alfaro, R., 1977. Pruebas comparativas de cultivares de soya en cinco epocas de siembra en Guanacaste. *Agron. Costarric.*, 1: 129-141.
- Carmona, G. and Radulovich, R., 1988. Metodología de evaluación de veranillos y de siembra temprana como estrategia para minimizar sus efectos. *Turrialba*, 38: 215-222.
- Castro, M. and Guevara, A.L., 1986. Evaluación de 20 híbridos experimentales de sorgo en Cañas. In: Resúmenes, VII Congreso Agronómico Nacional, Jul. 28-Aug. 1, 1986, Costa Rica, Vol. 1. Colegio de Ingenieros Agronomos de Costa Rica, pp. 204-205.
- Cox, W.J. and Jolliff, G.D., 1987. Crop-water relations of sunflower and soybeans under irrigated and dryland conditions. *Crop Sci.*, 27: 553-557.
- Crookston, R.K. and Hicks, D.R., 1988. Effect of early defoliation on maize growth and yield: an eleven year perspective. *Crop Sci.*, 28: 371-373.
- Doorenbos, J. and Kassam, A.H., 1979. Yield response to water. *FAO Irrigation and Drainage Paper No. 33*, Rome, 193 pp.
- Faci, J.M. and E. Fereres, 1980. Responses of grain sorghum to variable water supply under two irrigation frequencies. *Irrig. Sci.*, 1: 149-159.
- Fischer, K.S., Johnson, E.C. and Edmeades, G.O., 1984. Mejoramiento y selección de maíz tropical para incrementar su resistencia a la sequía. CIMMYT, El Batán, México, 20 pp.
- Frere, M. and Popov, G.F., 1979. Agrometeorological crop monitoring and forecasting. *FAO Plant Production and Protection Paper No. 73*, Rome, 64 pp.
- Hargreaves, G., 1975. Climate and moisture availability for Costa Rica. Working Paper 75-E161. Utah State Univ., Logan, UH, 23 pp.
- Hsiao, T.C., Fereres, E., Acevedo, E. and Henderson, D.W., 1976. Water stress and dynamics of growth and yield of crop plants. In: O.L. Lange et al. (Editor), *Water and Plant Life, Ecological Studies*, Vol. 19. Springer, Berlin, pp. 281-305.
- IPGH (Instituto Panamericano de Geografía e Historia), 1976. Atlas Climatológico e Hidrológico del Istmo Centroamericano. Publ. No. 367, Guatemala, 282 pp.
- Lomas, J. and Herrera, H., 1984. Weather and maize yield relationships in the tropical region of Guanacaste, Costa Rica. *Agric. For. Meteorol.*, 31: 33-45.
- Lomas, J. and Herrera, H., 1985. Weather and rice yield relationships in tropical Costa Rica. *Agric. For. Meteorol.*, 35: 133-151.
- Lugo-Lopez, M.A. and Antoni, M., 1981. A practical and simple graphic model to appraise the occurrence of dry spells in the humid tropics. *J. Agric. Univ. Puerto Rico*, 65: 264-268.
- Millar, A.A., 1985. Relaciones Hídricas del Sistema Suelo-Planta-Atmósfera: Enfoque Agronómico. IICA, Sto. Domingo, Dominican Republic, 313 pp.
- Paes de Camargo, M.B., Brunini, O., Angelocci, L.R. and Ortolani, A.A., 1984. Melhores épocas de plantio para arroz de sequeiro, CV. IAC-1246, em função de índices biometeorológicos. *Pesq. Agropec. Bras.*, 19: 1227-1233.
- Radulovich, R., 1987a. AQUA, a model to evaluate water deficits and excesses in tropical cropping. Part I. Basic assumptions and yield. *Agric. For. Meteorol.*, 40: 305-321.
- Radulovich, R., 1987b. Predicción de la precipitación de fin de estación lluviosa en el Régimen del Pacífico. *Agron. Costarric.*, 11: 55-64.

- Ramirez, P., 1982. La estacion lluviosa en Costa Rica y los veranillos. CATIE, Turrialba, Costa Rica, 6 pp.
- Ramirez, P., 1983. Estudio meteorologico de los veranillos de Costa Rica. Inst. Meteorologico de Costa Rica, Nota de Investigacion No. 5, San Jose, Costa Rica, 27 pp.
- Rojas, O., 1985. Estudio agroclimatico de Costa Rica. IICA, Serie de Publicaciones Miscelaneas No. 617. San Jose, Costa Rica, 177 pp.
- Sanchez, P.A., 1976. Properties and Management of Soils in the Tropics. Wiley, New York, 618 pp.
- Soria, J., 1976. Los sistemas de agricultura del Istmo Centroamericano. Rev. Biol. Tropical, 24 (Suppl. 1): 57-68.
- Taylor, H.M., Jordan, W.R. and Sinclair, T.R. (Editors), 1983. Limitations to Efficient Water Use in Crop Production. American Society of Agronomy, Madison, WI, 538 pp.
- Teare, I.D. and Peet, M.M. (Editors), 1983. Crop-Water Relations. Wiley, New York, 547 pp.

Nota Técnica

AGUA Y CULTIVOS SECUENCIALES EN ZONAS SEMI-SECAS:  
EVALUACION DE CAMPO PRELIMINAR<sup>1/\*</sup>

Ricardo Radulovich \*\*

Gisella Vargas \*\*

José Rodolfo Chaves \*\*

Fernando Sánchez \*\*

ABSTRACT

**Water and sequential cropping in semi-dry regions: preliminary field evaluation.** Bean and maize crops were planted sequentially during the rainy season of 1988, also evaluating the feasibility of producing crops on stored soil water only by planting at the end of the season, in Alajuela, Costa Rica, at an altitude of 840 masl. Annual precipitation averages 2370 mm, with a rainy season beginning early May and ending late November; mean monthly temperature is 22.2°C. Most plantings were done on a Typic Dystropept, while a bean planting at the end of the season was also done on a Thapto Vertic Dystrandept. Field results confirm in a preliminary manner the results of previous modeling efforts, and indicate the feasibility of producing two sequential crops per year, thus making a better use of natural precipitation and soil water storage capacity. Plantings at the end of the rainy season indicate the feasibility of producing a bean crop on stored soil water plus the reduced precipitation fallen during November and December. The large capacity of beans and maize to extract soil water was most relevant, extracting between 130 and 250 mm of water, which represents 185 to 250 mm/m of available soil water. These values are fairly higher than those normally used in water balance models.

INTRODUCCION

Dada la poca variabilidad de la temperatura media mensual a través del año para una región dada, el agua es el factor ambiental que más limita la producción agrícola tropical. Déficits y excesos hídricos durante la época de lluvias explican de un 60 a un 90% de la variabilidad de los rendimientos de granos básicos en la provincia de Guanacaste, Costa Rica (Radulovich, 1987a).

Se ha postulado que la optimización agrícola en zonas tropicales debe hacerse en función de rendimientos por año, aumentando el número de cultivos producidos en ese período (Sánchez, 1976; Soria, 1976), y no en función de rendimientos por cultivo. Evidentemente, toda estrategia de optimizar en función del número de cultivos por año debe ser basada en consideraciones hídricas. Un enfoque de esta índole para la región del Pacífico de Costa Rica ha sido presentado por Radulovich (1987a; 1989) y por Carmona y Radulovich (1988).

El presente trabajo, resume una evaluación preliminar a nivel de campo de varias hipótesis y esfuerzos de modelación desarrollados alrededor de la optimización hídrica de la agricultura de secano en Costa Rica, que se define como producción con agua de lluvia (Radulovich, 1987a; 1987 b; 1989; Carmona y Radulovich, 1988).

1/ Recibido para publicación el 25 de mayo de 1989.

\* Contribución del proyecto Optimización Hídrica de la Agricultura Tropical de Secano, financiado por el Programa de Cooperación en Ciencia y Tecnología, AID, Washington D.C., Estados Unidos, y la Universidad de Costa Rica.

\*\* Escuela de Ingeniería Agrícola, Facultad de Ingeniería, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.

## MATERIALES Y METODOS

Se realizaron en 1988 siembras secuenciales de frijol (*Phaseolus vulgaris* var. "Talamanca") y maíz (*Zea mays* var. "Tico V7") en la Estación Experimental Fabio Baudrit Moreno, de la Universidad de Costa Rica, en Alajuela (altitud 840 msnm; precipitación promedio anual de 2370 mm, con estación de lluvias entre mayo y noviembre; temperatura media mensual de 22,2°C).

Tres siembras de frijol y cuatro de maíz se efectuaron en la parte alta de la Estación, en un suelo clasificado como Typic Dystropept; y una cuarta siembra de frijol se efectuó en un suelo de la parte baja de la Estación, clasificado como Thapto Vertic Dystrandep (Mata, R. 1989. Comunicación personal. Suelos, Facultad de Agronomía, UCR). Para la producción de los cultivos se siguieron las prácticas culturales recomendadas para la zona (MAG, 1983), emulando en gran medida una situación de producción real.

Todas las siembras siguieron un diseño experimental de bloques completos al azar, con tres repeticiones, excepto la segunda siembra de frijol con dos repeticiones. Los tamaños de las parcelas en cada repetición fluctuaron entre 40 y 100 m<sup>2</sup>. Los rendimientos reportados fueron obtenidos cosechando 10 m<sup>2</sup> seleccionados al azar dentro de cada parcela útil, y expresados en 12% de humedad.

Las fechas de siembra y cosecha se muestran en el Cuadro 1. La primera fecha de siembra de cada uno de los cultivos se determinó por medio del modelo desarrollado por Radulovich (1986) y

por Carmona y Radulovich (1988), que utiliza componentes probabilísticos y de tiempo real de precipitación, para determinar la fecha de siembra más temprana posible que implique el menor riesgo en el establecimiento de los cultivos.

La siembra II de frijol se realizó un tiempo prudencial después de la cosecha de la siembra I de maíz. La siembra II de maíz se efectuó tras la cosecha de la siembra I de frijol, y la siembra III de maíz se efectuó también tras la cosecha de la siembra I de maíz (Cuadro 1). Las dos primeras siembras de frijol y las tres primeras de maíz se efectuaron con miras a evaluar una secuencialidad de dos cultivos por año en la zona del estudio, que se resume como frijol-maíz, maíz-frijol y maíz-maíz.

Las siembras III y IV de frijol y IV de maíz, se efectuaron al final de la época de lluvias (Cuadro 1), con miras a evaluar: a) la factibilidad de producir un cultivo de frijol fundamentalmente con sólo el agua almacenada en el suelo, tras su emergencia durante el fin de las lluvias; y, b), la capacidad del frijol y del maíz de extraer agua de los suelos en estudio, tras períodos prolongados de escasez de agua.

La humedad de los suelos se determinó por muestreo gravimétrico de cada repetición, con secado a 110°C por 48 h, convirtiéndola luego a humedad volumétrica por medio de la densidad aparente. La humedad a capacidad de campo se determinó *in situ*, 48 h después de un evento pluvial al final de la estación de lluvias, lo que representa el máximo de agua almacenable en el suelo (algunas pérdidas por evapotranspiración que

Cuadro 1. Fechas de siembra y cosecha, y rendimientos de los cultivos producidos en 1988, en la Estación Experimental Fabio Baudrit Moreno, Alajuela.

Número de siembra	Fecha de siembra	Fecha de cosecha	Rendimiento (kg/ha)		Desviación estándar
			Frijol	Maíz	
Frijol I	5 mayo	28 julio	1.533,2		(286,8)
Maíz II	4 agosto	12 diciembre		2.076,0	(171,5)
Maíz I	5 mayo	6 setiembre		5.202,4	(827,0)
Frijol II	22 setiembre	13 diciembre	1.035,9		(136,5)
Maíz III	8 setiembre	12 enero		3.346,8	(348,1)
Frijol III	27 octubre	17 enero	215,5		(64,9)
Maíz IV	27 octubre	30 enero		--	
Frijol IV	11 noviembre	30 enero	1.404,5		(129,8)

Todas las siembras se efectuaron en un suelo Typic Dystropept, salvo la de frijol IV que se realizó en un Thapto Vertic Dystrandep.



puedieron ocurrir durante las 48 h después de la lluvia, se despreciaron). El muestreo de humedad del suelo alrededor de la cosecha representa el agotamiento máximo del agua del suelo por el cultivo, tras un período prolongado de sequía.

La siembra IV de frijol, que se efectuó en el suelo de la parte baja de la Estación, también se fundamentó en el modelo de predicción de lluvias de fin de año desarrollado para la región del Pacífico de Costa Rica por Radulovich (1987b).

## RESULTADOS Y DISCUSION

### Cultivos secuenciales

Según el modelo de Carmona y Radulovich (1988), la fecha más temprana de siembra posible fue el 4 de mayo. La siembra I de frijol y maíz se efectuó el 5 de mayo (Cuadro 1), una fecha bastante temprana en relación a la práctica usual en la zona. La germinación y establecimiento temprano de los cultivos fue óptima, lo que otorga un cierto grado de credibilidad preliminar al modelo, cuyo uso permite extender la duración cultivable de la estación de lluvias desde su inicio, sembrando cuanto antes sea seguro.

Las siembras II de frijol y II y III de maíz se realizaron en forma secuencial (sin traslape) posterior a las cosechas de la siembra I, y las cosechas se extendieron hasta diciembre en la siembra II de frijol y maíz, y enero en la siembra III de maíz.

A estas alturas, se visualiza que el año agrícola fundamentado en la estación de lluvias, utilizando cultivos secuenciales en una forma tradicional, se extiende desde fines de abril con las prácticas culturales de pre-siembra hasta mediados-finales de enero con la cosecha y manejo de biomasa no cosechable. Es decir, fácilmente se puede comprobar que el año agrícola en esta región podría comprender nueve meses. Los resultados de los cultivos sembrados al final de las lluvias, presentados posteriormente, permiten suponer que el año agrícola es aún más largo sin necesidad de riego.

Los rendimientos de las siembras secuenciales se muestran en el Cuadro 1. Los rendimientos de las siembras I y II de frijol, y I, II y III de maíz son mayores que los promedios nacionales, destacando, por altos, los rendimientos de las siembras I de frijol y maíz. Las reducciones en rendimientos de la siembra II de frijol y II y III de maíz son atribuibles en gran medida a los efectos directos e indirectos de la incidencia de los huracanes

Gilbert y Juana, en setiembre y octubre, respectivamente. Según datos de la Estación, durante setiembre hubo 26 días con lluvia para un total de 449,3 mm, mientras que en octubre llovió 27 días para un total de 568,2 mm de precipitación.

A pesar de que el huracán Juana se presentó a mediados de octubre, y mantuvo su efecto hasta finales del mes, la lluvia en noviembre de 1988 fue de 104,8 mm, bastante inferior al promedio. Una precipitación baja había sido predicha desde junio en función de la precipitación del mes de mayo, la cual, siendo alta (323,7 mm), indicaba grandes probabilidades de baja precipitación en noviembre, según el modelo predictivo de Radulovich (1987b). El déficit hídrico durante el mes de noviembre fue aún más severo de lo que se deduce del valor mensual, pues la mayoría de la precipitación de noviembre se dio hasta el día 6 inclusive, con sólo 25,6 mm para todo el mes después de esa fecha, a lo que se deben sumar 11,7 mm caídos en diciembre. La baja precipitación de noviembre y diciembre es otro factor al que se pueden atribuir los bajos rendimientos de las siembras II de frijol y II y III de maíz.

En la medida que los resultados aquí presentados están siendo reevaluados en forma más rigurosa, puede afirmarse que es factible producir regularmente dos cultivos secuenciales por año en esta región de Costa Rica, que representa un enorme potencial de productividad agrícola que está actualmente desaprovechado.

### Cultivos con las últimas lluvias

Las características hídricas de los dos suelos empleados difirieron mucho entre sí. El suelo de la parte alta de la Estación retiene entre 45 y 55% de humedad volumétrica a capacidad de campo y presenta un horizonte impenetrable por las raíces a 70 cm de profundidad, mientras que el de la parte baja retiene de 64 a 70% de agua a capacidad de campo y es fácilmente penetrable hasta 1 m de profundidad por lo menos.

En relación a las siembras durante las últimas lluvias, efectuadas el 27 de octubre y el 11 de noviembre, contrastan grandemente los rendimientos de las siembras III y IV de frijol (Cuadro 1). Según se observa en el Cuadro 2, el consumo de agua del suelo por los cultivos de frijol difiere mucho, siendo de 130,1 mm para la siembra en el suelo de la parte alta (III), y de 252,3 mm para la siembra en el suelo de la parte baja (IV). Esta gran diferencia en cantidad de agua aprovechable

Cuadro 2. Consumo de agua del suelo por cultivos sembrados al fin de la estación de lluvias en dos suelos de la EEFBM, Alajuela.

Suelo	Cultivo	Consumo	Capas de suelo (cm)				Consumo total (mm)	Agua disponible Promedio (mm/m)
			0-10	10-40	40-70	70-100		
Typic Dystropept	Frijol III	% volumétrico*	31,7	22,3	10,5		130,1	185,6
		mm/capa**	31,7	66,9	31,5			
		Agua Disp. mm/m***	317,0	223,0	105,0			
Typic Dystropept	Maíz IV	% volumétrico	31,7	27,0	18,0		166,7	238,1
		mm/capa	31,7	81,0	54,0			
		Agua Disp. mm/m	317,0	270,0	180,0			
Thapto Vertic Dystrandept	Frijol IV	% volumétrico	41,7	29,8	23,7	16,7	252,3	252,3
		mm/capa	41,7	89,4	71,1	50,1		
		Agua Disp. mm/m	417,0	298,0	237,0	167,0		

\* % volumétrico=diferencia en humedad volumétrica entre capacidad de campo y cosecha.

\*\* mm/capa= mm de agua consumidos por capa de suelo muestreada.

\*\*\* Agua Disponible= cantidad de agua consumida normalizada a mm de agua por m de profundidad de suelo).

por los cultivos explica en gran parte la diferencia en rendimientos. Resulta interesante que, un suelo como el de la parte baja de la Estación, que sufre de mal drenaje durante la época de lluvias, brinda suficiente agua para obtener un cultivo de frijol cuando se siembra al final de las lluvias; esto representa una valiosa estrategia de manejo.

Otro factor que influyó en la diferencia de rendimientos entre frijol III y IV fue el desarrollo de una enfermedad del follaje en el frijol III, la cual no fue posible de superar, debido al esperado pobre desarrollo de área foliar obtenido por escasez de agua. Esto representa una clara indicación del cuidado a tenerse con el follaje al enfrentar cultivos al déficit hídrico, pues la cantidad de hojas será limitada y la capacidad de recuperación foliar se verá fuertemente disminuida.

A pesar de que a la siembra IV de maíz no le fue permitido llegar a madurez, siendo cosechada junto con la siembra III de frijol, puede verse que para el mismo período de crecimiento, el maíz extrajo 36,6 mm más de agua del suelo que el frijol (Cuadro 2).

En general, la experiencia de las siembras con el fin de la estación de lluvias indica la factibilidad de producir cultivos fundamentalmente con el agua almacenada en el suelo más la precipitación de noviembre y la que pueda darse en diciembre. En el año en cuestión, como ya se indicó, la precipitación del 7 al 30 de noviembre fue sumamente baja, lo cual era esperado. En años con precipita-

ción esperada en noviembre de media a alta (Radulovich, 1987b), el éxito de este tipo de siembras tardías será bastante mayor. Por supuesto, como se indicó arriba, la cantidad de agua en el suelo disponible a los cultivos es fundamental y varía mucho entre suelos.

Cabe destacar que los valores de agua disponible medidos como la diferencia en contenido volumétrico de agua entre capacidad de campo y cosecha, son sumamente altos, para ambos suelos, fluctuando entre 185,6 y 252,3 mm/m (Cuadro 2). Estos valores son de gran importancia para efectos de modelación de balance hídrico, e indican una mayor capacidad de extracción de agua de los suelos por los cultivos que lo considerado usualmente.

## RESUMEN

Se sembraron en forma secuencial cultivos de frijol y maíz de secano durante la estación de lluvias de 1988, evaluándose también la factibilidad de producir cultivos con el agua almacenada en el suelo al final de las lluvias, en Alajuela, Costa Rica. La mayoría de las siembras se efectuaron en un Typic Dystropept, mientras que una siembra de frijol de fin de lluvias se realizó en un Thapto Vertic Dystrandept.

Los datos de campo confirman de manera preliminar los resultados de esfuerzos de modelación previos, e indican la factibilidad de producir

dos cultivos secuenciales por año, dando así un mejor uso a la precipitación natural y a la capacidad de almacenamiento de agua de los suelos. Las siembras al fin de la estación de lluvias indicaron la factibilidad de producir un cultivo de frijol prácticamente con el agua almacenada en el suelo más la poca precipitación de noviembre y diciembre. En particular, se destaca una gran capacidad de extracción de agua de los suelos por los cultivos, fluctuando entre 130 y 250 mm de agua extraída, lo que se normaliza a valores de agua disponible de 185 a 250 mm/m. Estos valores son bastante más altos que los normalmente empleados en modelos de balance hídrico.

#### LITERATURA CITADA

- CARMONA, G.; RADULOVICH, R. 1988. Metodología de evaluación de veranillos y de siembra temprana como estrategia para minimizar sus efectos. Turrialba 38:215-222.
- MAG. 1983. Manual de recomendaciones. San José, Costa Rica. 234 p. (Boletín Técnico no. 62)
- RADULOVICH, R. 1986. AQUA, an integrated water model for tropical cropping. Final report. Mc Namara Fellowships Program, Economic Development Institute. Washington D.C., The World Bank. 114 p.
- RADULOVICH, R. 1987a. AQUA, a model to evaluate water deficits and excesses in tropical cropping. I. Basic assumptions and yield. *Agricultural and Forest Meteorology* 40:305-321.
- RADULOVICH, R. 1987b. Predicción de la precipitación de fin de estación lluviosa en el régimen del Pacífico. *Agronomía Costaricense* 11(1):55-64.
- RADULOVICH, R. 1989. Optimization of rainfed tropical cropping in semi dry areas: A case study. *Agricultural Water Management* 16(3): 337-352.
- SANCHEZ, P.A. 1976. Properties and management of soils in the tropics. New York, Wiley. 618 p.
- SORIA, J. 1976. Los sistemas de agricultura en el Istmo Centroamericano. *Revista de Biología Tropical* 24(Suplemento 1):57-68.

## AQUA, a model to evaluate water deficits and excesses in tropical cropping. Part II. Regional yield prediction

Ricardo A. Radulovich\*

*Department of Agricultural Engineering, University of Costa Rica, San Jose (Costa Rica)*

(Received September 19, 1989; revision accepted March 23, 1990)

### ABSTRACT

Radulovich, R.A., 1990. AQUA, a model to evaluate water deficits and excesses in tropical cropping. Part II. Regional yield prediction. *Agric. For. Meteorol.*, 52: 253-261.

Indices of water deficit (IDef) and of deficit+excess (IStes) produced with the water balance model AQUA were correlated against rainfed regional yields of one annual planting of rice and beans, and of two different planting dates of maize. Data used are from northern Costa Rica, with 12 years of rice yield data available and eight years for the other crops.

The linear regression model best fitted the data, with all  $r$  values obtained significant at  $P < 0.05$  and most at  $P < 0.01$ . Although water deficits explained most of the year-to-year yield variability, in all cases  $r^2$  values from using IStes were higher than those from IDef; this indicates that a portion of yield reductions are the result of water excess. Yields predicted for 2 years were not significantly different from actual yields, using either index. Yield variability explained through  $r^2$  by using IStes was 90% for rice, 70% for beans, and 61 and 83% for first and second maize plantings, respectively. After converting yields to a relative basis, both maize plantings were grouped in one regression analysis and 71% of yield variability was explained by using IStes. After converting yields of all three crops and two maize plantings to their respective relative values, one single regression was run using all values. The overall yield explanation thus obtained was of 76% using IStes and of 65% using only deficits through IDef.

A simple water balance model like this, that can explain from 60 to 90% of regional yield variability of individual plantings, from 80 to 90% of variability of individual crops if the best planting date for maize is considered, and 76% of the variability of all three crops and planting dates when regressed together, can have many uses such as yield forecasting, crop zonification and regionalization, and a series of analyses of climates and expected responses of crops that at present have but a loose connection with yield.

### INTRODUCTION

Rainfed tropical crop production is characterized by variable yield behavior, largely due to as yet poorly quantified and even more poorly managed

\*Present address: Department of Agronomy, Cornell University, Ithaca, NY, U.S.A.

water deficit and excess effects, together comprising a water stress complex. Water deficit and excess together explain a large percentage of yield variability of several annual crops in Costa Rica, with the effects of deficit providing the main explanation (Radulovich, 1987a).

Many efforts have been directed towards optimizing rainfed tropical cropping as a function of water, and even some predictive capabilities regarding forthcoming precipitation have been developed (Stewart and Kashasha, 1984; Radulovich, 1987b, 1989; Sivakumar, 1988). However, there seems to be a wide gap between modeling efforts, based at the experimental plot level, that emphasize the direct biophysical causality between water stress and yield (e.g. Wilkerson et al., 1983; Jones and Kiniry, 1986), and those models and analyses functioning at a regional scale that in general have a loose connection with yield (e.g. Musembi and Griffiths, 1986; Lewis and Ndolo, 1987; Stewart, 1988; Carmona and Radulovich, 1988; Nullet and Giabelluca, 1988; Nieuwolt, 1989; Radulovich, 1989).

It is not clear how well yield prediction developed for individual plantings from biophysical factors will translate to yields on a regional scale; known attempt so far have used regional weather data without regional yield validation (Samani et al., 1987). Even the classical model developed by Frere and Popov (1979) was established using research station yields, and it is not certain whether regional behavior will follow that of small plots. On the other hand, the strong relationships between regional yields regressed vs. simple water stress indices (P. Vossen cited by the Food and Agriculture Organization, 1986; Radulovich, 1987a; Walker, 1989) provide evidence that regional models can be based on regional yields.

In a previous effort to establish a relationship between water stress and yields, the model AQUA was developed and tested (Radulovich, 1987a). In spite of the limited available yield data, the model explained from 60 to 90% of the variability of regional yields of maize, beans and rice; however, no quantitative relationships were established then between degrees of water stress and yield. The work presented here builds on that earlier work, quantifying the relationship between water stress and regional yields for these crops, with the objective of producing a tool for yield prediction which can also be used for crop zonification and regionalization in the tropics.

#### METHODOLOGY

Work was conducted using data from the North Pacific region of Costa Rica, Central America, with efforts focusing on four localities of agricultural importance (Cañas, Liberia, Nicoya and Santa Cruz). Relevant aspects of these localities and the region have been presented elsewhere (Lomas and Herrera, 1984, 1985; Radulovich, 1987a, 1989; Carmona and Radulovich, 1988).

The model AQUA (Radulovich, 1987a) was used to determine degrees of water stress for one yearly planting date of rice and beans, and two of maize, for the years with available yield data, which are 12 for rice (1976–1987) and eight for beans and maize (1980–1987). Areas planted with maize and beans fluctuate around 6000 ha, while those planted with rice can surpass 30 000 ha.

The model is basically a daily water balance calculation that uses actual daily precipitation, daily crop evapotranspiration ( $ET$ ) derived from monthly potential  $ET$  and crop coefficients ( $k_1$ ), and manages a soil supply of crop available water, based on rooting depth and a depletion coefficient that determines what fraction of a generalized soil available water value of 100 mm  $m^{-1}$  can be taken up by a crop. The way these values change with crop species and growth stage, and the underlying criteria and basic mechanics of the model, have been described elsewhere (Radulovich, 1987a, 1989).

For each of the localities, AQUA was run from the planting date of each crop through its effective crop growth cycle, accumulating days with deficit and days with excess, which were used to produce the indices of water deficit (IDef) and of water deficit+excess (IStres). The individual indices obtained from each of the four localities were averaged into one regional index, and confronted with a yield that was also the average of yields from the four localities (Radulovich, 1987a).

After analyzing the data following several regression models, it was clear that the linear model explained the relationship between either index and yields with a larger coefficient of determination in most of the cases. All results are expressed in terms of the linear model ( $Y=mX+b$ ).

## RESULTS

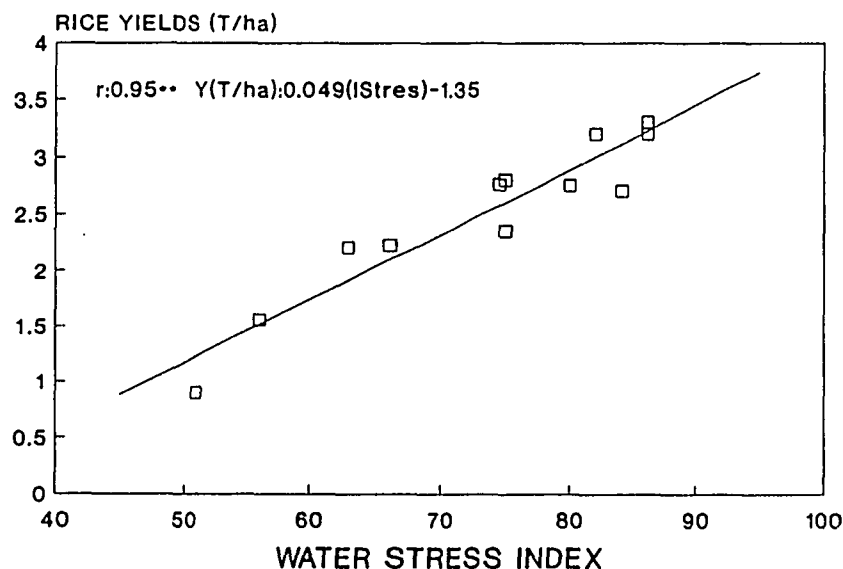
Table 1 shows the values obtained from the linear regression analyses for all the crops using all the years of data. All  $r$  values shown are high, with significant ( $P < 0.05$  and  $P < 0.01$ ) correlations between the indices and yields. As reported previously (Radulovich, 1987a),  $r^2$  values using IStres are higher in all cases than those using IDef. The  $r^2$  values using IDef range from 0.58 to 0.85, while those using IStres range from 0.61 to 0.90. The values for rice and for second maize planting are particularly high, with the lowest values being those of first maize planting. Figure 1 illustrates the relationship between IStres and rice yields, which produced a highly significant  $r$  ( $P < 0.01$ ) with 90% of yield variability explained by water stress.

Several lines of evidence besides the basic relationship between the indices and yields were followed, in order to further establish the validity and transferability of the models. Among these, yields of 1986 and 1987 were predicted from each of those years' indices, using partial versions of the regression model developed using data only from previous years. This provided for an indepen-

TABLE 1

Values produced from linear regression analysis ( $Y = mX + b$ )

Crop	<i>n</i>	Index ( <i>X</i> )	<i>r</i>	<i>r</i> <sup>2</sup>	<i>m</i>	<i>b</i>
Based on actual yields ( $Y = T \text{ ha}^{-1}$ )						
Rice	12	IDef	0.92**	0.85	0.0488	-1.349
		IStres	0.95**	0.90	0.0577	-1.763
Beans	8	IDef	0.81*	0.66	0.0067	-0.170
		IStres	0.84**	0.70	0.0099	-0.328
Maize 1	8	IDef	0.76*	0.58	0.0203	-0.231
		IStres	0.78*	0.61	0.0217	-0.283
Maize 2	8	IDef	0.90**	0.82	0.0228	-0.742
		IStres	0.91**	0.83	0.0241	-0.788
Based on relative yields ( $Y = \%$ ) <sup>a</sup>						
Maize 1 + 2	16	IDef	0.84**	0.70	1.170	-26.9
		IStres	0.84**	0.71	1.227	-28.3
All crops	36	IDef	0.81**	0.65	1.072	-21.6
		IStres	0.87**	0.76	1.305	-33.7

Significant at \* $P < 0.05$  and \*\* $P < 0.01$ , respectively.<sup>a</sup>100% yields are ( $T \text{ ha}^{-1}$ ): rice = 3.84; beans = 0.68; maize 1 = 2.0; maize 2 = 1.72.Fig. 1. Correlation between the water stress index (IStres) and yields of rice. \*\* $P < 0.01$ .

dent validation of preliminary versions of the regression model. Results are shown in Fig. 2, where a relationship quite close to 1:1 between actual and predicted yields can be seen. Predicted yields from either index were not significantly different from actual yields according to paired *t*-test analysis. The values that most deviate in relative terms from the 1:1 relationship are those of the first maize planting (both maize values above the line) and the lowest

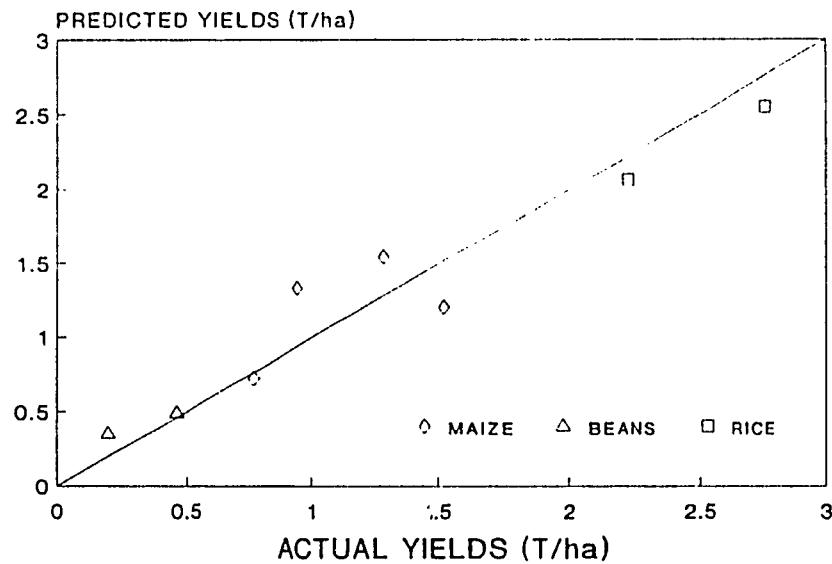


Fig. 2. Relationship between actual yields of beans, rice and two maize plantings vs. yields predicted by preliminary versions of the regression model.

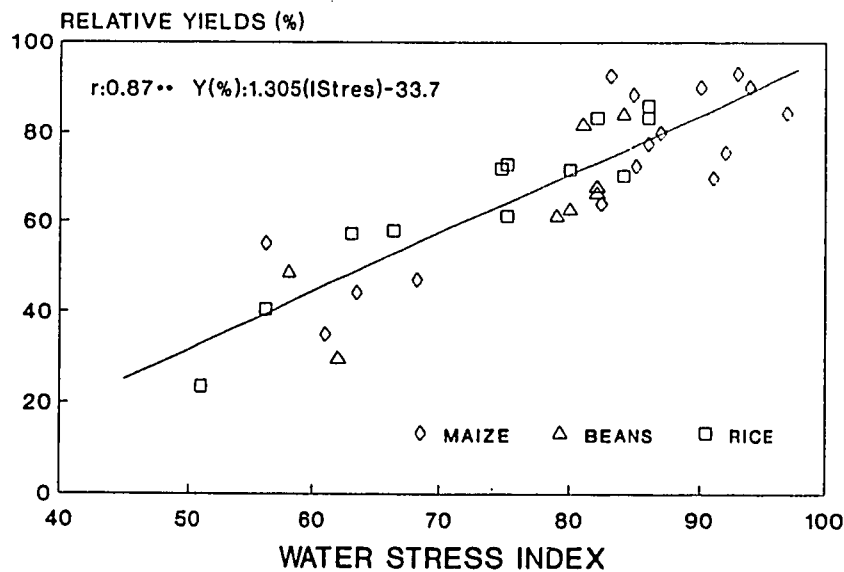


Fig. 3. Correlation between the water stress index (IStres) and relative yields of beans, rice and two maize plantings.  $**P < 0.01$ .

bean yield value. Since the actual yield values were incorporated into the regression model after the prediction exercise, it is expected that prediction has been improved beyond that shown in Fig. 2.

As a test of the transferability of the model, it was thought that the yields of the first and second maize plantings should follow a similar relationship with the indices. First and second maize plantings were grouped on the basis of relative yields (obtained as percentages using the highest yield on record for each planting as 100%) and were regressed together, yielding highly sig-



nificant  $r$  values ( $P < 0.01$ ), with  $r^2$  values larger than those of the first planting alone, of 0.70 and 0.71 for IDef and IStres, respectively (Table 1). This indicated that the outputs of the model AQUA, the indices, work for maize in a more general form than just for a specific planting date, at least in this region.

Further validating the model, yields of all crops were converted to a relative basis and were analyzed together, with the results shown in Table 1 and Fig. 3 for IStres. Although  $r$  values from either index are highly significant ( $P < 0.01$ ), the difference between them was substantial, with IStres explaining 11% more of yield variability, with an  $r^2 = 0.76$  vs.  $r^2 = 0.65$  for IDef. It can be seen in Fig. 3 that a single relationship seems to hold between IStres and relative regional yields, regardless of crop species (maize, beans or rice) or date of planting in the case of maize. Basically, the general relationship is a 1.3% drop in yield per unit drop in IStres (Table 1).

## DISCUSSION

The relationship between both IDef and IStres and crop yields, established earlier in a preliminary form (Radulovich, 1987a), is shown to be strong and the correlation highly significant for both indices and all three crops (Table 1). The predictive ability of the model was quite sound and has been presumably improved by the incorporation of the data used for prediction and, in the case of maize, by grouping both planting dates, which provided a solid explanation of yield variability for this crop regardless of planting date (Table 1).

The fact that a better explanation was obtained for the second maize planting than for the first (Table 1) is attributed to at least two factors: (a) there is a larger variability in yields between years for the second maize planting, which provides for a larger range in yields accompanied by lower relative yields; (b) as a result of differences in planting dates, the first planting encounters water deficit during early vegetative growth, which provides an opportunity for recovery, whereas the second planting confronts water deficit mainly during reproductive stages, which allows less opportunity for recovery. Phenological differences in the response to water stress that consider the ability of a crop to recover are particularly difficult to model, and are beyond the scope of this work, both in complexity and in necessity.

In all cases, IStres related better to yields than IDef, and in some cases the difference was substantial. It is advisable, at least for regions where water deficit coexists with excesses, that water excess effects be incorporated into the analyses through this kind of model. This discussion will proceed further, emphasizing results from IStres.

Given that water is the most relevant variable controlling yield variability, the explanation for how a simple model like this can explain such large portions of yield variability may be found in the fact that it is regional yields that

are being evaluated. Yields of thousands of hectares are being grouped together, and this allows us to consider spatial, temporal and other variants in an integrated manner within a single yield average. Particularly relevant are soil and small planting date differences, that only by themselves should produce an infinite array of different responses which are smoothed out by the regional yield average. Even effects of biotic stresses, such as those caused by a pest, should be smoothed out by regional yields unless they are truly widespread about the whole area. A more sophisticated model, working in much smaller production units, would probably be more susceptible to each of these circumstances.

The high level of explanation of rice yields by the water stress index (IStres), with an  $r^2=0.90$  (Table 1, Fig. 1), has been attributed to this crop being at a higher level of technology in Costa Rica than maize and beans (Radulovich, 1987a). It can be assumed that as the level of technology of the rainfed production of a crop increases to an optimum level, in which most yield-affecting variables are controlled (such as soil fertility and pest control), the variability in yield will depend more on water stress, an uncontrolled variable. For example, Walker (1989) was able to explain 92% of the variability of regional wheat yields from drought indices, in the Canadian prairie, a region with a highly developed technological package for wheat production. The case of rice in this region of Costa Rica can be similar, where production is mechanized and occurs in large plantings. Production of maize and beans is basically of the low-input small-farmer type, and is thus more susceptible to the vagaries of a series of variables other than water. Following this line of reasoning, it can be expected that as production technology for a crop reaches a stable level of widespread use, the dependency of rainfed yields on water stress will increase.

Besides the ability of the model's outputs to relate well to regional yields, it was most striking to observe how the relative yields of maize, beans and rice coalesced into a single, highly significant linear relationship with IStres, which explained 76% of the variability in yield of the three crops, including two planting dates of maize (Table 1, Fig. 3). The explanation may be two-fold: (a) IStres already considers some differences in crop-water relationship between types of crops (Radulovich, 1987a); (b) as discussed above, by considering thousands of hectares, response differences between species of annual crops may also tend to be smoothed out; this may not be the case when comparing species responses to water stress on a single experimental plot.

The fact that IStres relates in a similar manner to relative yields of different crops and planting dates represents a most useful tool in several aspects at the regional level, and might allow for transferability of the methodology followed here. It must be noted, though, that further validation should be sought, particularly for regions that have different productivity levels. Regarding the latter, crops can be grouped according to their known responses to water re-

relationships into a few groups for the purpose of producing IStres values; this was done here, by grouping together beans and rice for several model input values (Radulovich, 1987a).

A simple model like this, which can explain 76% of regional yield variability based on elementary variations of a single parameter, could very well suffice for a series of applications. These applications are several: yield forecasting by concerned agencies; crop zonification and regionalization; and a series of analyses of climates and expected responses of crops. Of particular relevance is the fact that many studies so far weakly connected to yield would gain in precision by incorporating relative yield estimates to their analysis, gaining a step in applicability in the process.

#### ACKNOWLEDGMENTS

Work financed by the Program in Science and Technology Cooperation of the United States Agency for International Development and by the University of Costa Rica.

#### REFERENCES

- Carmona, G. and Radulovich, R., 1988. Metodologia de evaluacion de veranillos y de siembra temprana como estrategia para minimizar sus efectos. *Turrialba*, 38: 215-222.
- Food and Agriculture Organization, 1986. Early Agrometeorological Crop Yield Assessment. F.A.O. Plant Prod. Prot. Pap. No. 73, Rome, 150 pp.
- Frere, M. and Popov, G.F., 1979. Agrometeorological Crop Monitoring and Forecasting. F.A.O. Plant Prod. Prot. Paper No. 17, Rome, 64 pp.
- Jones, C.A. and Kiniry, J.R. (Editors), 1986. CERES-Maize: A Simulation Model of Maize Growth and Development. Texas A&M University Press, College Station, TX, 194 pp.
- Lewis, J.E. and Ndolo, I.J., 1987. Estimating moisture availability for rice cultivation in Mwea, Kenya. *Agric. For. Meteorol.*, 41: 87-95.
- Lomas, J. and Herrera, H., 1984. Weather and maize yield relationships in the tropical region of Guanacaste, Costa Rica. *Agric. For. Meteorol.*, 31: 33-45.
- Lomas, J. and Herrera, H., 1985. Weather and rice yield relationships in tropical Costa Rica. *Agric. For. Meteorol.*, 35: 133-151.
- Musembi, D.K. and Griffiths, J.F., 1986. The use of precipitation data to identify soil moisture patterns and the growing seasons in eastern Kenya. *Agric. For. Meteorol.*, 37: 47-61.
- Nieuwolt, S., 1989. Estimating the agricultural risks of tropical rainfall. *Agric. For. Meteorol.*, 45: 251-263.
- Nullet, D. and Giambelluca, T.W., 1988. Risk analysis of seasonal agricultural drought on low Pacific islands. *Agric. For. Meteorol.*, 42: 229-239.
- Radulovich, R., 1987a. AQUA, a model to evaluate water deficits and excesses in tropical cropping. Part I. Basic assumptions and yield. *Agric. For. Meteorol.*, 40: 305-321.
- Radulovich, R., 1987b. Prediccion de la precipitacion de fin de estacion lluviosa en el regimen del Pacifico. *Agron. Costarricense*, 11: 55-64.
- Radulovich, R.A., 1989. Optimization of rainfed tropical cropping in semi-dry areas: a case study. *Agric. Water Manage.*, 16: 337-352.

- Samani, Z.A., Hargreaves, G.H., Zuniga, E. and Keller, A.A., 1987. Estimating crop yields from simulated daily weather data. *Appl. Eng. Agric.*, 3: 290-294.
- Sivakumar, M.V.K., 1988. Predicting rainy season potential from the onset of rains in Southern Sahelian and Sudanian climatic zones of West Africa. *Agric. For. Meteorol.*, 42: 295-305.
- Stewart, J.I., 1988. *Response Farming in Rainfed Agriculture*. Wharf Foundation Press, Davis, CA, 103 pp.
- Stewart, J.I. and Kashasha, D.A.R., 1984. Response farming of maize and beans at Katumani, Machakos District, Kenya: Recommendations, yield expectations and economic benefits. *E. Afr. Agric. For. J.*, 44 (Spec. Iss., Oct.): 58-79.
- Walker, G.K., 1989. Model for operational forecasting of Western Canada wheat yield. *Agric. For. Meteorol.*, 44: 339-351.
- Wilkerson, G.C., Jones, J.W., Boote, K.J., Ingram, K.T. and Mishoe, J.W., 1983. Modeling soybean growth for crop management. *Trans. ASAE*, 26: 63-73.

# DESARROLLO AGRICOLA EN EL TROPICO LATINOAMERICANO: EL CASO DEL PEQUEÑO AGRICULTOR vs. LA ECONOMIA NACIONAL

RICARDO RADULOVICH

Existen actualmente en relación al Tercer Mundo y en particular a Latinoamérica dos corrientes principales en el desarrollo de la agricultura, que parecen mutuamente excluyentes. Por una parte se encuentra la línea agroecológica, que promueve una agricultura en amplio equilibrio con la naturaleza, manteniendo una visión un tanto bucólica, quizá irreal dentro del contexto de las necesidades socioeconómicas de una nación en desarrollo, aunque favoreciendo en gran medida el estatus del pequeño campesino tradicional. Por otra parte, se encuentra la línea tecnicista, que favorece la tecnificación del agro y el amplio uso de insumos en cultivos de exportación, lo que evidentemente resulta en altos rendimientos —al menos al corto plazo— ya que generalmente esta tendencia ha considerado en forma muy leve los aspectos de sustentabilidad y se han irrespetado una serie de relaciones ambientales.

Así, se da una especie de dicotomía en la clientela de las políticas agrícolas y de la investigación-extensión, teniendo como polos por un lado el bienestar del pequeño agricultor tradicional y por el otro el bienestar de la

sociedad en general. Esta dicotomía se visualiza mejor al imaginar la contraposición entre políticas e investigaciones destinadas a beneficiar a los pequeños agricultores y los mercados que de éstos dependen, y aquellas políticas agrarias o investigaciones de alta tecnificación, como puede ser el desarrollo a gran escala de un cultivo de exportación en una región dada. En el primer caso, el sujeto humano es el objetivo, mientras que en el otro caso el sujeto humano es sólo el productor-empresario que se dedica a dicha actividad, y el objetivo final de esa política vendría siendo el beneficio global del país por la rentabilidad de las exportaciones. Ambos extremos están probando ser incompatibles.

Por una parte, el progreso agrícola de una nación requiere un productor empresarial y tecnificado, y de una producción agrícola eficiente y estable. Por otra, es necesario diseñar medios para lograr el desarrollo o la evolución a fuentes de ingreso más estables y suficientes del pequeño agricultor tradicional, e ineficiente en términos de mercados modernos.

Sin embargo, los principios de la sustentabilidad agrícola no son

incompatibles con una serie de grados de tecnificación. Ambos, tanto la sustentabilidad como la tecnificación son impresionables en la producción agrícola tropical.

Este trabajo presenta un intento por separar los extremos de lo que puede llamarse la clientela de las políticas agrarias y de los esfuerzos de desarrollo agrícola en un país. Se espera con el presente documento iniciar el tratamiento de una materia que, aunque difícil, puede demostrar ser de extrema importancia en aspectos del desarrollo agrícola de Latinoamérica toda y tropical en particular.

## Agricultura sustentable

Con los inicios del apogeo de la agricultura sustentable y en particular su doctrina de minimización de insumos en la producción agrícola, cobra fuerza también la tendencia agroecologista y su visión del equilibrio entre el agricultor y el trozo de naturaleza que maneja. Estas dos corrientes provienen de diferentes nacientes, y convergen en un cauce que podría llegar a ser perju-

/ PALABRAS CLAVE / Agricultura tropical / Desarrollo agrícola / Pequeño agricultor / Productividad agrícola / Agroecología /

Ricardo Radulovich. Ph.D. Universidad de California, Davis EE.UU (1984); post-doctorado, Universidad Estatal de Oregon, Corvallis, EE.UU (1984-85); McNamara Research Fellow, Banco Mundial (1985-86); Profesor (1986 al pte.) y Director (1987-88), Escuela de Ingeniería Agrícola, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica; Profesor Asociado Visitante, Universidad de Cornell, Ithaca, Nueva York, EE.UU (1989 al pte.). Investigador Principal, proyecto "Optimización Hídrica de la Agricultura Tropical", desarrollado en Costa Rica (1988 al pte.). Dirección: Dept. of Soil, Crop and Atmospheric Sciences, Cornell University, Ithaca, NY 14853, EE.UU.

dicial para el desarrollo agrícola en Latinoamérica tropical, por poder interferir en el progreso del desarrollo agrícola tecnificado.

Es necesario establecer en este punto que la misión de la agricultura es, a grandes rasgos, proporcionar a cada país beneficios a un nivel de macroescala, que incidan favorablemente en el bienestar y progreso socio-económico de su población en general, y no sólo de su población agrícola.

La sustentabilidad de las empresas humanas, que no se limita solamente a la agricultura, nace —o renace— en esta era junto con la clarificación de los conceptos sobre finitud de los recursos naturales y la capacidad humana de dañar irreparablemente la vida a nivel global, lo que se sintetiza en la vívida noción de la nave espacial Tierra, de la cual somos responsables. La gran fuerza de la sustentabilidad cobra inercia, sin embargo, solamente al percatarnos de los gigantescos y galopantes grados de contaminación y degradación ambiental al que la humanidad ha sometido y sigue sometiendo al planeta.

Dentro de las numerosas circunstancias de degradación y contaminación ambiental que se relacionan y atribuyen a la agricultura (por ej., Radulovich, 1988), el mal uso de agroquímicos y la erosión de los suelos son aspectos de gran relevancia a nivel generalizado. La ignorancia humana, enmascarada tras la idea de que a mayor uso mejor, ha llevado a los agricultores tecnificados a sobreutilizar agroquímicos, desde fertilizantes hasta los más peligrosos insecticidas, los cuales terminan de una u otra forma circulando en concentraciones indeseables en el metabolismo de los seres humanos, principalmente por ingesta de productos y agua contaminados. Por otra parte, la erosión desmedida se produce principalmente por la poca atención que se da a los suelos desnudos de bosque, lo cual es posible evitar por medio de varios sistemas agrícolas y agrosilviculturales de ladera (Radulovich, 1988).

La agricultura sustentable, para la cual es difícil encontrar una única definición, tiene entre sus principales metas el reducir el uso de agroquímicos a niveles que minimicen su presencia última en fines no deseados. Teniendo en mente una clásica curva de nivel de insumos contra productividad (Figura 1), podemos apreciar, por el desplazamiento de *a* a *b*, que una agricultura de alta tecnificación y uso de insumos (tradicional en países desarrollados) puede

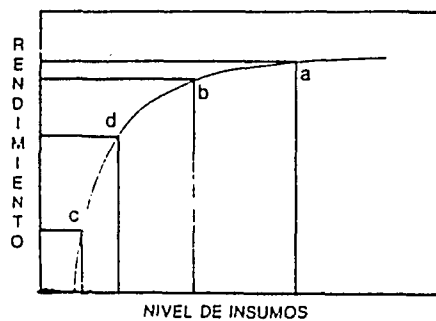


Figura 1. Clásica relación entre nivel de insumos empleados en la producción y rendimiento esperado de un cultivo. Las letras corresponden a estadios en niveles de uso de insumos, y representan: el paso de la producción con alto nivel de insumos de países desarrollados (*a*) a un uso bastante inferior de insumos sin grandes reducciones en rendimiento (*b*); y el paso de la producción tradicional con muy bajo nivel de insumos de países en desarrollo (*c*) a un nivel moderadamente mayor en uso de insumos con grandes aumentos proporcionales en rendimientos (*d*).

disminuir notablemente los niveles de insumos empleados sin disminuir en gran forma su productividad, expresada como rendimientos. En cambio, una agricultura de baja tecnificación (tradicional en países en desarrollo) podría, por el desplazamiento de *c* a *d*, aumentar considerablemente su productividad con pequeños aumentos en nivel de insumos utilizados (Figura 1). Este último caso viene siendo el de la agricultura tradicional en Latinoamérica tropical, cuyo potencial de productividad será analizado posteriormente.

Se deduce del anterior aunque somero análisis, que la agricultura que tradicionalmente ha venido utilizando muy bajos niveles de insumos (que a menudo se limitan sólo a la semilla y mano de obra —aparte de los insumos naturales como insolación, agua de lluvia y fertilidad nativa) no sólo puede sino que además debe aumentar sus niveles de insumos para aumentar su productividad si desea permanecer

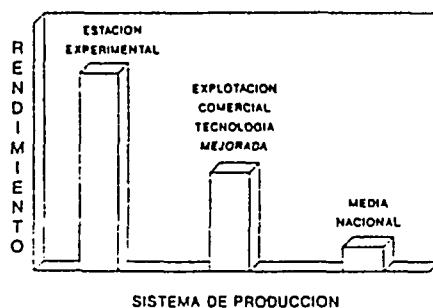


Figura 2. Comparación relativa de niveles de rendimiento para producción de granos básicos en Centroamérica (los datos usados son los de maíz en el Cuadro 3 de Soria, 1976).

viable. Ello no implica llegar a grados elevados o irreversibles de contaminación o degradación ambiental, tradicionalmente —aunque no necesariamente— asociados con agricultura altamente tecnificada. Esto último se visualiza mejor en la Figura 1, al verse que el punto *d*, que representa el desplazamiento propuesto para la agricultura actualmente de baja tecnificación, permanece bastante inferior en nivel de insumos al punto *b*, el cual representa una sustancial disminución en el uso de insumos por parte de la agricultura tecnificada de países desarrollados en beneficio de la sustentabilidad.

Dentro de conceptos de elasticidad ambiental que permiten suponer una recuperación de la calidad ambiental si se respetan ciertos umbrales de degradación, es posible agregar a lo anterior que, en comparación con los países desarrollados, donde la contaminación de aguas por agroquímicos es enorme, los países subdesarrollados tendrían aún algunos grados de tolerancia ambiental para consumir inteligentemente en pos del desarrollo.

### Agroecología

El enfoque agroecológico, cuyo énfasis es a menudo biológico más que agronómico (por ej. Janzen, 1973; Altieri, 1987), se fundamenta en un aprovechamiento muy inteligente y eficiente de los flujos de energía y materia en un ecosistema, así como de las complejas relaciones biológicas. Los sistemas agroecológicos promueven la diversidad de especies, en gran medida en la forma de agrosilvicultura, al punto de llegarse a recomendar la existencia en conjunto de docenas de especies vegetales en reducidas áreas de terreno.

Estos modelos, que vienen de los conocidos jardines y huertas de los agricultores tradicionales, en los cuales siempre es posible encontrar un alto número de especies vegetales, son muy estables biológica, química y físicamente por un sinnúmero de razones y han sido y seguirán siendo una buena —sino la mejor— manera de utilizar pequeñas áreas de terreno cuando no se poseen los recursos necesarios para una explotación intensiva de mediana o alta inversión.

Dentro del contexto de la agricultura como una industria nacional de rentabilidad económica, es difícil, sin embargo, imaginar cómo podrían manejarse grandes extensiones de tierras

en forma de pequeños jardines, cada uno dotado de un componente animal para abonos y enmiendas orgánicas. La dificultad aumenta al considerar el rápido crecimiento de la población urbana y de la capacidad consumista de ésta, que produce demandas tales sobre la producción y productividad agrícola que los sistemas tradicionales no pueden sostener.

Existe poca duda de que los sistemas netamente agroecológicos son en la actualidad funcionales sólo en pequeña escala, y no pueden significar la base conceptual del desarrollo agrícola latinoamericano. Es claro, sin embargo, que estos sistemas, ya de por sí practicados por muchos pequeños agricultores tradicionales (Fernández y Nair, 1986), representan una excelente alternativa para elevar la productividad y la estabilidad en explotaciones reducidas, de muy bajo nivel de insumos. Incluso, se ha estipulado que la mayor aplicabilidad de sistemas agrosilviculturales es en laderas densamente pobladas (Young, 1989). La aplicabilidad del modelo agroecológico es tanto mayor en la medida que la actividad agrícola es meramente de subsistencia o de complementación de ingresos. Este aspecto será retomado posteriormente en relación al tipo de esfuerzo que debe realizarse para ayudar al pequeño agricultor tradicional a elevar su nivel de vida, lo cual puede considerarse como un tema aparte de lo que son las necesidades de un país en materia de desarrollo agrícola.

### La Agricultura Latinoamericana Tropical

La agricultura en Latinoamérica tropical ha estado tradicionalmente compuesta por dos sectores claramente separados: el sector exportador, especializado en productos tropicales como son bebidas y frutas, además de azúcar y algodón, con significantes grados de tecnificación e inversión; y el sector alimentario, especializado en la producción de los alimentos básicos como granos y fuentes de almidón, caracterizado por bajos insumos y baja productividad salvo excepciones de medianas a grandes explotaciones.

En la actualidad se está dando una diversificación del sector exportador, gracias a una grande y variada demanda por productos tropicales exóticos, comestibles y ornamentales, de parte de consumidores en países desarrollados. La productividad en este sector continúa siendo alta así como la inver-

sión; el tamaño de la explotación ha dejado de ser un aspecto relevante respecto a eficiencia, pues el grado de intensidad e inversión a menudo permite explotaciones en áreas pequeñas, como son fresas, flores y ornamentales.

El sector alimentario, por otra parte, se encuentra dividido entre explotaciones a mediana y gran escala, que son tecnificadas y tienen rendimientos de medianos a altos, y las innumerables minixplotaciones del pequeño agricultor, quien persiste en producir granos básicos y otros cultivos tradicionales como caña de azúcar en áreas minúsculas con mínimo grado de insumos, obteniendo rendimientos de bajos a muy bajos. Los bajos rendimientos promedio de granos básicos en Centroamérica, son analizados en comparación con rendimientos de intermedia y alta tecnificación por Soría (1976), y en la siguiente sección.

La consecuencia frecuente de la baja productividad es que la producción de granos básicos es a menudo insuficiente, y los gobiernos optan por importarlos a costa de préstamos internacionales como alternativa a invertir en sistemas de producción no rentables. Por lo demás, la falta de rentabilidad de una explotación agrícola en, digamos, media o una hectárea sembrada de maíz o caña de azúcar con mínimo o cero fertilizante y agroquímicos, no es algo que sorprenda, y mucho menos algo en lo que debiera insistirse ya que, salvo operaciones de intenso flujo de capital, lograr un nivel de vida decente con base en un pequeño pedazo de tierra es sumamente difícil sino imposible. Por otra parte, no es posible ignorar aquí los muchos problemas asociados con las grandes explotaciones agrícolas, entre los que se cuentan daños al ambiente, fuga de capitales, y una tendencia a sobrecargar diversos grados de ineficiencia en un sobreproteccionismo estatal, que a menudo se expresa como un seguro de cosecha, todo lo cual genera y mantiene una polarización social indeseable.

Tras esta breve presentación, comienza a resultar evidente que, así como el equilibrio social, el equilibrio en la producción agrícola podrá ser encontrado en sistemas de tecnificación intermedia.

### Productividad de la Agricultura Tropical

La baja productividad de cultivos en la zona tropical es tradicionalmente atribuida a alguna combina-

ción de factores que solamente se da en el trópico, y que por razones desconocidas y misteriosas es imposible de vencer, por lo que nunca se obtendrán altos rendimientos (por ej., Janzen, 1973). Lo anterior es fácilmente refutable, y la historia demostrará que no existe lugar en el planeta mejor dotado para la producción agrícola que las zonas tropicales, sobre todo cuando gozan de abundantes lluvias y pocas catástrofes naturales como el trópico húmedo y semi-húmedo de Latinoamérica.

Se puede demostrar la alta productividad potencial de la agricultura tropical tanto por razonamiento deductivo como inductivo. La primera línea de limitaciones a la producción de cultivos es la impuesta por el ambiente físico. Dando por sentado que existe oxígeno y dióxido de carbono atmosférico en todo el mundo, y que la radiación es raramente limitante en zonas tropicales y de serlo lo sería sólo para especies altamente eficientes, la primera necesidad de un cultivo es una adecuada temperatura para realizar sus procesos metabólicos. Bajo 12° C los procesos metabólicos de la mayoría de los cultivos son mínimos; en el trópico, salvo en zonas de altitud, la temperatura media mensual es bastante más alta y prácticamente constante a lo largo de todo el año. Es decir, basados en la temperatura se puede tener agricultura los 12 meses del año, lo cual no es ni cercanamente posible en los países de clima templado. La siguiente limitación al crecimiento de los cultivos es el agua, la cual, de estar presente aunque sea por riego, permite la producción agrícola todo el año sin ninguna otra significativa limitación ambiental generalizada, salvo excesos hídricos.

Específicamente, se han dado innumerables ejemplos de alta y continuada productividad en zonas tropicales. En relación a la productividad de cultivos de plantación, en general, cuanto explotación tecnificada y bien manejada se ha montado en el trópico la productividad ha sido alta y bien mantenida por décadas; ejemplo de esto son las bananeras, las plantaciones de caña de azúcar y el café bajo sombra regulada; e incluso en las plantaciones de algodón tras haberse logrado estabilidad mediante el control integrado de plagas. Es interesante notar en el caso de las bananeras cómo a pesar de yerros tales como la contaminación de suelos por cobre en Costa Rica que obligaron al abandono de tierras (Cordero y Ramírez, 1979) o de enfermedades como la Sigatoka que obligaron

a un cambio de variedades, los sistemas de producción han evolucionado y continúan fuertes. El factor común de este éxito pareciera ser el que estos cultivos han sido tradicionalmente producidos para exportación, lo cual se corrobora al constatar que los rendimientos del algodón en Centroamérica y México son bastante más elevados que en EE. UU. (USDA, 1989), país este último con larga tradición algodонера. Otro ejemplo de esto último se aprecia con la yuca (*Manihot esculenta*), cuya productividad es bastante mayor en países que la industrializan para alcohol (Brasil) o la exportan a Europa como alimento para ganado (Tailandia), que en países donde se produce sólo para alimento humano (ver Norman *et al.*, 1984).

Por otra parte, en relación a granos básicos, se encuentra el ejemplo de Los Cerrados en Brasil, donde los rendimientos actuales de soya en producción tecnificada casi igualan a los de EE. UU. en zonas anteriormente casi yermas (Abelson y Rowe, 1987), aparte de que puede obtenerse más de un cultivo por año. Por otro lado, en Centroamérica, desde por lo menos fines de la década de los 60, los rendimientos experimentales de granos básicos han sido bastante elevados y similares a los de países desarrollados (Soria, 1976), y aun entonces varias veces mayores a los promedios nacionales del presente, sin necesidad de riego. Valga agregar que cada sumario de congresos de investigación agronómica tropical es una lista más de los potenciales de productividad con que se cuenta o podría contarse de lograrse utilización de tecnologías por parte de los productores —o lo contrario— que sería lograr productores dispuestos o capaces de usar la tecnología necesaria.

Por supuesto, el objetivo no es obtener en los campos de los agricultores el rendimiento máximo de un cultivo, el cual se da prácticamente sólo en condiciones experimentales. Existe un rendimiento máximo económico el cual, dadas las diversas condiciones, es el que rinde un adecuado nivel de beneficios al agricultor, y es la meta a perseguir en los campos de los agricultores. Sin embargo, según ha sido destacado anteriormente (Soria, 1976) y como se observa en la Figura 2, el rendimiento de los agricultores tradicionales y pequeños es mucho menor que un rendimiento rentable con tecnología mejorada, lo que baja la media de rendimientos nacionales a niveles ínfimos. Esta última diferencia, entre

rendimientos generalmente muy bajos y los obtenidos con tecnología mejorada, es la que se debe eliminar, buscándose cada vez más el acercamiento de la media nacional al rendimiento económico con tecnología mejorada. Asimismo, debe procurarse el acercamiento paulatino del rendimiento con tecnología mejorada al rendimiento de estación experimental, aunque esto representa una menor prioridad cuando se le compara con la necesidad de desestancar los rendimientos ínfimos recién mencionados.

Es cada vez más fácil y sustentable obtener rendimientos adecuados de granos básicos en zonas tropicales, lo que sucede en la medida de que las razones por las que se dan bajos rendimientos son identificadas y atacadas adecuadamente. En Los Cerrados, en Brasil, algunos problemas de fertilidad y acidez en los suelos fueron identificados y corregidos, y una vasta zona se convirtió en una enorme fuente de riqueza agrícola (Abelson y Rowe, 1987). Es claro también que los altos rendimientos experimentales que se obtienen en el trópico latinoamericano se han debido a un adecuado control de plagas, malezas y enfermedades, sanas prácticas de drenaje superficial, uso de buena semilla de alta germinación y baja contaminación de patógenos, y la dosis recomendada de fertilizantes. Además, es imposible lograr rendimientos altos y estables sin la adecuada disposición de agua, lo cual ha sido tradicionalmente ignorado. Es bien sabido que en los trópicos la estacionalidad la dicta la precipitación, y que el agua es la principal variable ambiental que limita la producción agrícola. Un ejemplo de la alta dependencia de rendimiento en déficits y excesos hídricos es dado por Radulovich (1987, 1990).

En síntesis, lograr de medianos a altos rendimientos en el trópico no es ningún secreto, sino la aplicación fehaciente de las técnicas de producción agrícola, adaptadas a las condiciones específicas, lo cual toma a menudo algo de investigación y prueba y error.

En toda esta discusión, se da por sentado que la intensificación agrícola y todo aumento en el uso de insumos debe darse dentro de un contexto de sustentabilidad o agricultura ecológica —esta última representa el trascender de la disciplina agrícola— que se viene dando como producto de la maduración de técnicas de control ambiental, la cual es precisamente la actividad de los agrónomos. Es innegable también

que un buen número de lecciones han sido recibidas del enfoque biológico. En resumen, es inaceptable a estas alturas el optimizar la producción agrícola sin los correspondientes criterios de sustentabilidad.

Es necesario, entonces, que los esfuerzos de políticas agrarias, investigación y extensión agrícola consideren como objetivo el desarrollo de sistemas de producción rentables, que combinen un alto grado de productividad y estabilidad, con un adecuado componente de sustentabilidad. Aquellos sistemas agrícolas que no correspondan con estas especificaciones no pueden, en forma general, formar parte de esfuerzos destinados a levantar la economía de una nación por medio de la agricultura, y deben ser tratados aparte. En esta última categoría calzan los sistemas de producción de los agricultores pequeños y tradicionales, quienes, a pesar de representar un elevado número, difícilmente pueden llevar en sus hombros la carga de sacar adelante las economías del subdesarrollo. Para estos agricultores es necesario establecer un sistema separado de investigación-extensión, cuya meta principal sea el bienestar de este sector de la población —meta bastante diferente a la de sistemas agrícolas rentables—, cuya meta es sacar a los países del estancamiento económico.

De hecho, actualmente, la falta de créditos y el ser poco o nada considerado por sistemas de extensión, hacen innecesario el que se ignore al pequeño agricultor en esquemas productivos; ya está siendo ignorado. Es por esto que la necesidad en realidad viene siendo la de crear, para el pequeño agricultor tradicional, estos sistemas de crédito, extensión y perspectivas de desarrollo separados de —aunque paralelos— a los sistemas imperantes.

Valga mencionar que, a este paso, el problema del pequeño agricultor tradicional sólo puede agravarse en la medida de que las ya pequeñas parcelas continúen subdividiéndose con las nuevas generaciones. Es muy probable que la pobreza y baja calidad de vida en general de grandes números de pequeños agricultores, sea debida a que ya desde hace tiempo se ha caído por debajo del tamaño mínimo de parcela para mantener con decoro a una familia, además de no poder éstos contar ya con el "refrescamiento" nutricional que proporcionaba el barbecho por algunos años, seguido de quema.



## Un Nuevo Paradigma en la Producción Agrícola Tropical

Partiendo de los comentarios anteriores, cabe preguntarse por qué razón no es la agricultura tropical exactamente lo contrario de lo que es: la cornucopia de alimentos del mundo en vez de un historial de fracasos. Cabe además preguntarse por qué es la franja tropical del mundo una zona de pobreza estando ubicada en la zona de mayor potencial agrícola del mundo.

Sin pretender resolver de una pincelada tales preguntas, es posible argumentar, con el fin de observar el problema desde una perspectiva diferente, que no es la pobre agricultura tropical la culpable del subdesarrollo, sino precisamente lo contrario. Podemos aceptar que la pobre agricultura tropical es un efecto y no una causa del subdesarrollo; esta perspectiva permitirá visualizar soluciones eliminando una serie de "imposibles" del camino.

Para reestructurar la agricultura tropical se postula como necesario un nuevo paradigma. Kuhn (1970) define un paradigma como el eje de toda disciplina científica, el cual comparten todos los que la practican y que es suficientemente amplio, de manera que ofrece un sinnúmero de problemas para que estos practicantes los resuelvan. Agrega que poseer un paradigma es una señal de madurez de una disciplina científica, y que un cambio de paradigma significa una revolución científica. Nada menos que una revolución tecnológico-científica permitirá desarrollar la agricultura tropical a los niveles posibles.

Se puede argumentar que en la actualidad la agricultura tropical carece de un paradigma propio, y fundamenta su labor en el paradigma de la agricultura de climas templados, el cual puede sumarse como: optimizar la producción en el rendimiento por cultivo. Este paradigma es adecuado para las zonas templadas, en las cuales sólo es posible producir un cultivo por año, y el paradigma de la agricultura tropical debería ser: optimizar la producción en rendimiento por año agrícola.

Cabe agregar que, al igual que en el caso de la producción en climas templados, la producción de cultivos perennes en el trópico (por ej., banano, caña de azúcar, palma aceitera, café) también obedecería a un paradigma de optimización de un rendimiento por año. Dado que la producción de cul-

tivos perennes es la que ha recibido mayor énfasis en tecnificación e investigación, no debe sorprendernos que no se haya necesitado modificar el paradigma que fundamenta la producción. Sin embargo, para intensificar la producción agrícola con cultivos anuales, el cambio de paradigma hacia optimización por año agrícola y no por rendimiento por cultivo es fundamental.

El año agrícola en el trópico es dictado por la disponibilidad de agua, y en zonas tropicales húmedas o con riego representa todo el año calendario. El optimizar la producción en función del año agrícola, aparte de que incluye optimizar el rendimiento de cada cultivo sembrado, comprende además optimizar en función de secuencias de cultivos y cultivos en asocio. Es evidente que el paradigma de la agricultura tropical incluye y trasciende el paradigma de la agricultura de climas templados.

Algunos ejemplos de optimización de la agricultura tropical en regiones húmedas-secas, en función del agua, han sido dados por Carmona y Radulovich (1988), Radulovich (1989) y Radulovich *et al.* (1989), quienes, por simulación computarizada y trabajo de campo, muestran el gran potencial de producción existente.

### Políticas para el Desarrollo de la Agricultura

La producción agrícola, además de ser la base económica de la mayoría de las zonas tropicales, es una industria, y como tal debe ser productiva, estable, confiable, rentable y moldeable a las demandas de los mercados nacionales e internacionales y a las necesidades del país donde se desarrolla. Como en cualquier tipo de industria, el desarrollo agrícola debe tener como objetivo principal el bienestar de la población en general y el desarrollo socioeconómico del país, y no exclusivamente el bienestar del agricultor. Por supuesto, es importante que toda actividad, agrícola u otra, proporcione un adecuado nivel de vida a quien la practica y, además, en sistemas capitalistas, una adecuada tasa de retorno en función del capital invertido.

La agricultura como industria contribuye de diversas formas al desarrollo de un país: contribuye con alimentos para la población en general, y el mantener los alimentos abundantes y

accesibles es fundamental; contribuye con materias primas, que son productos que promueven crecimiento secundario por procesamiento; contribuye a la disponibilidad de divisas internacionales tanto por evitar la importación al producir localmente lo necesario, como por la exportación de un sinnúmero de productos; contribuye al funcionar las zonas rurales como mercados para productos de manufactura y servicios originados en las zonas urbanas; y, contribuye también como fuente de capital.

Dentro del contexto formulado, es muy difícil imaginar que el desarrollo agrícola de un país pueda tener éxito en manos de los pequeños agricultores tradicionales quienes, de momento, carecen no sólo de los recursos para producir (tierra, capital) sino que también carecen de los medios para adaptarse a corrientes productivas modernas y evolucionar con la velocidad que las cambiantes situaciones demandan (principalmente debido a falta de educación y de flexibilidad en la idiosincrasia). Todo esto se expresa también como una gran aversión al riesgo, que impide aún más el avance.

El desarrollo agrícola de los países tropicales debe provenir del agricultor tecnificado, quien es un industrial que incorpora en su bagaje técnico, además de las lecciones de la agricultura tradicional, la cultura agrícola moderna y sostenible, y quien está además dispuesto y capacitado para producir de acuerdo a las necesidades nacionales y a las condiciones socioeconómicas, y cambiar en la medida que se le demande. Dentro de un esquema de distribución más equitativa de ingresos y recursos, cabe indicar la necesidad de diseñar este agricultor tecnificado como término medio, evitándose así también los problemas asociados con las grandes explotaciones.

Este agricultor tecnificado, que ya se da como se mencionara arriba en operaciones intensivas con productos generalmente destinados a la exportación, debe ser forjado también para la producción de granos básicos y otros productos, con miras no sólo a satisfacer con amplitud la demanda nacional sino a convertir eventualmente al trópico en el granero del mundo. Su misión sería producir alimentos, materias primas y productos exportables en forma productiva y rentable, fundamentando su actividad en la optimización de los rendimientos por año agrícola. En relación a esto, debe recordarse que la autosuficiencia

alimentaria de cada país, dentro del contexto actual de relaciones internacionales, representa no sólo seguridad alimentaria, sino que está además íntimamente ligada con la dependencia económica. Sobre este punto puede revisarse el caso de la *Common Agricultural Policy* de la Comunidad Europea, cuyos objetivos por más de 25 años han sido aumentar la autosuficiencia y la seguridad alimentaria de sus países (ver de Wit *et al.*, 1987).

Forjar este agricultor tecnificado, de tamaño medio y con ciertos grados de educación y entranamiento, es más fácil de conceptualizar que de producir. El tamaño mínimo de la operación que debe manejar viene dado por las diversas características de la explotación, tanto en relación a cantidad y distribución de los recursos hídricos, calidad de suelos, tipo de cultivos a explotar, y aspectos de mecanización, todos los cuales, combinados, probarán ser rentables para el agricultor y productivos en un contexto de desarrollo nacional. De esta forma se define la unidad básica y más pequeña de una agricultura industrializada, que constituirá la búsqueda de riquezas en la producción agrícola y con ésta la independencia alimentaria y, en lo posible, económica de Latinoamérica. Constituye esto además la base técnica para la estructuración de una reforma agraria, sobre todo al ampliarse el esquema para incluir agrupaciones de agricultores como cooperativas y otras sociedades.

Es de estas unidades productivas mínimas hasta las más grandes explotaciones que debe preocuparse la rama mayor de los sistemas de extensión e investigación agrícola de cada país, ya que en conjunto constituyen la fuerza productiva que trabaja para los objetivos mayores de la nación.

La otra propuesta rama de los sistemas de extensión e investigación agrícola, se ocuparía de la calidad de vida del agricultor pequeño y tradicional, no considerándolo principalmente como una fuerza mayor de producción, sino en el sentido de ayudarle a alcanzar un nivel de vida digno, que lo merece en su condición de ciudadano. El objetivo de esta propuesta rama de la extensión agrícola sería ayudar al agricultor pequeño y tradicional a aumentar y estabilizar la productividad y rentabilidad de su pedazo de tierra, y a obtener empleo rural, además de trabajar en conjunto con otras actividades como son salud y educación. El objetivo de

esta labor sería colaborar con estos agricultores a dar los pasos necesarios para pasar de los bajos niveles socioeconómicos actuales a niveles suficientes y acordes con la sociedad moderna, de acuerdo a sus deseos. Según se postulara al inicio, el trabajar con pequeños agricultores en este proceso vendría a ser la principal labor de la agroecología y de sistemas agroforestales a pequeña escala, mientras que una tecnificación racional y sustentable se implantaría en las fuerzas agrícolas productivas y eficientes en términos económicos de un país.

### Conclusiones

El costo social de crear un sistema de extensión, crédito e investigación para ayudar al pequeño agricultor es, sin duda, elevado. Sin embargo, no existe alternativa. Por otra parte, el continuar dependiendo del pequeño agricultor y de sus bajos y erráticos rendimientos para la producción de alimentos, puede representar un costo social tan elevado que le cueste a Latinoamérica tropical su única oportunidad de lograr el desarrollo.

Mientras que el énfasis de la producción es canalizado cada vez con más decisión a un productor con mentalidad industrial, es posible imaginar que el pequeño agricultor tradicional, liberado de la responsabilidad de producir los alimentos de la sociedad en general, y con la adecuada dosis de ayuda y planificación, podrá re-encontrar una posición de autosuficiencia en la sociedad rural actual.

Está de más reiterar la noción de abundancia agrícola potencial sobre la que Latinoamérica tropical —salvo notadas excepciones— se sienta a contar sus miserias y debatir sobre ellas, en vez de promover su desarrollo vigorosa e integralmente.

### REFERENCIAS

- Abelson, P. H. y J. W. Rowe (1987): A new agricultural frontier. *Science*, 235: 1450-1451.
- Altieri, M. A. (1987): *Agroecology: The Scientific Basis of Alternative Agriculture*. Westview Press, Boulder, Colorado EE. UU. 227 pp.
- Carmona, G. y R. Radulovich (1988): Metodología de evaluación de veranillos y de siembra temprana como estrategia para minimizar sus efectos. *Turrialba*, 38: 215-222.
- Cordero, A. y G. F. Ramírez (1979): Acumulamiento de cobre en los suelos del Pacífico Sur de Costa Rica y sus efectos detrimentales en la agricultura. *Agronomía Costarricense*, 3: 63-78.
- de Wit, C. T., H. Huisman y R. Rabbinge (1987): Agriculture and its environment: are there other ways? *Agricultural Systems*, 23: 211-236.
- Fernández, E. C. M. y P. K. R. Nair (1986): An evaluation of the structure and function of tropical homegardens. *Agricultural Systems*, 21: 279-310.
- Janzen, D. H. (1973): Tropical agroecosystems. *Science*, 182: 1212-1219.
- Kuhn, T. S. (1970): *The Structure of Scientific Revolutions*. 2nd. Ed. The University of Chicago Press. Chicago, EE. UU. 210 pp.
- Norman, M. J.T., C. J. Pearson y P. G. E. Searle (1984): *The Ecology of Tropical Food Crops*. Cambridge University Press, Cambridge. 356 pp.
- Radulovich, R. (1987): AQUA, a model to evaluate water deficits and excesses in tropical cropping. I. Basic assumptions and yield. *Agricultural and Forest Meteorology*, 40: 305-321.
- Radulovich, R. (1988): Degradación ambiental en Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 12: 253-271.
- Radulovich, R. (1989): Optimization of rain-fed tropical cropping in semi dry areas: a case study. *Agricultural Water Management*, 16: 337-352.
- Radulovich, R. (1990): AQUA, a model to evaluate water deficits and excesses in tropical cropping. II. Regional yield prediction. *Agricultural and Forest Meteorology*, 52: 253-261.
- Radulovich, R., G. Vargas y R. Chaves (1989): Agua y cultivos secuenciales en zonas semi-secas: evaluación de campo preliminar. *Agronomía Costarricense*, 13: 219-224.
- Soria, J. (1976): Los sistemas de agricultura en el Istmo Centroamericano. *Revista de Biología Tropical (Costa Rica)*, 24 (Supl. 1): 57-68.
- U.S.D.A. (1989): World Agricultural Production. Circular Series WAP 9-89, Sept. Washington, D.C., EE.UU. 65 pp.
- Young, A. (1989): The Environmental Basis of Agroforestry. In: W. E. Reifsnnyder y T. O. Darnhofer (Eds.), *Meteorology and Agroforestry*, pp. 29-48. ICRAF, Kenya.

# **Tercer Seminario Latinoamericano de Agromática**

## **Memoria**

27, 28, 29 y 30 de abril

1992

Organizado por el Centro de Investigaciones en Computación (CIC)  
Auspiciado por: CIC-ITCR, FUNDATEC, Convenio Holanda-Costa Rica

# El modelo de balance hídrico AQUA

Lic. Fernando Sánchez C.<sup>1</sup>

Dr. Ricardo Radulovich R.<sup>2</sup>

*Se describe parte del trabajo realizado por el proyecto "Optimización Hídrica de la Agricultura Tropical de Secano", desarrollado por la Escuela de Ingeniería Agrícola de la Universidad de Costa Rica, con financiamiento de la Agencia para el Desarrollo Internacional de los E.E.UU. El trabajo consiste principalmente de dos partes: el desarrollo y programación de un modelo matemático para la zonificación agrícola y para el análisis climático básico, que requiera datos de fácil acceso, y una parte de validación de los resultados del modelo en el campo, a partir de secuencias de cultivos. A partir del cálculo del balance hídrico, el programa es capaz de estimar, entre otras aplicaciones: la fecha más temprana de siembra para un cultivo, la última fecha en que el suelo está a capacidad de campo en el año, los índices de estrés hídrico y el calendario de riego. También efectúa análisis básicos de la precipitación. Basado en lo anterior, es factible diseñar y evaluar por simulación secuencias de cultivos con el propósito de optimizar el uso del agua en función de rendimientos. El programa puede generar reportes impresos, por pantalla o a disco (archivos ASCII) y gráficos por pantalla e impresora. Para efectuar los cálculos citados, el programa requiere de datos climáticos (evapotranspiración mensual y lluvia diaria), datos de suelo y de cultivo. Está diseñado para proporcionar un manejo fácil y una buena validación de los datos, para ser de uso sencillo por personal calificado en el tema y corre en ambientes D.O.S.*

**Lista de palabras clave.**  
**AGROMETEOROLOGÍA. RIEGO**  
**Y DRENAJE.**

## 1. INTRODUCCION

El agua es uno de los factores ambientales que más limitan el uso racional de la tierra, particularmente en los trópicos, por lo que es necesario un análisis y aprovechamiento sistemático del recurso hídrico para un buen desempeño de las labores agrícolas. El programa descrito en este trabajo aprovecha las capacidades de una microcomputadora para que los cálculos de balance hídrico y sus aplicaciones sean accesibles a un amplio número de usuarios; el mismo es una versión ampliada del modelo AQUA [7, 8]. Los cálculos y orientación de este modelo de balance hídrico computarizado siguen los lineamientos del proyecto de investigación "Optimización Hídrica de la Agricultura Tropical de Secano", de la Escuela de Ingeniería Agrícola de la Universidad de Costa Rica en convenio con la Agencia para el Desarrollo Internacional de los E.E.U.U, la cual financia el proyecto. En el trópico semiseco, como es el caso de la mayor parte de la vertiente del Pacífico de los países centroamericanos, se presenta un régimen de lluvias bimodal caracterizado por una época seca y otra época bastante lluviosa. El año agrícola de secano se define entonces como el período entre el inicio de las lluvias y el fin de éstas, aunque en realidad comienza antes, con las lluvias pre-estación, y continúa por un período variable después de las lluvias, con los cultivos creciendo sólo con el agua almacenada en los suelos [8]. La época de lluvias presenta variaciones importantes en la cantidad de lluvia diaria, que incluyen el fenómeno

conocido como "veranillo", el cual consiste en una disminución de la precipitación; dicho fenómeno es variable en intensidad y duración, así como geográficamente [3]. Se presenta también el caso de meses con precipitaciones excesivas, como son junio y octubre en el Pacífico Norte y Central de Costa Rica. Este comportamiento tan complejo de las lluvias puede ser perjudicial si no se le sabe utilizar. En vista de esto, el modelo se ha desarrollado como una herramienta para encontrar y evaluar estrategias que permitan evadir y enfrentar estas limitaciones hídricas, así como utilizar óptimamente el agua de lluvia [3, 7, 8].

## Otros modelos.

Las simplificaciones excesivas en los métodos de regionalización producen resultados menos precisos que los obtenidos con el presente modelo de balance hídrico [3, 7]. En la actualidad existen programas para el cálculo del balance hídrico, pero poseen limitaciones en cuanto a su aplicación en la zona tropical o requieren de una cantidad excesiva de datos. Por ejemplo, el programa CROPWAT [6] presenta como principales desventajas el uso de promedios mensuales de precipitación para efectuar cálculos, así como el uso del método de Penman modificado para la determinación de la evapotranspiración. El uso de promedios mensuales de precipitación no es recomendable, dada la gran variabilidad de ésta dentro de un mismo mes. El uso de Penman modificado solo es aplicable para estaciones meteorológicas muy bien equipadas, que son muy pocas en el país.

1 Escuela de Ingeniería Agrícola, Universidad de Costa Rica

2 C. A. T. I. E.

## 2. DESCRIPCIÓN DEL MODELO

### 2.1 Balance hídrico.

La ecuación básica [7] para el cálculo del balance hídrico, parte central de este programa, es:

$$B_N = B_{N-1} + P_N - ETC_N + (ADC_N - ADC_{N-1}) \quad (2.1)$$

donde:

$B_N$ =balance hídrico, expresado como la cantidad de agua (mm) disponible en el suelo para la planta al final del día N;

$N$ = día del ciclo efectivo de crecimiento;

$P_N$ = precipitación efectiva (mm) durante el día N;

$ETC_N$ =evapotranspiración del cultivo (mm) durante el día N;

$ADC_N$ =agua fácilmente disponible para el cultivo (mm) en el día N;

El balance hídrico siempre se lleva a cabo sobre lo que se denomina **siembro**, que se define como un área sembrada en una misma fecha de un único cultivo y que posee un único perfil de suelo; el área sembrada es tal que su clima puede ser descrito en base a un único juego de datos climáticos, es decir, en base a los datos de una sola estación meteorológica.

Este balance se efectúa generalmente durante el ciclo efectivo de crecimiento del cultivo, definido como el número de días requeridos por el mismo para pasar del momento de la siembra a la madurez efectiva. La madurez efectiva se da cuando la parte cosechable adquiere independencia de la planta y no hay requerimientos de agua.

Para la precipitación efectiva usada en la ecuación(2.1) se utiliza el valor medido diariamente (en mm), dado que en nuestra zona climática la precipitación es muy variable y es la que determina mayormente la existencia de excesos o déficits. Si la  $P_N$  es mayor a lo que le falta al balance  $B_N$  para alcanzar su valor máximo, se considera la cantidad en exceso como pérdida por escorrentía o percolación; es decir, toda  $P_N$  primero repone el agua de  $B_N$  y el resto se desprecia [7]. El método de balance hídrico aquí utilizado considera

el suelo a capacidad de campo el día de la siembra. Esta simplificación se justifica ya que se inicia el cálculo con períodos de abundante  $P_N$ . Conforme transcurre el tiempo  $N$ , diferentes variables que determinan la  $ADC_N$  o la  $ETC_N$ , como  $CAN$ ,  $PRN$  y  $k_{c,N}$ , varían, lo cual debe tomarse en cuenta al efectuar los cálculos. Ejemplos de estas variaciones son dados por Radulovich [7, 8].

### 2.1.1 Cálculo de ADC.

El límite superior del balance  $B_N$  viene dado por (ver figura 2.1):

$$ADC_N = \sum_{NC=1}^{NUC-1} (AD_{NC} * CAN * ENC) + RestoPR * AD_{NUC} \quad (2.3)$$

donde:

- $AD_{NC}$ =agua disponible en la capa número  $NC$  del perfil del suelo (mm de agua por metro de suelo), que se define como el agua entre los puntos de capacidad de campo y marchitez permanente (mm de agua por metro de suelo);
- $CAN$ =coeficiente de agotamiento en el día  $N$ , se define como la fracción del  $AD_{NC}$  que puede consumirse sin que el cultivo sufra por déficit hídrico;
- $ENC$ = espesor (en metros) de la capa número  $NC$  del suelo;
- $NUC$ = número de la última capa que toca la raíz;
- $RestoPR$  =longitud (en metros) de la raíz que pertenece a la última capa que toca la raíz, sin atravesar la capa totalmente;

Diferentes valores de estas variables se pueden obtener de Doorenbos y Kassam [4], Borg y Grimes [1], Carmona [2], Doorenbos y Pruitt [5], Radulovich [7, 8, 9], Carmona y Radulovich [3].

### 2.1.2 Cálculo de ETCN.

El valor de la  $ETC_N$  usada en la ecuación(2.1) se calcula según la siguiente relación:

$$ETC_N = k_{c,N} * ETP_N \quad (2.4)$$

donde:

$k_{c,N}$ = coeficiente  $k_c$  del cultivo en el día  $N$ , que depende de cada cultivo y de su estado de desarrollo [5, 7].

$ETP_N$ = evapotranspiración potencial (mm) en el día  $N$ .

Dado que en muy pocas estaciones meteorológicas del país se miden directamente variables para el cálculo de la  $ETP$  diaria, es necesario usar un valor de  $ETP$  mensual calculado, el cual luego se transforma a valores diarios. Otra razón que permite el uso de valores mensuales de  $ETP$  es la poca variación diaria de la misma en nuestra zona climática, en comparación con la variación de  $P_N$ [2].

### 2.2 Índices.

El cálculo de los índices de déficit, exceso y estrés permite estimar el potencial de una zona para la producción de un cultivo, así como estimar los períodos críticos del año desde el punto de vista hídrico (períodos de sequía o de exceso). Igualmente, este cálculo permite estimar cual es la mejor secuencia de cultivos para una región, mediante una correlación lineal entre índices y rendimientos obtenidos para la región; a menores índices menores serán los rendimientos [7, 9].

Los índices están dados por las siguientes ecuaciones:

$$I_{Def} = ((DurEf - DDef) / DurEf) * 100 \quad (2.5)$$

$$I_{Exc} = ((DurEf - DExc) / DurEf) * 100 \quad (2.6)$$

$$I_{Est} = ((DurEf - DEst) / DurEf) * 100 \quad (2.7)$$

donde:

$I_{Def}$  = índice de déficit,

$DurEf$  = duración efectiva del cultivo,

$DDef$  = días con déficit,

$I_{Exc}$  = índice de exceso,

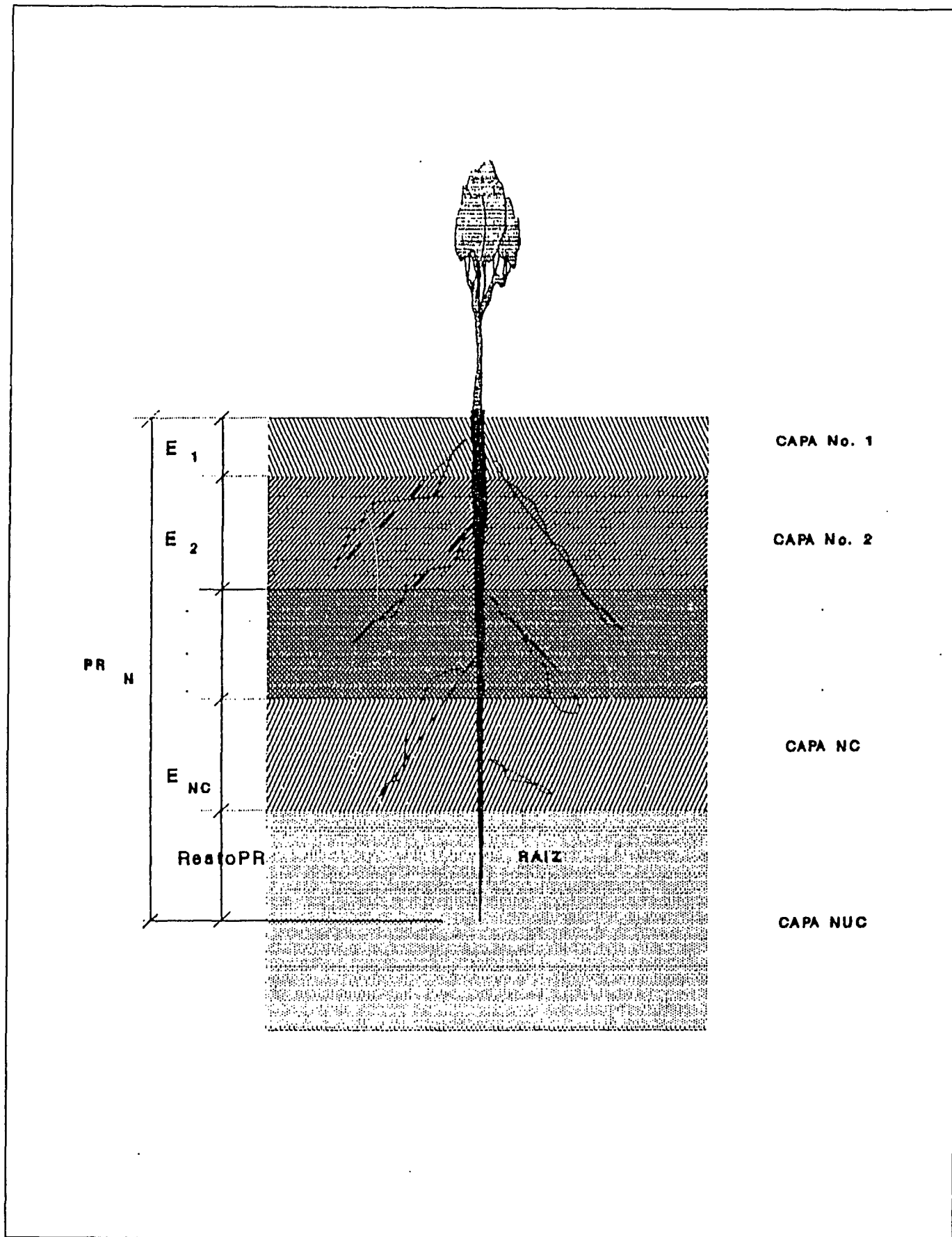


Figura 2.1. Esquema utilizado para calcular ADCn

DExc = días con exceso,

I<sub>Est</sub> = índice de estrés,

DEst = días con estrés (DDef + DExc).

Para determinar los índices, primero se calculan el número de días con déficit, exceso y estrés durante el ciclo efectivo de crecimiento del cultivo mediante el uso del balance hídrico.

Un día con déficit es aquel cuyo balance BN es menor a cero. Un día con exceso es cuando el balance es mayor a ADCN más la lámina de agua (mm/día) mínima para que se produzca estrés por exceso de agua en el cultivo [7].

El número de días con estrés es la suma de los días con déficit y los días con exceso. Esto implica que se reconocen tanto el déficit y el exceso hídrico como estrés hídrico.

### 2.3 Duración del año agrícola.

El cálculo de la fecha más temprana de siembra permite definir el inicio del año agrícola. Por otro lado, la determinación de la última fecha del año en que el suelo llega a capacidad de campo ayuda a definir la última fecha de siembra a partir de la cual un cultivo sobrevivirá únicamente con el agua almacenada en el suelo y las pocas lluvias restantes [10]. Estos cálculos ayudan a definir la duración del año agrícola de secano en una zona determinada, lo que permite un mejor planeamiento de las labores agrícolas requeridas y la estimación de las potencialidades de una zona para la producción agrícola. Tanto la fecha temprana de siembra como el último día con el suelo a capacidad de campo son parámetros sumamente variables temporal y espacialmente.

#### 2.3.1 Fecha más temprana de siembra.

Una fecha es considerada la fecha más temprana de siembra si es la primera del año en que se cumplen las siguientes condiciones, tomadas con leves variaciones de Carmona y Radulovich [3].

- a. La precipitación en la década (diez días) anterior al día de siembra debe ser mayor o igual a 30 mm. Esta condición tiene el propósito de garantizar que la capa superior del suelo se encuentre cerca de capacidad de

campo el día de la siembra. Además, es indicio de un pronto inicio de las lluvias, aunque no estrictamente [8].

- b. Deben darse al menos 3 días con precipitación menor o igual a 5 mm ó 2 días sin lluvia, en la década anterior al día de siembra. Esta condición busca asegurarse que se puedan realizar las operaciones de campo.
- c. En los 20 días después de la siembra (que corresponden a 5 días para emerger, en los que no se contabilizan días con estrés, y 15 de establecimiento del cultivo), no se pueden presentar más de 2 días con déficit para cultivos resistentes al déficit hídrico, ó más de 1 día con déficit para cultivos susceptibles. Para calcular el número de días con déficit se realiza el balance hídrico del cultivo siguiendo el procedimiento explicado en la sección anterior (ecuación 2.1). Esta condición sirve para garantizar que la fecha seleccionada es efectivamente seguida por el inicio formal de la estación de lluvias.

En la región del Pacífico Norte y Central de Costa Rica, la fecha más temprana de siembra se encuentra generalmente después del mes de marzo, de acuerdo al patrón de lluvia que se presenta. Esto no es igualmente válido para otras zonas del país ni del mundo. Además, es posible que los criterios expuestos deban ser variados para satisfacer otras características de precipitación.

#### 2.3.2 Última fecha a capacidad de campo.

Para el cálculo de dicha fecha se efectúa el balance hídrico a partir de una fecha en que se tiene seguridad que el suelo está a capacidad de campo. Para la Zona Central y el Pacífico Seco de nuestro país, esta condición se da a principios del mes de octubre.

Para hacer el balance se utilizan los parámetros de un cultivo ya establecido. El balance se efectúa hasta el final de la estación lluviosa (finales de diciembre en las zonas ya citadas), obteniéndose de esta forma la última fecha con el

suelo a capacidad de campo, o sea, la última fecha de la estación de lluvias cuando BN llega a ser igual a ADCN.

### 2.4 Riego.

Otra utilidad del programa es en la operación y diseño de sistemas de riego, ya que permite el cálculo del calendario de riego (calendario que muestra las fechas de riego y las cantidades de agua por aplicar). Para determinar el calendario de riego, el programa efectúa el balance diario y cada vez que se presenta un día con déficit, se establece como un día de riego, calculándose la lámina (mm) neta de agua a regar como un porcentaje (escogido por el usuario) del ADCN. La lámina neta aplicada entra a la ecuación (2.1) como precipitación, por lo que se repone total o parcialmente el agua del suelo. El volumen neto a aplicar se encuentra multiplicando la lámina neta por el área del siembro, y el caudal neto se halla dividiendo ese volumen por el tiempo entre riegos. El volumen aplicado y el caudal aplicado se calculan dividiendo los netos entre la eficiencia del sistema de riego.

### 2.5 Análisis de precipitación.

El programa también es capaz de analizar la precipitación de dos formas: encontrando precipitación diaria probable para un juego determinado de datos y calculando acumulados de precipitación para el incremento de tiempo que el usuario desee (décadas, pentadas, etc). Este tipo de análisis no es tan recomendable como el obtenido usando balance hídrico, pero se incluyó en el programa dado que es un análisis bastante extendido y utilizado.

La cantidad de días secos y días muy húmedos se calculan comparando cada precipitación en el período especificado con una precipitación máxima y una precipitación mínima (también especificadas por el usuario): cuando la precipitación en un día está por debajo de la mínima, se le considera un día seco, y cuando está por encima de la máxima, se le considera un día muy húmedo.

Los acumulados se calculan sumando las precipitaciones de los días dentro del incremento de tiempo escogido por el usuario (pentadal, decadal, mensual, del período, etc).

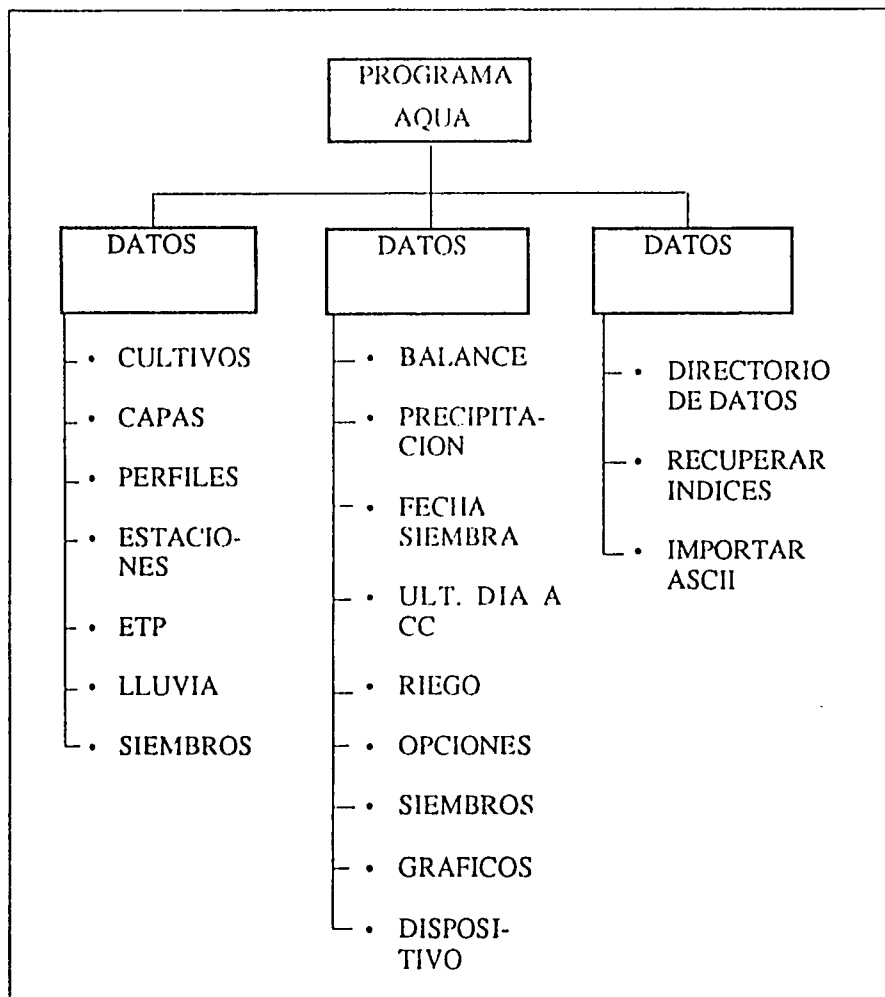


Fig. 3.1: Diagrama de los dos primeros niveles de menús del programa AQUA

Para calcular la lluvia probable para una fecha determinada, el programa ordena de mayor a menor todos los datos que posee para dicha fecha, asignándole una probabilidad (probabilidad de que el valor sea superado) de  $I/NV \cdot 100$  a cada valor, donde I es el orden que ocupó el valor después de ser ordenado (1 para el valor más grande, etc) y NV es el número de valores que el programa tiene para la precipitación en dicha fecha.

### 3. FUNCIONAMIENTO DEL PROGRAMA.

Para iniciar el programa se debe escribir, estando en el D.O.S., el comando AQUA y presionar la tecla <RETURN>.

En la figura 3.1 se muestra un diagrama de los dos primeros niveles de menús del programa. En la figura 3.2 se da un ejemplo de dichos menús.

#### 3.1 Sección de datos.

Al entrar en cualquiera de las opciones del menú de datos, aparece una lista de nombres en la que se puede borrar, añadir, copiar y modificar cualquier juego de datos relacionado con el nombre (llave). En la figura 3.3 se puede observar un ejemplo de estas listas.

Existen dos excepciones a lo antes dicho: los datos de ETP y los de lluvia. Para los de ETP aparece primero un menú donde se escoge el tipo de ETP que se desea (diaria, mensual o promedio), luego aparece la lista de estaciones meteorológicas y por último la lista de fechas que tienen datos para la estación escogida. Para los datos de lluvia, aparece primero una lista de estaciones y luego la lista de meses que tienen datos para la estación escogida.

La lista de siembros permite marcar uno o más siembros (tecla TAB) con el

fin de que pueda escogerse un grupo sobre el cual realizar los cálculos simultáneamente. La lista de siembros marcados es almacenada en disco una vez que termina el programa, y es de nuevo activada al reiniciarse el mismo; esto se hace con el fin de mantener una configuración automática.

Si se entra a modificar, insertar o copiar algún dato de las listas, aparece una pantalla de introducción de datos. Un ejemplo de las mismas se da en la figura 3.4.

En el cuadro 3.1 se desglosa la información requerida para cada juego de datos.

#### 3.2 Sección de Análisis.

Luego de introducir los datos pertinentes, el usuario puede efectuar diferentes cálculos para analizar una región. Para hacerlo, el usuario debe escoger la opción "Análisis" del menú principal del programa (figura 3.2).

El cuadro 3.2 muestra un desglose de los submenús que aparecen en cada escogencia del menú de Análisis. Cada sección que dice "Datos de..." en los submenús sirve para especificar el intervalo de años en el que se quiere hacer el análisis y para establecer el período (de cada año) del cual se desea ver los resultados del análisis.

Cada sección que dice "Incremento de tiempo" (cuadro 3.2) tiene por función especificar cada cuantos días se quiere hacer el análisis, esto es, si cada pñtada, cada década, cada mes, etc. Las secciones que dicen "Criterios" son para establecer los criterios sobre los que se efectúa el análisis; por ejemplo, en "Riego" se puede cambiar el porcentaje del ADC que se repone en cada riego y la eficiencia del sistema de riego usado. "Efectuar el cálculo" sirve para hacer el análisis respectivo y producir el reporte a través del dispositivo escogido.

A continuación se dará una breve explicación de cada escogencia del menú de análisis.

##### 3.2.1 Balance.

Aquí se efectúa el cálculo del balance hídrico, que da como resultado los números de días con déficit, exceso y estrés y sus respectivos índices.



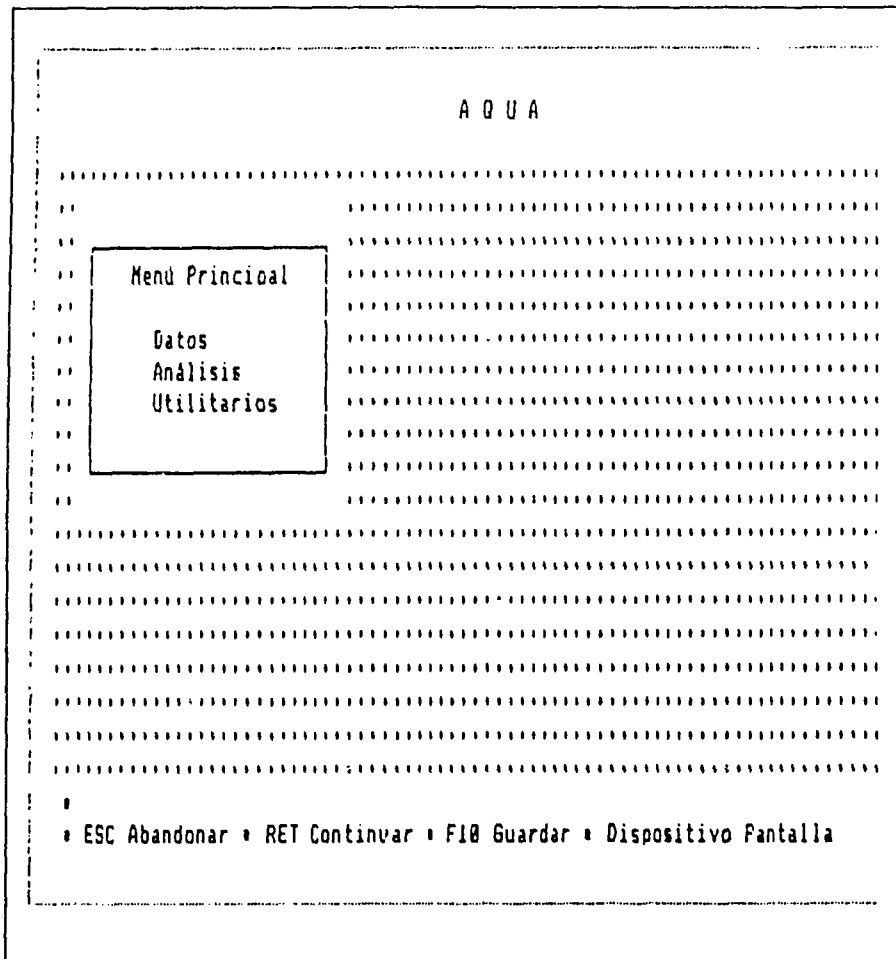


Figura 3.2. Menú principal del programa

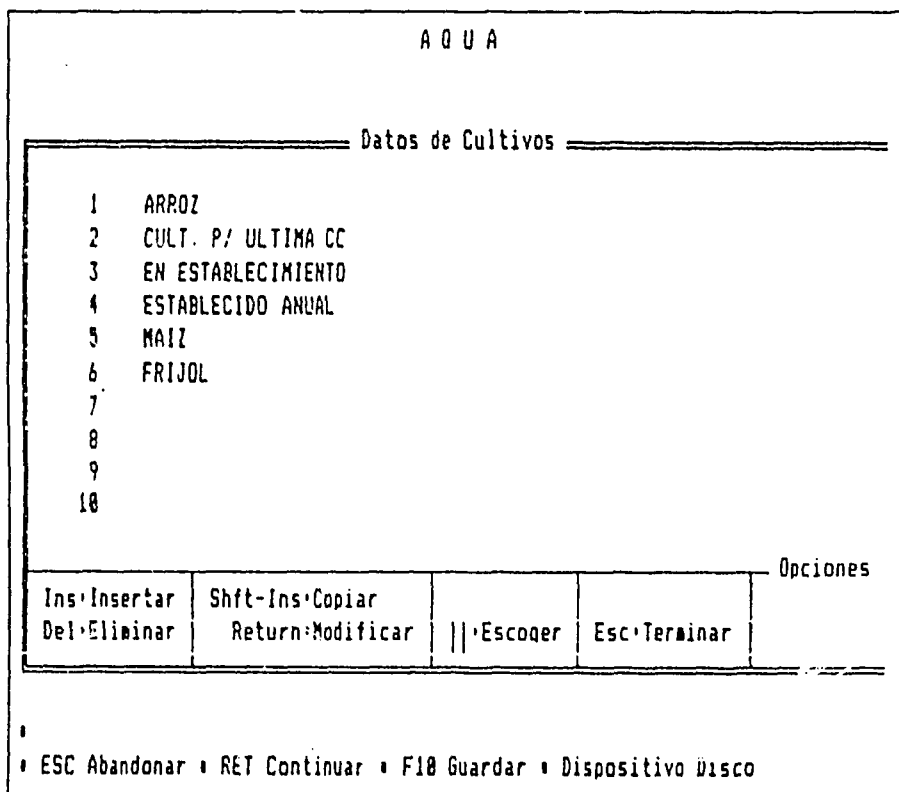


Figura 3.3. Lista de cultivos

Un cálculo muy útil para caracterizar una región es el efectuar el balance hídrico para todos los años de los que se tengan datos. Para ejemplificar, se hizo ese cálculo para la estación Fabio Baudrit con un cultivo en establecimiento, mostrándose los resultados en el cuadro 3.3.

También se puede utilizar el balance para encontrar qué época del año en determinada región es la más problemática. Para hacerlo, el usuario puede calcular el balance año a año e imprimir el gráfico de  $B_n/ADC_n$  vs Fecha (ver sección de gráficos). En un gráfico de  $B_n/ADC_n$  vs Fecha las épocas de déficit y exceso se detectan muy fácilmente. Cuando el valor de  $B_n/ADC_n$  llega a cero se presenta el déficit hídrico, y cuando llega 1 se presenta el exceso hídrico. Un ejemplo de este tipo de gráfico se da en la figura 3.5.

### 3.2.2 Precipitación.

Ejemplos de los análisis que se pueden efectuar a los datos de precipitación se dan en los cuadros 3.4, 3.5, 3.6 y 3.7.

### 3.2.3 Fecha más temprana de siembra.

En el cuadro 3.8 se puede observar el reporte generado por el programa para el cálculo de fecha más temprana de siembra de un cultivo resistente al déficit hídrico en la estación experimental Fabio Baudrit.

El programa puede generar gráficos de fecha de siembra versus porcentaje de ocurrencia los cuales son de gran utilidad para determinar una fecha de siembra con determinada probabilidad de ocurrencia. La figura 3.6 muestra ese tipo de gráfico, generado a partir de los resultados mostrados en el cuadro 3.8.

### 3.2.4 Último día a capacidad de campo.

El cuadro 3.9 muestra el cálculo para la estación Fabio Baudrit, y a partir del mismo el programa generó el gráfico mostrado en la figura 3.7.

### 3.2.5 Riego.

Esta escogencia sirve para generar el calendario de riego para los siembras que estén marcados, durante el intervalo

A Q U A

---

Nombre : ARROZ  
 Duración efectiva (días) : 110  
 Lámina para exceso (mm) : 25  
 Resistente o Susceptible (R/S) : R  
 Tipo de datos para las etapas (1/2) : 2

Etapa	Duración días	KC	CA %	PR cm
1. PRE-EMERGENCIA	5	0.50	50	25.00
2. ESTABLECIMIENTO	20	0.50	50	25.00
3. ESTABLECIMIENTO2	25	0.50	50	50.00
4. VEGETATIVO	40	0.75	50	50.00
5. VEGETATIVO2	50	0.75	50	80.00
6. MADUREZ	110	1.00	50	80.00
7.	0	0.00	0	0.00

Modificando datos de Cultivos ...  
 ESC Abandonar \* RET Continuar \* F10 Guardar \* Dispositivo Disco

Figura 3.4. Pantalla de introducción de datos de cultivo

de años que se especifique y en el período que se diga. Un ejemplo del reporte generado al efectuar el cálculo se puede observar en el cuadro 3.10.

### 3.2.6 Opciones.

Si el indicador "Datos dudosos" está activo, los datos dudosos de evapotranspiración y precipitación son tomados en cuenta para los cálculos; de otra forma, son evaluados como datos faltantes. El indicador de "Tipo de ETP" sirve para especificar si se usará ETP diaria, mensual o promedio para efectuar los cálculos.

### 3.2.7 Siembros.

Esta opción es idéntica a la que se encuentra en el menú de datos. La razón por la que se repitió en este menú es para facilitar al usuario el escoger (marcar) siembros rápidamente.

### 3.2.8 Gráficos.

Esta opción es la encargada de la generación de los gráficos de los resultados de los cálculos. Casi cualquier variable puede ser graficada contra cualquier otra. Es en "Gráfico actual" donde se escoge qué variables se desean graficar. A continuación se da

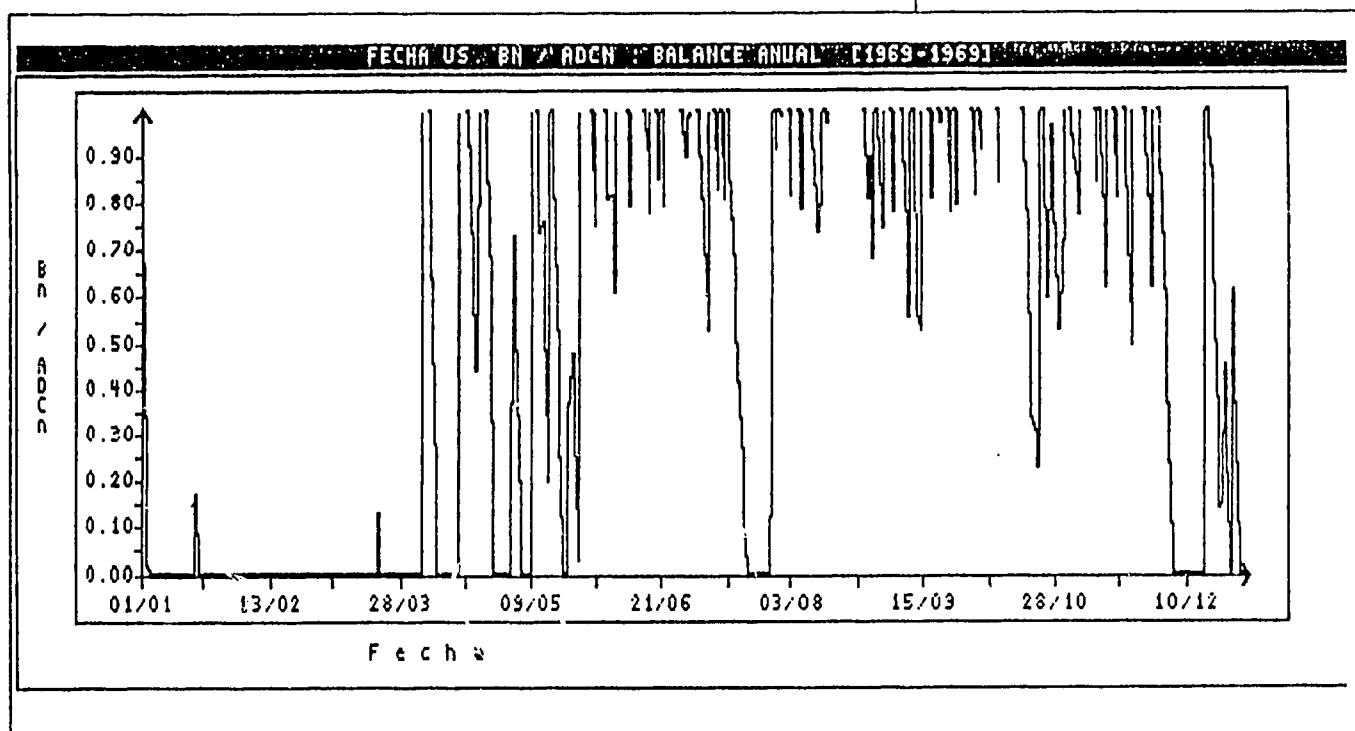


Figura 3.5. Gráfico generado por el programa AQUA a partir del cálculo de balance hídrico para un cultivo en establecimiento

una lista de cuales gráficos pueden ser generados. Cada variable puede ser colocada en cualquier eje.

1. Precipitación VS Precipitación (correlación de períodos).

2. Fecha VS Balance (Bn).

3. Fecha VS Bn/ADCn.

4. Fecha VS ADCn.

5. Fecha VS Días con déficit.

6. Fecha VS Días con exceso.

7. Fecha VS Días con estrés.

8. Fecha VS Índice de déficit.

9. Fecha VS Índice de exceso.

10. Fecha VS Índice de estrés.

11. Fecha VS Días sin lluvia.

12. Fecha VS Días con lluvia.

13. % de ocurrencia VS Fecha más temprana de siembra.

14. % de ocurrencia VS Ultimo día a capacidad de campo.

En "Tipo de gráfico" se especifica si se desea un gráfico lineal (uniendo los puntos con líneas rectas) o puntual. En "Código de vértice" se escoge el símbolo que se quiere usar para los puntos, "Gráfico inverso" sirve para ver el gráfico dibujado en negro sobre fondo

blanco y "Gráfico por impresora" se utiliza para imprimir el gráfico que se desea generar.

### 3.2.9 Dispositivo.

En este apartado se especifica el dispositivo en el cual se van a generar los reportes de los resultados de los cálculos. Las tres posibilidades son: PANTALLA, IMPRESORA y DISCO (en este último hay que especificar un nombre de archivo).

## 3.3 Sección de Utilitarios.

### 3.3.1 Directorio de datos.

La primera opción del menú de Utilitarios sirve para cambiar el subdirectorio de datos, con lo cual se pueden tener datos en diferentes directorios e incluso en diferentes unidades de disco.

### 3.3.2 Recuperación de índices.

La segunda opción del menú de Utilitarios se utiliza cuando por alguna razón se dañan los archivos de índices de los datos del programa. Al ser escogida esta opción, el programa empieza inmediatamente a reconstruir

los archivos de índices a partir de los archivos de datos.

### 3.3.3 Importación de archivos ASCII.

La tercera opción del menú de Utilitarios es la usada para importar datos de diferentes fuentes. El programa puede importar desde dos formatos: el de CLICOM y el formato columnar. El formato CLICOM es un formato ASCII en que CLICOM exporta los datos climáticos que posee. El formato columnar es un formato ASCII que se puede utilizar para importar datos climáticos que se tengan en hojas electrónicas como Lotus, QPRO o Smart.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Borg H. y Grimes D.W. "Depth Development of Roots with Time: an Empirical Description". TRANSACTIONS of the ASAE. 29(1), 194-197, 1986.
- [2] Carmona Villalobos, Geovanni. Modelo de balance hídrico para caracterización regional. Tesis de Licenciatura.

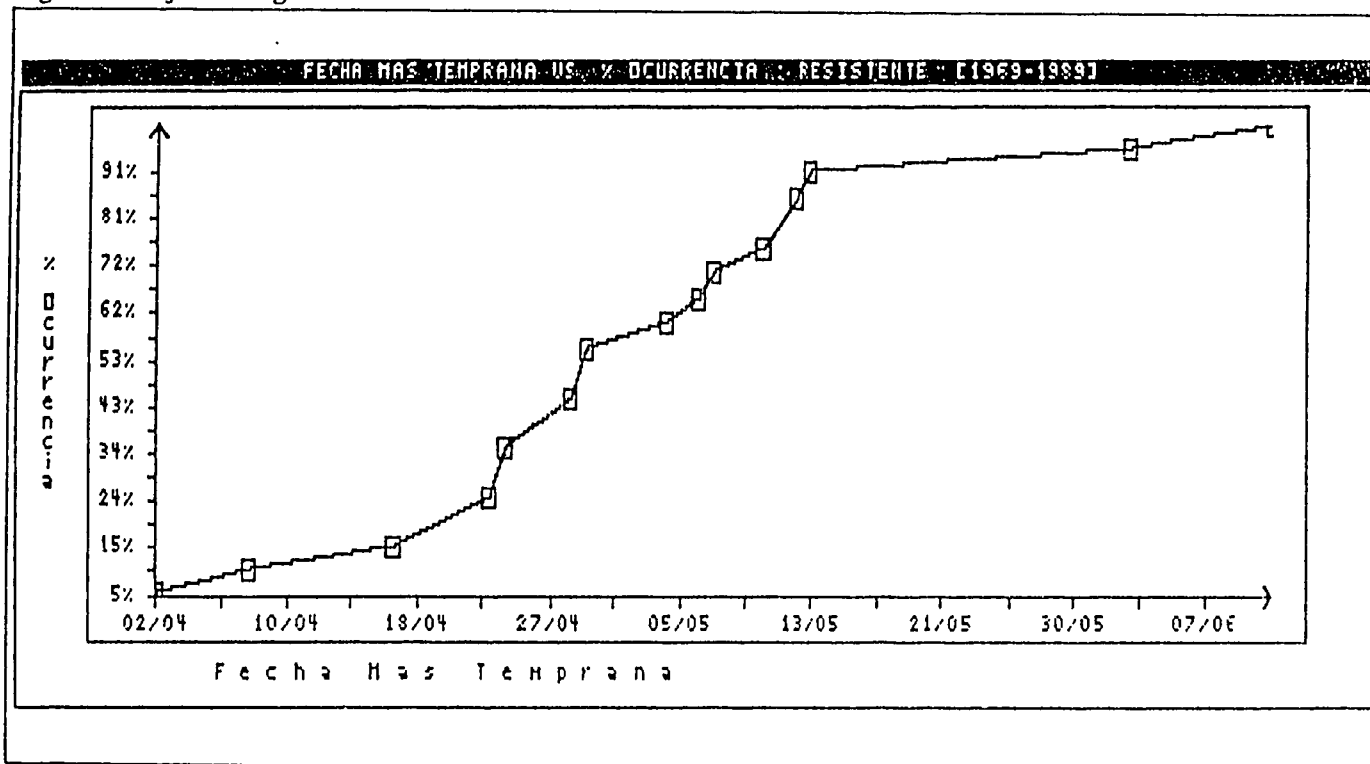


Figura 3.6. Gráfico de porcentaje de ocurrencia de fecha más temprana de siembra generado por el programa AQUA. Basado en el cuadro 3.8

Escuela de Ingeniería Agrícola, Universidad de Costa Rica: 1986.

- [3]Carmona G. y Radulovich R. "Metodología de evaluación de veranillos y de siembra temprana como estrategia para minimizar sus efectos". Turrialba, 38(3), 215-222, 1988.
- [4]Doorenbos, J. y A.H. Kassam. Efectos del agua sobre el rendimiento de los cultivos. Estudio FAO: Riego y Drenaje No.33. Roma: FAO, 1979.
- [5]Doorenbos, J. y W.O Pruitt. Las necesidades de agua de los cultivos. Estudio FAO: Riego y

Drenaje No.24. Roma: FAO, 1986.

- [6]FAO, Land and Water Development Division. Manual for Cropwat. Roma: FAO, 1988.
- [7]Radulovich, Ricardo. "AQUA, a Model to Evaluate Water Deficits and Excesses in Tropical Cropping. Part I. Basic assumptions and yield". Agricultural and Forest Meteorology. 40, 305-321, 1987.
- [8]Radulovich, Ricardo. "Optimization of Rainfed Tropical Cropping in Semi Dry Areas: A Case Study".

Agricultural Water Management. 16, 337-352, 1989.

- [9]Radulovich, Ricardo. "AQUA, A Model to Evaluate Water Deficits and Excesses in Tropical Cropping. Part II. Regional Yield Prediction". Agricultural and Forest Meteorology. 0,00-00 (aceptada para publicación en marzo 23, 1990).
- [10]Radulovich, Ricardo. et al. "Agua y cultivos secuenciales en zonas semi-secas: evaluación de campo preliminar". Agronomía Costarricense. 13(2), 219-224, 1989.

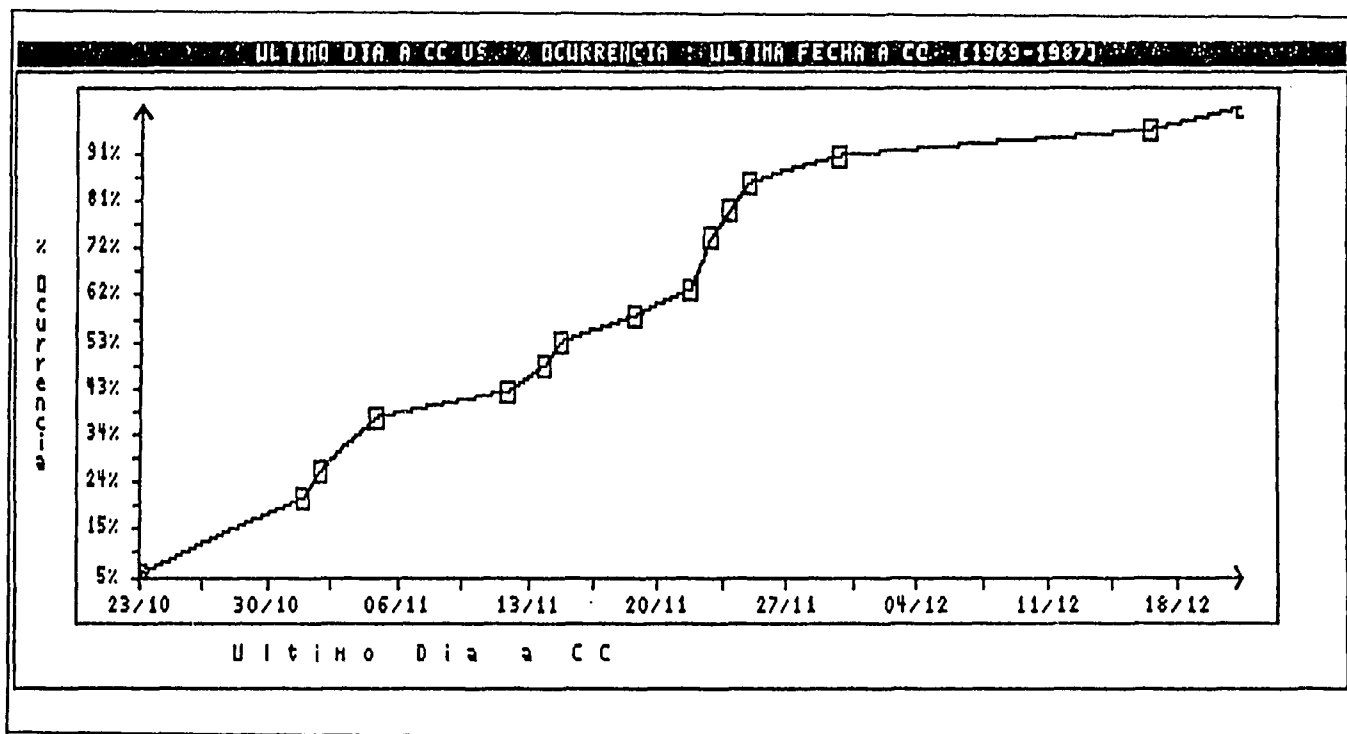


Figura 3.7. Gráfico de porcentaje de ocurrencia de la última fecha a CC generado por el programa AQUA. Basado en el cuadro 3.9

JURGO DE DATOS	INFORMACION ALMACENADA
Cultivo	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Nombre del cultivo.</li> <li>■ Duración efectiva.</li> <li>■ Tipo de cultivo (resistente o susceptible).</li> <li>■ Tipo de dato (valores al final de etapa o promedio durante etapa).</li> <li>■ Lista de 7 etapas máximo con: nombre de etapa, duración, Kc (coeficiente de cultivo), CA (coeficiente de agotamiento), PR (profundidad de raíces).</li> </ul>
Capa	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Nombre de capa.</li> <li>■ Capacidad aprovechable.</li> </ul>
Perfil	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Nombre de perfil.</li> <li>■ Lista de 5 capas máximo, cada una con su nombre y espesor.</li> </ul>
Estación	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Nombre de estación.</li> <li>■ Elevación.</li> <li>■ Localización (latitud y longitud).</li> <li>■ Tipo (A, B o C).</li> </ul>
BTP	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Nombre de estación meteorológica.</li> <li>■ Si es BTP diaria : Fecha (mes/año) y 31 valores diarios.</li> <li>■ Si es BTP mensual : Fecha (año) y 12 valores diarios (uno por mes).</li> <li>■ Si es BTP promedio: 12 valores diarios (uno por mes).</li> </ul>
Lluvia	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Nombre de estación meteorológica.</li> <li>■ Fecha (mes/año) y 31 valores diarios.</li> </ul>
Siembro	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Nombre de siembro.</li> <li>■ Fecha de siembra (día/mes/año).</li> <li>■ Área del siembro.</li> <li>■ Nombre del perfil de suelo.</li> <li>■ Nombre del cultivo.</li> <li>■ Nombre de estación meteorológica.</li> </ul>

Cuadro 3.1. Desglose de los datos utilizados por el programa AQUA

ESCOGENCIA	SUBMENU
Balance	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Datos de balance.</li> <li>■ Efectuar el cálculo.</li> </ul>
Precipitación	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Incremento de tiempo.</li> <li>■ Datos de precipitación.</li> <li>■ Días con y sin lluvia.</li> <li>■ Correlación de períodos.</li> <li>■ Acumulados.</li> <li>■ Lluvia probable.</li> <li>■ Criterios: Probabilidad. PPT de día seco. PPT de día muy húmedo.</li> </ul>
Fecha de siembra	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Datos de fecha más temprana.</li> <li>■ Efectuar el cálculo.</li> <li>■ Criterios: Días para establecimiento. PPT mínima década anterior. PPT máxima para labores. Días con PPT baja. Días con PPT nula. Días secos consecutivos. Días permitidos con déficit Agua residual.</li> </ul>
Ultimo día a CC	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Datos de última fecha a CC.</li> <li>■ Efectuar el cálculo.</li> </ul>
Riego	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Datos para el calendario.</li> <li>■ Efectuar el cálculo.</li> <li>■ Criterios: % de ADC aplicado en riego. Eficiencia de riego.</li> </ul>
Opciones	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Datos dudosos.</li> <li>■ Tipo de ETP.</li> </ul>
Siembros	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Lista de manejo de datos de siembros.</li> </ul>
Gráficos	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Gráfico actual.</li> <li>■ Tipo de gráfico.</li> <li>■ Código del vértice.</li> <li>■ Gráfico inverso.</li> <li>■ Gráfico por impresora.</li> </ul>
Dispositivo	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Pantalla.</li> <li>■ Impresora.</li> <li>■ Disco.</li> </ul>

Cuadro 3.2. Esquema de los submenús que se presentan en cada escogencia del menú de análisis

## Sistema AQUA

## Reporte de los resultados de los cálculos

Tipo de cálculo : Balance

No. de siembras : 1

Siembra No. 1 : BALANCE ANUAL

Fecha de siembra : 01 de Enero

Duración efectiva : 364 día (s)

Fin del ciclo : 31 de Diciembre

Estación : FABIO BAUDRIT

Cultivo : EN ESTABLECIMIENTO

Perfil : AQUA

Año	Días			Indices		
	Déficit	Exceso	Stress	Déficit	Exceso	Stress
1969	133	117	258	63.46	67.86	31.32
1970	124	101	225	65.93	72.25	38.19
1971	163	182	265	55.22	71.98	27.28
1972	170	73	243	53.38	79.95	33.24
1973	163	104	267	55.22	71.43	26.65
1974	173	83	256	52.47	77.20	29.67
1975	161	109	270	55.77	70.85	25.82
1976	173	67	240	52.47	81.59	34.07
1977	186	79	265	48.98	76.38	27.28
1978	150	83	233	58.79	77.28	35.99
1979	132	96	228	63.74	73.63	37.36
1980	162	94	256	55.49	74.18	29.67
1981	147	111	258	59.62	69.51	29.12
1982	195	76	271	46.43	79.12	25.55
1983	180	77	257	58.55	78.85	29.48
1984	151	100	251	58.52	72.53	31.84
1985	167	80	247	54.12	78.82	32.14
1986	205	69	274	43.68	81.84	24.73
1987	203	68	263	44.23	83.52	27.75
1988	177	85	262	51.37	76.65	28.82
1989	166	91	257	54.48	75.88	29.48

. Fin del reporte !

Cuadro 3.3. Reporte obtenido al efectuar el balance anual para todos los años de registro de la estación Fabio Baudrit, cultivo en establecimiento

----- Sistema AQUA -----

---

Reporte de los resultados de los cálculos

---

Tipo de cálculo : Días con y sin lluvia  
 Estación : FABIO BAUDRIT  
 Intervalo : 1987 -> 1989  
 Período (s) : 01/01 -> 31/12  
 Incremento : ANUAL

---

Fecha	Días secos	Días muy húmedos	Comentario
31/12/1987	288	25	
31/12/1988	262	36	
31/12/1989	257	29	

---

. Fin del reporte !

---

Cuadro 3.4. Reporte producido para el cálculo de días con y sin lluvia, estación Fabio Baudrit

----- Sistema AQUA -----

---

Reporte de los resultados de los cálculos

---

Tipo de cálculo : Acumulados  
 Estación : FABIO BAUDRIT  
 Intervalo : 1987 -> 1989  
 Período (s) : 01/01 -> 31/12  
 Incremento : ANUAL

---

Fecha	Acumulados	Comentario
31/12/1987	1599.0	
31/12/1988	2236.6	
31/12/1989	1865.4	

---

. Fin del reporte !

---

Cuadro 3.5. Reporte producido en el análisis de acumulados de precipitación



Sistema AQUA		
Reporte de los resultados de los cálculos		
Tipo de cálculo : Lluvia probable		
Estación : FABIO BAUDRIT		
Intervalo : 1982 -> 1989		
Periodo (s) : 21/85 -> 23/85		
Incremento : DIARIO		
Fecha	Precipitación (mm) [ 80 % ]	Comentario
21/85	0.1	
22/85	0.2	
23/85	0.2	
; Fin del reporte !		

Cuadro 3.6. Reporte producido para análisis  
de lluvia probable

Sistema AQUA			
Reporte de los resultados de los cálculos			
Tipo de cálculo : Correlación de periodos			
Estación : FABIO BAUDRIT			
Intervalo : 1987 -> 1989			
Periodo (s) : 15/85 -> 31/85 , 01/11 -> 15/11			
Incremento : DIARIO			
Año	Periodo #1	Periodo #2	Comentario
1987	78.3	8.0	
1988	193.5	94.6	
1989	112.9	92.5	
. Fin del reporte !			

Cuadro 3.7. Análisis de "Correlación de periodos"  
para la estación Fabio Baudrit

Sistema AQUA	
Reporte de los resultados de los cálculos	
Tipo de cálculo : Fecha más temprana de siembra	
No. de siembros : 1	
Siembro No. 1 : RESISTENTE	
Estación	: FABIO BAUDRIT
Cultivo	: RESISTENTE
Perfil	: AQUA
Año	Fecha más temprana de siembra
1969	08 de Abril
1970	02 de Abril
1971	28 de Mayo
1972	23 de Abril
1973	29 de Abril
1974	13 de Mayo
1975	10 de Mayo
1976	23 de Abril
1977	11 de Junio
1978	29 de Abril
1979	24 de Abril
1980	28 de Abril
1981	24 de Abril
1982	12 de Mayo
1983	13 de Mayo
1984	17 de Abril
1985	04 de Mayo
1986	02 de Junio
1987	07 de Mayo
1988	06 de Mayo
, Fin del reporte !	

Cuadro 3.8. Cálculo de fecha más temprana de siembra para un cultivo resistente al déficit hídrico, para la estación Fabio Baudrit

---

 Sistema AQUA
 

---



---

 Reporte de los resultados de los cálculos
 

---

Tipo de cálculo : Último día a capacidad de campo  
 No. de siembros : 1

Siembro No. 1 : ULTIMA FECHA A CC

Fecha de siembra : 01 de Octubre  
 Fin del ciclo : 01 de Enero  
 Estación : FABIO BAUDRIT  
 Cultivo : CULT. P/ ULTIMA CC  
 Perfil : AQUA

---

Año	Último día a capacidad de campo
-----	---------------------------------

---

1969	30 de Noviembre
1970	12 de Noviembre
1971	05 de Noviembre
1972	22 de Diciembre
1973	22 de Noviembre
1974	01 de Noviembre
1975	24 de Noviembre
1976	15 de Noviembre
1977	25 de Noviembre
1978	02 de Noviembre
1979	23 de Noviembre
1980	23 de Noviembre
1981	01 de Noviembre
1982	05 de Noviembre
1983	17 de Diciembre
1984	19 de Noviembre
1985	14 de Noviembre
1986	01 de Noviembre
1987	23 de Octubre

---

: Fin del reporte !

---

Cuadro 3.9. Resultado del cálculo del último día del año en que el suelo se encuentra a capacidad de campo para la estación Fabio Baudrit

64

## Sistema AQUA

## Reporte de los resultados de los cálculos

Tipo de cálculo : Calendario de riego

No. de siembras : 1

ADC aplicado en cada riego (%) : 100

Eficiencia de riego (%) : 70

Siembro No. 01 : ARROZ

Area (Ha) : 100.00

Fecha de siembra : 13 de Noviembre

Duración efectiva : 110 día (s)

Fin del ciclo : 02 de Marzo

Estación : FABIO BAUDRIT

Cultivo : ARROZ

Perfil : AQUA

Intervalo de años : 1988-1988

Periodo : 01/01 -&gt; 31/12

FECHA	D	LAMINA (mm)	VOLUMEN A APLICAR (metros cúbicos)		CAUDAL MINIMO (lt/s)	
			Neto	Aplicado	Neto	Aplicado
25/11/1988	12	13	13000	18571	12.5	17.9
12/12/1988	17	25	25000	35714	17.0	24.3
02/01/1989	21	40	40000	57143	22.0	31.5
10/01/1989	8	40	40000	57143	57.9	82.7
20/01/1989	10	40	40000	57143	46.3	66.1
28/01/1989	8	40	40000	57143	57.9	82.7
04/02/1989	7	40	40000	57143	66.1	94.5
11/02/1989	7	40	40000	57143	66.1	94.5
18/02/1989	7	40	40000	57143	66.1	94.5
25/02/1989	7	40	40000	57143	66.1	94.5

, Fin del reporte !

Cuadro 3.10. Reporte a disco generado por el programa para el cálculo de calendario de riego

63

1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8 **Intensifying Cropping in Seasonal Tropical Regions:**  
9 **Sequential Cropping and Yield Analysis.<sup>1</sup>**

10  
11  
12 Ricardo Radulovich<sup>2</sup>

13  
14 Department of Agricultural Engineering, University of Costa  
15 Rica, San José, Costa Rica.  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22

---

23 <sup>1</sup>Research supported by grant No. 8.337 of the Program in Science  
24 and Technology Cooperation, USAID, and by the University of Costa  
25 Rica. Partial support was received by Cornell University.

26 <sup>2</sup>Present address: CATIE, Turrialba, Costa Rica.

66

1 **ABSTRACT**

2 Radulovich, R. 1993. Intensifying cropping in seasonal tropical  
3 regions: Sequential cropping and yield analysis. Field Crops  
4 Res., \_\_:\_\_\_-\_\_\_.

5  
6 Water is the most limiting environmental factor for crop  
7 production in seasonal tropical regions. Excepting high-input  
8 and irrigated operations, annual cropping is traditionally very  
9 cautious and of low yield. Previous water-based simulations  
10 showed that more effective use of rainfall could be made by  
11 maximizing the length of the rainfed growing period. Sequential  
12 cropping schemes thus designed were field-tested at two stations  
13 in Costa Rica. Several agronomic crops were grown sequentially,  
14 beginning with pre-season rains and ending with crops growing  
15 only on stored soil water after the end of the season. Results  
16 were better than simulation had indicated, and of 63 sequential  
17 rainfed plantings reported only 7 had low yields, all of them  
18 second plantings in a series of two or three sequential crops per  
19 year. Low yields were attributed to water excess conditions.  
20 These rainfed sequences were, on average, 50 d longer than normal  
21 practices. Adding a third or fourth irrigated planting after  
22 rainfed sequences allowed to study the large potential of these  
23 regions for cropping throughout the year. Several absolute and  
24 relative procedures for the analysis of yield were used. This  
25 included the development of a relative cropping index, useful for  
26 the analysis of both inter- and sequential cropping.

61

1 INTRODUCTION

2 It is possible to crop all-year round in the tropics, given  
3 the practically constant and usually high mean monthly  
4 temperatures. The major limitation to all-year-cropping is  
5 imposed by water, which as rainfall dictates seasonality in the  
6 lower latitudes.

7 Multiple cropping (i.e., intensifying cropping through time  
8 and space) has clearly been recognized as an important method to  
9 increase resource use efficiency (e.g., Papendick et al., 1976).  
10 Within multiple cropping, the benefits of sequential cropping  
11 (where each crop is planted after the previous one has been  
12 harvested) are derived from obtaining the yield of more than one  
13 crop per year. Basically, the longer actively-growing crops are  
14 in the field, the more radiation will be intercepted and  
15 converted to biomass and harvestable yields. The importance of  
16 sequential cropping is widely recognized not only for tropical  
17 regions, but also for subtropical and mild temperate areas (e.g.  
18 for U.S.A., Hodges and Evatt, 1969; Lewis and Phillips, 1976;  
19 Hook and Gascho, 1988; Crabtree et al., 1990; Grabau and  
20 Pfeiffer, 1990; Kane and Grabau, 1992). Of course, only in the  
21 tropics it is possible to find an environment suited for the  
22 maximum expression of sequential cropping, which is cropping  
23 throughout the year.

24 In the wet-dry (or seasonal) regions of Central America, not  
25 unlike other seasonal tropical climates, length of the rainy  
26 season is approximately 180 d long, plus periods of erratic

1 rainfall during a 0 to 20 d pre-rainy season and 0 to 20 d post-  
2 rainy season. A major feature of the rainy season is its  
3 bimodality, with two periods of abundant rainfall, and a rather  
4 variable one of low to no rainfall. In this region of Central  
5 America, encompassing millions of hectares of mostly agricultural  
6 land where the rural population density is also highest (IPHG,  
7 1976), traditional rainfed cropping consists of growing only one  
8 long-cycle crop (typically 160-180 d long rice or cotton) or a  
9 maize-bean (Phaseolus) relay system which spans at most 200 d.  
10 In the drier, hilly areas, subsistence farmers traditionally  
11 intercrop maize with sorghum, with the latter considered to be an  
12 insurance against the failure of the maize crop (Hawkings, 1984).

13 Average yields for the main staple crops in Central America  
14 are: 1.6 T ha<sup>-1</sup> for maize; 0.7 T ha<sup>-1</sup> for bean; 1.5 T ha<sup>-1</sup> for  
15 sorghum; and, 3.1 T ha<sup>-1</sup> for rice (FAO 1992). Besides rice, with  
16 most planted area grown in medium to large mechanized operations,  
17 yields of the other staple crops are very low and traditionally  
18 grown by subsistence farmers. Soybean, sunflower and peanut are  
19 not major crops in the region (FAO, 1992).

20 The vagaries of rainfall contribute significantly to low and  
21 highly variable yields, often conducive to complete crop failure.  
22 Water stress, both as deficit and excess, explains from 70 to 90%  
23 of year to year regional yield variability of bean, maize and  
24 rice in wet-dry areas Costa Rica (Radulovich, 1990). Efforts to  
25 decrease the negative effects of water stress will contribute to  
26 increase yield levels and stability, thus allowing to further



1 develop the biophysical potential of these regions for annual  
2 crop production.

3 Reports fitting multiple cropping schemes to the climatic  
4 characteristics of a tropical region make use of more or less  
5 sophisticated rainfall and water balance analyses (e.g., Musembi  
6 and Griffiths, 1986; Lewis and Ndolo, 1987; Omer et al., 1988;  
7 Nieuwolt, 1989; Crabtree et al., 1990). However, other works  
8 have attempted this fitting in a more loose manner, based only on  
9 mean rainfall values (e.g., Harwood, 1979; Beets, 1982;  
10 Quisumbing, 1983; Woolley and Smith, 1986; de Datta, 1987; Morris  
11 et al., 1990). None of these works, however, take advantage of  
12 dynamic farming techniques. These techniques, besides detailed  
13 analysis of the water-related aspects of a region, also use real-  
14 time climatic observations and may include predictability of some  
15 characteristics of upcoming precipitation as aids to pre- and in-  
16 season decision making (Stewart and Hash, 1982; Stewart and  
17 Kashasha, 1984; Stewart, 1988; Radulovich, 1987b, 1989;  
18 Sivakumar, 1988, 1990).

19 Work reported here constitutes part of an effort to  
20 intensify tropical cropping through time in wet-dry regions,  
21 considering water as the main limiting factor. This approach to  
22 research on multiple cropping entails three steps: a) basic  
23 agroclimatic characterization of the region; b) design of  
24 cropping schemes that would best fit the region's  
25 characteristics; and, c) field test of these designs. This paper  
26 deals with the latter step.

7/0

1           Accordingly, cropping schemes were designed and managed  
2 using the water balance model AQUA (Radulovich, 1987a,  
3 1990; Carmona and Radulovich, 1988; Radulovich and Sanchez,  
4 1993), specifically translating to field situations cropping  
5 schemes previously designed for this region (Radulovich, 1989).  
6 Thus, the operational objectives were to field-test the modeled  
7 results using both probabilistic and real-time data in a dynamic  
8 manner, producing two to three sequential rainfed crops of medium  
9 to high yields per year. Irrigated plantings were added after  
10 rainfed sequences in order to contribute to elucidate the  
11 potential and limitations of these regions for year-round  
12 cropping. Given the limited available tools for the analysis of  
13 sequential cropping, a substantial portion of this work is  
14 devoted to yield analysis.

15

#### 16   **MATERIALS AND METHODS**

17           Work was conducted in Costa Rica, Central America, at two  
18 stations with seasonal rainfall regime, Alajuela and San Pedro.  
19 Main characteristics of each station are given in Table 1 and  
20 Figure 1. Alajuela, being at a lower elevation than San Pedro,  
21 is warmer and it also receives slightly more rain (Table 1).  
22 Besides these differences, the stations exhibit very similar,  
23 bimodal, rainfall distributions (Fig. 1), and represent millions  
24 of hectares of agricultural land in Central America (IPHG, 1976).  
25 The rainy season normally begins from late April to mid May, and  
26 ends by early to late November. There is a decrease in rainfall

71

1 around July, which does not normally cause severe drought in  
2 these stations (Carmona and Radulovich, 1988). High peaks in  
3 rainfall occur in May-June and September-October. There is  
4 hardly any rain for over five months, from mid-November through  
5 late April, which is a period with higher potential  
6 evapotranspiration (ETP) (Fig. 1, Table 1).

7 In Alajuela, two soils were used: an Ustic Dystropept, which  
8 is a clayey soil of poor structure with a compacted layer below  
9 0.5 m that inhibits drainage and deep root penetration; and, a  
10 Thapto-Vertic Dystric Haplustand, which exhibits good physical  
11 and chemical characteristics down to a depth of about 1.0 m,  
12 where a buried Vertisol can be found inhibiting drainage and root  
13 penetration. The soil at the San Pedro site is a Typic  
14 Haplustand, which is a deep, friable clayey soil with no known  
15 physical or chemical limitations to root penetration in the upper  
16 1.5 m. Classification of these soils follows recent terminology  
17 (Soil Survey Staff, 1992). The soils at the Alajuela site have  
18 been used for intensive experimental cropping for 23 years  
19 without interruption and were planted to sugar-cane before that.  
20 All plots presented infestation with Cyperus rotundus, which was  
21 controlled after two years of field work. The soil at the San  
22 Pedro site had not been cropped for at least twenty years, and  
23 supported an early successional stage of grasses and small  
24 bushes.

25 The model AQUA, used to design and manage planting  
26 sequences, operates on daily water balance calculations and on

12

1 probabilistic and expected estimates of rainfall (Radulovich  
2 1987a and b, 1989, 1990; Carmona and Radulovich, 1988; Radulovich  
3 et al., 1989; Radulovich and Sanchez, 1993). Plantings followed  
4 the analysis and the cropping patterns designed earlier for  
5 Alajuela (Radulovich, 1989), which consists of growing at least  
6 two sequential rainfed crops, making maximum safe use of the  
7 length of the rainfed cropping season. The length of the rainy  
8 season (not the same as rainfed cropping season) is approximately  
9 180 d, plus 0 to 20 d pre-rainy season and 0 to 20 d post-rainy  
10 season (Fig. 1).

11 Main aspects of this work (Radulovich, 1989) are: to take  
12 advantage of the pre-rainy season by early planting which,  
13 besides lengthening the rainfed cropping season, avoids exposing  
14 the crop at an early stage to excessive rainfall while also  
15 allowing maturity and harvest during the mid-season dry spell;  
16 and, to fully use for crop growth both the post-rainy season and  
17 stored soil water after that, instead of only partially as it is  
18 currently done.

19 According to simulation with the model, the rainfed cropping  
20 season begins during the pre-rainy season with the earliest safe  
21 planting date, which is determined each year by real-time daily  
22 rainfall data within a probabilistically pre-determined period.  
23 By using the earliest safe planting date, seeding can be done  
24 before the full start of the rainy season while avoiding water  
25 deficits (Carmona and Radulovich, 1988; Radulovich, 1989). A  
26 critical point of the rainfed cropping season is the last date in

12

1 which the soil water is replenished to field capacity by  
2 rainfall; all seeding should be done before that date. The  
3 rainfed cropping season is continued after that by cropping on  
4 stored soil water plus any sporadic late rains, and it ends with  
5 the last harvest (Carmona and Radulovich, 1988; Radulovich, 1989;  
6 Radulovich et al., 1989). Prediction of some late season  
7 rainfall characteristics are also included in these schemes  
8 (Radulovich, 1987b, 1989). Briefly, it has been established that  
9 there is a negative correlation between May and November  
10 rainfall, which permits some prediction of rainfall amounts for  
11 November. Taking thus advantage of several characteristics of  
12 rainfall amounts and distribution, and using conservative values  
13 of available soil water and of crop water extraction abilities,  
14 it was calculated by simulation that the Alajuela site should  
15 present dependable rainfed cropping seasons of 209 to 236 d long,  
16 with an average of 220 d (Radulovich, 1989).

17 Crops and cultivars grown, together with their codes are  
18 given in Table 2. Excepting three bean cultivars from CIAT,  
19 which were used for only a few plantings, locally recommended  
20 cultivars were employed. Plantings reported here are:  
21 Alajuela: Plantings were conducted for four years from May, 1988  
22 through January, 1992. During 1988, plantings were on the  
23 Dystropept, all other plantings were on the Haplustand. Yearly,  
24 two sequences were begun with plantings of maize and bean or  
25 soybean, followed by plantings of these and other crops. The  
26 sequences started with bean in 1989 and 1990 also branched into

74

1 third plantings after the second bean planting. For those same  
2 years, some irrigated plantings were added after the rainfed  
3 sequences in order to examine the possibility of year-round  
4 cropping. Given the length of growing cycle of the crops used,  
5 bean is the only one considered a short crop, all the others are  
6 considered long.

7 San Pedro: Plantings were conducted during the 1989 rainy season,  
8 ending in May, 1990. Three rainfed sequences were started using  
9 bean and soybean. Two irrigated plantings were added after an  
10 all-bean sequence to examine the feasibility of year-round  
11 cropping.

12 Plantings were done using a randomized complete block design  
13 with three replications. Plot sizes for each crop within each  
14 block were: 300 m<sup>2</sup> for the first planting and 20 to 50 m<sup>2</sup> for the  
15 second and third plantings in Alajuela, and 40 to 80 m<sup>2</sup> for the  
16 first planting and 20 to 40 m<sup>2</sup> for the second and third plantings  
17 in San Pedro. The smaller plots were used for bean. Yields were  
18 obtained by harvesting from 3 to 20 m<sup>2</sup>, from at least two  
19 randomly chosen portions of each useful plot. Yields of grains  
20 are reported on a 12-14% moisture basis, while those of peanut  
21 and cotton are after air drying.

22 Agronomic practices followed are those recommended for  
23 intermediate yields in the region. Light cultivation was used  
24 for land preparation. Seeding was by hand or by using a manual  
25 planter. Plant population densities were intermediate of those  
26 normally recommended. Fertilization was 100 kg N ha<sup>-1</sup> (120 kg N

75

1 ha<sup>-1</sup> for maize and rice) in two or three split applications (one  
2 of them at seeding time under the seed bed, the others side-  
3 dressed), and 60 kg P ha<sup>-1</sup> (80 kg P ha<sup>-1</sup> for maize and cotton) at  
4 seeding time under the seed bed. For plantings close to the end  
5 of the rainy season, all the fertilizer was applied at seeding  
6 time. A mixture of granular soil insecticide-nematicide was  
7 applied with the fertilizer at seeding time. Two or three  
8 preventive applications of mixtures of insecticide and fungicide,  
9 sometimes with foliar nutrients, were done during each crop's  
10 growing cycle. The exceptions being damage control applications,  
11 sometimes done on a weekly basis for short periods mostly to  
12 control fungal attacks. Pre-plant herbicide was used; post-  
13 emergence weed control was mostly done by hoeing and direct-  
14 contact herbicide applications using a wet wick. Irrigated  
15 plantings received full ETP weekly by furrows.

16 For general yield analysis, and unless otherwise noted, the  
17 reference for considering a yield low, medium or high is the  
18 following relation to values reported by FAO (1992): for bean,  
19 maize and sorghum the FAO yields for Central America are  
20 considered low while those reported for the U.S.A. are considered  
21 high; for rice, FAO yields for Central America are considered  
22 medium while those for the U.S.A. high. For the other crops,  
23 since no significant yields are reported for Central America,  
24 yields of other tropical Latin American countries are considered  
25 a reference for medium and those of the U.S.A. as high; the  
26 exception being cotton, where the reverse is true (FAO, 1992).

1     **RESULTS and DISCUSSION**

2             Excepting two periods of high water excess in 1988 due to  
3     hurricanes Gilbert (September) and Joan (October) in the  
4     Caribbean, the four rainy seasons of this study did not depart  
5     from expected values for the parameters considered by the model.  
6     Sowing was 1 to 4 d after all the criteria for earliest safe  
7     planting date were met. After the first planting of each season,  
8     one or two more rainfed plantings followed sequentially, sown at  
9     least one to a few days after the harvest of the previous crop.  
10    Irrigated crops were established as third or fourth planting in  
11    1989-90 and 1990-91. A total of 63 rainfed and 16 irrigated  
12    plantings are reported (Table 3).

13            Mean rainfed yields obtained were much higher than values  
14    for Central America, particularly for bean, maize, and sorghum,  
15    and least so for rice (Table 4). Mean yields of the other crops  
16    were substantially higher than those for other tropical Latin  
17    American countries, close to or larger than those reported for  
18    the U.S.A. (FAO, 1992). Late plantings even up to mid November  
19    produced medium to high yields, despite the ending of the rainy  
20    season soon after that. Only seven low yields are reported,  
21    three for bean, three for maize and one for sunflower; all of  
22    them second plantings in their respective sequence. No yields of  
23    first-planted or irrigated crops were nearly as low (Table 3).

24            Thus, it was possible to grow, rainfed and in general  
25    maintaining medium to high yields, two long crops (cotton, maize,  
26    peanut, rice, sorghum, soybean) or three crops (three bean, or

11



1 two bean plus a long crop), as well as combinations of one long  
2 and one short crop (Table 3). The harvest of the last crop of  
3 each rainfed sequence began in May was from December through  
4 March. The length of the rainfed cropping season, calculated as  
5 the number of days from the first planting to the last harvest of  
6 each sequence, varied from as low as 203 d to as high as 328 d in  
7 Alajuela, and from 273 d to 319 d in San Pedro (Table 3). BN-BN  
8 sequences are not included in this analysis. Mean values were,  
9 for Alajuela 1988-89: 231.7 d (SD=17.6), 1989-90: 264.0 d (34.4),  
10 1990-91: 235.8 d (31.1), 1991-92: 243.1 d (16.6), and all four  
11 years: 249.6 d (31.0); and 289.2 d (16.0) for San Pedro 1989-90.  
12 The overall mean length for both stations was of 254.9 d. Adding  
13 an irrigated crop after rainfed sequences took the number of days  
14 cropped to 345.7 d (12.3) for the 14 cases in Alajuela and to  
15 350.5 d (2.1) for the 2 cases in San Pedro.

16 The longest overall values for rainfed season were those of  
17 San Pedro, and in Alajuela those of 1989-90. The former reflect  
18 longer growth cycles and lower ETP rates due to lower  
19 temperatures, while the latter reflect a more favorable soil than  
20 in 1988 and more aggressive schemes implemented in 1989 than in  
21 the other years. More aggressive schemes were implemented in  
22 1989 because, according to the low rainfall in May that year,  
23 medium to high rainfall was expected in November--actually, rains  
24 extended into early December. For the other three years, high  
25 rainfall in May cautioned shorter rainfed seasons--this  
26 assumption turned out to be true only for 1988 and 1991. Also,

15

1 the soil used in 1988 did not allow for deep root penetration,  
2 what prompted limited experimentation.

3 The mean length of the rainfed cropping season obtained in  
4 Alajuela, 249.2 d, is about 30 d longer than mean values  
5 previously calculated for this station (Radulovich, 1989) and 50  
6 d or longer than normal practices. This difference is related to  
7 larger than expected ability of crops to extract soil water, to  
8 the large amounts of soil water available for extraction, and to  
9 some late season rainfall, particularly in 1989 and 1990  
10 (Radulovich and Chaves, 1993). Long rainfed cropping seasons  
11 were obtained basically because of early plantings and late  
12 growth on stored soil water, which extended through March in some  
13 instances (Table 3). These plantings, conducted during the first  
14 two weeks of May, were quite earlier than the normal practice,  
15 and hardly any standing rainfed crop is seen in these regions  
16 past December.

17 The high yields obtained, which included an instance of  
18 maize yielding over 7 T ha<sup>-1</sup>, were no surprise. For example, over  
19 15 yr ago Soria (1976) cited commercial yields with improved  
20 technology at 3.8 T ha<sup>-1</sup> for maize, 4.5 T ha<sup>-1</sup> for sorghum, 1.3 T  
21 ha<sup>-1</sup> for bean, and 5.2 T ha<sup>-1</sup> for rice in Central America. Also,  
22 experimental rainfed maize yields over 6.0 T ha<sup>-1</sup> are common in  
23 the Alajuela site since at least the early 70's (e.g., Vives and  
24 Chacon, 1972). Besides planting in a more careful manner  
25 regarding water, medium to high yields reported here are  
26 attributed to the fact that standard recommended practices were

1 applied in a consistent manner.

2 Yield analysis can be performed on absolute and relative  
3 bases. Absolute yields (e.g., T ha<sup>-1</sup>) have been the standard for  
4 monocropping. Yet, in multiple cropping, absolute yields are not  
5 adequate when evaluating together yields of several different  
6 crops. It is quite meaningless to add up the absolute yields of,  
7 e.g., maize and bean. However, when cropping sequentially with  
8 the same crop species, adding up the absolute yield of each  
9 planting is the clearest option. In such case, it is also  
10 possible to add up specific efficiencies, such as the water  
11 resource use efficiency calculated for double cropped soybeans in  
12 Georgia by Hook and Gascho (1988).

13 Given the availability of data and ease of analysis, yields  
14 of eleven sequences with only one crop species each are shown in  
15 Table 5, for which absolute yields were added up. For the  
16 sequences of two maize crops, average rainfed yield was 8.6 T ha<sup>-1</sup>  
17 yr<sup>-1</sup>. Sequences with three rainfed bean plantings yielded 3.7 T  
18 ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>, and 5.2 T ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup> for these plus a fourth irrigated  
19 planting. Sequences with two rainfed soybean plantings yielded  
20 4.8 T ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup> (Table 5).

21 As mentioned earlier, all noticeably low yields were in  
22 second rainfed plantings (Table 3). This recurrence of low  
23 yields, which included third rainfed plantings together with  
24 second ones, was found highly significant ( $P < 0.01$ ) for these  
25 periods through t-tests performed between selected sets of yield  
26 data from Alajuela: the mean of first-maize yields (5763 kg ha<sup>-1</sup>)

1 was significantly larger than the mean of second-maize yields  
2 (3079 kg ha<sup>-1</sup>), as well as the mean of first-bean yields (1800 kg  
3 ha<sup>-1</sup>) vs. the mean of second-bean yields (864 kg ha<sup>-1</sup>). After  
4 converting yields of all plantings to relative values dividing  
5 each value by the crop's mean: the mean of first-planting  
6 relative yields (1.44) was significantly larger than the mean of  
7 second-planting relative yields (0.88), also the mean of first-  
8 planting relative yields was significantly larger than the mean  
9 of third-planting relative yields (0.92). The difference in  
10 relative yields between second and third plantings was not  
11 significant. Also, the difference between the mean of first-bean  
12 yields (1800 kg ha<sup>-1</sup>) and that of fourth-irrigated-bean yields  
13 (1560 kg ha<sup>-1</sup>) was not significant, while that between second-bean  
14 yields (864 kg ha<sup>-1</sup>) and fourth-irrigated-bean yields was so.  
15 Also using relative yields for all plantings, the mean of first-  
16 planting yields (1.44) was not significantly different from that  
17 of irrigated-planting yields (1.25); however, the mean of second-  
18 planting yields (0.88) was significantly lower than that of  
19 irrigated-planting yields. It was necessary to draw upon  
20 relative yields to make the analysis between so many different  
21 crops. The validity of the method (i.e., lack of bias from using  
22 each crop's mean as denominator) was established by comparing P  
23 values obtained from absolute and relative analysis within first  
24 and second plantings of bean and of maize, which were the same.

25 It is clear from the above analysis that the main limiting  
26 period for crop production is that of second and third rainfed

1 plantings. Although detailed evaluation escapes the scope of  
2 this paper, this difference is attributed mostly to water excess  
3 conditions associated with biological stress. Interestingly  
4 enough, after the end of the rainy season, irrigated plantings  
5 performed as well as first plantings which, in turn, were  
6 preceded by the plantings of the previous year. This indicates  
7 that any effect of biological stress is highly modified by water  
8 excess.

9 Strategies to increase the annual yields shown in Table 5  
10 should be, obviously, based on increasing yields of second and  
11 third rainfed plantings by growing crops or cultivars more  
12 tolerant to water excess conditions and apply/develop  
13 technologies for these conditions. Also, growing in all  
14 instances a third or fourth irrigated crop to complete year-round  
15 cropping largely increases the yield potential. In this example  
16 of cropping sequentially with the same crop, maximum yield  
17 potential is achieved by growing a fourth irrigated bean crop  
18 after three rainfed bean plantings, and by growing a third  
19 irrigated maize or soybean crop after the respective sequence of  
20 two rainfed crops. The use of fast maturing varieties and/or  
21 relay plantings would permit to produce three maize or three  
22 soybean crops per year in this environment.

23 The annual yield potentials discussed above in relation to  
24 Table 5, appear high because they are the summation of from two  
25 to four experimental yields. However, a realistic approach to  
26 evaluating the potential of the regions considered would be to

1 recalculate annual yield potential by using an average of  
2 experimental and commercial yields in what can be considered the  
3 formulation of productivity strategies (see reference yields in  
4 Table 4). In this case, it is possible to expect: for maize, 7.0  
5 T ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup> rainfed and 10.5 T ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup> adding a third irrigated  
6 planting; for bean, 3.0 T ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup> rainfed and 4.0 T ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup> with  
7 a fourth irrigated planting; and, for soybean, 3.6 T ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>  
8 rainfed and 5.4 T ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup> by adding a third irrigated planting.

9 The yield potentials mentioned above are not intended to  
10 mean that a recommendation is made to have three or four  
11 plantings of the same species per year, every year. However,  
12 within the same farm, rotations can be established in such a  
13 manner so that, e.g., a 2.0-ha field, divided into two 1.0-ha  
14 fields can provide the farmer per year with the yields mentioned  
15 above for maize and soybean. All of these yields are of  
16 intermediate level, and, accordingly, should require intermediate  
17 input levels to obtain them. This scheme of several intermediate  
18 yields per year has been proposed as a sustainable system to be  
19 implemented in the tropics, in which cropping is extended  
20 throughout the year, for as long as rainfall water permits and  
21 followed by irrigation if available, using intermediate level  
22 inputs that remain well below a level that may be considered a  
23 sustainable goal in developed countries (Radulovich, 1991).  
24 Adding soil conservation measures to this scheme of intermediate  
25 input levels will certainly contribute towards increasing the  
26 sustainability of higher productivity of tropical cropping.

1           However, even if only for the principles of crop rotation,  
2 sequences with different crop species should be expected as the  
3 norm. Therefore, relative yields analysis remains a necessity.

4           Besides the simple method of using relative yields for a  
5 variety of comparisons presented above, the most direct relative  
6 yield analysis is that in which the total value of yield is  
7 obtained by converting and adding up the value of each component,  
8 regardless of how many these are. An approach to this, in which  
9 the total value of yields from a cropping system,  $V$ , is  
10 represented by the function (Finney, 1990):

$$11 \quad V = \sum_{i=1}^n (p_i Y_i)$$

12  
13  
14  
15           where  $p_i$  is a constant expressing intensive value of, e.g.,  
16 economic, nutritional, or energetic content of each unit of  
17 absolute yield of crop  $i$  ( $Y_i$ ).

18           Several conditions limit the use of economic value for  
19 evaluating yields from multiple cropping. Finney (1990) states  
20 that economic values may lose applicability through time, as  
21 prices and costs vary. Comparisons between regions may also not  
22 be possible on a purely economic basis. Francis and Sanders  
23 (1978) showed that the ratio of bean price/maize price fluctuated  
24 widely through time and space in Latin America, ranging from 2:1  
25 to 7:1. Also, production costs are difficult to ascertain for  
26 diverse multiple cropping; e.g., Adetiloye and Adekunle (1989)  
27 calculated economic indicators based on gross profit instead of  
28 net profit for multiple cropping systems in Nigeria. Other

1 values, such as nutritional content of yield, have limited  
2 applications.

3 The use of relative yields to evaluate performance of  
4 intercropping systems has been extensive. Methods in use have  
5 been fashioned after the relative yield total (RYT) of De Witt  
6 and Van Den Bergh (1965):

$$7 \quad RYT = \sum_{i=1}^n (Y_{i,I}/Y_{i,M})$$

8  
9  
10  
11 where  $Y_{i,I}$  is yield of crop  $i$  from intercropping, and  $Y_{i,M}$  is  
12 yield of crop  $i$  monocropped. In general terms, the RYT  
13 represents a measure of biological efficiency, expressed as the  
14 summation of individual ratios of each yield of interest over its  
15 control yield (i.e., the summation of individual efficiencies).

16 The use of RYT has been mostly under the name of land  
17 equivalent (or equivalency) ratio (LER), which is defined as "the  
18 ratio of the area needed under sole cropping to one of  
19 intercropping at the same management level to give an equal  
20 amount of yield" (Andrews and Kassam, 1976). Values of LER > 1.0  
21 have traditionally been considered indicative of a better  
22 performance of an intercrop system than of a monocrop one. Yet,  
23 LER has several shortcomings, particularly when varying areal  
24 proportions of crops and regarding length of growth cycle of the  
25 different crops (e.g., Hiebsch and McCollum, 1987;  
26 Balasubramanian and Sekayange, 1990). Moreover, LER is not  
27 applicable to sequential cropping since, by definition, for  
28 sequential monocrop yields LER = 1.0.



1           The only method specifically designed for sequential  
 2 cropping is the cropping index (CI), also known as cropping  
 3 intensity index. The CI is the summation of how many crops have  
 4 been harvested per year, and is thus a very simple indicator.  
 5 The CI does not consider at all either the length of the growing  
 6 cycle of the crops involved (e.g., a CI of 2.0 may mean two  
 7 radish crops or two cotton crops), nor the yields obtained by  
 8 each one of the crops (e.g., a CI of 2.0 may represent two near-  
 9 failures or two high yielding harvests).

10           Given the above limitations, it was considered necessary to  
 11 develop a method to evaluate this type of work. Such a method is  
 12 presented here as a relative cropping index (RCI).

13           It was thought that a more complete method for relative  
 14 yield analysis should provide, from a biophysical perspective and  
 15 preferably within a single value:

- 16 a) a measure of how long has the land been mono-, inter- and/or
- 17 sequentially cropped within a year or other length of time;
- 18 b) a measure of the success in doing so; and,
- 19 c) the possibility of comparing experiments or cropping sequences
- 20 both within a specific setting and between space and time.

21           The mathematical relationship that integrates to a degree  
 22 these three points is:

$$23 \quad RCI = \sum_{i=1}^n (Y_i/Y_{i,r}) d_{i,r}$$

24           where: RCI = relative cropping index (days);

25            $Y_i$  = yield of the crop of interest (mono-, inter- or

1 sequentially cropped);  
2  $Y_{i,r}$  = the reference yield of crop  $i$ ; and,  
3  $d_{i,r}$  = the reference length of the growing cycle of  
4 crop  $i$  (days).

5 The reference parameters as well as the rationale behind  
6 their use are explained as follows:

7

8 Reference Length of Growing Cycle ( $d_{i,r}$ )

9 In relation to the  $d_{i,r}$ , a sophistication of the cropping  
10 index (CI) could have been just adding up the number of days the  
11 crops were grown, as it was done above. Yet this approach does  
12 not account for relative yields (success), nor does it account  
13 for differences in length of crop growth cycle, mainly due to  
14 differences in temperature (i.e., differences in elevation in the  
15 tropics) or in the time a farmer may leave the crop to dry out in  
16 the field before harvesting it. A maize cultivar may take 120 d  
17 to mature at sea level or 200 d at high elevations (colder  
18 temperatures). Also, in some intercropping situations, the  
19 development of one of the crops can be delayed, e.g., until the  
20 canopy of the taller crop senesces and allows radiation to reach  
21 the lower crop. Thus, a conversion of each crop's growing length  
22 to a reference length was considered necessary. A constraint to  
23 establishing the reference at sea level is that not all crops  
24 grow or yield well at sea level.

25 The reference length of growth cycle for each crop (and cv.)  
26  $i$  ( $d_{i,r}$ ) was established as: the number of days it takes that crop,

51

1 freely growing and unstressed, to reach maturity at the highest  
2 temperature (shortest cycle) at which it yields optimally.  
3 Basically, each crop is given a certain value in number of days  
4 it takes to produce it, thus considering time at the essence of  
5 the methodology. The  $d_{i,r}$  for maize, bean and soybean used here  
6 are given in Table 4. In case that  $d_{i,r}$  has not been determined  
7 for a crop in a given situation, it can be substituted for local  
8 comparisons by the number of days ( $d_i$ ) it took the crop in  
9 question to reach maturity.

10

11 Reference Yield ( $Y_{i,r}$ )

12 The reference yield for each crop  $i$  ( $Y_{i,r}$ ) represents the  
13 expected yield of crop  $i$ , at the level of technology used, for  
14 the region where it produces its optimum yield (the same region,  
15 and thus cycle duration, where  $d_{i,r}$  is determined). The accurate  
16 determination of the reference yield and frequent revision and  
17 updating are essential. Of course, the RCI can also be  
18 calculated using control yields from individual experiments  
19 instead of the  $Y_{i,r}$ .

20 It was also established for the purpose of this analysis of  
21 sequential plantings, that whenever  $Y_i > Y_{i,r}$  then  $Y_i/Y_{i,r} = 1.0$  in  
22 order to maintain a basis for comparison, and because it is  
23 considered that whenever  $Y_i \geq Y_{i,r}$  the land has been efficiently  
24 used. In this case, the maximum yearly RCI for monocropping  
25 (sequential or not) can be of 365 d. However, this value may be  
26 exceeded by highly efficient intercropping systems. Also,

- 82

1 situations in which  $Y_i$  is repeatedly and substantially larger  
2 than  $Y_{i,r}$ , may indicate a need to revise  $Y_{i,r}$ . Reference yields for  
3 maize, bean and soybean are given in Table 4. In the manner used  
4 here, these reference yields represent realistic productivity  
5 goals rather than an actual mean being obtained at present by  
6 farmers.

7 After adequate determination of the  $d_{i,r}$  and the  $Y_{i,r}$ , the RCI  
8 should allow for yield comparisons between crops and between  
9 cropping systems with different species, and also between regions  
10 and time. Setting the  $d_{i,r}$  should not represent major  
11 difficulties; however, setting the  $Y_{i,r}$  is not so simple, and  
12 requires first an agreement on what constitutes an optimum yield  
13 for each crop for any given level of technology. Work towards  
14 establishing the latter means working towards standardization of  
15 tropical agriculture.

16 The individual and total RCIs for selected sequences and its  
17 component crops are shown in Table 6. Comparisons can be made:  
18 1) within a year for a station: e.g., the RCI for the BN-MZ  
19 sequence in Alajuela 1989-90, 205.0 d, is equal to that of the  
20 BN-SY sequence; 2) between years for one station: e.g., the RCI  
21 for the BN-MZ sequence in Alajuela was of 154.1 d in 1988-89 and  
22 205.0 d in 1989-90, reflecting the higher maize yield in 1989-90;  
23 and, 3) between stations: e.g., the RCI for the BN-BN-BN sequence  
24 in Alajuela 1989-90 is lower than the one for the same sequence  
25 in San Pedro that year, due to the difference in yield of the  
26 second planting.

89

1           A way of understanding the RCI values is by seeing them as  
2 the number of days a field has been used effectively. For  
3 example, a composite RCI of 225.0 d may mean that fully  
4 successful cropping was done during 225 d, or that cropping of  
5 only 75 % success was done for 300 d. The end result is the  
6 same, the land produced adequately for an RCI of 225.0 d or the  
7 equivalent of 225 full days. Biophysically, equal RCI values are  
8 equivalent in the sense that they represent the same amounts of  
9 effective radiation conversion within each crop's  
10 characteristics. However, in the field of economic analysis,  
11 particularly when stepping out of cereals, pulses and even root  
12 crops, an RCI of 130 d may mean very different things, just as a  
13 full crop of tomato and one of maize have completely different  
14 market values. In this sense, the RCI is just as powerless as  
15 RYT-based methods.

16           The RCI also provides the basis for relative biophysical  
17 comparison of individual yields of different species. For  
18 example, how does 1.0 T ha<sup>-1</sup> of bean compare with 3.5 T ha<sup>-1</sup> of  
19 maize? Both yields are equal to their respective  $Y_{i,r}$  (Table 4),  
20 and so they both represent individual relative yields of 1.0.  
21 Yet, the RCI of bean is 80.0 d and that of maize 125.0 d; thus,  
22 the bean yield represents 64 % (80.0/125.0) of the maize yield.

23           The RCI, though a limited tool, is versatile within its  
24 range of applications. It can be used to evaluate yields of  
25 multiple cropping in general, whether inter- or sequential  
26 cropping. It provides within a single value a reference to

- 90

1 effective length of cropping. When divided by the actual length  
2 of cropping, it gives an estimate of overall efficiency achieved  
3 (this latter use is analogous to the area time equivalency ratio  
4 of Hiebsch and McCollum, 1987). Also important is that the RCI  
5 can be used without control yields, by means of the  $Y_{i,r}$ . The  $Y_{i,r}$   
6 can be established taking into consideration a variety of  
7 assumptions and needs. When properly established, it can also be  
8 used for comparing efficiency of cropping systems across space,  
9 time and technology levels. However, a limitation of the method  
10 as used here can be readily seen in relation to Table 6.  
11 Basically, many yields were larger than the reference yields  
12 established for this analysis, and this is not reflected by the  
13 individual RCI's. However, it is expected that in a non-  
14 experimental setting, most yields should be lower than the  
15 reference yield, thus allowing for better comparisons. In this  
16 case, the solution to this limitation would have been to use high  
17 experimental yields as reference.

18 As mentioned earlier, to optimize cropping in terms of  
19 yield(s) per growing season should constitute the paradigm of  
20 tropical cropping, instead of the paradigm of temperate regions,  
21 which has been traditionally to optimize the yield of one crop  
22 per year (Radulovich, 1991). This allows to take a different  
23 view, and even to reinterpret previous results. An example of  
24 this is given in relation to modeled data for maize yields of  
25 Muchow et al. (1990; their Table 3). They concluded that high  
26 maize yield is associated with low temperature and high solar

1 radiation, and that in the tropics, despite high radiation, the  
2 yield potential of maize is lower than in temperate environments  
3 due to high temperature. This is correct when measured as  
4 absolute yields per crop; however, when considering length of  
5 cycle in function of temperature, the shorter length in warmer  
6 temperatures may allow for more than one planting during the year  
7 or season (something that is not possible in temperate regions,  
8 hence the insistence on high yield per crop). Moreover, after  
9 converting the data of Muchow et al. (1990) in  $\text{g m}^2$  to  $\text{g m}^2 \text{d}^{-1}$ ,  
10 the values at high temperatures were in all cases larger than at  
11 lower temperatures, precisely because of shorter length of cycle.  
12 It follows that maize yields can be higher in the tropics, not on  
13 a per planting basis, but on a per day and, even more, on a per  
14 length of cropping season basis. Also, three medium-level maize  
15 yields per year may be higher than one high-level yield, and  
16 perhaps more sustainable if only medium-level inputs are used  
17 throughout the year instead of a short season with high inputs.


18 The implementation of model recommendations and of dynamic  
19 cropping based on real-time and expected rainfall, did not  
20 present any major limitation, at least at the research stage.  
21 The procedure followed during our work was: first, to study the  
22 agroclimatic characteristics of a region, then to design cropping  
23 schemes to best suit these characteristics, followed by  
24 application and dynamic management of these cropping schemes.  
25 Such procedure may offer several avenues for the development of  
26 rainfed tropical agriculture. This can be a very cost effective

1 alternative to the development of costly irrigation schemes,  
2 particularly given the ubiquitous shortages of water for  
3 irrigation.

4 While the dynamics under water deficits and excesses escape  
5 the scope of this paper, it is clear that problems associated  
6 with water excess need to be solved before these cropping schemes  
7 can be fully implemented. These solutions will have to deal not  
8 only with direct crop well being, but also with field (land  
9 preparation, planting, harvesting) and post-harvest operations at  
10 an appropriate scale. It can be said that work on water excess  
11 for the humid and semi-humid tropics represents a most promising  
12 line of work that can benefit large areas of the world now with  
13 poor general agricultural development.

14 To improve rainfed cropping may thus represent an  
15 intermediate and perhaps more sustainable development strategy.  
16 To optimize cropping in terms of several yields per growing  
17 season instead of on each crop's individual yield, represents a  
18 more desirable paradigm for annual tropical cropping and it makes  
19 less necessary to obtain high yields for each crop. Level of  
20 inputs per crop can be intermediate if intermediate levels of  
21 yields are expected. This can constitute the basis of both  
22 environmentally and socioeconomically sustainable cropping  
23 systems in the tropics (Radulovich, 1991).

24 It is foreseeable that, when methodology to deal with the  
25 major problems is developed or, as in most cases, begun to be  
26 properly used, tropical cropping, through the many different





1 intercropping and sequential cropping options, might well prove  
2 to be quite efficient, productive and sustainable.

3

4

5

6

7 **REFERENCES**

- 8 Adetiloye, P.O. and A.A. Adekunle. 1989. Concept of monetary  
9 equivalent ratio and its usefulness in the evaluation of  
10 intercropping advantages. Trop. Agric. (Trinidad) 66:337-  
11 341.
- 12 Andrews, D.J. and A.H. Kassam. 1976. The importance of multiple  
13 cropping in increasing world food supplies. In: R.I.  
14 Papendick, P.A. Sanchez and G.B. Triplett (eds), Multiple  
15 Cropping, pp. 1-10. ASA Special Publ. No. 27, Madison,  
16 Wisconsin.
- 17 Balasubramanian, V. and L. Sekayange. 1990. Area harvests  
18 equivalency ratio for measuring efficiency in multiseason  
19 intercropping. Agron. J. 82:519-522.
- 20 Beets, W.C. 1982. Multiple cropping and tropical farming systems.  
21 Westview Press, Boulder, Colorado, 156 p.
- 22 Carmona, G. and R. Radulovich. 1988. Metodología de evaluación de  
23 veranillos y de siembra temprana como estrategia para  
24 minimizar sus efectos. Turrialba 38:215-222.
- 25 Crabtree, R.J., J.D. Prater and P. Mbolida. 1990. Long-term wheat,  
26 soybean, and grain sorghum double-cropping under rainfed

- 1 conditions. Agron. J. 82:683-686.
- 2 de Datta, S.K. 1987. Principles and practices of rice production.  
3 R.E. Krieger, Malabar, Florida, 618 p.
- 4 De Witt, C.T. and J.P. Van Den Bergh. 1965. Competition between  
5 herbage plants. Neth. J. Agric. Sci. 13:212-221.
- 6 FAO. 1992. Production Yearbook. FAO Statistics Series No. 104,  
7 Rome. 265 p.
- 8 Finney, D.J. 1990. Intercropping experiments, statistical  
9 analysis, and agricultural practice. Expl. Agric. 26:73-81.
- 10 Francis, C.A. and J.H. Sanders. 1978. Economic analysis of bean  
11 and maize systems: monoculture versus associated cropping.  
12 Field Crops Res. 1:319-335.
- 13 Grabau, L.J. and T.W. Pfeiffer. 1990. Management effects on  
14 harvest losses and yield of double-crop soybean. Agron. J.  
15 82:715-718.
- 16 Harwood, R.R. 1979. Small farm development. Westview, Boulder,  
17 Colorado, 160 p.
- 18 Hawkings, R. 1984. Intercropping maize with sorghum in Central  
19 America: a cropping systems case study. Agric. Systems 15:1-  
20 21.
- 21 Hiebsch, C.K. and R.E. McCollum. 1987. Area-X-time equivalency  
22 ratio: a method for evaluating the productivity of  
23 intercrops. Agron. J. 79:15-22.
- 24 Hodges, R.J. and N.S. Evatt. 1969. Second crop rice production.  
25 Fact Sheet No. 13, Texas A&M Univ. Agric. Research and  
26 Extension Service, Beaumont, Texas, 2p.

- 1 Hook, J.E. and G.J. Gascho. 1988. Multiple cropping for efficient  
2 use of water and nitrogen. In: W.L. Hargrove (ed), Cropping  
3 strategies for efficient use of water and nitrogen, pp. 7-  
4 20, American Soc. of Agronomy, Madison, Wisconsin.
- 5 IPHG (Instituto Panamericano de Historia y Geografía). 1976.  
6 Atlas climatológico del Istmo Centroamericano, Public. No.  
7 367. Guatemala, 356 p.
- 8 Kane, M.V. and L.J. Grabau. 1992. Early planted, early maturing  
9 soybean cropping system: growth, development and yield.  
10 Agron. J. 84:769-773.
- 11 Lewis, J.E. and I.J. Ndolo. 1987. Estimating moisture  
12 availability for rice cultivation in Mwea, Kenya. Agric.  
13 For. Meteorol. 41:87-95.
- 14 Lewis, W.M. and J.A. Phillips. 1976. Double cropping in the  
15 eastern United States. In: R.I. Papendick, P.A. Sanchez and  
16 G.B. Triplett (eds), Multiple cropping, pp. 41-50. American  
17 Soc. of Agronomy Special Public. No. 27, Madison, Wisconsin.
- 18 Morris, R.A., A.N. Villegas, A. Polthanee and H.S. Centeno. 1990.  
19 Water use by monocropped and intercropped cowpea and sorghum  
20 grown after rice. Agron. J. 82:664-668.
- 21 Muchow, R.C., T.R. Sinclair, and J.M. Bennett. 1990. Temperature  
22 and solar radiation effects on potential maize yield across  
23 locations. Agron.J. 82:338-343.
- 24 Musembi, D.K. and J.F. Griffiths. 1986. The use of precipitation  
25 data to identify soil moisture patterns and the growing  
26 season in eastern Kenya. Agric. For. Meteorol. 37:47-61.

- 1 Nieuwolt, S. 1989. Estimating the agricultural risks of tropical  
2 rainfall. *Agric. For. Meteorol.* 45:251-263.
- 3 Omer, M.A., K.E. Saxton and D.L. Bassett. 1988. Optimum sorghum  
4 planting dates in western Sudan by simulated water budgets.  
5 *Agric. Water Manage.* 13:33-48.
- 6 Papendick, R.I., P.A. Sanchez and G.B. Triplett (eds). 1976.  
7 Multiple Cropping. ASA Special Publication No. 27, Madison,  
8 WI, 378 p.
- 9 Quisumbing, E.C. 1983. Linking farming systems research and  
10 extension to the farmer--the Philippine experience. In:  
11 Farming systems research, Paper Series paper No. 5, pp. 146-  
12 161, Kansas State Univ., Manhattan, Kansas.
- 13 Radulovich, R. 1987a. AQUA, a model to evaluate water deficits  
14 and excesses in tropical cropping. I. Basic assumptions and  
15 yield. *Agric. For. Meteorol.* 40:305-321.
- 16 Radulovich, R. 1987b. Predicción de la precipitación de fin de  
17 estación lluviosa en el régimen del Pacífico. *Agron.*  
18 *Costarric.* 11:55-64.
- 19 Radulovich, R. 1989. Optimization of rainfed tropical cropping in  
20 semi-dry areas: a case study. *Agric. Water Manage.* 16:337-  
21 352.
- 22 Radulovich, R. 1990. AQUA, a model to evaluate water deficits and  
23 excesses in tropical cropping. II. Regional yield  
24 prediction. *Agric. For. Meteorol.* 52:253-261.
- 25 Radulovich, R. 1991. Desarrollo agrícola en el trópico  
26 Latinoamericano: El caso del pequeño agricultor vs. la

- 1           economía nacional. *Interciencia* 16:125-130.
- 2   Radulovich, R. and F. Sanchez. 1993. *AQUA: modelo de balance*  
3        *hídrico para agricultura tropical, v. 1.0.* Editorial  
4        Universidad de Costa Rica, San José, 150 p.
- 5   Radulovich, R., G. Vargas, J.R. Chaves and F. Sánchez. 1989. *Agua*  
6        *y cultivos secuenciales en zonas semi-secas: evaluación de*  
7        *campo preliminar.* *Agron. Costarric.* 13:219-225.
- 8   Rojas, O.E. 1985. *Estudio agroclimático de Costa Rica.* IICA,  
9        *Serie Public. Misceláneas No. 617.* San José, Costa Rica, 178  
10       p.
- 11   Sivakumar, M.V.K. 1988. *Predicting rainy season potential from*  
12        *the onset of rains in southern Sahelian and Sudanian*  
13        *climatic zones of West Africa.* *Agric. For. Meteorol.*  
14        42:295-305.
- 15   Sivakumar, M.V.K. 1990. *Exploiting rainy season potential from*  
16        *the onset of rains in the Sahelian zone of West Africa.*  
17        *Agric. For. Meteorol.* 51:321-332.
- 18   Soil Survey Staff. 1992. *Keys to Soil Taxonomy, 5th Ed.* SMSS  
19        *Technical Monograph No. 19, Blacksburg, Virginia.* Pocahontas  
20        Press, Inc. 556 p.
- 21   Soria, J. 1976. *Los sistemas de agricultura en el Istmo*  
22        *Centroamericano.* *Rev. Biol. Trop.* 4(Supl. 1):57-68.
- 23   Stewart, J.I. 1988. *Response farming in rainfed agriculture.*  
24        WHARF Press, Davis, California, 103 p.
- 25   Stewart, J.I. and C.T. Hash. 1982. *Impact of weather analysis on*  
26        *agricultural production and planning decisions for the*

- 1            semiarid areas of Kenya. J. Appl. Meteorol. 21:477-494.
- 2        Stewart, J.I. and D.A.R. Kashasha. 1984. Rainfall criteria to
- 3            enable response farming through crop-based climate analysis.
- 4            E. Afr. Agric. For. J. 44(Special Issue October):58-79.
- 5        Vives, L.A. and A. Chacón. 1972. Análisis de épocas de siembra
- 6            del maíz. Estación Fabio Baudrit, Boletín Técnico Vol. 5,
- 7            No. 5, Alajuela, Costa Rica, 19 p.
- 8        Woolley, J.N. and M.E. Smith. 1986. Maize plant types suitable
- 9            for present and possible bean relay systems in Central
- 10          America. Field Crops Res. 15:3-16.

Table 1. Basic characteristics of the study sites in Costa Rica.

Site	Latitude- Longitude	Altitude m a.s.l.	Mean (SD)	Mean	Mean (SD)	
			Annual Rainfall (mm)	Monthly Temperature (C)	ETP <sup>1</sup> (mm/d)	Jun-Nov Dec-May
Alajuela (La Central)	10 01 N- 84 16 W	840	1949.9 (273.5)	22.7	3.8 (0.1)	4.9 (0.2)
San Pedro (Sabanilla)	09 57 N- 84 03 W	1200	1736.8 (328.7)	19.0	3.7 (0.1)	4.3 (0.2)

<sup>1</sup> Potential evapotranspiration determined by a radiation method (Rojas, 1985).

Table 2. Crops and cultivars grown, and codes used throughout text.

---

<u>Common name</u>	<u>Latin name</u>	<u>Code</u>	<u>Cultivar</u>	<u>Code (cv.)</u>
Bean	<u>Phaseolus vulgaris</u>	BN	Huetar	BNh
			Talamanca	BNT
			Bat-477 <sup>1</sup>	BNb
			Dor-363 <sup>1</sup>	BNd
			San Cristobal <sup>1</sup>	BNs
Cotton	<u>Gossypium hirsutum</u>	CN	Pexa	
Maize	<u>Zea mays</u>	MZ	Diamantes	
			Tico-V7 <sup>2</sup>	
Peanut	<u>Arachis hypogaea</u>	PN	Flowerson	
Rice	<u>Oryza sativa</u>	RC	CR5272	
Sorghum	<u>Sorghum bicolor</u>	SR	Costasem II	
Soybean	<u>Glycine max</u>	SY	IAC-8	
Sunflower	<u>Helianthus annuus</u>	SF	Mamut	

---

<sup>1</sup> Cultivars from CIAT.

<sup>2</sup> Used only in Alajuela 1988-89.



Table 3. Rainfed and rainfed + irrigated cropping sequences with planting and harvest dates, yields, and length of cropping season. (Data on each row are of the last crop of that row's sequence).

Site (year)	Cropping sequence	Planting date	Harvest date	Yield (kg/ha)	(S.E.)	Length of cropping season (d)	
ALAJUELA (1988-89)	BNt	05/05	07/28	1533	(155)		
	BNt- MZ	08/04	12/12	2076	(99)	221	
	MZ	05/05	09/06	5202	(478)		
	MZ- MZ	09/08	01/12	3347	(202)	252	
	MZ- BNt	09/22	12/13	1036	(79)	222	
ALAJUELA (1989-90)	BNh	05/04	07/28	1468	(230)		
	BNh- BNh	07/29	10/17	411	(19)		
	BNh- CN	08/01	02/03	1756	(565) 1	276	
	BNh- SY	08/01	12/05	2967	(97)	216	
	BNh- PN	08/03	12/12	1592	(252)	223	
	BNh- MZ	08/22	12/26	4639	(534)	237	
	BNh- RC	08/22	01/09	3734	(590) 2	251	
	BNh- BNt	08/23	11/16	909	(127)		
	BNh- BNh- BNh	10/19	12/26	1025	(241)	237	
	BNh- BNh- SY	10/19	02/08	2533	(200)	281	
	BNh- BNh- MZ	10/19	02/24	2977	(224)	297	
	BNh- BNh- SR	10/19	02/27	4857	(514)	300	
	BNh- BNt- SR	11/18	03/27	1803	(456)	328	
		MZ	05/04	09/07	7057	(218)	
		MZ- BNh	09/14	12/12	841	(82)	223
		MZ- MZ	09/14	01/16	3267	(617)	258
		MZ- BNt	09/18	12/12	842	(198)	223
		MZ- SY	09/18	01/18	3428	(394)	260
		MZ- PN	09/19	02/24	2996	(354)	297
		MZ- CN	09/19	03/06	1168	(150) 1	307
		MZ- SR	09/20	02/01	4597	(374)	274
	Irrigated	BNh- PN- MZ	12/19	04/27	4379	(282)	359
BNh- MZ- BNh		01/03	03/27	1160	(116)	328	
BNh- BNh- BNh- BNh		01/03	03/27	1345	(99)	328	
BNh- MZ- BNt		01/03	04/03	1660	(188)	335	
BNh- MZ- BNb		01/03	04/03	1567	(387)	335	
BNh- MZ- BNs		01/03	04/03	1657	(269)	335	
BNh- BNh- BNh- SR		01/03	04/25	6309	(398)	357	
BNh- CN- BNh		02/07	04/25	1963	(304)	357	
MZ- SY- BNh		01/29	04/17	1573	(144)	349	
MZ- MZ- BNh		01/29	04/17	2192	(399)	349	
MZ- SR- BNh		02/07	04/25	1704	(312)	357	
ALAJUELA (1990-91)		BNh	05/03	07/21	2484	(47)	
		BNh- BNt	07/30	10/15	1750	(91)	
	BNh- BNh	07/26	10/03	801	(91)		
	BNh- SF	08/03	11/21	894	(120)	203	
	BNh- MZ	07/26	11/27	4428	(145)	209	
	BNh- SY	07/31	11/29	3895	(382)	211	
	BNh- BNh- MZ	10/10	02/11	6176	(934)	285	
	BNh- BNh- SF	10/10	01/30	1478	(437)	273	
		MZ	05/03	09/03	6276	(247)	
		MZ- BNh	09/06	11/21	323	(49)	203
		MZ- SY	09/12	01/08	1616	(175)	251
		MZ- SF	09/12	12/24	1420	(50)	236
		MZ- MZ	09/10	01/08	1830	(68)	251
Irrigated	MZ- SY- SF	01/16	04/25	1416	(28)	358	
	MZ- SF- BNt	01/17	04/02	981	(169)	335	
	MZ- MZ- SF	01/16	04/25	1477	(128)	358	

ALAJUELA (1991-92)	BNt		05/14	07/26	1713	(263)	
	MZ		05/13	09/13	4517	(341)	
	MZ- BNd		09/20	12/12	1625	(131)	214
	MZ- SF		09/20	01/07	3742	(335)	240
	MZ- SY		09/20	01/21	1982	(334)	254
	MZ- SR		09/20	01/21	4563	(332)	254
	MZ- MZ		09/20	01/21	3016	(362)	254
	SY		05/13	09/13	3118	(330)	
	SY- BNd		09/20	12/12	1549	(19)	213
	SY- SF		09/20	01/07	3503	(354)	240
	SY- SY		09/20	01/21	2556		254
	SY- SR		09/20	01/21	3262	(476)	254
SY- MZ		09/20	01/21	2033	(111)	254	
SAN PEDRO (1989-90)	SY		05/13	10/28	2147	(329)	
	SY- BNb		11/10	02/21	2451	(133)	294
	SY- BNs		11/10	02/19	2188	(288)	283
	SY- BNt		11/10	02/19	1592	(160)	283
	BNt		05/13	08/21	1899	(267)	
	BNt- BNh		08/29	11/17	355	(59)	
	BNt- BNh- BNh		11/20	02/19	1505	(105)	283
	BNh		05/13	08/07	2122	(149)	
	BNh- BNh		08/14	11/08	714	(92)	
	BNh- BNh- BNh		11/10	02/09	1619	(76)	273
	BNh- BNh- SY		11/13	03/27	1691	(442)	319
	Irrigated	BNh- BNh- BNh- BNh		02/13	04/27	1645	(47)
BNh- BNh- BNT- BNh			02/21	04/30	973	(71)	352

- 1 Lint yield (=seedcotton yield \* 0.44)
- 2 Paddy rice yield

Table 4. Mean rainfed yields, and references used for relative cropping index.

<u>Crop</u>	<u>Site</u> <sup>1</sup>	<u>Mean crop yield (SE) (kg/ha)</u>	<u>Reference Yield, Y<sub>i,r</sub> (kg/ha)</u>	<u>Reference # of days d<sub>i,r</sub></u>
Bean	AL	1,220.6 (148.7)	1,000	80
	SP	1,604.9 (228.9)		
Cotton	AL	1,462.0 (294.2)	3,500	125
Maize	AL	4,060.0 (449.5)		
Peanut	AL	2,293.7 (702.1)		
Rice	AL	3,733.8 (590.1)		
Sorghum	AL	3,816.3 (574.9)		
Soybean	AL	2,761.8 (264.3)	1,800	125
	SP	1,919.2 (227.8)		
Sunflower	AL	2,207.3 (587.9)		

<sup>1</sup>AL= ALAJUELA; SP= SAN PEDRO

Table 5. Yields of sequences using with the same crop species throughout one year.

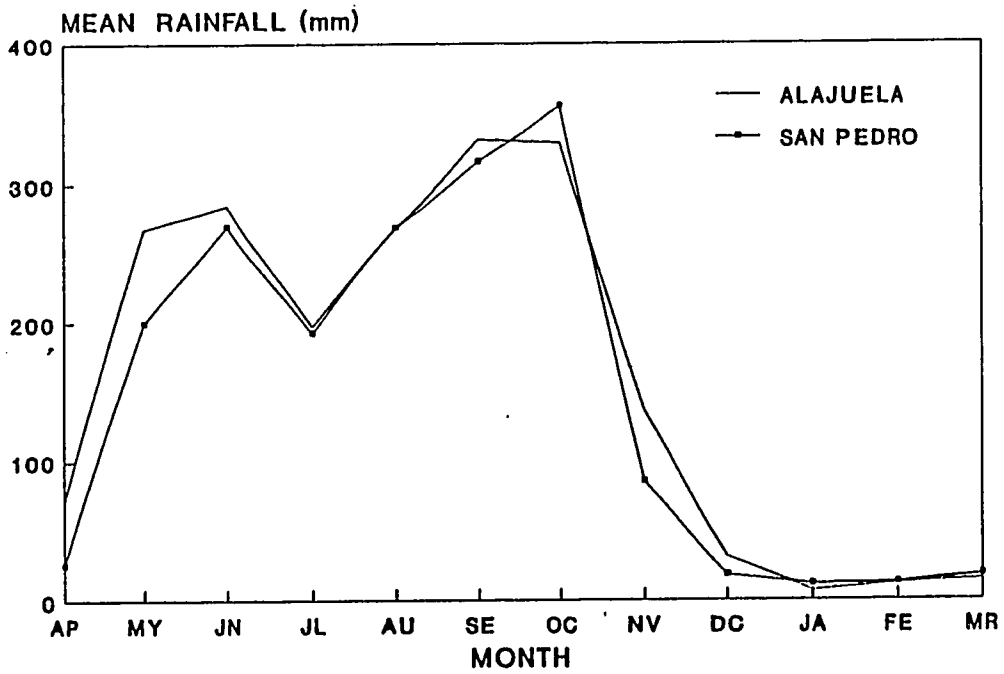
<u>Site</u>	<u>Year</u>	<u>Cropping Sequence</u>	<u>Annual yields (T/ha)</u>	<u>Mean annual yield (T/ha) (S.E.)</u>
RAINFED				
Alajuela	1988	MZ-MZ	8.6	
	1989	MZ-MZ	10.3	
	1990	MZ-MZ	8.1	
	1991	MZ-MZ	7.5	8.6 (0.6)
Alajuela	1991	SY-SY	5.7	
San Pedro	1989	SY-SY	3.8	4.8 (1.3)
Alajuela	1989	BN-BN-BN	2.9	
San Pedro	1989	BN-BN-BN	4.5	
		BN-BN-BN	3.9	3.7 (0.5)
RAINFED + IRRIGATED				
Alajuela	1989	BN-BN-BN-BN(I) <sup>1</sup>	4.3	
San Pedro	1989	BN-BN-BN-BN(I)	6.1	5.2 (0.8)

<sup>1</sup>(I)= Irrigated

1 **FIGURE CAPTION**

2

3 Figure 1. Mean monthly rainfall for the two stations of the  
4 study.



Rodulovich Fig. 1

106

1  
2  
3  
4  
5  
6  
7 Intensifying Cropping in Wet-Dry Tropical Regions.

8 II. Late Season Plantings and Irrigation.<sup>1</sup>  
9  
10

11 R. Radulovich<sup>2</sup>, J.R. Chaves and M. Díaz  
12  
13

14 Department of Agricultural Engineering, University of Costa  
15 Rica, San José, Costa Rica.  
16  
17  
18  
19  
20  
21

---

22 <sup>1</sup>Research supported by grant No. 8.337 of the Program in Science  
23 and Technology Cooperation, USAID, and by the Univ. of Costa  
24 Rica. Senior author partially supported by Cornell University.

25 <sup>2</sup>Present address: Dept. of Soil, Crop and Atmospheric Sciences,  
26 Cornell University, Ithaca, NY 14853, U.S.A.

## 1 ABSTRACT

2  
3 Radulovich, R., Chaves, J.R. and Diaz, M., 1992. Intensifying  
4 cropping in wet-dry tropical regions. II. Late season plantings  
5 and irrigation. Field Crops Res., \_\_: \_\_\_\_-\_\_\_\_.

6  
7 To maximize the effective length of the cropping season in  
8 wet-dry tropical areas, we studied if several annual crops can  
9 grow only on stored soil water after the rains end and still  
10 yield adequately. We also report on the interface between  
11 rainfed and irrigated cropping after this process of water  
12 depletion. We planted bean, cotton, maize, peanut, rice, sorghum  
13 and soybean close to the end of the rainy season and established  
14 irrigated crops after rainfed sequences in two similar regions in  
15 Costa Rica, Alajuela and San Pedro. Soils are classified as  
16 Ustic Dystropept and Thapto-Vertic Dystric Haplustand in  
17 Alajuela, and as Typic Haplustand in San Pedro. The Haplustands  
18 are deep and friable with high water holding capacity, the  
19 Dystropept has poor structure and exhibits a compacted layer  
20 beginning at 0.5 m that inhibits root penetration. Late planted  
21 rainfed crops confronted rainless periods ranging from 34 to 111  
22 d, and extracted from 96.0 to over 265.0 mm of soil water,  
23 satisfying total evapotranspirational demand from 46.7 to 100.0  
24 %. Most crops, however, had their water requirements unsatisfied  
25 from 21.9 to 53.3 %; yet, there were no generalized yield  
26 reductions, and yields averaged 82.8 % of irrigated controls. A

1 linear relationship between number of rainless days confronted by  
2 the crops and total soil water extraction ( $r = 0.73$ ;  $p < 0.01$ ) had  
3 a slope of  $1.5 \text{ mm d}^{-1}$ , indicating that crops adapted to low water  
4 supplies by reducing consumption to about one third without  
5 drastic yield reductions. An irrigated crop after each rainfed  
6 sequence increased the length of the cropping season up to 359 d.  
7 All irrigated yields obtained were medium to high. The interface  
8 between rainfed and irrigated cropping is discussed in terms of  
9 timing of irrigation in relation to preceding rainfed crop and  
10 soil water depletion strategies.

11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22  
23  
24  
25  
26

101



## 1 INTRODUCTION

2 If water is available in adequate amounts all year round,  
3 then crops can be grown  $365 \text{ d yr}^{-1}$  in most of the tropical  
4 regions of the world. This is the case for traditional  
5 plantation crops in the humid tropics, and also for any tropical  
6 region that counts either with sufficient precipitation (P)  
7 throughout the year, irrigation, or a combination of P and  
8 irrigation. The latter is becoming a most ubiquitous case, since  
9 about 60% of the tropical areas of the world have from four to  
10 eight months a year when low moisture limits crop growth  
11 (President's Sci. Adv. Com., 1967). These areas represent the  
12 wet-dry or seasonal tropics. Since the cost of irrigation is  
13 often very high, and water for irrigation is usually most scarce  
14 when and where it is needed, a continued interest exists to  
15 optimize rainfed cropping systems. Few works, however, deal with  
16 the interaction between rainfed and irrigated cropping, which  
17 would benefit the majority of the irrigated areas throughout the  
18 wet-dry tropics.

19 While increasing the efficiency of rainfed cropping it is  
20 necessary to rely to different extents on unreplenished stored  
21 soil water to grow the crop. An extreme application of this is  
22 to plant close to the end of the rainy season, growing the crop  
23 on any post-rainy season P after that plus extractable soil  
24 water. Wherever conditions permit, this can represent a powerful  
25 possibility to increasing the length of the rainfed cropping  
26 season in regions with a prolonged dry period.

110

1           The performance of crops growing only on unreplenished  
2 stored soil water depends on crop, soil and atmospheric factors.  
3 Available works for temperate and subtropical regions show that  
4 many crops can produce over 60% of the irrigated yield when grown  
5 only or mostly on unreplenished stored soil water (e.g., Hsiao et  
6 al., 1976; Faci and Fereres, 1980; Radulovich, 1984; Cox and  
7 Jolliff, 1987). For the wet-dry tropics work in this topic is  
8 rather deficient, though some recent limited evidence exists  
9 attesting to the above (Reddy et al., 1987; Shepherd et al.,  
10 1988; Sponchiado et al., 1989). Of course, whether tropical or  
11 temperate, the soil must have a large extensive and/or intensive  
12 available water holding capacity if cropping will be only on  
13 stored soil water.

14           As part of an effort to maximize the length of the rainfed  
15 cropping season, the present work reports on yields and soil  
16 water extraction of several annual crops planted late in the  
17 rainy season. Work exploring the interface between rainfed and  
18 irrigated cropping is also reported, thus taking the cropping  
19 season of wet-dry tropical regions to its maximum extent, a full  
20 year.

## 21

## 22 MATERIALS AND METHODS

23           Plantings were conducted in two stations in Costa Rica:  
24 between May, 1988 and April, 1990 in Alajuela, and between May,  
25 1989 and April, 1990 in San Pedro. These stations and  
26 methodological procedures are described in a previous companion

111

1 paper (Radulovich et al., 1992). Besides 28 new plantings  
2 reported here, the only methodological difference is that several  
3 plantings were irrigated in the 1989-90 season, thus extending  
4 the cropping season through April. All plantings were done using  
5 a randomized complete block design with three replications.

6 Irrigation water was applied weekly by surface, delivering  
7 water on a plot by plot basis, at a rate of 5.0 mm d<sup>-1</sup> in  
8 Alajuela and 4.3 mm d<sup>-1</sup> in San Pedro, fully satisfying potential  
9 evapotranspiration (ETP). Irrigation began December 16 of 1989  
10 at both sites, which was 10 d after the last rain of the post-  
11 rainy season. Crops grown, and their codes, were bean (BN),  
12 cotton (CN), maize (MZ), peanut (PN), rice (RC), sorghum (SR) and  
13 soybean (SY).

14 Three soils were used, which are classified as Ustic  
15 Dystropept and Thapto-Vertic Dystric Haplustand in Alajuela, and  
16 as Typic Haplustand in San Pedro. Soil water content was  
17 determined gravimetrically, drying the sample for 48 h at 105 C,  
18 and is reported on a volumetric basis. Selected points of the  
19 soil moisture desorption curve were obtained by use of the  
20 pressure plate technique; samples up to 100 kPa pressure were  
21 analyzed undisturbed. Field capacity (F.C.) was determined in  
22 situ by saturating the soil, covering it with a plastic (2 m x 2  
23 m) and allowing it to drain for 48 h before determining moisture  
24 content (Klute, 1986; Sollins and Radulovich, 1988). Field  
25 capacity determinations were conducted once at the beginning of  
26 the rainy season and once during the post-rainy season, in order

112

1 to avoid slow-draining waters and lateral contributions during  
2 the peak rainy periods, and to eliminate problems associated with  
3 saturating a dry soil during the dry season. To measure crop  
4 extraction of soil water, gravimetric samples were taken the same  
5 day or the day after harvesting the crop. Two randomly selected  
6 points were sampled from each of three replications for moisture  
7 desorption curves and F.C. in situ, and one to two in the crop  
8 row for gravimetric moisture content determinations. Increments  
9 sampled were 0.0-0.1 m, 0.1-0.4 m, 0.4-0.7 m, 0.7-1.0 m, and 1.0-  
10 1.3 m. The latter only for the San Pedro site. In Alajuela root  
11 growth as well as sampling was severely restricted below 1.0 m in  
12 the Haplustand (due to the buried Vertisol). No sampling was  
13 conducted below 0.7 m in the Dystropept due to a hard layer  
14 beginning at approximately 0.5 m that did not allow further  
15 deepening of roots. Deeper gravimetric sampling during selected  
16 dates at the three sites indicated no detectable water  
17 consumption. Desorption curves were done only for the 0.25 and  
18 0.5 m depths of the Dystropept in Alajuela, all other samplings  
19 were similar.

20 For plantings close to the end of the rainy season, or  
21 during the post-rainy season, crops of different length of growth  
22 cycle were planted from August through November in Alajuela, and  
23 in November in San Pedro (excepting one planting in San Pedro  
24 which was done in February, established by an irrigation intended  
25 to bring the soil to F.C.). One bean planting was also done  
26 during November of 1988 in Alajuela on the Haplustand soil. The

1 time confronted with practically no P is presented as number of  
2 rainless days, which are the days between the last rain that  
3 brought the soil to F.C. and the harvest date for each crop,  
4 according to the water balance model AQUA (Radulovich, 1987,  
5 1990). The last day with rains in 1989 was late because although  
6 a sharp decrease in P occurred in early November (marking the  
7 formal end of the rainy season), a prolonged post-rainy season  
8 lasted through December 6 at both sites.

9 The water deficit created by the rainless period was  
10 calculated for each crop by adding up daily ETP obtained from  
11 mean monthly ETP values throughout the rainless period,  
12 subtracting any P received during that period. These  
13 calculations excluded the last 10 d of each crop's cycle in order  
14 to reflect crop maturity (when transpiration becomes negligible),  
15 and represent calculated P deficit. The difference between  
16 calculated P deficit and the extracted soil water, was divided by  
17 the calculated P deficit to give % unsatisfied P deficit.

18

## 19 RESULTS

20 Soil water holding capacity data are shown in Table 1 for  
21 the two main soils of the study. Values at field capacity (FC)  
22 determined in situ were much larger than water contents at 33 kPa  
23 of pressure. The latter is traditionally considered the upper  
24 limit of soil water storage, yet the values determined in situ  
25 are on the average much closer to water contents at 10 kPa of  
26 pressure (Table 1). That F.C. is closer to -10 kPa of soil water

1 potential (SWP) than to -33 kPa has been clearly stated recently  
2 (Ahuja and Nielsen, 1990). This difference, though relatively  
3 small in soil water potential, occurs at precisely the smallest  
4 slope of the soil moisture characteristic curve and, when  
5 compounded through depth, it can account for large differences in  
6 soil water storage capacity. For these two soils, this  
7 difference represents  $123 \text{ mm m}^{-1}$ , for the Haplustand in Alajuela,  
8 and  $89 \text{ mm m}^{-1}$ , for the Haplustand in San Pedro, of the most  
9 easily available soil water. When calculating available soil  
10 water (ASW) traditionally, as the difference between water  
11 content at 33 and 1500 kPa of pressure ( $ASW_{33kPa}$ ), values for these  
12 two Haplustands were quite standard, of 105.3 and  $147.8 \text{ mm m}^{-1}$ ,  
13 respectively; yet, the ASW holding capacity using F.C. in situ as  
14 upper limit ( $ASW_{FCin situ}$ ) is much higher:  $228.2 \text{ mm m}^{-1}$  in Alajuela,  
15 and  $236.7 \text{ mm m}^{-1}$  in San Pedro (Table 1). This value of  $ASW_{FCin situ}$   
16 was of  $267.5 \text{ mm m}^{-1}$  for the Dystropept in Alajuela, which is  $40.7$   
17  $\text{mm m}^{-1}$  larger than the value obtained when using water content at  
18 33 kPa of pressure. It is questionable, however, that the  
19 compacted layer below 0.5 m in this soil allows for the  
20 establishment of true field capacity.

21 Table 2 shows that prolonged rainless periods occurred from  
22 the last rain of each season through April 20. April 20 is  
23 chosen as cut-off date for crop water extraction since all crops  
24 must be harvested shortly after that for the beginning of the  
25 upcoming rainy season. Number of days with P and total P that  
26 fell during each rainless season were minimal, with total P

115

1 amounting to less than 10% of the ETP (Table 2).

2 As shown in Table 3, late planted crops confronted from 68  
3 to 80 rainless days from the last rains to harvest in Alajuela  
4 88-89, from 34 to 111 d in Alajuela 89-90, and from 65 to 111 d  
5 in San Pedro 89-90. This produced calculated P deficits of from  
6 93.8 to 492.0 mm for the different crops--calculated excluding  
7 the last 10 days before harvest, during which ET is assumed  
8 negligible (Table 3).

9 To cope with the P deficit, crops extracted substantial  
10 amounts of soil water, with values ranging from 96.0 mm for a  
11 maize crop that was only 41 d (up to harvest) into the rainless  
12 season, to over 260 mm for a cotton planting in Alajuela 89-90  
13 and a soybean planting in San Pedro (Table 3). All crops  
14 extracted water down to 1.0 m in Alajuela 89-90, and down to 1.3  
15 m in San Pedro 89-90. Crops extracted 130.1 and 166.7 mm down to  
16 0.7 m in the Dystropept soil in Alajuela 88-89 (Table 3), and  
17 this represents extractions of 185.9 and 238.1 mm m<sup>-1</sup>,  
18 respectively.

19 Even though no wilting was ever observed, Table 4 shows, for  
20 grouped data, that extraction proceeded below the "permanent  
21 wilting point" set at -1.5 MPa of soil water potential,  
22 particularly for the high extraction group. When extraction  
23 amounts are shown as % depletion (traditionally termed "depletion  
24 coefficient"), these values are in general much larger than or  
25 close to 100% using  $ASW_{33kPa}$ , and more within limits when using  
26  $ASW_{fc\text{ in situ}}$ , though still >100% for several cases (Table 4).

116

1           The unsatisfied P deficits ranged from 0.0% for a few crops  
2 to over 50.0% (Table 3). Yet, no generalized yield reductions  
3 were measured when comparing yields against irrigated controls or  
4 against reference unstressed yields. Only three of the 21 yields  
5 reported were relatively low, between 60.1 and 69.5%; all other  
6 18 yields were from about 80.0 to 100.0% (Table 3). While the  
7 overall mean of relative rainfed yields was of 90.5 %, that of  
8 yields with direct irrigated controls was of 82.8 % (SE = 4.1).  
9 This difference is the reflection of higher yields obtained under  
10 controlled irrigated conditions than those used as reference  
11 yields from Radulovich (1992).

12           A generalized relationship between number of rainless days  
13 and total extracted soil water is shown in Figure 1. A highly  
14 significant correlation coefficient ( $p < 0.01$ ) yielded an  $r^2 = 0.54$ ,  
15 indicating that over half of the variability in total soil water  
16 extraction is explained by number of rainless days for the seven  
17 crops in the study. The slope of the regression equation is 1.5  
18 mm d<sup>-1</sup>, which is obtained for the range of 24 to 101 rainless  
19 days with active crop growth in record (i.e., excluding the last  
20 10 d before harvest). Grouping all seven crops into one  
21 regression analysis is done only to obtain a general  
22 relationship. Analysis of water extraction on a per crop basis  
23 is beyond the scope of this paper.

24           Table 5 shows data for the irrigated plantings implemented  
25 after the rainfed sequences with the purpose of taking the  
26 cropping season to its maximum extent. The sequence previous to

117



1 each of these irrigated plantings is shown (data from companion  
2 paper, Radulovich et al., 1992). All irrigated yields obtained  
3 are medium to high, and some are very high, such as for BN-BN-BN-  
4 SRi and for MZ-MZ-BNi (Table 5). Most harvest dates went well  
5 into April, when it is time to prepare for the first planting of  
6 the upcoming rainy season. Length of cropping seasons thus  
7 obtained, adding each irrigated planting to its previous rainfed  
8 sequence, ranged from 328 to 357 d in Alajuela, and were of 349 d  
9 and 350 d in San Pedro. Number of days during which it was  
10 irrigated varied greatly in function of the crop species and the  
11 preceding rainfed sequence, and ranged from 62 to 114 d in  
12 Alajuela, and from 58 to 120 d in San Pedro (Table 5).

13

#### 14 DISCUSSION

15 The results related to available soil water (Tables 1 and 4)  
16 indicate the need to consider a wider range of available soil  
17 water values for some of the soils encountered in the tropics,  
18 both for rainfed and irrigated agriculture. This is particularly  
19 so when considering water content at field capacity in situ as  
20 the maximum storage value and not at 33 kPa of pressure.

21 A most interesting aspect was the large ability of the seven  
22 crops tested to extract soil water, down to 1.0 m in the  
23 Haplustand soil in Alajuela, and to at least 1.3 m in San Pedro  
24 (Table 3). This in spite of using local cultivars, apparently  
25 not particularly selected for water deficit situations. It has  
26 been shown that crops grown on fertile soils develop deep rooting

1 systems, thus being able to cope much better with drought  
2 situations by extracting soil water (e.g., Sponchiado et al.,  
3 1989; Payne et al., 1990). This appears to be the case here, and  
4 it is clear that the approach to relying on stored soil water  
5 must consider different aspects of crop well-being, with special  
6 attention to root growth.

7 That there were no generalized yield reductions in spite of  
8 substantially high unsatisfied P deficits may be due to the fact  
9 that, after the initial period of rainless days (not accounted  
10 for here since the smallest datum in Table 3 is 34 rainless days,  
11 equivalent to 24 d in Fig. 1), crops adjusted their soil water  
12 extraction rate to a value of around  $1.5 \text{ mm d}^{-1}$ , well below ETP,  
13 which is about  $5 \text{ mm d}^{-1}$  (Table 2) but apparently sufficient to  
14 maintain adequate reproductive development. For this, it might  
15 prove essential to have a period of active vegetative growth to  
16 establish crop size for adequate reproductive ability before the  
17 crop enters drought physiology in the rainless period. This was  
18 the case for most of the rainfed plantings reported.

19 Number of rainless days was the dominating parameter in  
20 explaining the variability in soil water extraction data (Fig.  
21 1). Also, all crops yielded adequately for a variety of number  
22 of rainless days. This speaks in favor of lessening sharp  
23 distinctions between crops, such as deficit resistant or non-  
24 resistant, at least for the conditions reported here. Supporting  
25 this argument, over 70 % of the variability of relative regional  
26 yields of bean, maize and rice has been explained by water stress

119

1 using a single quantitative relationship (Radulovich, 1990).

2 The soils used in this study are fairly deep, excepting the  
3 Dystropept in Alajuela, and have large water holding capacity  
4 (Table 1), and the two stations are not in the most drought-  
5 prone regions of the Pacific coast of Central America. However,  
6 it can be assumed that under less favorable circumstances  
7 proportional decreases in yields should be expected. Even so,  
8 and considering the very low yields of most annual staple crops  
9 in these regions (e.g., 1.5 T ha<sup>-1</sup> for maize and 0.7 T ha<sup>-1</sup> for  
10 bean), crops grown by this method could take drastic yield losses  
11 and still turn out a yield that is socioeconomically viable.

12 Taking the cropping season to its full length by irrigating  
13 during the rainless season (Table 5), represents another attempt  
14 to elucidate the productive potential of these tropical regions,  
15 traditionally considered by some to be quite low. The connection  
16 between rainfed and irrigated cropping can be optimized in  
17 several manners. First, optimum use of rainfall water stored in  
18 the soil should be done (i.e., an extent of use which allows  
19 desired yield levels to be obtained). According to irrigation  
20 capabilities and water supplies, this depletion scheme can be  
21 followed by irrigated crops. Another option is to begin a crop  
22 as rainfed during the rainy season continuing it with irrigation  
23 after a period of depletion. After harvesting this crop, another  
24 crop may be grown, either fully irrigated or just irrigating it  
25 early, letting it enter reproduction and mature mostly on stored  
26 soil water after that. These different options relate to freeing

120

1 irrigation water and equipment for other crops, or to turning on  
2 and off irrigation for different fields through the season with a  
3 larger degree of flexibility. Thus, by combining crop and  
4 irrigation choices with the preceding rainfed sequence irrigation  
5 can be optimized according to each set of conditions.

6 Understanding the limitations to high and sustained  
7 productivity in tropical regions has not been done to present,  
8 except for the plantation type of cropping systems. By doing it,  
9 it may well be that an unsuspectedly high potential is discovered  
10 and, far more important, realized. Highly efficient agriculture  
11 may thus become the rule rather than the exception in tropical  
12 regions, and by it signifying a source of wealth for otherwise  
13 poor countries.

14  
15 **REFERENCES**

16 Ahuja, L.R. and Nielsen, D.R., 1990. Field soil-water relations.

17 In: B.A. Stewart and D.R. Nielsen (eds), Irrigation of  
18 Agricultural Crops. ASA Agronomy Series No. 30, Madison,  
19 Wisconsin, U.S.A. pp. 143-190.

20 Cooper, P.J.M., Gregory, P.J., Tully, D. and Harris, H.C., 1987.

21 Improving water use efficiency of annual crops in the  
22 rainfed farming systems of West Asia and North Africa.  
23 Expl. Agric., 23:113-158.

24 Cox, W.J. and Jolliff, E.H., 1987. Crop-water relations of  
25 sunflower and soybeans under irrigated and dryland  
26 conditions. Crop Sci., 27:553-557.

121

- 1     Faci, J.M. and Fereres, E., 1980. Responses of grain sorghum to  
2         variable water supply under two irrigated frequencies.  
3         Irrig. Sci., 1:149-159.
- 4     Hsiao, T.C., Fereres, E., Acevedo, E. and Henderson, D.W., 1976.  
5         Water stress and dynamics of growth and yield of crop  
6         plants. In: Water and Plant Life, Ecol. Studies Vol. 19,  
7         Springer Verlag, Berlin. pp. 281-305.
- 8     Klute, A. (ed)., 1986. Methods of Soil Analysis, Part 1.  
9         Agronomy Monograph Series, No. 9, ASA, Madison, WI.
- 10    Payne, W.A., Wendt, C.W. and Lascano, R.J., 1990. Root zone water  
11        balances of three low-input millet fields in Niger, West  
12        Africa. Agron. J., 82:813-819.
- 13    President's Science Advisory Committee, 1967. Report on the World  
14        Food Problem, Vol. 2. The White House, Washington, D.C.
- 15    Radulovich, R., 1984. Reproductive Behavior and Water Relations  
16        of Cotton. Ph.D. Diss., Univ. of California, Davis. 138 pp.
- 17    Radulovich, R., 1987. AQUA, a model to evaluate water deficits  
18        and excesses in tropical cropping. I. Basic assumptions and  
19        yield. Agric. For. Meteorol., 40:305-321.
- 20    Radulovich, R., 1989. Optimization of rainfed tropical cropping  
21        in semi-dry areas: a case study. Agric. Water Manage.,  
22        16:337-352.
- 23    Radulovich, R., 1990. AQUA, a model to evaluate water deficits  
24        and excesses in tropical cropping. II. Regional yield  
25        prediction. Agric. For. Meteorol., 52:253-261.
- 26    Radulovich, R., 1992. Intensifying cropping in wet-dry tropical
- 124

- 1 regions. III. Yield potential and analysis of multiple  
2 yields. (Submitted).
- 3 Radulovich, R., Chaves, J.R., Sanchez, F., Barboza, R. and  
4 Bertsch, S., 1992. Intensifying cropping in wet-dry  
5 tropical regions. I. Sequential rainfed cropping.  
6 (Submitted).
- 7 Reddy, B.V.S., Seetharama, N. and House, L.R., 1987. Sorghums  
8 in the post-rainy season. I. Effect on irrigation and date  
9 of sowing on the grain and stover yields of diverse  
10 cultivars. *Expl. Agric.*, 24:31-36.
- 11 Rojas, O.E., 1985. Estudio agroclimático de Costa Rica. IICA,  
12 Serie Public. Misceláneas No. 617. San José, Costa Rica. 177  
13 pp.
- 14 Shepherd, K.D., Gregory, P.J., Woodhead, T., Pandey, R.K. and  
15 Magbujos, E.C., 1988. Growth of soyabean (Glycine max) and  
16 mungbean (Vigna radiata) in the post-monsoon season after  
17 upland rice. *Expl. Agric.*, 24:433-441.
- 18 Sollins, P. and Radulovich, R., 1988. Effects of soil physical  
19 structure on solute transport in a weathered tropical soil.  
20 *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 52:1168-1172.
- 21 Sponchiado, B.N., White, J.W., Castillo, J.A. and Jones, P.G.,  
22 1989. Root growth of four common bean cultivars in relation  
23 to drought tolerance in environments with contrasting soil  
24 types. *Expl. Agric.*, 25:249-257.
- 122

Table 1. Soil water holding capacity and available soil water.

Depth (m)	Volumetric Water Content (%) at				Available Soil Water <sup>1</sup> (% vol. water content)	
	10 kPa	33 kPa	1.5 MPa	F.C. in situ	33 kPa	F.C. in situ
ALAJUELA (Thapto-Vertic Dystric Haplustand)						
0.0-0.1	47.5 (2.0)	37.2 (0.9)	24.9 (0.6)	46.3 (1.0)	12.3	21.5
0.1-0.4	44.9 (2.7)	37.0 (0.6)	30.1 (0.4)	47.4 (2.5)	6.9	17.3
0.4-0.7	53.9 (3.1)	41.1 (3.7)	27.9 (0.7)	59.2 (7.5)	13.1	31.3
0.7-1.0	57.4 (2.9)	48.1 (1.2)	37.1 (0.3)	57.4 (5.2)	11.0	20.3
Total Available Soil Water (mm/m)					105.3	228.2
SAN PEDRO (Typic Haplustand)						
0.0-0.1	47.0 (0.1)	41.8 (0.1)	24.6 (3.1)	40.4 (0.9)	17.2	15.8
0.1-0.4	43.4 (2.8)	30.1 (0.7)	15.2 (2.2)	42.5 (1.4)	14.9	27.3
0.4-0.7	34.2 (1.9)	28.0 (8.8)	12.6 (2.0)	40.4 (1.9)	15.4	27.8
0.7-1.0	39.0 (0.5)	33.2 (0.2)	18.1 (2.9)	42.0 (3.2)	15.1	23.9
1.0-1.3	41.0 (0.1)	32.5 (0.9)	18.4 (1.7)	36.7 (6.3)	12.9	18.3
Total Available Soil Water (mm/m)					147.8	236.7

<sup>1</sup>ASW determined using water content at either 33 kPa of pressure or F.C. situ as upper limit and at 1.5 MPa of pressure as lower limit.

Table 2. Characteristics of rainless periods.

<u>Site - year</u>	<u>(1) Last day of post-rainy season</u>	<u>Number of days with P<sup>1</sup> from (1)</u>	<u>Cumulative P (mm) from (1) to 04/20</u>	<u>Daily P from (1) to 04/20 (mm d<sup>-1</sup>)</u>	<u>Daily ETP<sup>2</sup> from (1) to 04/20 (mm d<sup>-1</sup>)</u>
Alajuela 1988-89	11/06	8	45.0	0.3	4.9
Alajuela 1989-90	12/06	0	21.2	0.2	4.9
San Pedro 1989-90	12/06	7	43.1	0.3	4.3

<sup>1</sup>P = precipitation in this and subsequent tables.

<sup>2</sup>ETP = potential evapotranspiration, from Rojas (1985).



Table 3. Characteristics of crops grown for a substantial portion of life cycle on stored soil water. Some data for irrigated controls included.

Crop	Plant. date	Harv. date	Yield (kg/ha) (SE)	# of Rain-less days	Calculated P Deficit (mm)	Extracted Soil water (mm)	Unsatisfied P deficit (%)	% Yield
ALAJUELA, 1988-89								
BN(T)	10/27	01/17	--- <sup>1</sup>	68	214.9	130.1	39.5	---
MZ(T)	10/27	01/17	--- <sup>1</sup>	68	262.9	166.7	36.6	---
BN(T)	11/11	01/30	1404.5( 75.0)	80	271.2	252.3	7.0	100.0 <sup>2</sup>
ALAJUELA, 1989-90								
CN	08/01	02/03	1756.2 <sup>3</sup>	59	215.0	190.8	11.3	100.0 <sup>2</sup>
RC	08/22	01/09	3733.8 <sup>3</sup>	34	93.8	155.1	0.0	100.0 <sup>2</sup>
MZ(D)	09/14	01/16	3266.5 <sup>3</sup>	41	127.4	96.0	24.7	93.3 <sup>2</sup>
SY	09/18	01/18	3427.9 <sup>3</sup>	43	137.0	152.4	0.0	100.0 <sup>2</sup>
CN	09/19	03/06	1167.8 <sup>3</sup>	90	377.0	211.2	44.0	100.0 <sup>2</sup>
PN	09/19	02/24	2995.8 <sup>3</sup>	80	323.0	150.7	53.3	100.0 <sup>2</sup>
SR	09/20	02/01	4596.8 <sup>3</sup>	57	204.2	130.3	36.2	100.0 <sup>2</sup>
CN	10/19	03/27	--- <sup>1</sup>	111	492.0	265.6	46.0	---
SR	11/18	03/27	1802.9 <sup>3</sup>	111	492.0	237.5	51.7	60.1 <sup>2</sup>
SY	10/19	02/08	2532.7 <sup>3</sup>	64	238.9	243.3	0.0	100.0 <sup>2</sup>
MZ(D)	10/19	02/24	2976.8 <sup>3</sup>	80	322.9	195.9	39.3	85.1 <sup>2</sup>
SR	10/19	02/27	4856.9 <sup>3</sup>	83	339.1	169.8	49.9	100.0 <sup>2</sup>
BN(H)	10/25	01/09	1346.4( 57.4)	34	95.5	157.3	0.0	>100.0 <sup>4</sup>
BN(H) i	10/25	01/09	1079.3(101.0)					
MZ(D)	10/25	02/27	3528.9(402.3)	83	339.1	215.1	36.6	82.2 <sup>4</sup>
MZ(D) i	10/25	02/27	4290.8( 33.2)					
SAN PEDRO, 1989-90								
BN(B)	11/10	03/03	2450.9 <sup>3</sup>	87	319.8	195.1	39.0	84.2 <sup>4</sup>
BN(B) i	11/10	03/03	2909.9( 75.5)					
BN(H)	11/10	02/09	1618.6 <sup>3</sup>	65	225.3	150.4	33.2	91.1 <sup>4</sup>
BN(H) i	11/10	02/09	1777.4(172.9)					
BN(S)	11/10	02/19	2188.1 <sup>3</sup>	75	265.8	203.8	23.3	91.0 <sup>4</sup>
BN(S) i	11/10	02/19	2405.2(421.3)					
BN(T)	11/10	02/19	1591.6 <sup>3</sup>	75	265.8	174.3	34.4	69.5 <sup>4</sup>
BN(T) i	11/10	02/19	2290.3(344.6)					
SY	11/13	03/27	1691.4 <sup>3</sup>	111	427.5	264.6	38.1	79.5 <sup>4</sup>
SYi	11/13	03/27	2128.4(260.8)					
BN(H)	11/20	02/19	1504.8 <sup>3</sup>	65	265.0	158.5	40.2	100.0 <sup>2</sup>
BN(H) <sup>5</sup>	02/21	04/30	631.2(150.2)	74	247.2	193.0	21.9	64.9 <sup>6</sup>

<sup>1</sup>No yield data available. The two 1988 crops were grown on the Dystropept soil.

<sup>2</sup>Relative yields based on reference yields (Radulovich, 1992).

<sup>3</sup>Yields already presented in a companion paper (Radulovich et al., 1992).

<sup>4</sup>Relative yield based on irrigated control immediately following.

<sup>5</sup>Planting brought up and grown with one irrigation to field capacity.

<sup>6</sup>Irrigated control for %yield in Table 5.

Table 4. Water extraction, soil water potential (SWP) and depletion coefficients at harvest, for selected groups of crops from the two stations. (Alajuela 89-90: low extraction is mean of four crops extracting total of 157.0 mm (SE=4.4); high extraction is mean of four crops extracting total of 239.4 mm (11.2). San Pedro: mean of four bean cultivars planted 11/10). Data reported are for Haplustands.

	Depth (m)				
	<u>0.0-0.1</u>	<u>0.1-0.4</u>	<u>0.4-0.7</u>	<u>0.7-1.0</u>	<u>1.0-1.3</u>
ALAJUELA 89-90, low extraction group:					
Water extracted (%)	21.9 (0.8)	13.7 (0.6)	20.7 (0.5)	10.7 (0.8)	
SWP (MPa)	<-1.50 (0.13)	-0.39 (0.12)	-0.07 (0.01)	-0.11 (0.02)	
Depletion Coeffic. (%) <sup>1</sup> :					
33 kPa	178.1	198.6	158.0	97.3	
F.C. <u>in situ</u>	101.9	79.2	66.1	52.7	
ALAJUELA 89-90, high extraction group:					
Water extracted (%)	29.2 (1.5)	21.7 (1.2)	27.1 (1.1)	21.3 (1.1)	
SWP (MPa)	<-1.50 (0.30)	<-1.50 (0.73)	-0.43 (0.18)	<-1.50 (0.22)	
Depletion Coeffic. (%):					
33 kPa	237.4	314.5	206.9	193.6	
F.C. <u>in situ</u>	135.8	125.4	86.6	104.9	
SAN PEDRO 89-90, four bean cultivars:					
Water extracted (%)	18.7 (1.6)	18.1 (1.2)	14.1 (0.3)	14.3 (0.8)	7.7 (2.0)
SWP (MPa)	<-1.50 (0.27)	-0.28 (0.06)	-0.04 (0.01)	-0.31 (0.03)	-0.27 (0.09)
Depletion Coeffic. (%):					
33 kPa	108.7	121.5	91.6	94.7	59.7
F.C. <u>in situ</u>	118.4	66.3	50.7	59.8	42.1

<sup>1</sup>Depletion coefficients calculated dividing extracted soil water by available soil water, which was calculated using two different upper limits as explained for Table 2.

Table 5. Irrigated plantings after rainfed sequential plantings. (Data on each row corresponds to the last, bold faced planting of each sequence shown. Rainfed data from Table 3, Radulovich et al., 1991).

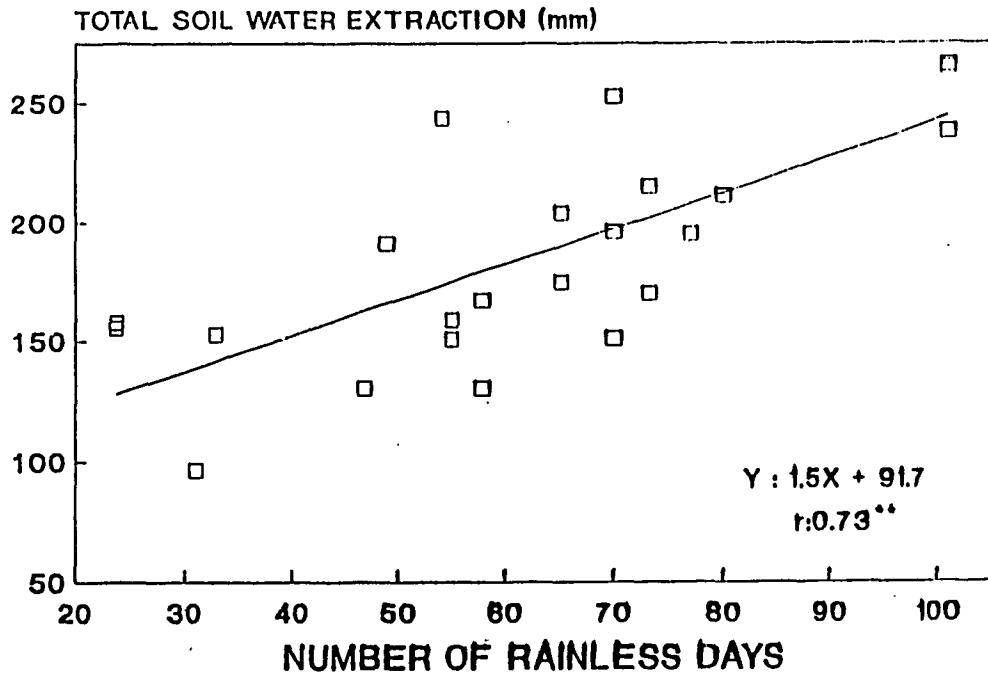
<u>Cropping sequence</u> <sup>1</sup>	<u>Planting date</u>	<u>Harvest date</u>	<u>Yield (SE) (kg/ha)</u>	<u>Length of cropping season (d)</u>	<u>Number of irrigated days</u>
ALAJUELA, 1989-90					
BN-BN(T)-SYi <sup>2</sup>	11/21/89	03/27/90	1802.9 (456.3)	328	86
BN-PN-MZi	12/19/89	04/27/90	4378.8 (282.1)	359	114
BN-MZ-BNi	01/03/90	03/27/90	1160.3 (116.4)	328	68
BN-BN-BN-BNi	01/03/90	03/27/90	1345.4 ( 99.2)	328	68
BN-MZ-BN(T)i	01/03/90	04/03/90	1659.6 (187.6)	335	75
BN-MZ-BN(B)i	01/03/90	04/03/90	1567.1 (386.8)	335	75
BN-MZ-BN(S)i	01/03/90	04/03/90	1657.1 (268.6)	335	75
BN-BN-BN-SRi	01/03/90	04/25/90	6309.4 (398.0)	357	97
BN-CN-BNi	02/07/90	04/25/90	1963.2 (304.1)	357	62
MZ-SY-BNi	01/29/90	04/17/90	1573.3 (144.4)	349	63
MZ-MZ-BNi	01/29/90	04/17/90	2191.7 (399.0)	349	63
MZ-SR-BNi	02/07/90	04/25/90	1703.8 (311.8)	357	63
SAN PEDRO, 1989-90					
BN-BN-BN-ENi	02/13/90	04/27/90	1645.1 ( 46.6)	349	58
BN-BN-BN(T)i-BNi	02/21/90	04/30/90	973.3 ( 70.6)	350	120

<sup>1</sup>Data are for the last planting of the sequence in each line. All BN are BN(H) unless noted.

<sup>2</sup>"i" stands for irrigated.

1 **FIGURE CAPTIONS**

2 Figure 1. Total extracted soil water in function of number of  
3 rainless days confronted by the crops up to 10 d  
4 before harvest. Data are from Table 3, rainfed crops.  
5 (\*\* significant at  $p < 0.01$ ).



1 WATER-BASED MANAGEMENT OF SUSTAINABLE RAINFED CROPPING SYSTEMS

2 Ricardo Radulovich

3  
4  
5  
6  
7 INTRODUCTION

8 Sustainability of cropping systems is both environmental and  
9 socioeconomic. Any sustainable cropping system within a region  
10 must be, then, a viable economic situation that allows farmers to  
11 live on it decently for years to come, not just subsist on it.  
12 Also, sustainable cropping systems must ideally produce  
13 considerable surpluses to act as motors of economic development,  
14 particularly in less-developed countries.

15 The paradox is clear, the solutions are less so: On one  
16 hand, sustainable cropping systems must be based on an  
17 equilibrated balance with their environment and with the  
18 consumers of the produce. This generally means land protection  
19 measures and lowest possible use of agrochemicals. On the other  
20 hand, sustainable cropping systems must be of such high  
21 productivity so as to be adequate generators of income for the  
22 farmer and of wealth for each nation.

23 Within an environmentally sound framework, the three main  
24 roles of agriculture should also apply to sustainable tropical  
25 cropping: a) provide food and employment to the rural population;  
26 b) produce food and raw materials for urban population and

1 industries; and, c) contribute directly to regional and national  
2 economic development through export. In fact, as it is the case  
3 in the more economically developed societies, the goal of  
4 tropical agriculture should be to cater only to the two latter  
5 roles, while the first one would tend to disappear. The  
6 socioeconomic advancement of the rural population beyond  
7 peasantry can be justified in economic terms, in as much as this  
8 population becomes more important as consumer of goods generated  
9 elsewhere. Moreover, it is only logical, and perhaps also the  
10 only ethical alternative, that the goal of agricultural research  
11 and development should be the eradication of misery and not only  
12 its containment.

13

#### 14 **Intense Yet Sustainable Tropical Cropping**

15 Although agriculture may have originated in the tropics,  
16 modern agriculture evolved in the temperate regions. The  
17 paradigm ruling crop production in the temperate regions is the  
18 optimization of the yield of a single crop per year--this because  
19 low temperature limitations only allow to grow one crop per year  
20 in temperate regions. The most generalized characteristic of  
21 tropical regions is the little variation of mean temperatures  
22 throughout the year, allowing for all year-round cropping. Thus,  
23 a more proper paradigm for tropical cropping should be: to  
24 optimize crop production in terms of the length of the cropping  
25 season. Provided there is water, the tropical cropping season  
26 can involve a number of plantings, by any or a combination of the

1 numerous multiple cropping systems available or yet to be  
2 created, namely inter- and/or sequential cropping (e.g.,  
3 Papendick et al., 1976). Ideas about emphasizing all-year  
4 cropping in the tropics are not new (e.g., Sanchez, 1976; Soria,  
5 1976). As contended later, the intensification of cropping in  
6 the tropics should not necessarily bring about negative  
7 environmental consequences, because several features of tropical  
8 cropping at present differ from temperate cropping, particularly  
9 in relation to level of inputs used.

10 As shown in Figure 1 for maize yields in Central America,  
11 average yields of most staple crops in the tropics are much lower  
12 than can be obtained, in the same region, by commercial systems  
13 using available technology. Also, actual maize yields are much  
14 lower yet than yields that were commonly obtained at experiment  
15 stations over two decades ago (Radulovich, 1991). As presented  
16 by Soria (1976) for Central America, the main cause for this  
17 yield gap is the low level of technology employed by the farmers.  
18 In the case of maize, yields for tropical countries in Africa and  
19 Latin America average  $1.25 \text{ T ha}^{-1}$  (FAO, 1989), while for 20 yr  
20 ago Soria (1976) considered  $4.0 \text{ T ha}^{-1}$  a yield level obtainable  
21 by commercial farms using available technology. The problem of  
22 the yield gap between and within developed and developing  
23 countries can be seen in Figure 2 for maize yield data. The  
24 yield gap between experimental and commercial yields, expressed  
25 as ratios, is very small (1.1:1) in the U.S.A., while it is very  
26 large (5.3:1) in tropical developing countries. Also, a large

1 yield gap (5.8:1) exists between commercial yields in the U.S.A.  
2 and the tropical countries. However, a very small yield gap  
3 (1.2:1) exists between experimental yields in the U.S.A. and in  
4 developing tropical countries (Fig. 2).

5 Without wishing to imply that the target of commercial  
6 yields in tropical countries should be the levels of experimental  
7 yields, the comparison shown in Figure 2 does allow to believe  
8 there is a great unexploited yield potential in tropical  
9 countries. This is evident by the large yield gap between  
10 experimental and commercial yields, which is very small in  
11 developed countries where technology is applied. With the  
12 application of technology, an increase in the level of inputs  
13 used is needed in order to bring yields up to an economically  
14 sustainable level.

15 A basic premise may be established at this point: the low  
16 productivity of tropical cropping is not a cause but a product of  
17 underdevelopment. This premise allows us to look at productivity  
18 problems in the tropics under the assumption that these can be  
19 solved. Many examples of high productivity in the tropics exist  
20 to date, besides those from plantation cropping. These cases  
21 appear to be intimately--and logically--connected to economic  
22 situations. For example, the case of the Cerrado in Brazil,  
23 where medium- to large-scale commercial soybean yields are  
24 similar to those of the U.S.A., with the difference that two or  
25 more crops can be grown per year (see Abelson and Rowe, 1987); or  
26 the fact that productivity of cassava is high in countries that



1 industrialize or export it, such as Brazil and Thailand, and low  
2 where it is grown as a staple crop (Norman et al., 1984).

3 It is normally thought that sustainability is achieved by  
4 decreasing input use. In a typified yield response curve (Figure  
5 3), this is depicted in a move from point a to point b. Such  
6 move would be the case for a high-technology scheme, typical of  
7 developed countries and of not few tropical cropping schemes  
8 (particularly of plantation-type crops). The move from point a  
9 to point b, in this simplified representation, produces little  
10 decreases in yield per each decrease in input level. In the case  
11 of low-input systems, typical of the low-yielding cropping  
12 schemes in the tropics, even a small increase in inputs, such as  
13 from point c to point d may signify a large increase in yield,  
14 and still the level of inputs at point d would be below those  
15 termed sustainable in high-technology systems (Fig. 3;  
16 Radulovich, 1991). Following this line of reasoning, the  
17 optimization of tropical cropping in terms of more than one  
18 medium level yield per rainfed season may conciliate with  
19 environmental sustainability, particularly in comparison to high  
20 technology schemes.

### 21 22 **Water as Limiting Factor**

23 For each technology level employed, the major limitation to  
24 the length and full use of the cropping season in the tropics is  
25 water (by itself a major factor controlling crop production in  
26 any climate, but the most important one in the tropics). Water

1 stress, both as deficits and excesses has explained from 60 to 90  
2 % of regional yield variability of bean, maize and rice in Costa  
3 Rica (Radulovich, 1987a, 1990). It has also been postulated that  
4 as a successful technological package for the rainfed production  
5 of a crop becomes widely used, dependency of regional yield  
6 variability on water increases (Radulovich, 1990). This happens  
7 because as other yield-affecting variables are controlled (such  
8 as pests and soil fertility) and thus their effect is decreased,  
9 the proportion of variability due to water stress increases.

10 Approximately 75% of the tropical regions exhibit at least  
11 4.5 humid months during which rainfed production is possible, and  
12 over 50% exhibit more than 7 humid months per year (President's  
13 Science Adv. Comm., 1967). This represents thousands of millions  
14 of hectares on which from one to several rainfed crops can be  
15 grown per year. Encouraging as this may sound, at least 75% of  
16 the tropical areas exhibit at least 2.5 to 5 months when  
17 precipitation is insufficient for adequate crop growth, and these  
18 semi-humid and wet-dry regimes usually have dry spells and excess  
19 water conditions during the rainy seasons. While many water  
20 excess problems remain to be solved, irrigation for water  
21 deficits is a limited option both because of the high investment  
22 (which requires high returns and therefore intensive input use)  
23 and because water for irrigation is usually scarcest when and  
24 where it is needed most. Thus, rainfed agriculture must be  
25 improved, as it represents the most--if not the only--viable  
26 option for the development of tropical agriculture. This means

1 improving water use efficiency in its broadest definition,  
2 including optimizing the interaction between rainfed and  
3 irrigated cropping.

4 The large yield variability induced by water stress,  
5 expressed as vagaries of rainfall which can be from too scarce or  
6 absent when needed, to extremely high and long-lasting, creates a  
7 large risk-aversion on the part of farmers. As a result,  
8 traditional annual rainfed cropping schemes in the tropics are,  
9 at present, very timid, and long portions of rainfed seasons in  
10 wet-dry, semi-humid and humid climates are left unused because of  
11 rainfall uncertainties. Another factor, presumably born from the  
12 latter, that complicates the full use of the rainfed growing  
13 season, is a lack of technology, namely: a) to adequately operate  
14 under humid climatic conditions; and, b) for the size and other  
15 characteristics of the small farmer in the tropics. At this  
16 point, it appears clear that rainfall uncertainties must be dealt  
17 with first. But to be fully effective, this should be  
18 accompanied or closely followed by the development of technology  
19 and machinery for cropping, harvesting, and postharvesting  
20 operations for small-medium farms and under humid conditions.

#### 21 22 **WATER-BASED MANAGEMENT SYSTEMS**

23 A case study developed for wet-dry regions of Costa Rica is  
24 described, which represents an effort to intensify rainfed  
25 tropical cropping based on the fore-mentioned discussion. This  
26 is followed by a brief survey of methods with similar approaches

1 being developed and applied in other parts of the world.  
2 Concluding this section, the different components of a water-  
3 based management system are summarized.

4

#### 5 **A Case Study for Wet-Dry Regions**

6 In view of the need to improve rainfed crop production, an  
7 approach to intensifying in time and managing tropical cropping  
8 systems based on water was developed by Radulovich and co-workers  
9 (Radulovich, 1987a and b, 1989a and b, 1990, 1991; Carmona and  
10 Radulovich, 1988; Radulovich et al., 1989). The objectives of  
11 this approach are to maximize length of the rainfed cropping  
12 season and to increase and stabilize yields within the  
13 sustainable frame described earlier. It basically consists of  
14 several steps, which can be broadly summarized as:

- 15 a) characterizing the water-related aspects of a region and
- 16 devising strategies to cope with them;
- 17 b) designing cropping schemes according to these
- 18 characteristics and strategies; and,
- 19 c) implementing these cropping schemes and managing them
- 20 using computerized methodology.

21 The computerized methodology uses pre-season methods that  
22 consist of traditional precipitation (P) analysis. This allows  
23 to develop probabilistic expectations regarding each critical  
24 period. Also used are in-season methods, which represent a  
25 dynamic approach to crop management, based both on current (real-  
26 time) P and on certain predictive abilities that allow to have

1 late-season P expectancies from early in the season.

2 Work reported here has been conducted in Costa Rica, Central  
3 America, from 1985 through the present. Results shown emphasize  
4 the wet-dry (or seasonal) climatic regimes of the North-Central  
5 Pacific and Central regions of Costa Rica, which are similar to  
6 millions of hectares along the Pacific coast of Central America  
7 (IPHG, 1976). The rainfall regime is six to eight months long,  
8 usually from May to November, and is followed by a clearly  
9 defined rainless season. Annual P values range from 1,200 to  
10 over 2,000 mm (IPGH, 1976). Periods of reduced P, called  
11 "veranillos" or little summers, occur between June and August  
12 (Ramirez, 1983, Carmona and Radulovich, 1988), thus the P pattern  
13 is semi-bimodal. Veranillos vary in duration and intensity both  
14 spatially and temporally, and can be from non-existent or of only  
15 a few rainless days, to 30 or more consecutive rainless days  
16 depending on location and year. The rainy season lasts  
17 approximately 180 d, plus 10 to 20 d pre-rainy season and 0 to 20  
18 d post-rainy season. As with most tropical regions at a given  
19 latitude, temperature is dictated by altitude and mean monthly  
20 values vary little throughout the year. Figure 4 shows mean  
21 monthly P and temperature values for two stations in Costa Rica,  
22 depicting the type of climate just described. It can be seen  
23 that the rainfall pattern is not dissimilar to patterns found in  
24 many seasonal tropical regions of the world.

25 Traditionally, in these regions of Costa Rica the rainy  
26 season is either monocropped with only one long-cycle crop (e.g.,

1 maize, rice), or intercropped with a maize-bean relay system,  
2 which spans no more than 200 d. The latter figure should then be  
3 considered the maximum length of the rainfed cropping season as  
4 currently practiced. Planting is done about a month after the  
5 rainy season starts, and at the end of the season a mature crop  
6 is in the fields ready for in situ grain drying.

7 In order to characterize the water-related aspects of this  
8 region a computerized analytical tool is required. The model  
9 AQUA (Agricultural QUery and Analysis) was developed for these  
10 and following purposes (Radulovich, 1987a, 1989a and b, 1990).  
11 This model is built around a daily water balance equation and  
12 also permits a variety of P analyses. The water balance equation  
13 is of the type:

$$14 \quad B_n = B_{n-1} + P_n - ETC_n$$

15 where:  $B_n$  = amount of crop-available water stored in the soil at  
16 the end of day n, which will enter the balance the  
17 next day as  $B_{n-1}$ ;

18  $P_n$  = effective P during day n (unless otherwise noted, P  
19 of day n first replenishes the profile, with any  
20 excess P leaving the system; thereby, effective P is  
21 the fraction of P that enters and is stored in the  
22 profile);

23  $ETC_n$  = crop evapotranspiration of day n (obtained by  
24 multiplying potential ET [ETP] by a crop coefficient  
25 [ $k_c$ ]).

26 Amounts of crop-available soil water vary with type of soil

1 and with the ability of a crop to extract it (in relation to  
2 rooting depth and depletion coefficient). Soil water values for  
3 different depths are modifiable variables in the model, as are  
4 rooting depth, depletion coefficient and  $k_c$  for different crops  
5 and growth stages. The model considers both water deficits and  
6 excesses for applications at the regional level (see Radulovich,  
7 1987a and 1990 for more details on model mechanics). Given that  
8 the changes in productivity sought are very large (e.g., see Fig.  
9 2), it was considered that the level of modeling sophistication  
10 required was only intermediate, and so models that consider in  
11 detail the different aspects of crop growth are not considered  
12 necessary at this point.

13 After developing the model AQUA, it was necessary to  
14 evaluate its ability to emulate reality and produce valid  
15 results. A series of comparisons were run between AQUA and  
16 simpler models that sometimes do not even consider a value of  
17 soil water storage (Radulovich, 1987a; Carmona and Radulovich,  
18 1988). Yet, it was thought that the ultimate ability of the  
19 model should be to explain regional yield variability.

20 A water stress index was developed by subtracting days with  
21 deficit and excess occurring throughout the life cycle of a crop  
22 from the duration of this life cycle, dividing this amount by the  
23 duration of the life cycle. This calculation, which has also  
24 been performed using only days with deficit, produces an index  
25 that is directly proportional to yields. Several exercises on  
26 the explanation of regional yield variability were conducted for

1 an area within the North Pacific region of Costa Rica  
2 (Radulovich, 1987a and 1990). For the relationship between  
3 stress index and yields, the values of  $r^2$  obtained were 70% for  
4 bean, 71% for maize and 90% for rice using the water stress  
5 indices (Radulovich, 1990). Most interesting was the high  $r^2$   
6 value (76%) obtained when grouping together relative yields of  
7 bean, maize and rice (Figure 5). The fact that relative yields  
8 of these three crops fall fairly within one line talks about  
9 their similitude in responses to water stress--particularly to  
10 water deficit which was the main component of the stress indices  
11 every year. For further details on this see Radulovich (1990).

12 Thus counting with an analytical tool, the characterization  
13 of the main water-related aspects of the region could proceed.  
14 This consisted first on identifying the different critical or key  
15 points of the P distribution pattern shown in Figure 4, which is  
16 shown as a diagram in Figure 6. Given the objectives of this  
17 work, seven different key water-related periods were identified,  
18 beginning with the start of the rainy season (point 1, Fig. 6)  
19 and ending with cropping only on stored soil water after the end  
20 of the rainy season (point 6, Fig. 6) and the end of the rainfed  
21 cropping season and last harvest (point 7, Fig. 6). Periods of  
22 water excess and deficit can be seen in between (points 2 and 3,  
23 Fig. 6). Another important period identified was the ending of  
24 the rainy season (point 5, Fig. 6), a period that by itself does  
25 not normally produce either water deficit or excess, yet it is  
26 important in defining the length of the rainy season and, more



1 important, of the rainfed cropping season.

2 Several aspects of these key water-related periods were  
3 evaluated using AQUA in order to produce information useful for  
4 maximizing the length of the rainfed cropping season and for  
5 minimizing water stress. This work was conducted after pooling  
6 from the literature and our experience the most relevant and  
7 applicable recommendations to deal with water stress. These are  
8 shown as Table 1, which is continuously being revised through  
9 feedback from modeling and field activities. Using the  
10 information from Table 1 and experience, the different key water-  
11 related periods were analyzed individually and collectively in  
12 order to produce an understanding of the potential of the region  
13 and of strategies for developing this potential.

14 For example, to deal with the uncertainties associated with  
15 early rains (point 1, Fig. 6) and yet take advantage of planting  
16 as early as possible, a method was devised to determine the  
17 earliest safe planting date (Carmona and Radulovich, 1988;  
18 Radulovich, 1989b). This method consists of establishing several  
19 criteria to guarantee the successful establishment of a crop,  
20 then running the model for the years in record using these  
21 criteria. This provides a time range within which the earliest  
22 safe planting will be done each year. For the current year, as  
23 that time range gets closer, planting preparations should begin.  
24 Triggering of planting, however, is determined by real-time P  
25 data from within that time range, and this occurs only when the  
26 minimum P criteria for determining earliest safe planting date

1 are satisfied. This represents a first approach to dynamic  
2 water-based management (in-season methods), and will be discussed  
3 further later.

4 Additional simulation work was conducted to determine the  
5 best strategies to deal with some of the other key water-related  
6 periods of the rainfed season. To deal with veranillos (point 3,  
7 Fig. 6), it was determined that the least accumulation of days  
8 with deficit was obtained by either escaping them or confronting  
9 them with crops during their late stages of growth. Both  
10 strategies require planting on the earliest safe planting date as  
11 defined above (Carmona and Radulovich, 1988; Radulovich, 1989b).  
12 A strategy similar to the earliest safe planting date can be  
13 implemented for the re-start of the rainy season after the  
14 veranillo (point 4, Fig. 6).

15 When addressing the problem of uncertainty related to the  
16 end of the rainy season (point 5, Fig. 6), a strong relationship  
17 between P of May, at the beginning of the rainy season, and P of  
18 November, at the end of the season, was found for the region  
19 under analysis (Radulovich, 1987b, 1989b). This relationship is  
20 shown for one station in Figure 7, where it can be seen that high  
21 P in May is associated with medium to low P in November, while  
22 low P in May is associated with medium to high P in November.  
23 This relationship was quantified and it produced substantial  
24 differences whether the year was one with high or low P in May.  
25 This predictive ability of P in November, possible by knowing  
26 values of P in May is another in season tool for use in the

1 dynamic management method, which allows to plan ahead in relation  
2 to expected P characteristics at the end of the rainy season.

3 While the analysis of cropping only on stored soil water  
4 (point 6, Fig. 6) is mostly a matter of varying the parameters of  
5 the water balance equation, water excess problems (point 2, Fig.  
6 6) have proven much harder to quantify, and even though the model  
7 considers water excesses, there is hardly sufficient  
8 understanding of these effects to simply manipulate variables.  
9 So far, our best strategy has been to avoid confronting water  
10 excesses at critical crop growth stages, mainly by manipulating  
11 planting dates (see Table 1). The use of the earliest safe  
12 planting date also allows the crop to get established before the  
13 first water excess period of the season.

14 The result of a complete simulation analysis of the length  
15 of the rainy season is shown in Table 2 (Radulovich, 1989b).  
16 This was produced by simulating the planting of two sequential  
17 crops, planting the first crop at the earliest safe planting date  
18 of the year and harvesting the second crop after growing it  
19 during its latter stages only on soil-stored water. This  
20 simulation established, at least theoretically, the feasibility  
21 of growing two crops with minimal accumulation of days with water  
22 deficit while avoiding exposure to the more severe periods of  
23 water excess during critical stages. The number of days in the  
24 season suitable for rainfed cropping in this simulation will be  
25 compared later to values obtained after three years of field  
26 work. These simulated values, however, are larger by up to 36 d

1 than the number of days currently used for rainfed cropping  
2 season in the region, which are at the most 200 d.

3 The following step was to design cropping schemes according  
4 to the water-related characteristics and strategies just  
5 mentioned. Work in this project is restricted to major annual  
6 crops (cereal, pulses and oil crops), using mostly local  
7 varieties. This portion of the work includes varying the  
8 different crop parameters in the model to produce different water  
9 stress and yield-level scenarios. The basic designs to  
10 accomodate the key water-related periods and the simulated length  
11 of rainfed cropping season are shown in Figure 8. Basically,  
12 these consist of fitting two crops, whether short or long, in the  
13 rainfed cropping season. These designs also include one planting  
14 of the second crop with the last rains of the season, and growing  
15 it thereafter only mostly on water stored in the soil plus  
16 sporadic late rains (Fig. 8). The latter is based on previous  
17 works conducted elsewhere that show that 65% or more of the  
18 optimal yield of several annual crops can be obtained when these  
19 are grown only with the water stored in a deep soil brought to  
20 field capacity around emergence time (Hsiao et al., 1976; Faci  
21 and Fereres, 1980; Radulovich, 1984; Cox and Jolliff, 1987).

22 The third and last step consisted of implementing these  
23 cropping schemes and managing them using the computerized (pre-  
24 and in-season) methods presented above. Some of the cropping  
25 schemes described in Figure 8 were first tested during the 1988  
26 rainfed cropping season. Particularly, a sequence of two maize

1 crops, that took 252 d and yielded over 8.5 T ha<sup>-1</sup>, plus a bean  
2 crop planted with the last rains, which yielded over 2.0 T ha<sup>-1</sup>  
3 (Radulovich et al., 1989) encouraged more aggressive cropping  
4 sequences during the 1989 and 1990 rainfed cropping seasons.  
5 Selected temporal arrangements of these more aggressive sequences  
6 are shown in Figure 8, and range and mean values of cropping  
7 length are given in Table 2. These sequences were of up to three  
8 sequential rainfed crops per season, for an average cropping  
9 length of 259 d, with some sequences lasting over 300 d. This  
10 averages about 60 d longer than what is common in the region, and  
11 longer by about 30 d than what the simulation exercise produced  
12 for deficit resistant crops (Table 2). No generalized yield  
13 reductions were observed for crops grown for up to 80% of their  
14 growth cycle only on water stored in the soil (without  
15 replenishment). Many more problems and yield reductions were  
16 associated with water excesses than with deficits. Mean annual  
17 production of the cropping sequences are of over 9.0 T ha<sup>-1</sup> for  
18 the maize-maize sequences and of over 4.0 T ha<sup>-1</sup> for the bean-  
19 bean-bean sequences (R. Radulovich, unpublished data).

20 Planting the same crop species consecutively throughout the  
21 season, even though against rotation principles, was done to  
22 directly add up yields without resorting to relative methods of  
23 analysis that do not adequately synthesize sequential cropping  
24 yields. The difference between the simulated and real length of  
25 rainfed cropping season is attributed to an unsuspectedly high  
26 ability of the crops to extract soil water and to large soil

1 water storage capacity of the soils used, mainly Inceptisols and  
2 one Andisol. However, a substantial difference in soil water  
3 storage capacity between the manner this is commonly estimated in  
4 the laboratory and the actual values as determined in the field  
5 should be expected for most soils. The soils used in these  
6 trials are common of these regions of Costa Rica.

7 The difference between the experimental lengths of rainfed  
8 cropping season and the shorter length used by farmers can be  
9 attributed to a variety of reasons, as their low yields are. An  
10 explanation, though, is that farmers use long-cycle varieties and  
11 thus only one crop can fit the rainy season. However, it is  
12 obvious that farmers' cropping schemes are designed to safely  
13 provide for their subsistence and the cash they can obtain by  
14 selling any surpluses. Thus, any method designed to intensify  
15 cropping must consider crop safety as a priority. The methods  
16 and the cropping schemes proposed here promise to provide an  
17 adequate handling of the major P uncertainties and of the most  
18 water-stressing situations. This proposal will be outlined later  
19 in a more comprehensive manner, following the presentation of  
20 other related methods.

#### 21 22 **Other Water-based Management Systems**

23 As will be shown, methods of dynamic water-based cropping,  
24 like those presented above, characterized by in-season decision  
25 making based on real-time P, have also been produced in different  
26 parts of the world. This allows to believe that they have great

1 potential. A part of in-season decision making comprises one  
2 form or another of predictive ability regarding upcoming rainfall  
3 situations, from weather advisory services that can warn about  
4 upcoming rainfall or a storm event, to predictive methods that  
5 provide months of lead time for planning agricultural activities.  
6 Although an incipient technology in modern times, climate  
7 prediction is not at all new. For example, there is unambiguous  
8 evidence that pre-Columbian inhabitants of Peru had many proven  
9 methods to predict climate (Antunez de Mayolo, 1981). Also,  
10 Jackson (1982) has compiled examples of traditional forecasting  
11 of tropical rainy seasons in Tanzania.

12 Besides satellite-based and other process oriented systems,  
13 that provide short term predictions, several simple methods for  
14 longer time predictions of P are found in the literature. These  
15 share the similarity of being based on a relationship that can be  
16 established between timing and amounts of P fallen early in the  
17 season and amounts of P expected after that.

18 Pioneering work in this field is that of Stewart for some  
19 parts of Africa (Stewart and Hash, 1982; Stewart and Kashasha,  
20 1984) and later also for Asia (Stewart, 1988). The work of these  
21 authors is based on a relationship that appears to exist between  
22 both the date of onset of rains and amounts of early season P and  
23 expected P for crop production during the rest of the season.  
24 Their basic method is shown graphically in Figure 9, for a  
25 station in Kenya. It is seen that the earlier the onset of  
26 rains, and the larger the amount of P fallen during a period

1 (expressed as mm/day), the larger will the amount of P during the  
2 maize cropping season be. The applications of this method allow  
3 for planning and conducting a variety of agricultural operations  
4 based on the particular rainfall expectancy for the current  
5 season, including seeding rates, fertilizer amounts, and thinning  
6 to desired stands. Late into the season, fine tuning of the  
7 prediction also allows to obtain an approximation of yields  
8 expected, which will vary according to amounts of P expected and  
9 the cropping practices that have been followed.

10 A method similar to that of Stewart and co-workers was  
11 developed by Sivakumar for zones of West Africa, based on a  
12 significant relationship found between the date of onset of rains  
13 and the length of the growing season (Sivakumar, 1988). The  
14 basic relationship is shown in Figure 10, for Niamey, in which it  
15 is seen that length of the growing season is related to earliness  
16 of onset of rains. In a more recent work, Sivakumar (1990) tested  
17 cropping schemes taking advantage of this methodology. Rainfall  
18 prediction of this nature has also been done for non-tropical  
19 regions, e.g., for Nebraska (Neild et al., 1987) and California  
20 (Stewart, 1988).

21 Apparently, no work of this type has been conducted to date  
22 with respect to predictability of periods of excessive P in wet-  
23 dry, semi-humid and humid tropical regions. It would be very  
24 useful to know in advance whether the peak(s) of the rainy  
25 season(s) will be mild or particularly severe. However, the work  
26 done in relation to water deficits, given the different areas



1 where it has been developed, offers hope that empirical  
2 capability of this kind can be established around the tropical  
3 world, at least while climatologists come up with more  
4 deterministic methodology. No doubt, to establish the empirical  
5 relationships discussed in relation to Figures 7,9 and 10  
6 represent a step in the direction of establishing cause-effect  
7 and, from it, deterministic predictive capability.

### 8 9 **Summary of Water-based Strategies**

10 A summary of the methodology presented to this point will  
11 allow to obtain a more complete picture of how far water-based  
12 analysis and management of rainfed cropping has come and the  
13 implications of this. Following, a detailed summary of the work  
14 being done in Costa Rica is presented, incorporating  
15 considerations about the other methods just described.

16 A water-based analysis and management system can be composed  
17 of:

- 18 1) Basic characterization of the key water-related periods of a  
19 region, by methods such as those shown in Figs. 4 and 6 and  
20 standard probabilistic analysis. Given the large year to year  
21 variability of P, these methods by themselves are not sufficient  
22 for an adequate water-based management of rainfed cropping.  
23 However, to properly characterize the key water-related periods  
24 of a region, including the right detail and areal delimitations,  
25 is the first and necessary step for this kind of work.
- 26 2) Evaluation of the severity of the stress expected during each

1 of the key water-related periods. Evaluation of the severity  
2 should be spatial, temporal and cropping system related. For  
3 example, spatial variations may refer not only to differences in  
4 P but also to differences in soils, crops and other climatic  
5 parameters such as those affecting ET. Analysis of temporal  
6 variations of severity can provide answers to questions such as:  
7 how often does this period effect severe yield losses? or, what  
8 is the magnitude of the losses effected by this period?  
9 Questions like these are usually asked when justifying irrigation  
10 systems; however, the justification of irrigation should come  
11 only after the complete water-based management analysis has been  
12 conducted.

13 3) Design and evaluation of strategies best suited to deal with  
14 the main stress periods. Based on an understanding of the key  
15 water-related periods and the expected severity of each event,  
16 several strategies can be devised and tested (by simulation  
17 and/or field work) in order to produce a variety of options  
18 applicable to each set of conditions. A list of these strategies  
19 has been given in Table 1, and is accompanied in the text by  
20 specific examples. The use of non-traditional cultivars, perhaps  
21 more aggressive to certain specific conditions and/or shorter  
22 lived (to escape stress periods) is included here.

23 4) Development of predictive abilities regarding upcoming  
24 rainfall events. Besides the use and interpretation of satellite  
25 data, which though short termed is extremely valuable (e.g, to  
26 know that rain is coming can be critical to many farming

1 activities), so far these methods have been related to developing  
2 P expectancies based on amounts and timing of early P events. It  
3 may well be possible that other climatic parameters can be used  
4 for the same purpose. The different efforts cited (Stewart and  
5 Hash, 1982; Stewart and Kashasha, 1984; Neild et al., 1987;  
6 Radulovich, 1987b; Sivakumar, 1988; Stewart, 1988; Radulovich,  
7 1989b; Sivakumar, 1990) should serve as a guide in adapting and  
8 developing analogous methodology for a particular region.

9 5) Development and application of dynamic management techniques.

10 Basically, these consist of reacting to real-time P within pre-  
11 established key water-related periods, thus taking advantage of  
12 current conditions (Carmona and Radulovich, 1988; Radulovich,  
13 1989b). Although helpful, predictive ability of upcoming P  
14 events is not required, but a thorough understanding of the  
15 probabilities related to current and near-future events is  
16 indispensable. An example was presented earlier in relation to  
17 the start of the rainy season (earliest safe planting date) and  
18 re-start after the veranillo (points 1 and 4, Fig. 6). Other  
19 applications can be to react by taking some measures at the time  
20 the end of the rainy season becomes evident, or to react to low  
21 levels of P during periods of expected high peaks.

22 6) Design and management of cropping schemes to best suit the  
23 conditions and management techniques developed. Although placed  
24 at the end of this list, this process is perhaps the very first  
25 since its occurrence in agricultural areas antecedes even formal  
26 efforts to characterize the key water-related parameters. Yet,

1 its position in this list indicates that all the work outlined  
2 above has cropping schemes as their objective. Existing  
3 information and field experimentation to be conducted while  
4 developing this management scheme, should all be useful as  
5 feedback to its different components. The ultimate closing of  
6 the feedback loop, however, comes when all the five points above  
7 are put to work to analyze, design and manage cropping systems,  
8 taking into consideration as many relevant variables as  
9 convenient. Collateral to this point are aspects relevant to  
10 planning at a high level, including questions such as: what is  
11 the economic potential of this region? or, what yields are  
12 expected for this season?

13 After these six points have been worked out for a region in  
14 some orderly fashion, a powerful technological package will have  
15 been created. To be able to take the best possible advantage of  
16 water is perhaps the most relevant asset in rainfed farming.  
17 This becomes the more obvious when one considers that most field  
18 problems (e.g., low soil fertility, diseases) can be corrected,  
19 while water shortages and excesses can not, short of irrigating  
20 or covering the field to keep rainfall off. However, the problem  
21 of effectively transferring it to farmers remains.

22

### 23 A CONCEPTUAL MODEL FOR THE APPLICATION OF THESE METHODS

24 It must be obvious already that the six points summarized  
25 above, for establishing a water-based management system for  
26 rainfed cropping can not be developed by individual farmers--

1    excepting, of course, large operations that can afford this type  
2    of research efforts.  Therefore, this work is more proper of  
3    government and other research/extension institutions of each  
4    country or region.  In fact, efforts to regionalize a country or  
5    region into agroecological areas comprise to a large extent the  
6    first step of characterization.  Usually, decisions to help an  
7    agricultural region to develop are both technical and political.  
8    To count with a water-based scheme such as this may facilitate in  
9    many manners the technical aspects, since it will be possible to  
10   evaluate the true rainfed cropping potential of each region.  
11   With it, it will also be possible to evaluate the benefits of the  
12   interaction between rainfed and irrigated cropping, so noticeably  
13   lacking.

14         After subdividing a region into homoclimatic areas, each one  
15   of these areas can comprise a unit for management and analysis.  
16   This homoclimatic unit can be called an agrometeorological  
17   district, and it can be managed as a unity for rainfed cropping  
18   purposes, taking into considerations different subdivisions  
19   within it (based on e.g., soils, topography, cropping or farming  
20   systems).  The responsibilities of each agrometeorological district  
21   would be: operating a network of weather stations throughout the  
22   district; analyzing data from these stations and other sources,  
23   such as farmers' and satellite information; interpreting results  
24   of the analysis in terms of the different characteristics of the  
25   district and the analytical and predictive models available for  
26   water-based management; and, timely conveying the information to

1 farmers. Besides these duties, the district can also manage  
2 other weather-based models, such as disease or pest outbreak  
3 models based on climatic factors. Each district would be  
4 connected to other districts and to a centralized unit for  
5 research purposes. The economic and environmental benefits of  
6 establishing this kind of system, by which the best advantage can  
7 be taken of rainfall water, may be weighed against establishing  
8 irrigation districts. The concept of the agrometeorological  
9 district and the application of water-based management systems  
10 such as the one proposed here make full use of the human factor  
11 in order to increase natural resource use efficiency. It is thus  
12 expected to be quite cost efficient when implemented,  
13 particularly when compared to irrigation schemes. Moreover,  
14 given that the information from the agrometeorological district  
15 reaches the farmer, and that he makes use of it, this technology  
16 can be considered scale-neutral (i.e., operations of any size can  
17 benefit from it).

18         Whatever the process of selecting an area for development  
19 and/or for implementing a water-based management and analysis  
20 system and, therefore, whoever the end-users of the system, there  
21 are several considerations that should apply to most if not all  
22 cases. For one thing, the farmer that benefits from this method  
23 must be very responsive to the information provided to him,  
24 including the selection of varieties, cultural and fertilization  
25 practices, and planting and harvesting operations. For the more  
26 advanced stages in the application of this model, the interaction

1 between the farmer and the information source should be on a  
2 daily basis, or more often when emergency messages must be  
3 conveyed. Most of the contact can be through public media such  
4 as local newspapers, radio and television. For high technology  
5 operations, however, it would be of advantage for both the  
6 producer and the user of information to communicate via computer.

7 As difficult as it may seem or be, however, and as discussed  
8 in the introduction regarding socioeconomic sustainability, every  
9 effort must be made to foster the upward mobility of the low end  
10 of farmers into more integral sustainable systems. This, besides  
11 education and access to other modern-day benefits, will most  
12 likely also require an increase in the size of the operations, so  
13 that a decent sustenance can be obtained. Figure 11 shows the  
14 basic evolutionary prototypes that might eventually converge from  
15 the extremes of very large, high input operations and very small,  
16 low input peasantry into a medium type of operation, with  
17 intermediate input-level use. Such an intermediate type of  
18 operation might be uniquely qualified to take full advantage of a  
19 water-based rainfed management system, while producing well  
20 within environmental sustainability. The sustainability of that  
21 medium sized operation will be increased to the extent that it is  
22 based on the use of renewable resources (Table 3), of which water  
23 from precipitation is listed as number one. The use of these  
24 renewable resources, particularly the physical-chemical ones, is  
25 increased through time, like water, radiation and heat. This  
26 provides for a biophysical reason to intensify rainfed tropical

1 cropping through time. The use of biological renewable resources  
2 should be enhanced by multiple cropping schemes and integrated  
3 farming systems that make use of a variety of crops and cropping  
4 systems and related activities (Table 3).

5 For the regions studied in Costa Rica, and likely also for  
6 large areas of the Pacific coast of Central America, the outputs  
7 of such a medium-type operation can be on the range of two (or  
8 even three short-lived) medium-yield crops per year (e.g., one  
9 maize and one soybean crop, or a sequence of bean, another short  
10 crop, and bean). Annual yields (or rather cumulative yields  
11 through the rainfed season), counted as sequences of individual  
12 crops for ease of interpretation, could be of over 6.0 T ha<sup>-1</sup> for  
13 two maize crops, over 2.0 T ha<sup>-1</sup> for two soybean crops, or over  
14 3.0 T ha<sup>-1</sup> for three short-lived bean crops. These annual yield  
15 potentials would vary according to climatic, edaphic, and other  
16 conditions, and perhaps can be even larger in semi-humid and  
17 humid regions, where all-year rainfed cropping is possible. The  
18 yield levels considered are technically feasible at present, and  
19 should be expected to increase in time as technological packages  
20 are refined. The sustainability of these systems can be obtained  
21 thus: socioeconomically, by determining the minimum operation  
22 size that will provide a decent sustenance to a farmer (notice  
23 that cumulative annual yields can be equal to or larger than  
24 those obtained at present by a farmer in developed temperate  
25 regions who grows only one crop and has economic needs much  
26 larger than a tropical farmer in a developing country); and,



1 environmentally, by keeping input levels at all times at a medium  
2 point (like point d of Fig. 3) it is conceivable that maximum  
3 input use efficiency can be made and minimum environmental impact  
4 will result.

5 A farmer that takes sustainable advantage of the environment  
6 and derives a decent sustenance from it does not seem to exist in  
7 great numbers at present, and therefore must be forged. This may  
8 take decades; yet, it is necessary at some point in time to  
9 establish the right direction. This is unavoidable once a  
10 consensus is reached on what the potential of tropical cropping  
11 is and on how to technically develop it. A diagram showing the  
12 basic steps in this evolutionary process is shown in Figure 12.  
13 The question of sufficient land area for a decent livelihood is,  
14 of course, dependent on a variety of factors that range from the  
15 biophysical to the sociological. Diversification should be  
16 viewed as the establishment of new cropping or farming systems  
17 that can increase the productivity of available land area given  
18 the input-level possibilities. When the first two possibilities  
19 have been exhausted, the question of off-farm employment becomes  
20 essential. Besides off-farm employment as an alternative or  
21 complement, production at the sustainable stage is mostly market  
22 oriented (Fig. 12). The latter seems particularly important  
23 within the context of present-day world-wide socioeconomic and  
24 political reforms.

25 To the extent to which our efforts to forge a  
26 socioeconomically and environmentally sustainable tropical

1 farming community are successful, where deprivation and abuse are  
2 not the everyday rule, it may be said that humanity is properly  
3 evolving.

4  
5 **ACKNOWLEDGMENTS**

6 Work funded by grant No. 8.337 of the Program in Science and  
7 Technology Cooperation of the U.S.A.I.D. Author supported by the  
8 University of Costa Rica and Cornell University. Thanks are  
9 expressed to Dr. Leda Muñoz for her helpful comments.

10  
11  
12  
13  
14 **REFERENCES**

- 15 Abelson, P.H. and J.W. Rowe. 1987. A new agricultural frontier.  
16 Science 235:1450-1451.
- 17 Antunez de Mayolo, S.E. 1981. La prediccion del clima en el Peru  
18 pre-Colombino. Interciencia 6:206-209.
- 19 Carmona, G. and R. Radulovich. 1988. Metodologia de evaluación de  
20 veranillos y de siembra temprana como estrategia para  
21 minimizar sus efectos. Turrialba 38:215-222.
- 22 Cox, W.J. and G.D. Jolliff. 1987. Crop-water relations of  
23 sunflower and soybeans under irrigated and dryland  
24 conditions. Crop Sci. 27:553-557.
- 25 Faci, J.M. and E. Fereres. 1980. Responses of grain sorghum to  
26 variable water supply under two irrigation frequencies.

- 1           Irrig. Sci. 1:149-159.
- 2   F.A.O. 1989. Yearbook. Production. Vol. 43. F.A.O. Statistics  
3           Series No. 94, Rome, 346 p.
- 4   Fresco, L.O. and E. Westphal. 1988. A hierarchical classification  
5           of farm systems. Expl. Agric. 24:399-419.
- 6   Hsiao, T.C., E. Fereres, E. Acevedo and D.W. Henderson. 1976.  
7           Water stress and dynamics of growth and yield of crop  
8           plants. In: O.L. Lange, L. Köppen and E.D. Schulze (eds),  
9           Water Stress and Plant Life, pp. 281-305, Ecological Studies  
10          Vol. 19, Springer, Verlag, Berlin.
- 11   IPHG (Instituto Panamericano de Historia y Geografia). 1976.  
12          Atlas Climatologico e Hidrologico del Istmo  
13          Centroamericano. Public. No. 367, Guatemala, 180 p.
- 14   Jackson, I.J. 1982. Traditional forecasting of tropical rainy  
15          seasons. Agric. Meteorol. 26:167-178.
- 16   Levitt, J. 1980. Responses of Plants to Environmental Stresses.  
17          Vol. II. Academic Press, New York, 607 p.
- 18   Neild, R.E., D.A. Wilhite and K.G. Hubbard. 1987. Preseason  
19          precipitation probabilities as an aid to corn planting  
20          decisions. Agric. For. Meteorol. 41:259-266.
- 21   Norman, M.J.T., C.J. Pearson and P.G.E. Searle. 1984. The Ecology  
22          of Tropical Food Crops. Cambridge, 369 p.
- 23   Papendick, R.I., P.A. Sanchez and G.B. Triplett (eds). 1976.  
24          Multiple Cropping. ASA Special Public. No. 27, Madison, WI,  
25          378 p.
- 26   President's Science Advisory Committee. 1967. Report on the World

- 1           Food Problem. Vol. 2. The White House, Washington, D.C.
- 2       Radulovich, R. 1984. Reproductive behavior and water relations of
- 3           cotton. Ph.D. Diss., Univ. of California, Davis, 184 p.
- 4       Radulovich, R. 1987a. AQUA, a model to evaluate water deficits
- 5           and excesses in tropical cropping. I. Basic assumptions and
- 6           yield. Agric. For. Meteorol. 40:305-321.
- 7       Radulovich, R. 1987b. Prediccion de la precipitacion de fin de
- 8           estacion lluviosa en el regimen del Pacifico. Agron.
- 9           Costarric. 11:55-64.
- 10      Radulovich, R. 1989a. AQUA: an Integrated Water Model for
- 11           Tropical Cropping. McNamara Fellowships Program, Economic
- 12           Development Institute of the World Bank, Washington, D.C.,
- 13           114 p.
- 14      Radulovich, R. 1989b. Optimization of rainfed tropical cropping
- 15           in semi-dry areas: a case study. Agric. Water Manage.
- 16           16:337-352.
- 17      Radulovich, R. 1990. AQUA, a model to evaluate water deficits
- 18           and excesses in tropical cropping. II. Regional yield
- 19           prediction. Agric. For. Meteorol. 52:253-261.
- 20      Radulovich, R. 1991. Desarrollo agricola en el tropico .
- 21           Latinoamericano: el caso del pequeño agricultor vs. la
- 22           economia nacional. Interciencia 16(3):(in press).
- 23      Radulovich, R., G. Vargas, J.R. Chaves and F. Sanchez. 1989. Agua
- 24           y cultivos sequenciales en zonas semi-secas: evaluacion de
- 25           campo preliminar. Agron. Costarric. 13:219-225.
- 26      Ramirez, P. 1983. Estudio meteorologico de los veranillos de

- 1 Costa Rica. Instituto Meteorologico Nacional de Costa Rica,  
2 Nota de Investigacion No. 5, Costa Rica, 27 p.
- 3 Sanchez, P. 1976. Properties and Management of Soils in the  
4 Tropics. Wiley, NY, 618 pp.
- 5 Sivakumar, M.V.K. 1988. Predicting rainy season potential from  
6 the onset of rains in southern Sahelian and Sudanian  
7 climatic zones of West Africa. Agric. For. Meteorol.  
8 42:295-305.
- 9 Sivakumar, M.V.K. 1990. Exploiting rainy season potential from  
10 the onset of rains in the Sahelian zone of West Africa.  
11 Agric. For. Meteorol. 51:321-332.
- 12 Sollins, P. and R. Radulovich. 1988. Effect of soil physical  
13 structure on solute transport in a weathered tropical soil.  
14 Soil Sci. Soc. Am. J. 52:1168-1172.
- 15 Soria, J. 1976. Los sistemas de agricultura del Istmo  
16 Centroamericano. Rev. Biol. Tropical 24(Suppl. 1):57-68.
- 17 Stewart, J.I. 1988. Response Farming in Rainfed Agriculture.  
18 WHARF Press, Davis, CA, 103 pp.
- 19 Stewart, J.I. and C.T. Hash. 1982. Impact of weather analysis on  
20 agricultural production and planning decisions for the  
21 semiarid areas of Kenya. J. Appl. Meteorol. 21:477-494.
- 22 Stewart, J.I. and D.A.R. Kashasha. 1984. Rainfall criteria to  
23 enable response farming through crop-based climate analysis.  
24 E. Afr. Agric. For. J. 44(Special issue Oct.):58-79.

Table 1. List of strategies to cope with water stress (following terminology by Levitt, 1980).

**ESCAPE:** Planting/harvesting dates  
Short-lived crops/cultivars  
Shortening crop growth cycle (mechanical or chemical means, use of photoperiodic response).

**CONFRONTATION:** Tolerant/resistant crops/cultivars.

**AVOIDANCE-AMELIORATION:**

Crop/cultivar selection  
Avoid stress during critical growth periods (planting dates)  
Good cropping husbandry.

**Specific for Stress by Water Deficit:**

- Mulching to decrease evaporation
- Water harvesting
- Facilitate deep root penetration (deep liming in acid soils, subsoiling)
- Wind barriers
- Decreasing stand density (to increase available soil water per plant).

**Specific for Stress by Water Excess:**

- Raised beds and mounds
- Surface water evacuation and drainage
- Timely pathogen control
- Avoid excess during harvest.

Table 2. Length of cropping season for Alajuela, Costa Rica, as determined by simulation and from actual cropping data (simulation data extracted from Radulovich, 1989; field data from R. Radulovich, unpublished).

---

Type of year*	SIMULATED RESULTS		Number of Days	FIELD RESULTS
	Susceptible crop	Resistant crop		
Short	209	224		Mean: 259.2 (SD=34.2) (n=20)
Long	225	236		Range: 216 - 328

---

\*Type of year refers to the relationship between P in May and P in November (short years represent low P expectancy in November and long years represent high P expectancy in November).

Table 3. List of renewable resources the use of which should be emphasized by the sustainable farmer in the tropics.

**RENEWABLE RESOURCES**

**Physical-chemical:**

- water from precipitation
- heat
- radiation
- gases (CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>)
- atmospheric N<sub>2</sub> fixation
- nutrients in precipitation
- mineral elements product of soil weathering

**Biological:**

- natural pest control
- well-adapted crops
- used of plant and animal byproducts
- plant-plant and rhizosphere interactions

**Human:**

- information
- integration
- management



## FIGURE LEGENDS

Figure 1. Comparison between relative yield levels for grain crop production in Central America (maize data from Table 3 of Soria, 1976).

Figure 2. The yield gap (shown for maize yield data). Ratios shown in parenthesis were obtained by dividing yield data in the direction of the arrow, from higher to lower. Data from the following sources: commercial USA and Tropical (mean for tropical Africa and Latin America) 1989 data from F.A.O. (1989); experiental data for U.S.A. are from research papers in 1990 volume of Agronomy Journal (n=7); experimental data for Tropical are from research papers in 1989 and 1990 volumes of Experimental Agriculture and Field Crops Research (n=8).

Figure 3. Generalized relationship between input level used and crop yield. Letters refer to shifts in input use level and resulting change in yield level (adapted from Radulovich, 1991).

Figure 4. Precipitation and temperature regimes for two typical wet-dry stations of the study area in Costa Rica.

Figure 5. Correlation between the water stress index and relative regional yields of bean, rice and two maize plantings for wet-dry stations of the North Pacific region of Costa Rica (from Radulovich, 1989).

Figure 6. Critical water-related periods identified in relation to the rainy season of the study area. (for precipitation data see Fig. 4).

Figure 7. Relationship between precipitation in May and that in November of the same year, for a station in northern Costa Rica. Darkened points represent years when P in November is low to medium, while clear points represent years when P in November is medium to high (from Radulovich, 1987b, 1989).

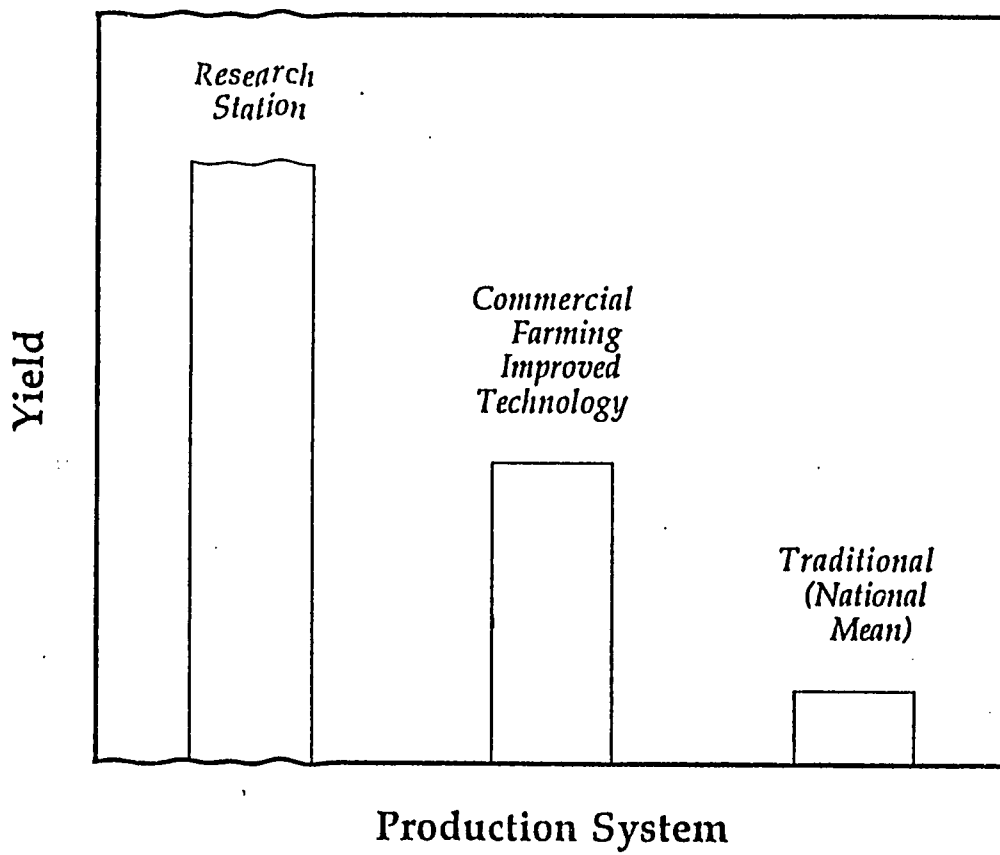
Figure 8. Cropping sequences designed after simulation and examples of sequences obtained in the field after three years of field work, for Alajuela station in Costa Rica.

Figure 9. Amount of precipitation during the maize cropping season in Machakos, Kenya, as related to date of onset and amount of precipitation fallen early in the season (from Stewart, 1988).

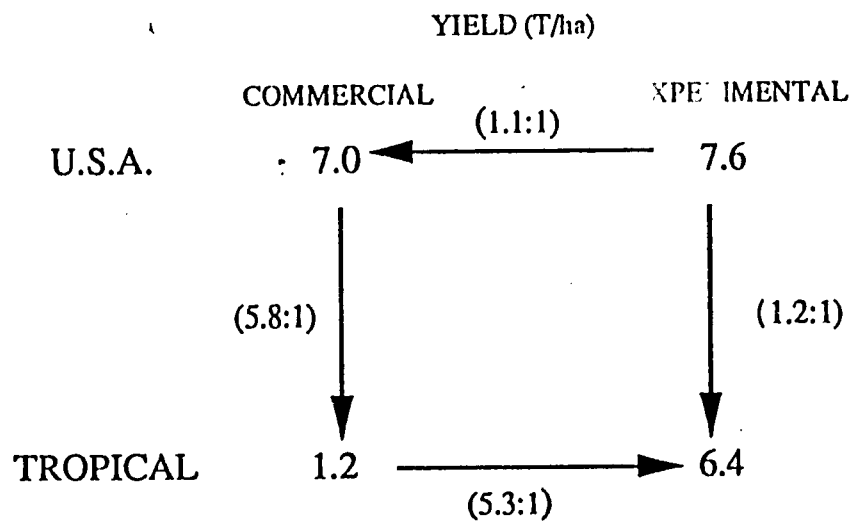
Figure 10. Length of growing season in Niamey, as related to date of onset of rains (from Sivakumar, 1988).

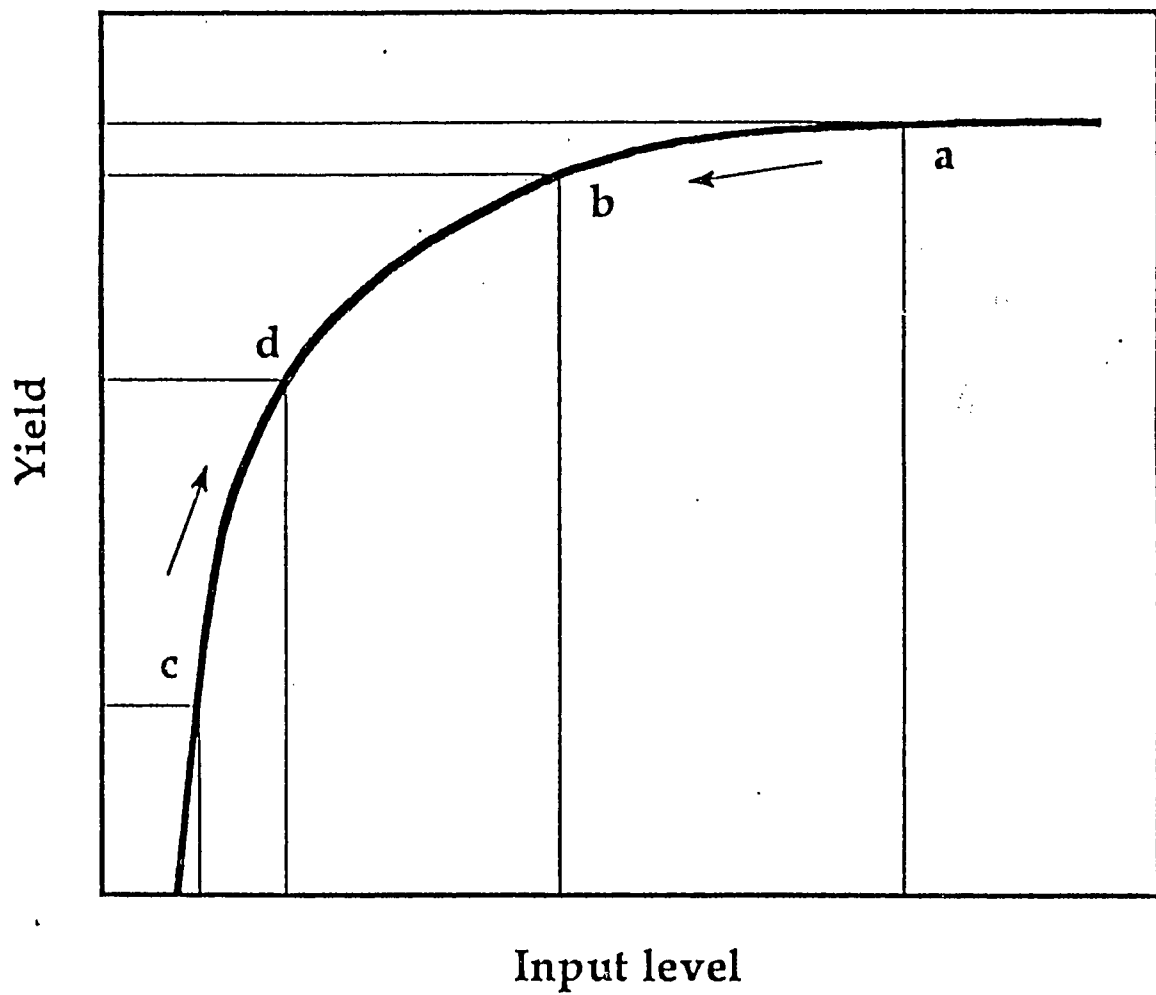
Figure 11. Evolution towards a sustainable-cropping farmer from unsustainable origins.

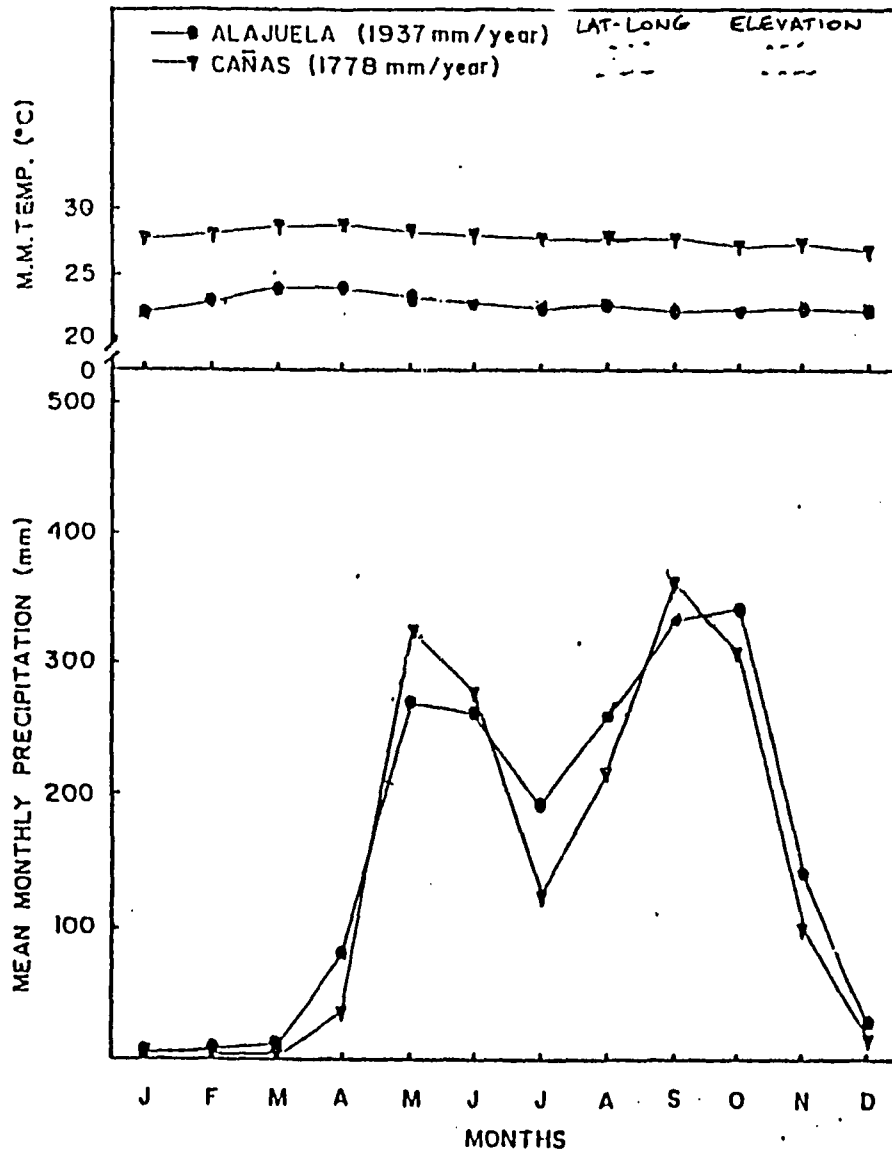
Figure 12. Evolutionary process of the passage from subsistence farming (non sustainable) to more sustainable systems (market oriented wholly or partially). Sufficient land area varies according to different local conditions. Broken lines represent feedback.



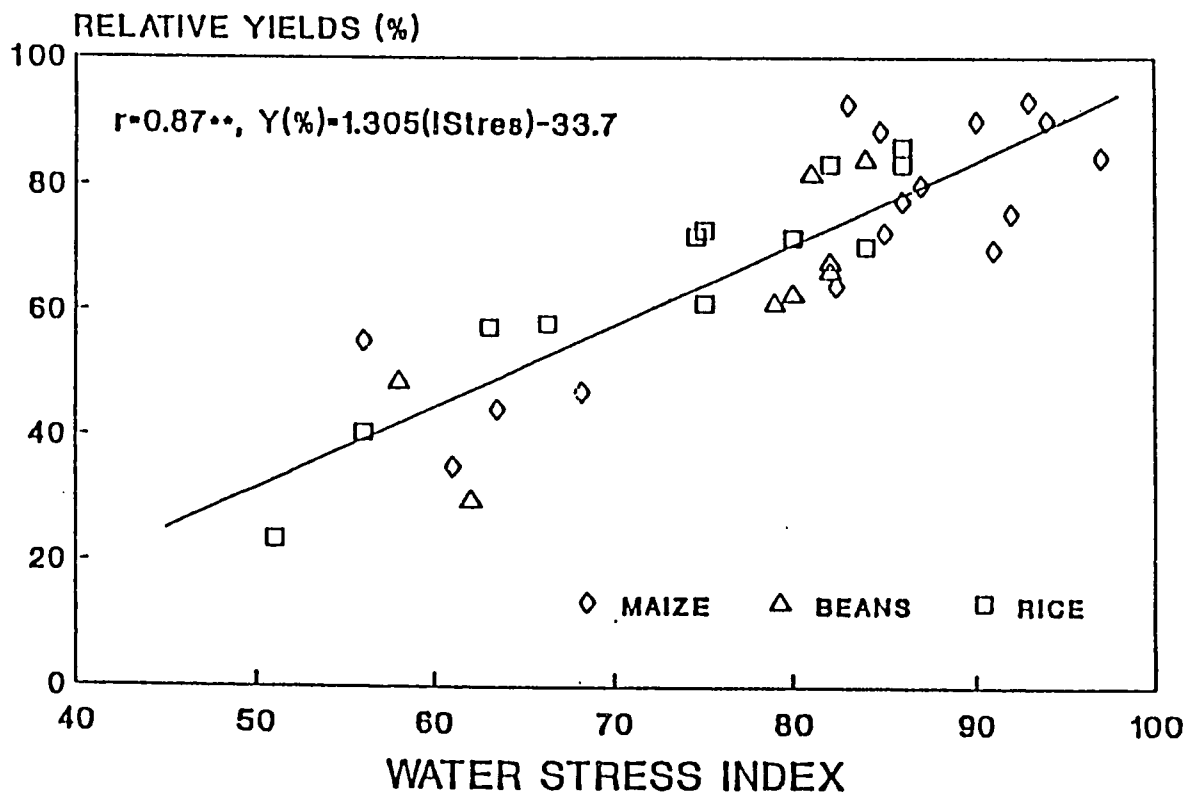
169

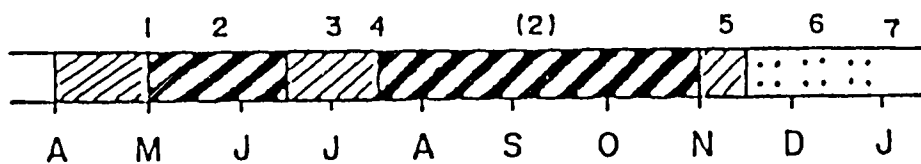






DRAFT





## MONTHS

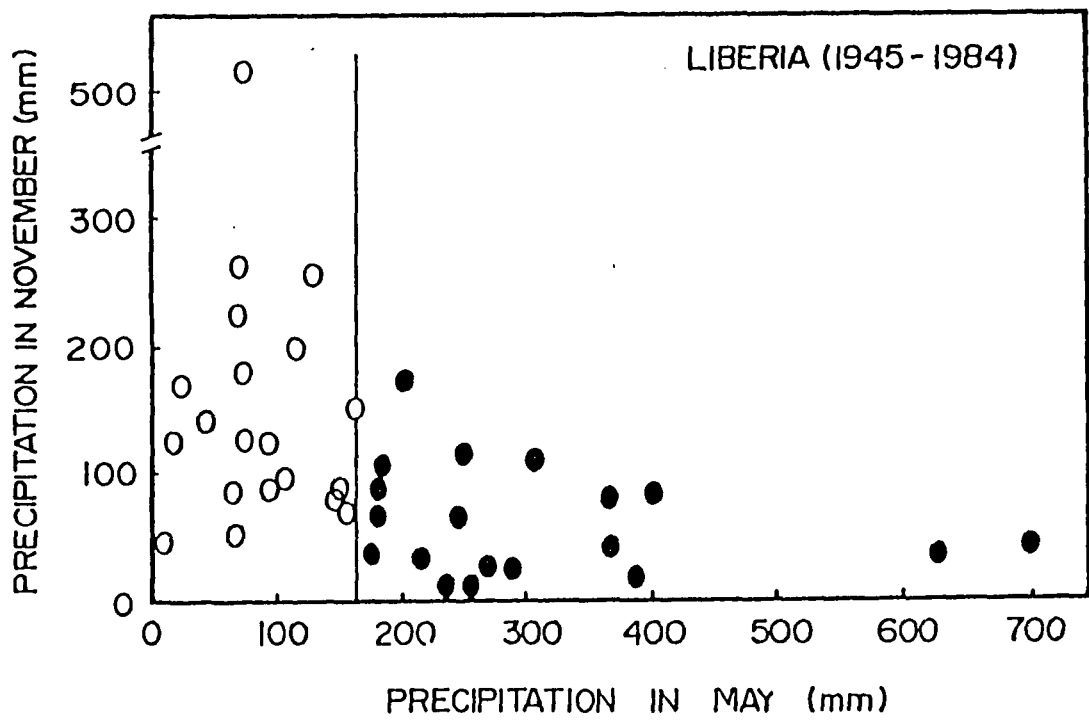
ERRATIC P                       ABUNDANT P                       RAINLESS

CROPPING ON STORED SOIL WATER (RAINLESS)

1. BEGINNING OF RAINY SEASON AND RAINFED CROPPING SEASON
2. WATER EXCESSES
3. VERANILLO
4. RE-START OF RAINY SEASON AFTER VERANILLO
5. END OF RAINY SEASON, LAST RAINS
6. CROPPING ON STORED SOIL WATER
7. END OF RAINFED CROPPING SEASON

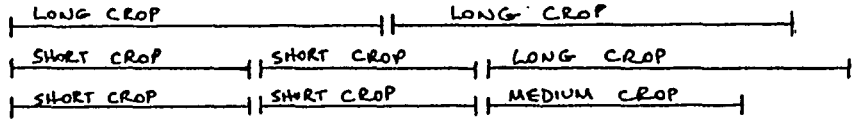
DRAFT



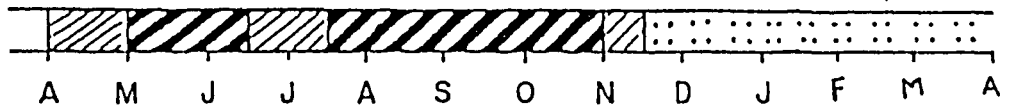
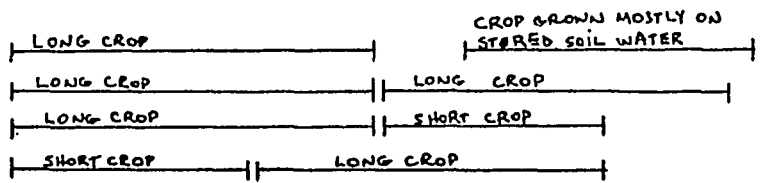


194

FIELD SEQUENCES



SIMULATED SEQUENCES

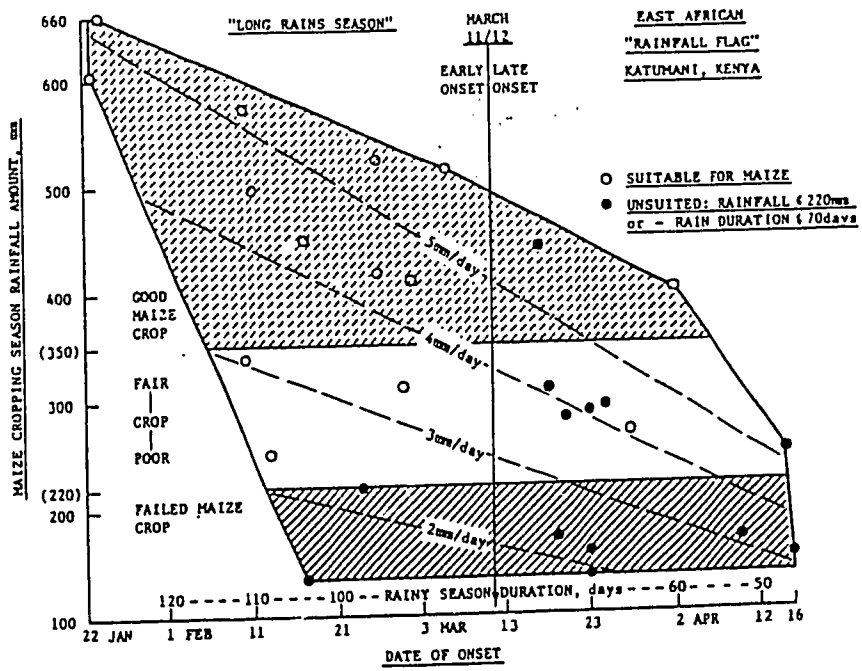


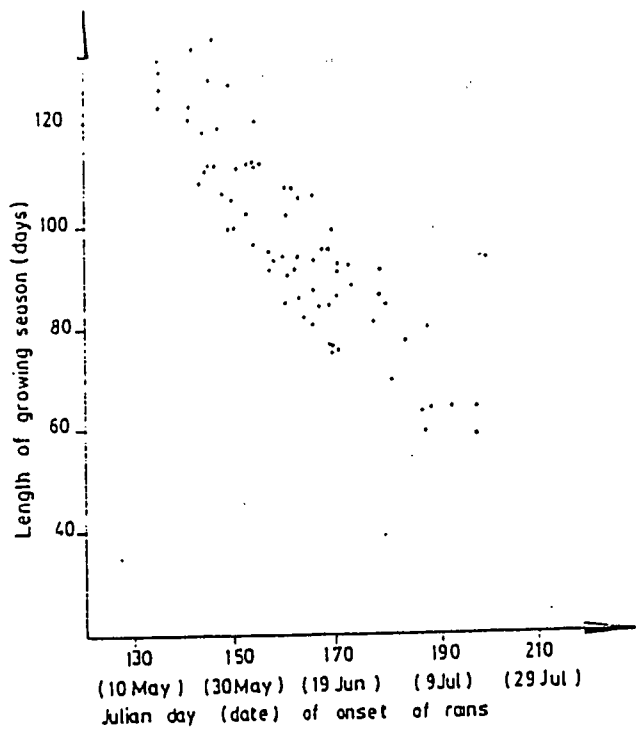
MONTHS

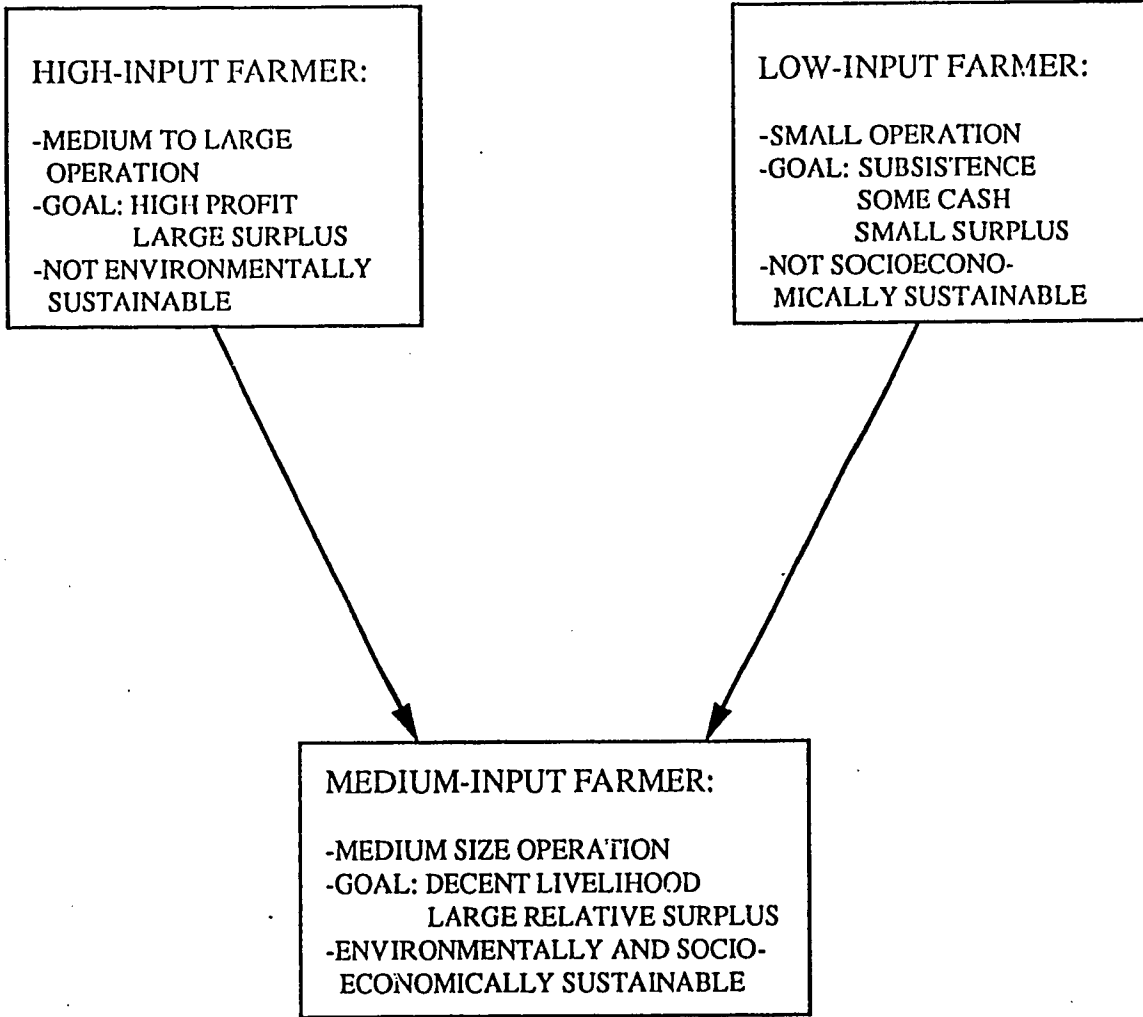
- ERRATIC P
  ABUNDANT P
  RAINLESS
- CROPPING ON STORED SOIL WATER (RAINLESS)

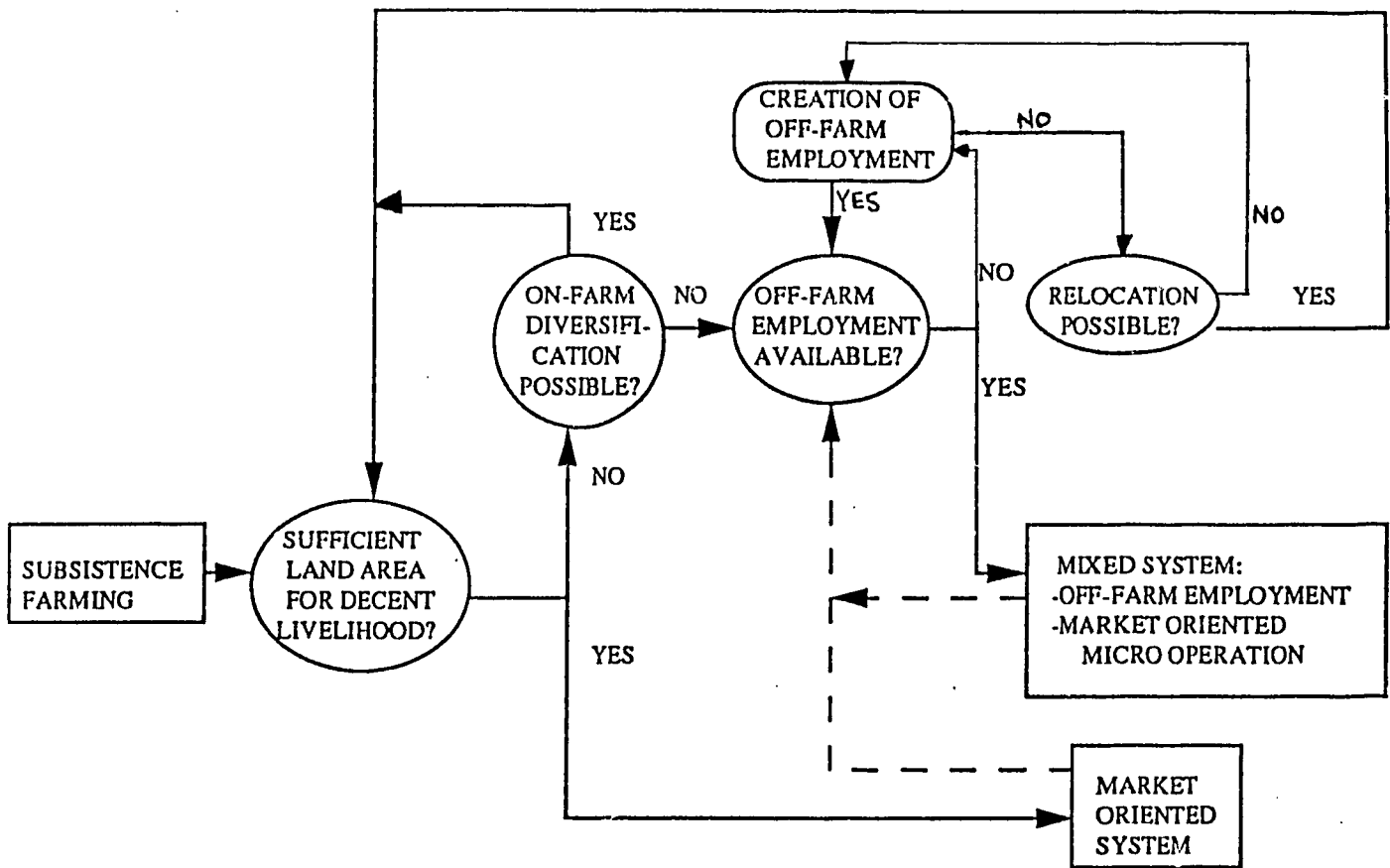
DRAFT

8 175









DRAFT

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
ESCUELA DE INGENIERIA AGRICOLA

RELACIONES HIDRICAS DE TRES INCEPTISOLES  
TROPICALES

Tesis presentada como Requisito Parcial para Optar  
por el Título de Ingeniero Agrícola con el Grado de  
Licenciado.

JOSE RODOLFO CHAVES CHACON

1989

130

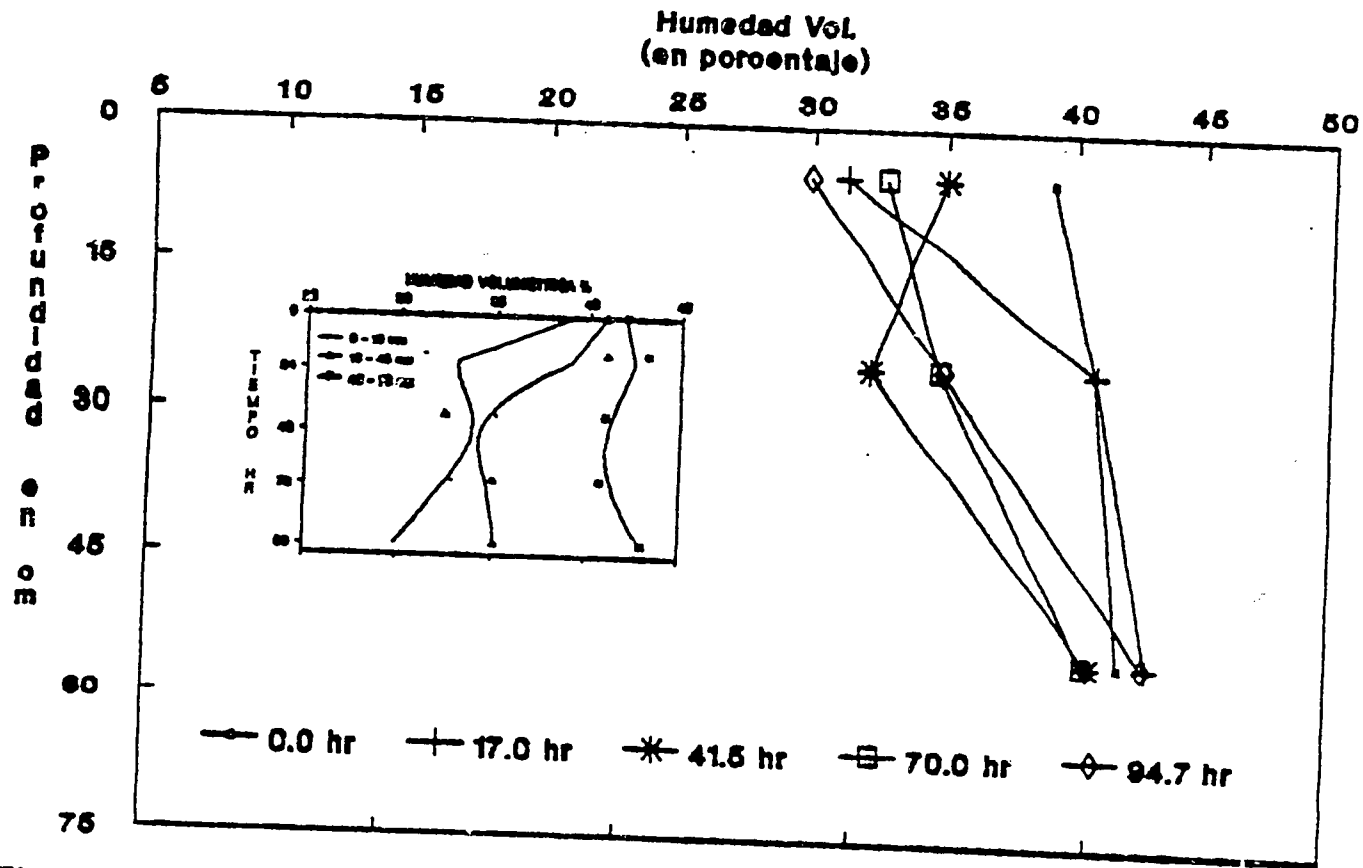


Fig. 4 Variación de la humedad en el perfil del suelo. Parcela B (Cafías)

181



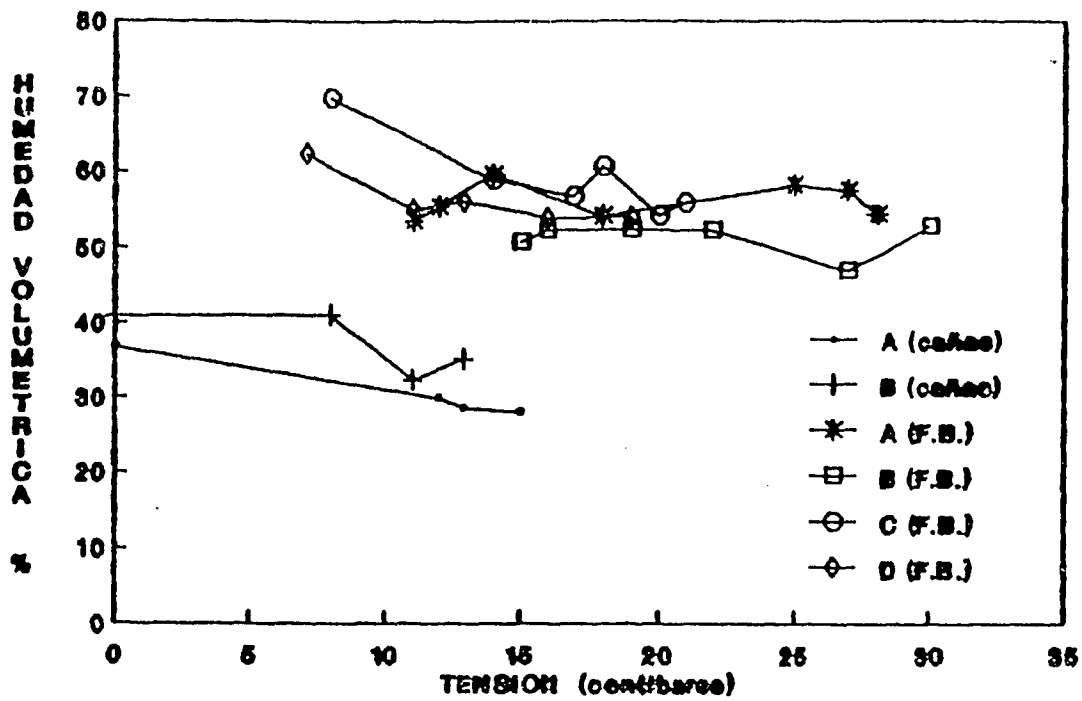


Fig. 9 Lecturas del tensiómetro a los 25 cm de profundidad. Prueba de C.C. in situ.

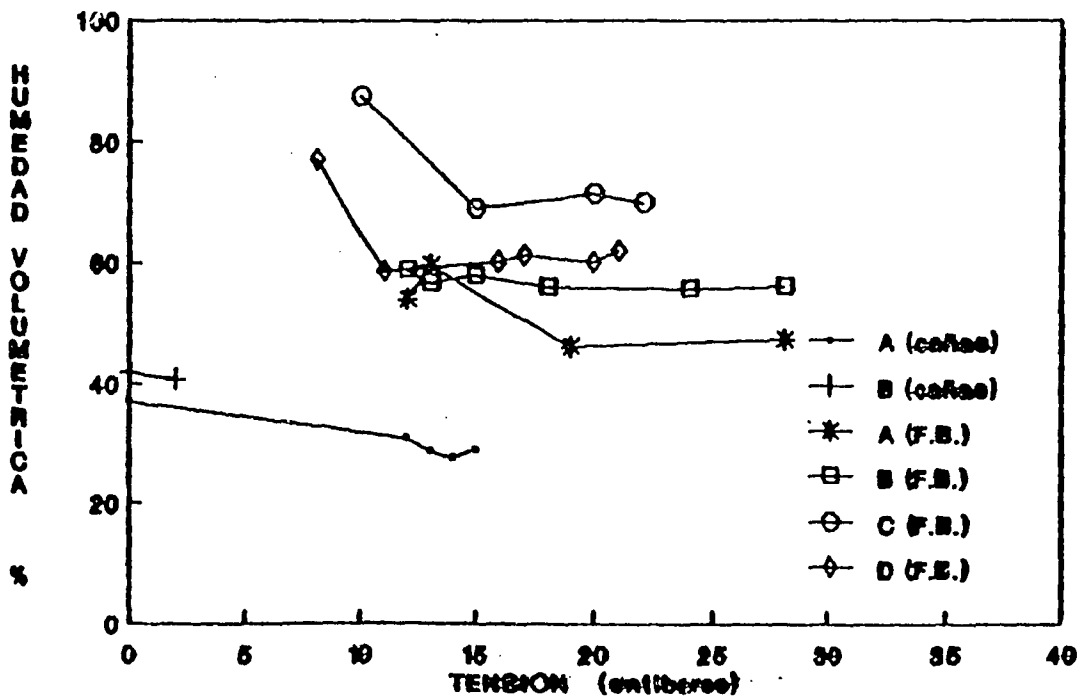


Fig. 10 Lecturas del tensiómetro a los 55 cm de profundidad. Prueba de C.C. in situ.

182

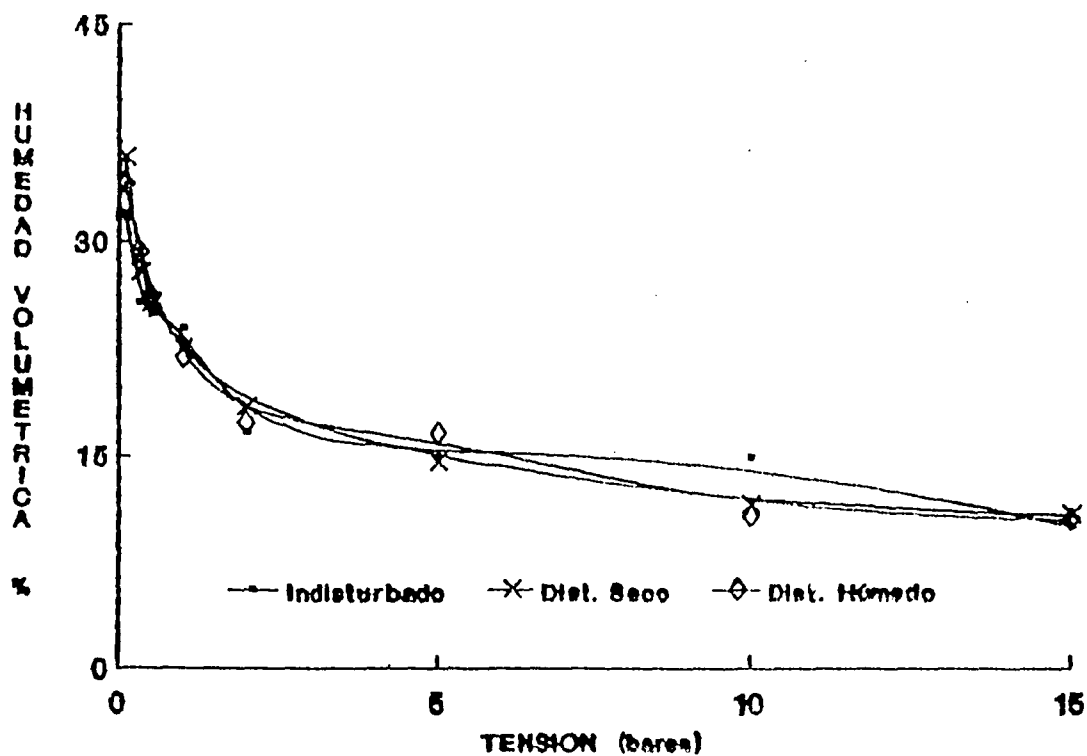


Fig. 11 Curva de desorción de humedad de suelo A (Cafias). Profun. 0 - 25 cm.

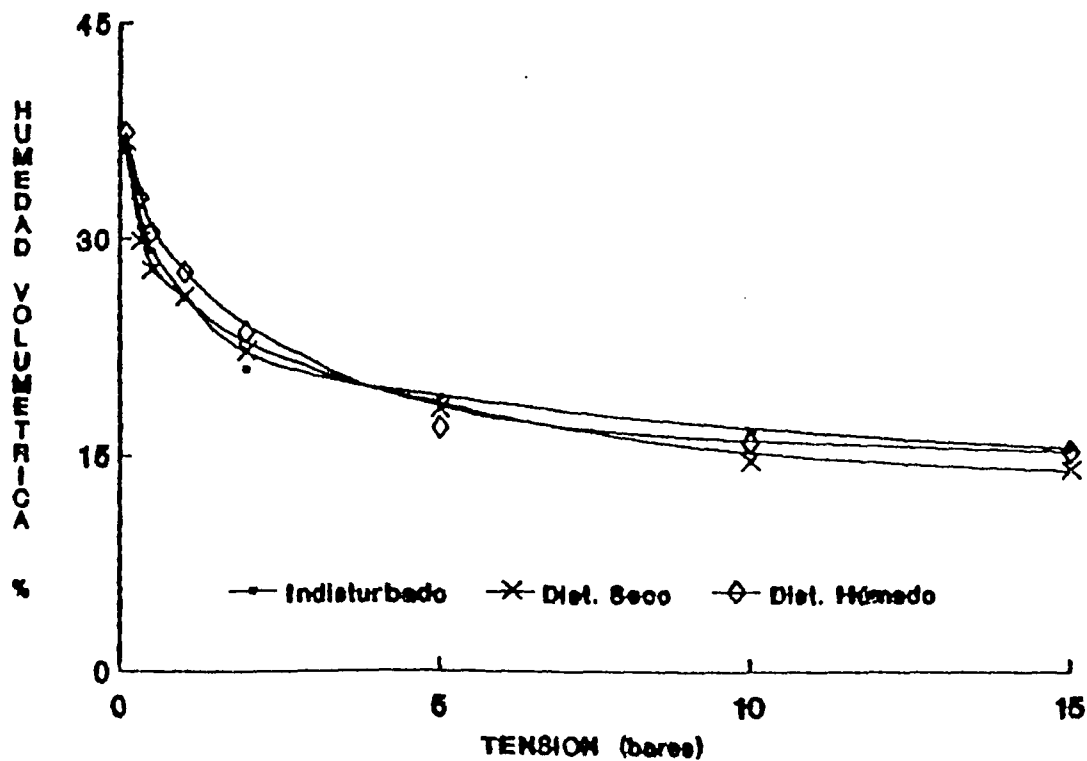


Fig. 12 Curva de desorción de humedad de suelo A (Cafias). Profun. 25 - 50 cm.

Cuadro 4. Humedad volúmetrica a capacidad de campo comparada con diversas humedades y tensiones por platos de presión.

Parcela		% Hum. Vol in situ	Tensión (bares)	% Hum. Vol. 0.10 bares			% Hum. Vol. 0.33 bares		
				Indist	Dist	Hum Dist. Sec	Indist	Dist	Hum Dist. Sec
A (cañas)	1	28.36	0.15	31.96	34.07	35.82	25.80	29.28	27.88
		(.34)		(1.64)	(.57)	(.44)	(.44)	(.23)	(.26)
	2	28.41	0.40	36.14	37.36	36.76	30.79	32.84	29.79
		(.75)		(.57)	(.17)	(.78)	(.87)	(.24)	(.22)
B (cañas)	1	34.11*	0.05	30.96	29.54	33.08	23.44	27.08	27.32
		(1.55)		(.76)	(.35)	(.75)	(.86)	(.05)	(.08)
	2	41.52	0.05	35.77	35.30	35.04	35.63	31.68	29.09
		(1.27)		(.22)	(.06)	(.68)	(.85)	(.08)	(.3)
A (F.B.)	1	56.01	0.25	51.78	58.01	66.06	46.78	44.34	48.36
		(2.4)		(1.6)	(.09)	(.39)	(.43)	(.27)	(.18)
B (F.B.)	1	50.83	0.30	63.58	65.29	71.54	51.15	48.80	50.96
		(2.13)		(1.96)	(.19)	(.76)	(.1)	(.34)	(.25)
	2	56.45	0.20	69.94	79.49	82.03	53.25	58.63	58.61
		(.46)		(1.0)	(1.53)	(.69)	(.68)	(.51)	(.17)
C (F.B.)	1	56.24	0.10	52.77	56.83	62.26	46.71	49.83	48.23
		(2.72)		(.53)	(.2)	(.23)	(.64)	(.09)	(.24)
	2	70.24	0.10	69.01	69.39	71.85	62.83	53.23	51.49
		(1.19)		(4.74)	(2.05)	(.56)	(2.2)	(2.13)	(.24)
D (F.B.)	1	55.36	0.10	52.40	53.68	62.21	44.70	48.69	49.81
		(1.49)		(2.25)	(.47)	(.29)	(2.36)	(.72)	(.95)
	2	60.90	0.05	51.54	58.56	53.62	45.75	55.67	46.21
		(1.08)		(.1)	(.06)	(.64)	(1.57)	(4.1)	(.62)

1 y 2 son las profundidades de 0 - 25 y 25 -50 cm respectivamente.

\* Promedios (Desv. Estan.)

194

**CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA  
PROGRAMA DE ENSEÑANZA  
ÁREA DE POSGRADO**

**ESTUDIO AGROCLIMÁTICO DE LOS SISTEMAS DE CULTIVO  
MAIZ, FRIJOL Y SORGO EN LAS ZONAS SECAS DE  
ESTELI, NICARAGUA.**

Tesis sometida a la consideración del Comité Técnico Académico del Programa de Estudios de Posgrado en Ciencias Agrícolas y Recursos naturales del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, para optar al grado de:

**Magister Scientiae**

por

**ARIEL ESPINOZA SALINAS**

**Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza  
Turrialba, Costa Rica  
1992**

158

Un caso bien particular es representado por las estaciones de Esteli y San Isidro, donde las lluvias se retiran casi en su totalidad antes de finales de octubre. Esto constituye una limitación en las siembras de los cultivos después del 15 de septiembre.

Por otro lado las estaciones de Santa Cruz y San Juan de Limay representan la finalización más tardía de las lluvias, a partir del 6 de noviembre (figura 13). En este caso los cultivos no presentan limitante por las lluvias. Sin embargo, no se deben desfasar las fechas de siembras. En el anexo D-8 se indican las figuras del resto de las estaciones.

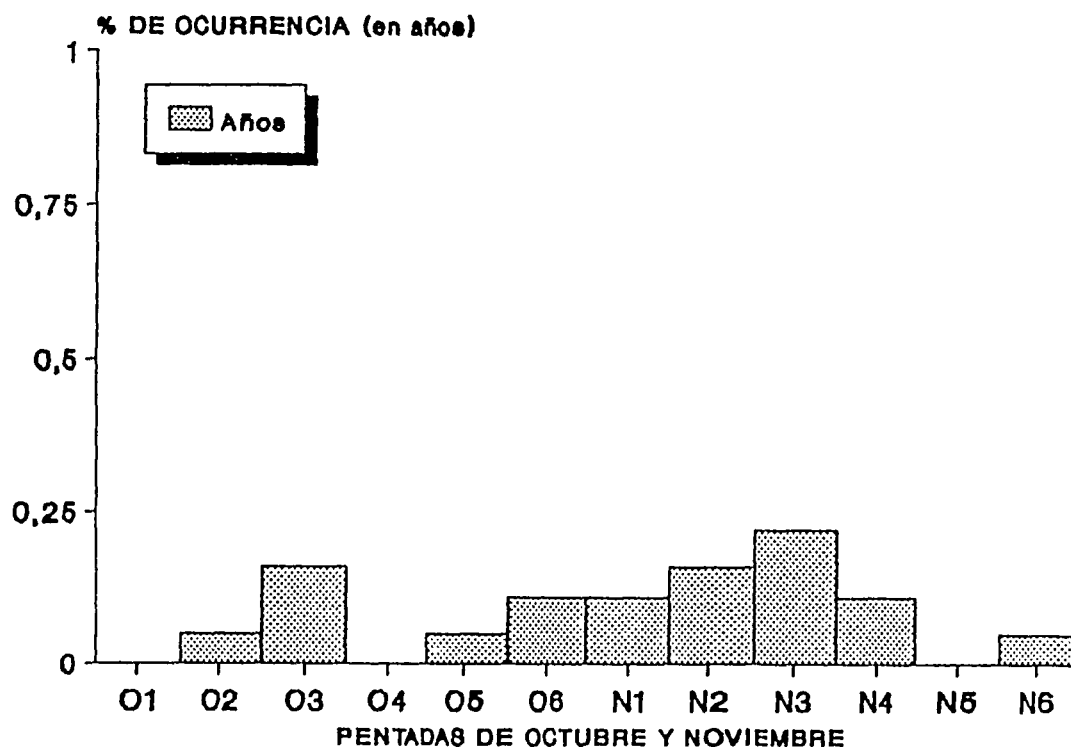


Figura 13. Finalización más probable de las lluvias, Limay

156

Cuadro 12. Comparación entre los criterios de siembra de los agricultores y la propuesta, de acuerdo con el número de años con diferentes grado de afectación de los cultivos y sus rendimientos, en la zona de Estelí.

CULTIVO Y GRADO DE AFECTACION	PROPUESTA	1 Lluvia	2 LLUVIAS	3 LLUVIAS
		Número de años		
<b>1. Frijol (75)</b>				
A	15	12	10	7
B	3	4	5	5
C	2	4	5	6
<b>2. Maíz (90)</b>				
A	9	6	5	4
B	6	7	7	6
C	5	7	8	11
<b>3. Sorgo (95)</b>				
A	8	6	4	3
B	5	7	7	6
C	7	7	9	11
<b>4. Maíz (110)</b>				
A	5	2	3	5
B	7	6	5	6
C	8	12	12	9

A: Poco afectado    B: Medianamente afectado

C: Severamente afectado

#### Zona de Santa Cruz

Esta zona presenta mayores posibilidades para los cultivos, aún para el sorgo y el maíz. A pesar de la duración de sus ciclos, su establecimiento es factible pero con el riesgo de ser afectado parcialmente. De acuerdo a la propuesta, el frijol es el cultivo con el cual el agricultor tiene mayores posibilidades de éxito (cuadro 13).

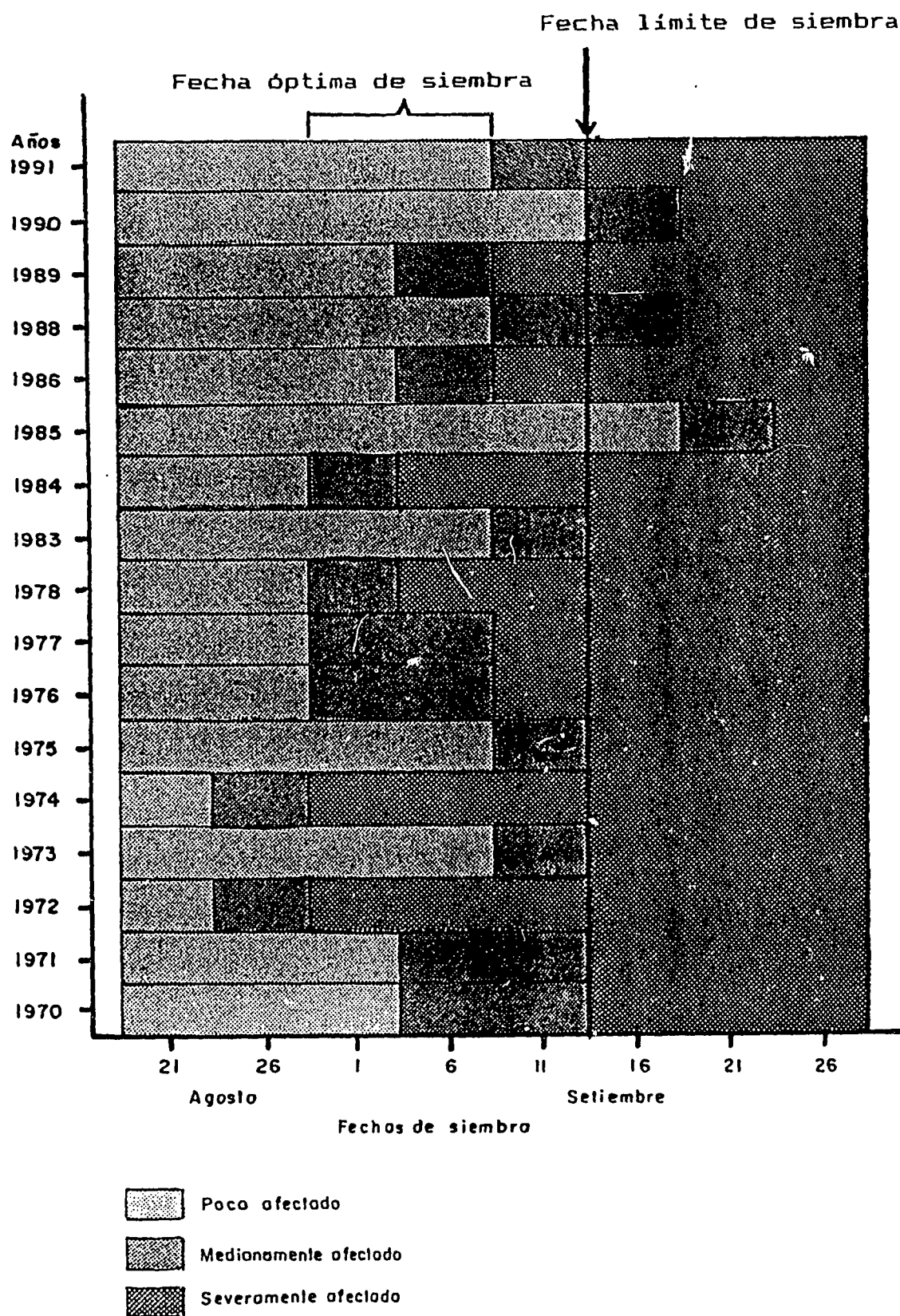


Figura 21. Número de días con DH en la floración (20 días) del sorgo de 95 días en base a la propuesta, San Isidro (La Trinidad).

181

*Attack #1*  
*Final Report*

*XD-ABH-127-A*

*Isn 85127*

# AQUA

MODELO DE BALANCE HIDRICO PARA AGRICULTURA TROPICAL

VERSION 1.0

Ricardo Radulovich  
Fernando Sánchez



Editorial de la Universidad de Costa Rica

*189-*



Edición aprobada por la Comisión Editorial de la Universidad de Costa Rica

Primera edición: 1993

(C) Ricardo Radulovich /  
Fernando Sánchez

631.702.85  
R-132a

Radulovich, Ricardo

AQUA: modelo de balance hídrico para agricultura tropical / Ricardo Radulovich, Fernando Sánchez. --  
Versión 1.0 -- San José, C.R. : Editorial de la Universidad de Costa Rica, 1993.

p. : il.

ISBN 9977-67-224-5

1. AQUA (Programa para computador) - Manuales.  
I. Sánchez, Fernando, coautor. II. Título.

CCC/BUCR-347

Prohibida la reproducción total o parcial.  
Todos los derechos reservados.

190

---

## INDICE.

---

SECCION	PAGINA
1. INTRODUCCION.....	1
2. DESCRIPCION DEL MODELO.....	4
2.1 BALANCE HIDRICO.....	4
2.1.1 CALCULO DE $ADC_N$ .....	5
2.1.2 CALCULO DE $ETR_N$ , $T_N$ Y $D_N$ .....	7
2.1.3 VARIABLES.....	8
2.2 INDICES.....	8
2.3 DURACION DEL AÑO AGRICOLA.....	10
2.3.1 FECHA MAS TEMPRANA DE SIEMBRA.....	10
2.3.2 ULTIMA FECHA A CAPACIDAD DE CAMPO.....	11
2.4 RIEGO.....	12
2.5 ANALISIS DE PRECIPITACION.....	12
3. FUNCIONAMIENTO DEL PROGRAMA.....	14
3.1 GENERALIDADES E INSTALACION.....	14
3.2 ESTRUCTURA GENERAL DE AQUA.....	15
3.3 OPCION DE DATOS.....	17
3.3.1 CULTIVOS.....	19
3.3.1.1 Duración efectiva.....	19
3.3.1.2 Tipo de cultivo.....	19
3.3.1.3 Tipo de dato.....	20
3.3.1.4 Etapas.....	20
3.3.2 CAPAS.....	21
3.3.3 PERFILES.....	21
3.3.4 ESTACIONES METEOROLOGICAS.....	21
3.3.5 ETP.....	21

3.3.5.1 ETP Diaria. ....	22
3.3.5.2 ETP Mensual. ....	22
3.3.5.3 ETP Promedio. ....	22
3.3.6 LLUVIA. ....	23
3.3.7 SIEMBROS. ....	24
3.3.8 DESCRIPCION DE LAS LISTAS DE DATOS.....	24
3.4 OPCION DE ANALISIS. ....	28
3.4.1 BALANCE. ....	28
3.4.1.1 Incremento de tiempo. ....	28
3.4.1.2 Datos de balance.....	30
3.4.1.3 Efectuar el cálculo. ....	30
3.4.1.4 Reporte en... ..	30
3.4.2 PRECIPITACION. ....	31
3.4.2.1 Incremento de tiempo. ....	31
3.4.2.2 Datos de precipitación.....	31
3.4.2.3 Días con y sin lluvia.....	32
3.4.2.4 Correlación de períodos. ....	32
3.4.2.5 Acumulados. ....	32
3.4.2.6 Lluvia probable.....	32
3.4.2.7 Criterios.....	33
3.4.3 FECHA MAS TEMPRANA DE SIEMBRA. ....	33
3.4.3.1 Datos de fecha más temprana. ....	33
3.4.3.2 Efectuar cálculo. ....	33
3.4.3.3 Criterios.....	34
3.4.3.4 Reporte.....	34
3.4.4 ULTIMO DIA A CAPACIDAD DE CAMPO. ....	35
3.4.4.1 Datos de último día a CC.....	35
3.4.4.2 Efectuar cálculo. ....	35
3.4.4.3 Reporte.....	35
3.4.5 RIEGO.....	36
3.4.5.1 Datos para el calendario. ....	36
3.4.5.2 Efectuar cálculo. ....	36

3.4.5.3 Criterios.....	36
3.4.6 OPCIONES.....	37
3.4.6.1 Datos dudosos.....	37
3.4.6.2 Agua hasta PMP. ....	37
3.4.6.3 Tipo de ETP.....	37
3.4.7 SIEMBROS. ....	38
3.4.8 GRAFICOS.....	38
3.4.8.1 Gráfico actual. ....	38
3.4.8.2 Tipo de gráfico.....	41
3.4.8.3 Incremento de tiempo. ....	41
3.4.8.4 Código del vértice. ....	42
3.4.8.5 Gráfico inverso. ....	42
3.4.8.6 Gráfico por impresora. ....	42
3.4.8.7 Generar el gráfico.....	42
3.4.9 DISPOSITIVO.....	43
3.4.9.1 Pantalla.....	43
3.4.9.2 Impresora.....	43
3.4.9.3 Disco.....	43
3.5 OPCION DE UTILITARIOS. ....	43
3.5.1 DIRECTORIO DE DATOS. ....	44
3.5.2 RECUPERAR INDICES.....	44
3.5.3 IMPORTAR ARCHIVOS ASCII.....	44
3.5.3.1 CliCom. ....	44
3.5.3.2 Columnar. ....	45
4. USO Y APLICACIONES. ....	48
4.1 INTRODUCCION. ....	48
4.2 PRESENTACION. ....	49
4.3 SECCION DE UTILITARIOS.....	51
4.3.1 DIRECTORIO DE DATOS. ....	51
4.3.2 RECUPERACION DE INDICES DE LOS DATOS. ....	52
4.3.3 IMPORTACION DE ARCHIVOS ASCII. ....	52

4.4 SECCION DE DATOS.....	57
4.4.1 CULTIVOS.....	58
4.4.2 CAPAS DE SUELO.....	61
4.4.3 PERFILES DE SUELO. ....	62
4.4.4 ESTACIONES METEOROLOGICAS. ....	63
4.4.5 EVAPOTRANSPIRACION POTENCIAL.....	64
4.4.6 LLUVIA. ....	68
4.4.7 SIEMBROS. ....	70
4.5 SECCION DE ANALISIS. ....	72
4.5.1 BALANCE HIDRICO.....	73
4.5.1.1 Datos de balance.....	74
4.5.1.2 Efectuando el cálculo. ....	77
4.5.1.3 Análisis del balance de una región. ....	81
4.5.1.4 Análisis de secuencias de cultivos. ....	87
4.5.2 PRECIPITACION. ....	90
4.5.2.1 Incremento de tiempo. ....	91
4.5.2.2 Datos de precipitación.....	92
4.5.2.3 Días con y sin lluvia.....	94
4.5.2.4 Correlación de períodos.....	97
4.5.2.5 Acumulados. ....	101
4.5.2.6 Lluvia probable.....	104
4.5.2.7 Criterios de precipitación. ....	107
4.5.3 FECHA MAS TEMPRANA DE SIEMBRA. ....	108
4.5.3.1 Datos de fecha más temprana de siembra. ....	109
4.5.3.2 Efectuando el cálculo. ....	110
4.5.3.3 Criterios de fecha más temprana. ....	116
4.5.4 ULTIMO DIA A CAPACIDAD DE CAMPO. ....	117
4.5.4.1 Datos para último día a capacidad de campo. ....	118
4.5.4.2 Efectuando el cálculo. ....	119

4.5.5 CALENDARIO DE RIEGO.....	123
4.5.5.1 Datos para el calendario.....	124
4.5.5.2 Efectuando el cálculo.....	125
4.5.5.3 Criterios para el calendario de riego.....	128
4.5.6 OPCIONES PARA EFECTUAR LOS ANALISIS.....	129
4.5.7 SIEMBROS.....	130
4.5.8 GRAFICOS.....	130
4.5.8.1 Gráfico actual.....	131
4.5.8.2 Tipo de gráfico.....	132
4.5.8.3 Código del vértice.....	133
4.5.8.4 Gráfico inverso y gráfico por impresora.....	133
4.5.8.5 Ejemplos de gráficos.....	134
4.5.9 DISPOSITIVO DE SALIDA.....	145
5. BIBLIOGRAFIA.....	149

---

## **RECONOCIMIENTOS.**

---

El modelo AQUA, versión 1.0, ha sido desarrollado gracias al aporte financiero de:

- Escuela de Ingeniería Agrícola de la Universidad de Costa Rica.
- Programa de Cooperación Científica y Tecnológica de la Agencia para el Desarrollo Internacional, E.E.U.U.
- Fondos de Investigación McNamara, Banco Mundial, Washington, E.E.U.U.

Agradecemos muy especialmente al Lic. Reinaldo Pineda L. por su valiosa colaboración en la programación del modelo y al Ing. Rodolfo Chaves por su gran aporte en la validación de campo.

Su distribución se realiza sin fines de lucro. Su uso es libre mientras se otorgue el crédito adecuado en publicaciones, presentaciones y reportes. La cita a utilizar es:

Radulovich, R. y F. Sánchez. 1993. AQUA, modelo de balance hídrico para agricultura tropical. Versión 1.0. Editorial Universidad de Costa Rica, San José. 150 p.

---

Se invita a los usuarios a registrarse utilizando el formulario adjunto o con:

Ricardo Radulovich  
Escuela de Ingeniería Agrícola  
Universidad de Costa Rica  
San José, Costa Rica.

Con el objetivo de mejorar y ampliar el modelo, se agradece el envío de comentarios y sugerencias, así como copias de los trabajos en los que se ha utilizado el mismo.

1996

*a Mile*

*a María*



---

## 1. INTRODUCCION.

---

El agua es uno de los factores ambientales que más limitan el uso racional de las tierras agrícolas, particularmente en los trópicos, en donde la temperatura media es estable a través del año y la estacionalidad es dictada principalmente por el agua. Considerando la enorme variabilidad espacio-temporal de la precipitación y las limitaciones que presenta el desarrollo generalizado del riego, es necesario un entendimiento y aprovechamiento sistemático del agua de lluvia para un buen desempeño de las labores agrícolas.

En el trópico semiseco (o húmedo-seco), como es el caso de la mayor parte de la vertiente del Pacífico de Centro América, se presenta un régimen de lluvias bimodal caracterizado por una época seca prolongada y otra lluviosa (Figura 1.1). El año agrícola de secano (sin riego) se define entonces como el período entre el inicio de las lluvias y el fin de éstas, aunque en realidad comienza antes, con las lluvias pre-estación y continúa por un período variable después de las lluvias, con los cultivos creciendo con el agua almacenada en los suelos más lluviosos post-estación.

La época de lluvias presenta variaciones importantes en cantidad y distribución, que incluyen el fenómeno conocido como "veranillo", el cual consiste en una disminución de la precipitación, variable en intensidad y duración, así como geográficamente. Se presenta también el caso de meses con precipitaciones excesivas, como son junio, setiembre y octubre.

Este comportamiento tan complejo de las lluvias es frecuentemente perjudicial a la productividad agrícola, más aún si las siembras no se planifican adecuadamente (Radulovich, 1990). En este sentido, el aprender a utilizar óptimamente el agua de lluvia representa una poderosa herramienta para aumentar y estabilizar los rendimientos (Carmona y Radulovich, 1988; Radulovich, 1989). Para ésto, el modelo AQUA se ha desarrollado como una herramienta para diseñar y evaluar estrategias que permitan enfocar eficazmente la problemática desde varias perspectivas, particularmente en función de:

- estrategias de siembra para confrontar mejor los períodos críticos de déficit y exceso hídricos;
- maximización del aprovechamiento de las lluvias cuando son escasas;
- maximización del aprovechamiento del agua almacenada en el suelo;
- caracterización regional;
- aplicaciones a aspectos de planificación y proyección de rendimientos (seguridad alimentaria y seguros de cosecha);
- interfase con riego.

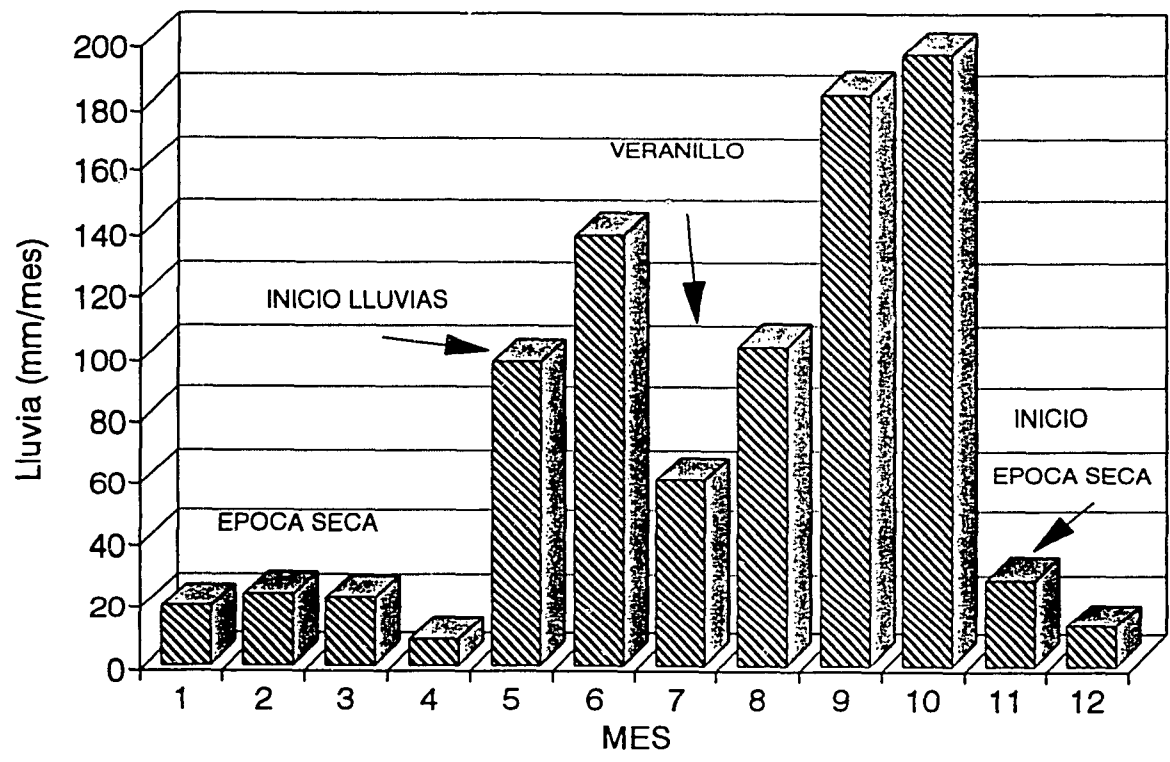


Figura 1.1. Lluvia promedio para la Estación Meteorológica La Central (Estación Fabio Baudrit), Alajuela, Costa Rica.

1991

El uso del modelo y los beneficios que se deriven de él dependen, por supuesto, de la imaginación y tenacidad del usuario en la búsqueda de soluciones y alternativas de producción que mejor se adapten a las características biofísicas y socio-económicas del entorno.

Los cálculos y orientación de este modelo de balance hídrico computarizado siguen los lineamientos del proyecto de investigación "Optimización Hídrica de la Agricultura Tropical de Secano", de la Escuela de Ingeniería Agrícola de la Universidad de Costa Rica, en convenio con la Agencia para el Desarrollo Internacional de los E.E.U.U (Programa para la Cooperación Científica y Tecnológica), las cuales financiaron el Proyecto. Una etapa preliminar del mismo se desarrolló con financiamiento del Banco Mundial. Básicamente los objetivos del Proyecto fueron proveer a los usuarios de una herramienta flexible, poderosa y fácil de usar, adaptada a los datos climáticos, de cultivos y de suelos usualmente disponibles en el Trópico Latinoamericano. Por esta razón, tanto la información requerida para utilizar el modelo como los resultados del mismo se adaptan a un enfoque pragmático, que es fomentar su uso en pos de los beneficios derivables actualmente, sin esperar un refinamiento en la disponibilidad de datos para ofrecer un modelo más sofisticado que posiblemente brindaría resultados más precisos.

Es así como la aplicación del modelo presenta algunas restricciones. Particularmente, destaca el hecho de que el modelo difícilmente explicará el rendimiento de un siembro individual a menos que éste haya estado afectado principalmente por déficit y/o exceso hídrico, lo cual es poco probable ya que la maraña de interacciones físicas y biológicas difícilmente excluyen otros componentes explicativos del rendimiento (por ej., nutrientes, plagas, malezas). Fundamentado en el concepto de que a nivel regional el agua se convierte en el común denominador que afecta los rendimientos de un cultivo, con las otras variables compensándose unas a otras (ver Radulovich, 1989), el modelo ha sido desarrollado y validado con excelentes resultados (Radulovich, 1987a y 1990) para explicar la variabilidad de rendimientos a un nivel de región. De allí, es posible extrapolar recomendaciones para el nivel de finca, aunque la multitud de aplicaciones a nivel regional constituyen por sí mismas un amplio objetivo.

En este manual del usuario se ilustran y ejemplifican las múltiples aplicaciones del modelo; sin embargo, para una mayor comprensión de su conceptualización, validación y aplicaciones, el usuario es invitado a estudiar la siguiente literatura citada en la Bibliografía: Carmona, 1986; Carmona y Radulovich, 1988; Espinoza, 1992; Mena, 1993; Radulovich 1986, 1987a, 1989 y 1990; Radulovich et al., 1989; Sánchez, 1991; Sánchez y Radulovich, 1992.

## 2. DESCRIPCION DEL MODELO.

### 2.1 BALANCE HIDRICO.

La ecuación básica para el cálculo del balance hídrico, parte central de este programa, es:

$$B_N = B_{N-1} + PPT_N - ETR_N + (ADC_N - ADC_{N-1}) \quad (2.1)$$

donde:

- $B_N$  = balance hídrico, expresado como la cantidad de agua (mm) disponible en el suelo para el cultivo al final del día N, su límite superior es capacidad de campo;
- $N$  = día del ciclo efectivo de crecimiento del cultivo desde la fecha de siembra;
- $PPT_N$  = precipitación efectiva (mm) durante el día N;
- $ETR_N$  = evapotranspiración real del cultivo (mm) durante el día N;
- $ADC_N$  = agua fácilmente disponible para el cultivo (mm) en el día N.

El balance hídrico siempre se lleva a cabo sobre lo que se denomina SIEMBRO, que se define como un área sembrada en una misma fecha de un único cultivo y que posee un único perfil de suelo; el área sembrada es tal que su clima puede ser descrito en base a un único juego de datos climáticos, es decir, en base a los datos de una sólo estación meteorológica. Para efectos prácticos, el siembro puede ser desde un área pequeña en una finca hasta todas las siembras del mismo cultivo en una ecorregión (conformada por similitud espacial en clima y suelos).

Este balance se efectúa generalmente durante el CICLO EFECTIVO DE CRECIMIENTO DEL CULTIVO, definido como el número de días requeridos por el mismo para pasar del momento de la siembra a la madurez efectiva. La madurez efectiva se da cuando la parte cosechable adquiere independencia de la planta y no hay más requerimientos de agua, aunque el cultivo permanezca en el campo.

Para la PRECIPITACION EFECTIVA usada en la ecuación (2.1) se utiliza el valor medido diariamente (en mm). Si la  $PPT_N$  es mayor a lo que le falta al balance  $B_N$  para alcanzar su valor máximo, se considera la cantidad en exceso como perdida por escorrentía o percolación; es decir, toda  $PPT_N$  primero repone el agua de  $B_N$  y el resto se desprecia. Esta simplificación puede no ser aceptable en suelos de muy baja tasa de infiltración.

El método de balance hídrico aquí utilizado considera el suelo a capacidad de campo el día de la siembra. Esta simplificación se justifica ya que se inicia el cálculo con períodos de suficiente precipitación para recargar las capas superficiales del suelo. Al comenzar el cálculo, el balance se toma con un valor inicial igual al agua disponible (diferencia entre capacidad de campo y punto de marchitez permanente) modificado por la capacidad de extracción del cultivo, o coeficiente de agotamiento (estos términos son explicados con más detalle posteriormente).

El término  $(ADC_N - ADC_{N-1})$  en la ecuación (2.1) es para simular el hecho de que más agua se va haciendo disponible conforme las raíces crecen en profundidad, penetrando suelo que se asume a capacidad de campo.

Conforme transcurre el tiempo  $N$ , diferentes variables que determinan la  $ADC_N$  o la  $ETR_N$ , como el coeficiente de agotamiento de agua del suelo ( $CA_N$ ), profundidad de raíces ( $PR_N$ ) y coeficiente de evapotranspiración del cultivo ( $k_{C,N}$ ), varían, lo cual debe tomarse en cuenta al estipular los cálculos.

### 2.1.1 CALCULO DE $ADC_N$ .

El agua fácilmente disponible para el cultivo (mm) en el día  $N$  viene dado por (ver Figura 2.1):

$$ADC_N = CA_N * ( \sum(AD_C * E_C) + AD_{UC} * RestoPR ) \quad (2.2)$$

donde:

- $AD_C$  = agua disponible en la capa número  $C$  del perfil del suelo (mm de agua por metro de suelo), que se define como el agua entre los puntos de capacidad de campo y marchitez permanente. Su valor fluctúa normalmente entre 50 y 200 mm/m;
- $CA_N$  = coeficiente de agotamiento en el día  $N$ , que se define como la fracción del  $AD_C$  que puede consumirse sin que el cultivo sufra por déficit hídrico; este valor fluctúa generalmente entre 0.4 y 0.7 (Doorenbos y Pruitt, 1986);
- $E_C$  = espesor de la capa número  $C$  (enésima) del suelo;
- $UC$  = número de la última capa que toca la raíz;
- $RestoPR$  = longitud de la raíz que pertenece a la última capa que ha penetrado la raíz, sin atravesarla totalmente.

Nótese que para cada unidad de suelo,  $ADC_N = AD_C * CA_N * E_C$ .

El modelo permite la definición de perfiles de suelo, cada uno con un máximo de cinco capas, las cuales también puede definir el usuario.

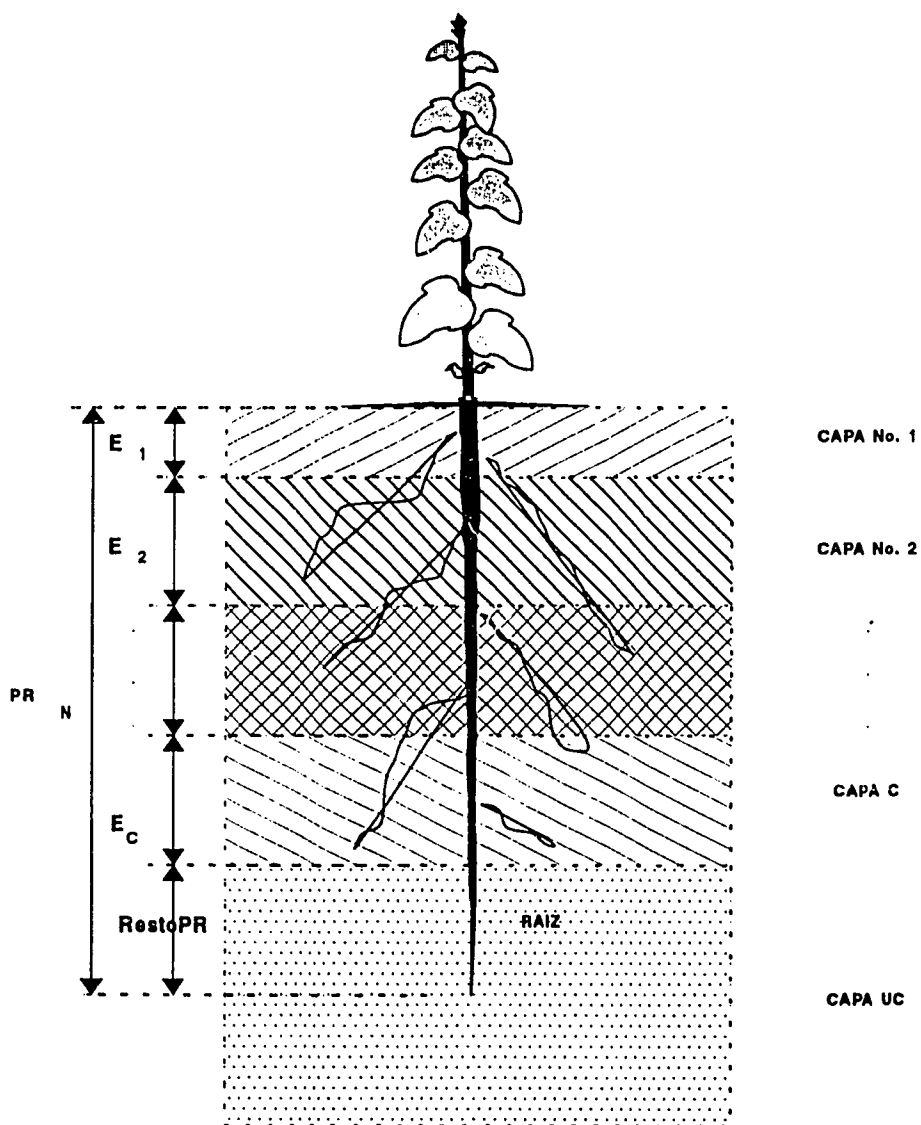


Figura 2.1. Esquema gráfico que explica algunas variables usadas para calcular ADCN (ver Ec. 2.2).

2027

### 2.1.2 CALCULO DE $ETR_N$ , $T_N$ Y $D_N$ .

El método en que la evapotranspiración real del cultivo  $ETR_N$  se calcula según la forma en que se efectúe el balance hídrico: considerando sólo el  $ADC_N$  (uso más frecuente), o considerando el agua que se encuentra desde capacidad de campo (CC) hasta el punto de marchitez permanente (PMP), o sea, el agua disponible total para el cultivo  $T_N$ .

Cuando se toma en cuenta sólo el  $ADC_N$  (que es la forma que por defecto usa el modelo), el valor de  $ETR_N$  es igual a la  $ETC_N$ , que se calcula según la siguiente relación:

$$ETR_N = ETC_N = k_{C,N} * ETP_N \quad (2.3)$$

donde:

- $ETC_N$  = evapotranspiración del cultivo (mm) durante el día N.
- $k_{C,N}$  = coeficiente  $k_C$  del cultivo en el día N, que depende de cada cultivo y de su estado de desarrollo; su valor varía normalmente entre 0.4 y 1.2 (Doorenbos y Pruitt, 1986).
- $ETP_N$  = evapotranspiración potencial (mm) en el día N.

Ya que en muy pocas estaciones meteorológicas de la región se miden directamente variables para el cálculo de la ETP diaria, se recomienda utilizar un valor de ETP mensual calculado, el cual luego se transforma a valores diarios. Otra razón que permite el uso de valores mensuales de ETP es la poca variación diaria de la misma en nuestra zona climática, en comparación con la variación diaria de  $PPT_N$  (ver Radulovich 1987a).

En etapas más sofisticadas de uso del modelo, cuando se escoge usar el agua hasta PMP, la  $T_N$  se calcula usando la ecuación 2.2 con  $CA_N = 1$ , es decir,  $T_N$  representa toda el agua que puede extraer el cultivo aunque se haya iniciado el déficit hídrico. La cantidad de agua almacenada en el suelo que el cultivo puede aprovechar, pero con tal esfuerzo que se produce estrés por déficit hídrico, se denomina  $D_N$ , y viene dada por  $(T_N - ADC_N)$ .

Si se efectúa el balance tomando en cuenta el agua hasta PMP, la  $ETR_N$  es igual al valor de  $ETC_N$  si  $B_N > D_N$ , y se calcula con la siguiente ecuación si  $B_N < D_N$ .

$$ETR_N = ETC_N * B_N / D_N \quad (2.4)$$

La ecuación 2.4 indica que cuando el  $B_N$  es menor al agua fácilmente disponible (lo que implica que el cultivo entró en estrés por déficit hídrico y se están

contabilizando días con déficit hídrico), la  $ETR_N$  disminuye linealmente hasta que se agote toda el agua del suelo. Esta suposición se ajusta bastante a la realidad, dado un cierre gradual y progresivo de estomas cuando el cultivo entra en déficit hídrico. Esta consideración se fundamenta en investigación de campo que indica que el consumo de agua en estas condiciones puede ser incluso más allá de PMP (Radulovich, datos sin publicar).

### 2.1.3 VARIABLES.

Según se desprende de lo anterior, las variables necesarias para correr el modelo son (ver Cuadro 3.1 para más detalles):

- Estación meteorológica: nombre de la estación, su elevación, localización y tipo.
- $PPT_N$ : datos diarios de 10 ó más años (preferiblemente) para cada estación meteorológica bajo estudio.
- ETP: promedio o mensual para los años en estudio.
- Datos de cultivo: para cada cultivo que el usuario desea estudiar, se deben definir de 1 a 7 etapas de cultivo, cada una con los valores de  $k_c$ , CA y PR para cada etapa, con sus respectivas duraciones.
- Perfiles de suelo: nombre del perfil y de 1 a 5 capas que lo conforman, cada una con su respectivo espesor.
- Capas de un perfil: nombre y su capacidad de almacenamiento de agua.
- Siembros: unidad básica que maneja el programa, en la cual se define un área con un único perfil de suelo, un sólo cultivo con una única fecha de siembra y cuyo clima se describe con una sólo estación meteorológica.

## 2.2 INDICES.

---

El cálculo de los índices de déficit, exceso y estrés permite estimar el potencial de una zona para la producción de un cultivo, así como estimar los períodos críticos del año desde el punto de vista hídrico (períodos de sequía o de exceso). Igualmente, este cálculo permite estimar cuál es la mejor secuencia de cultivos para una región, mediante una correlación lineal que puede realizarse entre índices y rendimientos obtenidos para la región. En caso de no existir una sólida base de datos sobre rendimientos, el análisis puede realizarse parcialmente, relativizando entre índices. Ya que los índices se estiman en función inversa de los días con estrés, a menores índices menores serán los rendimientos (ver Radulovich, 1987a y 1990).



Los índices están dados por las siguientes ecuaciones:

$$I_{Def} = (( DurEf - DDef ) / DurEf ) * 100 \quad (2.5)$$

$$I_{Exc} = (( DurEf - DExc ) / DurEf ) * 100 \quad (2.6)$$

$$I_{Est} = (( DurEf - DEst ) / DurEf ) * 100 \quad (2.7)$$

donde:

- $I_{Def}$  = índice de déficit hídrico;
- $DurEf$  = duración efectiva del cultivo (ciclo efectivo de crecimiento);
- $DDef$  = días con déficit hídrico;
- $I_{Exc}$  = índice de exceso hídrico;
- $DExc$  = días con exceso hídrico;
- $I_{Est}$  = índice de estrés hídrico;
- $DEst$  = días con estrés hídrico ( $DDef + DExc$ ).

Para determinar los índices, primero se calculan el número de días con déficit, exceso y estrés durante el ciclo efectivo de crecimiento del cultivo (u otro período seleccionado) mediante el uso del balance hídrico (Ec. 2.1).

Un DIA CON DEFICIT se da cuando se ha gastado el agua fácilmente disponible para el cultivo. Si no se está tomando en cuenta el agua hasta PMP, un día con déficit se da cuando el balance  $B_N$  es menor que cero. Si se hace el balance usando el agua hasta PMP (opción específica de uso limitado), dicho día se da si el balance  $B_N$  es menor al  $D_N$ .

Un DIA CON EXCESO es cuando el balance es mayor a su límite superior más la lámina de agua (llamada LAMINA PARA EXCESO en el programa) que se considera que produce estrés por exceso de agua en el cultivo (Radulovich, 1987 y 1990). Si el balance se realiza tomando en cuenta sólo el ADCN, el límite superior del balance es ADCN; si el balance se realiza tomando en cuenta el agua hasta PMP, el límite superior viene dado por TN. El límite superior del balance se da cuando el perfil del suelo se encuentra a capacidad de campo. Cada día que el valor del BN sobrepasa su límite superior, tras realizar los cálculos, BN se hace igual a su límite superior, pues se considera que el resto escurre o percola ese día.

El número de DIAS CON ESTRES es la suma de los días con déficit y los días con exceso. Esto implica que se reconocen tanto el déficit y el exceso hídrico como estrés hídrico, y ambos pueden darse durante un período dado (Radulovich, 1987a y 1990).

## 2.3 DURACION DEL AÑO AGRICOLA.

---

El cálculo de la fecha más temprana de siembra permite definir el inicio del año agrícola y utilizarlo para siembras tempranas. Por otro lado, la determinación de la última fecha del año en que el suelo es llevado a capacidad de campo por las lluvias de estación ayuda a definir la última fecha de siembra a partir de la cual un cultivo sobrevivirá únicamente con el agua almacenada en el suelo y las pocas lluvias restantes (Radulovich, 1989).

Estos cálculos ayudan a definir la duración del año agrícola de secano en una zona determinada, lo que permite un mejor planeamiento de las labores agrícolas requeridas y la estimación de las potencialidades de una zona para la producción agrícola. Por otro lado, sembrar temprano en el año generalmente permite evadir o enfrentar mejor los efectos adversos del veranillo (Carmona y Radulovich, 1988).

Tanto la fecha más temprana de siembra como el último día con el suelo a capacidad de campo son parámetros sumamente variables temporal y espacialmente, y definen el inicio y el fin de la estación de lluvias, respectivamente.

### 2.3.1 FECHA MAS TEMPRANA DE SIEMBRA.

Una fecha es considerada la fecha más temprana de siembra si es la primera del año en que se cumplen una serie de condiciones y características, que pueden ser variadas a criterio del usuario. A continuación se dan las condiciones que el programa utiliza por defecto, y se indican en letra mayúscula los nombres que se les dan dentro del programa en el menú de criterios de fecha más temprana de siembra (ver por ej., Figura 4.62):

- A. La precipitación (PPT) en la década (diez días) anterior al día de siembra debe ser mayor o igual a 30 mm (PRECIPITACION MINIMA EN DECADA ANTERIOR A LA SIEMBRA). Esta condición tiene el propósito de garantizar que la capa superior del suelo se encuentre cerca de capacidad de campo el día de la siembra. Además, es indicio parcial de un posible inicio cercano de las lluvias.
- B. Deben darse al menos 3 días (DIAS CON PPT MENOR A PPT MAXIMA) con precipitación menor o igual a 5 mm (PPT MAXIMA PARA LABORES) ó 2 días sin lluvia (DIAS CON PPT NULA), en la década anterior al día de siembra. Esta condición busca asegurarse que se puedan realizar las operaciones de campo.
- C. En los 20 días después de la siembra (DIAS PARA ESTABLECIMIENTO DEL CULTIVO), que corresponden a 5 días para emerger, en los que a escogencia del usuario no se contabilizan días con estrés, y 15 de establecimiento del cultivo, no se pueden presentar más de 2 días con déficit para cultivos resistentes al déficit hídrico, o más de 1 día con déficit

para cultivos susceptibles (DIAS PERMITIDOS CON DEFICIT). Para calcular el número de días con déficit se realiza el balance hídrico del cultivo siguiendo el procedimiento explicado en la sección anterior (Ec. 2.1). Esta condición sirve para garantizar que la fecha seleccionada es efectivamente seguida por el inicio formal de la estación de lluvias y para asegurar que el cultivo sobrevivirá la etapa de establecimiento.

D. Dado que en los 5 días antes de emerger lo que domina el proceso de evapotranspiración es la evaporación del suelo, se puede considerar que en esos días no es posible gastar toda el agua disponible para el cultivo, por lo que existe un AGUA RESIDUAL que permanece en el suelo hasta que el cultivo emerja y que puede ser utilizada en los demás días del establecimiento. Para cultivos resistentes se toma el AGUA RESIDUAL igual a 8 mm, y para susceptibles a 5 mm. Esta consideración es relevante sólo en el caso de que la precipitación sea mínima o nula una vez que se siembra.

En los ejercicios realizados para la región del Pacífico Norte y Central de Costa Rica, la fecha más temprana de siembra se encuentra generalmente después del mes de marzo, y más a menudo desde finales de abril hasta mediados de mayo, de acuerdo al patrón de lluvia que se presenta. Esto no es igualmente válido para otras zonas del país ni del mundo.

Los criterios expuestos pueden ser variados para satisfacer otras características de precipitación a disposición del usuario.

### 2.3.2 ULTIMA FECHA A CAPACIDAD DE CAMPO.

Para el cálculo de esta fecha se efectúa el balance hídrico a partir de una fecha en que se tiene seguridad que el suelo está a capacidad de campo. Para la Zona Central y el Pacífico Seco de Centro América, esta condición se da aún a principios del mes de octubre, e incluso llega a darse hasta finales de noviembre y principios de diciembre.

Para hacer el balance se utilizan los parámetros de un cultivo ya establecido. El balance se efectúa hasta pasado el final de la estación lluviosa (finales de diciembre en las zonas ya citadas), obteniéndose de esta forma la última fecha con el suelo a capacidad de campo, o sea, la última fecha de la estación de lluvias cuando  $B_N$  llega a ser igual a su límite superior.

## 2.4 RIEGO.

---

Otra utilidad del programa es en la operación y diseño de sistemas de riego, ya que permite el cálculo del CALENDARIO DE RIEGO (calendario que muestra las fechas de riego y las cantidades de agua por aplicar).

Para determinar el calendario de riego, el programa efectúa el balance diario y cada vez que se presenta un día con déficit, se establece como un día de riego, calculándose la lámina (mm) neta de agua a regar como un porcentaje (escogido por el usuario) del  $ADC_N$ . La lámina neta aplicada entra a la ecuación (2.1) como precipitación, por lo que se repone total o parcialmente el agua del suelo. El volumen neto a aplicar se encuentra multiplicando la lámina neta por el área del siembra, y el caudal neto se encuentra dividiendo ese volumen por el tiempo entre riegos. El volumen aplicado y el caudal aplicado se calculan dividiendo los netos entre la eficiencia del sistema de riego.

Si el programa se está utilizando para diseño, el cálculo se debe efectuar para la cantidad de años que se considere necesaria, y luego se escogen las láminas y caudales que se den con un período de retorno escogido por el diseñador.

Si se está calculando el calendario de riego para el manejo de un sistema de riego ya construido y en operación, los datos meteorológicos reales se deben introducir día a día, en combinación con un estimado probabilístico de los días futuros. Así, el programa dirá si se debe regar el día de hoy y cuales pueden ser los riegos futuros. Cada día en que se introducen nuevos datos reales se puede recalcular el calendario de riego para obtener mejores estimaciones de los riegos presentes y futuros.

## 2.5 ANALISIS DE PRECIPITACION.

---

El programa también es capaz de analizar la precipitación de dos formas: encontrando precipitación diaria probable para un juego determinado de datos y calculando acumulados de precipitación para el incremento de tiempo que el usuario desee (décadas, péntadas, etc.). Este tipo de análisis no es tan preciso como el obtenido usando balance hídrico, pero se incluyó en el programa dado que es bastante extendido y utilizado.

La cantidad de DIAS SECOS y DIAS MUY HUMEDOS se calculan comparando cada precipitación en el período especificado con una precipitación máxima y una precipitación mínima (también especificadas por el usuario): cuando la precipitación en un día está por debajo de la mínima, se le considera un día seco, y cuando está por encima de la máxima, se le considera un día muy húmedo. Este cálculo sirve para detectar épocas del año que se pueden considerar demasiado secas o demasiado húmedas, así como la magnitud y variabilidad de los eventos.

Los ACUMULADOS se calculan sumando las precipitaciones de los días dentro del incremento de tiempo escogido por el usuario (pentadal, decadal, mensual, del período, etc.). Igual que el anterior, sirve para detectar épocas del año muy lluviosas o muy secas.

Para calcular la LLUVIA PROBABLE para una fecha determinada, el programa ordena de mayor a menor todos los datos que posee para dicha fecha, asignándole una probabilidad (probabilidad de que el valor sea superado) de  $1/NV*100$  a cada valor, donde  $l$  es el orden que ocupó el valor después de ser ordenado (1 para el valor más alto) y  $NV$  es el número de valores que el programa tiene para la precipitación en dicha fecha.

---

## 3. FUNCIONAMIENTO DEL PROGRAMA.

---

### 3.1 GENERALIDADES E INSTALACION.

---

El modelo AQUA (Agricultural QUery and Analysis) es un programa que implementa un modelo matemático para la planificación de siembras, la zonificación agrícola y el análisis agro-climático básico. A partir del cálculo del balance hídrico, el programa es capaz de estimar, entre otras aplicaciones: la fecha más temprana de siembra para un cultivo, la última fecha en que el suelo está a capacidad de campo en el año, los índices de estrés hídrico y el calendario de riego. También efectúa análisis básico de precipitación.

Las capacidades mencionadas anteriormente permiten diseñar y evaluar, por simulación, diferentes cultivos, fechas de siembra y secuencias de cultivos con el propósito de optimizar los rendimientos en función del agua de lluvia. Para efectuar estos cálculos el programa requiere de datos climáticos (evaporación mensual y lluvia diaria), datos de suelo y datos del cultivo.

El modelo ha sido desarrollado y validado para condiciones de Centro América, lo cual considera la simplificación de las variables empleadas para incluir solamente aquellas fácilmente disponibles.

Otras capacidades del paquete son la generación de reportes por pantalla, impresos o a disco (los reportes a disco permiten cierta exportación de los resultados de los cálculos y de los datos de lluvia diaria) y de gráficos a pantalla o impresora (basados en los resultados de los diferentes tipos de cálculos), y la importación de datos en formato ASCII.

Por otra parte, AQUA está diseñado para ser de uso sencillo por personal calificado en el tema, así como para proporcionar un manejo fácil y una buena validación de los datos.

Los requerimientos mínimos para utilizar AQUA son:

Un microcomputador IBM compatible con

- 640KB de RAM (o memoria principal)
- 700KB de espacio en disco
- Una tarjeta gráfica CGA, EGA, VGA, HERCULES, IBM 3270 o AT&T 6300.

Para instalar el programa el usuario debe introducir el disco de instalación y dar el comando "AQUA", seguido del directorio en el que desea instalar el programa. Por ejemplo, si se desea instalar el programa en el directorio C:\AQUA, el usuario debe dar el comando "AQUA C:\AQUA".

Una vez instalado el programa, puede instalarse otra copia en cualquier otro directorio dando el comando "INSTALA" desde el directorio donde se instaló originalmente, seguido del directorio donde se instalará la nueva copia del programa. Por ejemplo, para instalar otra copia del programa en el disco A:, se debe escribir "INSTALA A:"

Para correr el programa ya instalado, el usuario debe dar el comando "AQUA" en el directorio donde se instaló. Si el programa no despliega bien los colores o los gráficos, es necesario que el usuario dé el comando AQUA seguido por el tipo de tarjeta graficadora de video (CGA, EGA, VGA, HERCULES, 3270, 6300, LCD). Por ejemplo, si se tiene una pantalla de cristal líquido con tarjeta graficadora CGA, es necesario que el usuario dé el comando "AQUA LCD".

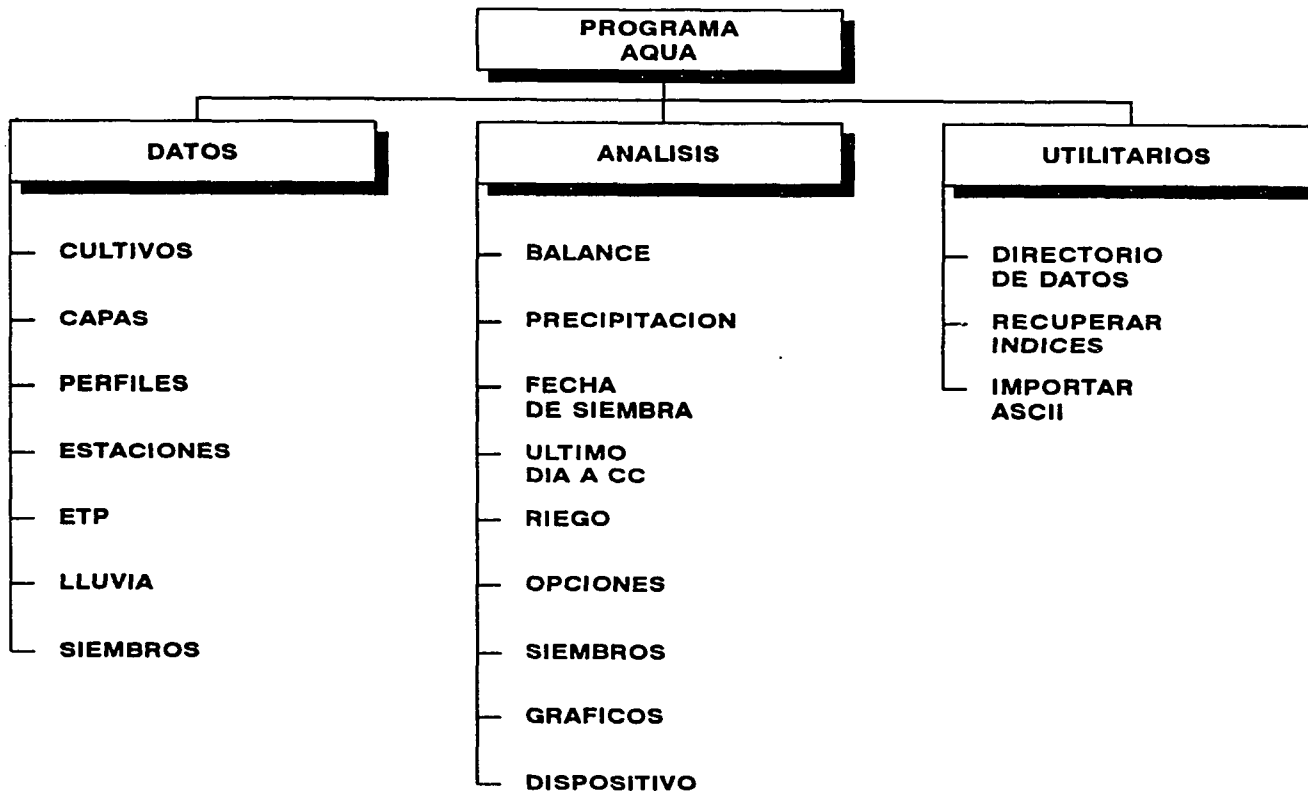
## 3.2 ESTRUCTURA GENERAL DE AQUA.

---

AQUA está compuesto por tres grandes módulos principales:

- Opción de DATOS, donde se actualizan los conjuntos de datos que se van a utilizar como entrada para los cálculos.
- Opción de ANALISIS, donde se ejecutan los diferentes tipos de cálculos, se generan los gráficos respectivos y se seleccionan algunas opciones especiales de configuración.
- Opción de UTILITARIOS, donde se realizan operaciones opcionales como lo son la especificación del directorio de trabajo y la importación de archivos.

En la Figura 3.1 se presenta un diagrama general de AQUA, que muestra sus dos primeros niveles de menús.



**Figura 3.1: Diagrama de los dos primeros niveles de menús del programa AQUA.**

213



### 3.3 OPCION DE DATOS.

---

Esta opción se encarga del manejo de los diferentes tipos de datos. Actualmente AQUA maneja los siguientes siete juegos de datos:

Cultivos

Capas

Perfiles

Estaciones meteorológicas

ETP

Lluvia

Siembros

En el Cuadro 3.1 se puede observar un desglose de cada juego de datos. La actualización de cada uno de estos juegos de datos conlleva el siguiente procedimiento (NOTA: Los casos de ETP y Lluvia son casos especiales y sus procedimientos de actualización son distintos. Ver el siguiente apartado para aclarar este punto):

- A. Seleccionar en el Menú de DATOS la opción respectiva.
- B. Aparecerá la lista completa del tipo de datos escogido que está en memoria. En ella se despliega únicamente el "campo llave" del dato, es decir, el campo que identifica plenamente cada ítem del mismo. Además, esta lista está ordenada alfabéticamente en orden ascendente.
- D. Seleccionar el dato que se desea modificar, copiar o eliminar; o, si no, presionar la tecla de inserción de un nuevo dato.
- E. Presionar ESC para volver al Menú de DATOS.

JUEGO DE DATOS	INFORMACION UTILIZADA
Cultivo	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Nombre del cultivo.</li> <li>■ Duración efectiva.</li> <li>■ Tipo de cultivo (resistente o susceptible).</li> <li>■ Tipo de dato (valores al final de etapa o promedio durante etapa).</li> <li>■ Lista de 7 etapas máximo con: nombre de etapa, duración, Kc (coeficiente de cultivo), CA (coeficiente de agotamiento), PR (profundidad de raíces).</li> </ul>
Capa	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Nombre de capa.</li> <li>■ Capacidad aprovechable.</li> </ul>
Perfil	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Nombre de perfil.</li> <li>■ Lista de 5 capas máximo, cada una con su nombre y espesor.</li> </ul>
Estación	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Nombre de estación.</li> <li>■ Elevación.</li> <li>■ Localización (latitud y longitud).</li> <li>■ Tipo (A, B o C).</li> </ul>
ETP	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Nombre de estación meteorológica.</li> <li>■ Si es ETP diaria : Fecha (mes/año) y 31 valores diarios.</li> <li>■ Si es ETP mensual : Fecha (año) y 12 valores diarios (uno por mes).</li> <li>■ Si es ETP promedio: 12 valores diarios (uno por mes).</li> </ul>
Lluvia	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Nombre de estación meteorológica.</li> <li>■ Fecha (mes/año) y 31 valores diarios.</li> </ul>
Siembro	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Nombre de siembro.</li> <li>■ Fecha de siembra (día/mes/año).</li> <li>■ Area del siembro.</li> <li>■ Nombre del perfil de suelo.</li> <li>■ Nombre del cultivo.</li> <li>■ Nombre de estación meteorológica.</li> </ul>

Cuadro 3.1: Desglose de los datos utilizados por el programa AQUA.

A continuación se presenta una explicación un poco más detallada de cada uno de los tipos de datos necesarios:

### 3.3.1 CULTIVOS.

La información que se mantiene en la base de datos sobre cultivos incluye el NOMBRE DEL CULTIVO (ej. especie y cultivar), su DURACION EFECTIVA (ciclo efectivo de crecimiento), el TIPO DEL CULTIVO (resistente [por defecto] o susceptible al déficit hídrico), el TIPO DE DATO (es decir, si se utilizarán valores al final de cada etapa o valores promedio) y una LISTA DE ETAPAS de desarrollo del cultivo, donde cada etapa está formada por el NOMBRE DE LA ETAPA (o número), su DURACION, su kc (coeficiente del cultivo), su CA (coeficiente de agotamiento) y su PR (profundidad de raíces).

#### 3.3.1.1 Duración efectiva.

El dato de ciclo efectivo de crecimiento que se utiliza es el número de días desde la siembra hasta que el producto cosechable se independiza de la planta. En cultivos agronómicos, esto ocurre básicamente cuando el grano comienza el proceso de secado, tras adquirir madurez fisiológica. Una apreciación concurrente es el inicio de senescencia foliar. En caso de no contarse con esta información, se puede utilizar el valor corrientemente dado para el cultivo menos 10 días. Debe ponerse particular atención al período de pre-emergencia, en función de contabilizar o no los días entre siembra y emergencia. Esto último se explica a continuación.

Debe notarse que existe una etapa especial, llamada "PRE EMERGENCIA", que se utiliza para el estado de preemergencia de los cultivos. Cuando AQUA detecta que la primera etapa del cultivo tiene este nombre, no contabiliza los días con déficit o exceso hídrico que ocurran durante la etapa (lo cual es lo recomendable en la mayoría de los casos), ni tampoco considera que se agote toda el agua del suelo. Lo anterior es útil para el cálculo de la fecha más temprana de siembra.

Para estudios de secuencias de cultivos y otras aplicaciones, se debe considerar que el dato utilizado aquí no representa el ciclo total del cultivo, que sería de siembra a cosecha (de mayor duración que lo analizado).

#### 3.3.1.2 Tipo de cultivo.

Se han identificado dos tipos de cultivo respecto a la tolerancia del déficit hídrico en la época de establecimiento del cultivo (primeros 20 días después de la siembra): resistente, que es lo utilizado por defecto (por ej., maíz, sorgo, girasol, soya, algodón) y susceptible (por ej., arroz, maní, frijol, la mayoría de las hortalizas).

Las diferencias entre estos dos tipos se expresan en las variables del cálculo de la fecha más temprana de siembra y en otras aplicaciones (ver Sección 2.3.1).

### 3.3.1.3 Tipo de dato.

Este campo tiene la finalidad de que el usuario pueda introducir datos para las diferentes etapas del cultivo de dos formas diferentes.

Si se le da un valor de 1 a este campo, el programa interpreta que los valores que se den en cada etapa representan los valores de cada característica del cultivo (PR, CA, Kc) al final (el último día) de la etapa, y para los demás días de cada etapa calculará cada característica haciendo una interpolación lineal entre el valor final de la etapa anterior y el final de la presente.

Si a este campo se le asigna el valor 2, los valores que se den para cada característica en cada etapa serán interpretados como valores promedio y constantes a lo largo de toda la etapa. Este es el modo en que el programa trabaja por defecto.

Se previeron estos dos tipos de datos porque en la literatura pueden darse cualquiera de los dos casos.

### 3.3.1.4 Etapas.

Se pueden definir un máximo de siete etapas, cada una con su nombre, duración, kc, CA y PR.

La duración de cada etapa significa el día, a partir de la fecha de siembra, hasta el que son válidos los valores de cada característica de cultivo. Por ej., si la primera etapa tiene una duración de 10 días y la segunda de 20, eso significa que la primera etapa dura hasta el día 10 después de la siembra, y la segunda etapa dura desde el día 11 hasta el día 20 después de la siembra.

Los valores de kc pueden variar de 0.4 al inicio (en la primera etapa) hasta 1.0 ó 1.2 en las etapas finales.

El coeficiente de agotamiento CA puede variar desde 0.4 a 0.5 al principio hasta 0.6 a 0.7 al final del desarrollo, dependiendo del cultivo (resistente o susceptible al déficit hídrico).

La profundidad de raíces PR puede ser de 10 a 20 cm al emerger, llegando de 50 a 150 cm o más en las etapas finales, según el tipo de cultivo y suelo.

### 3.3.2 CAPAS.

La información de capas incluye el NOMBRE DE LA CAPA (o número) y su CAPACIDAD APROVECHABLE de agua (contenido de agua entre capacidad de campo y punto de marchitez permanente, en mm/m). Las capas son utilizadas para definir los perfiles de los suelos. Los valores fluctuarán desde 50 mm/m o menos para suelos arenosos hasta incluso 200 mm/m para suelos limosos con alto contenido de materia orgánica. Un suelo franco puede tener un valor entre 100 y 150 mm/m.

### 3.3.3 PERFILES.

La información de perfiles incluye el NOMBRE DEL PERFIL (o número) de suelo (en otras palabras, el nombre del suelo) y una LISTA DE CAPAS en la cual se pueden especificar un máximo de 5 capas, cada una de ellas con un ESPESOR dado.

Cada capa que forma parte del perfil debe estar previamente definida en la opción CAPAS.

### 3.3.4 ESTACIONES METEOROLOGICAS.

La información de las estaciones meteorológicas incluye el NOMBRE DE LA ESTACION meteorológica, su ELEVACION (m s.n.m.), su localización dada en LATITUD y LONGITUD y su TIPO (A/B/C). El dato requerido o mínimo es el nombre, los otros son opcionales.

### 3.3.5 ETP.

Al escoger la opción ETP aparece un submenú donde se presentan los tres tipos de evapotranspiración que AQUA maneja:

- A. Diaria: Un valor por día (mm/día), cuando existe la posibilidad de calcularla diariamente o hay datos diarios de tanque de evaporación.
- B. Mensual: Un valor por mes (mm/día), 12 por cada año considerado.
- C. Promedio: Un valor fijo para cada mes (mm/día), para todos los años, es decir, hay 12 valores en total ya promediados o calculados para todos los años.

Una vez escogido el tipo de evapotranspiración que se desea introducir o actualizar, se presenta una lista con todas las estaciones meteorológicas actualmente definidas; por ejemplo, en el caso de escoger evapotranspiración MENSUAL, aparecen únicamente las estaciones a las que se les ha definido los valores mensuales de al menos un año. El usuario puede entonces escoger una estación de la lista presionando la tecla RETURN. Una vez escogida, se le presenta otra lista con todas las "llaves" para acceder los datos de evapotranspiración correspondientes a esa estación. La información "llave" que se presenta depende del tipo de evapotranspiración. Continuando con el ejemplo de ETP mensual, se desplegaría una lista de fechas (mes/año) en las que se tienen datos para la estación escogida.

Para poder introducir datos de evapotranspiración deben existir estaciones meteorológicas previamente definidas.

### 3.3.5.1 ETP Diaria.

La llave es MES/AÑO y para cada dato se incluye el NOMBRE DE LA ESTACION escogida, el MES/AÑO escogido y una LISTA MENSUAL con 31 valores de ETP. Los datos de ETP diaria que se tengan en hojas electrónicas o en CLICOM se pueden importar a AQUA utilizando el comando "Importar archivos ASCII" del menú de Utilitarios (ver Sección 4.3.3).

### 3.3.5.2 ETP Mensual.

La llave es AÑO y para cada dato se incluye el NOMBRE DE LA ESTACION escogida, el AÑO escogido, el MES y una LISTA ANUAL con 12 valores de ETP. Los datos de ETP Mensual también se pueden importar usando la opción "Importar archivos ASCII" del menú de Utilitarios (ver Sección 4.3.3).

### 3.3.5.3 ETP Promedio.

La llave es el NOMBRE DE LA ESTACION y para cada dato se incluye el NOMBRE DE LA ESTACION escogida y una LISTA ANUAL con 12 valores de ETP.

El rango de los valores de ETP va de 00.0 a 99.9. Para indicar un "valor faltante" debe digitarse un "-9.9" y un "valor dudoso" se especifica introduciendo el dato en forma negativa (por ejemplo, el valor "-3.4" significa el dato 3.4 y es "dudoso"). Los valores dudosos serán usados para efectuar los cálculos si así se especifica en la escogencia "Datos dudosos" del menú de "Opciones" de los cálculos (ver Sección 4.5.6); si se especifica lo contrario, los datos dudosos se tomarán como valores faltantes y el programa no efectuará el cálculo para el ciclo del siembro en que aparezcan datos dudosos.

Al usuario se le ofrece también información adicional sobre los datos de ETP que puede ser útil como forma de control durante la digitación de los mismos. Esta información incluye la SUMATORIA ( $\Sigma$ ) y el PROMEDIO (X) de los datos, en forma decadal, mensual y anual, dependiendo del tipo de evapotranspiración que se esté actualizando.

Una vez terminada la actualización de los datos para una estación dada, se debe presionar la tecla ESC para "volver" a la lista de estaciones meteorológicas (en el caso de ETP promedio se "vuelve" al Menú de Tipos de ETP).

### 3.3.6 LLUVIA.

Al escoger esta opción aparece inicialmente una lista con todas las estaciones meteorológicas definidas. Para poder introducir datos de precipitación deben existir estaciones meteorológicas previamente definidas. El usuario puede entonces escoger una de ellas presionando la tecla RETURN. Una vez escogida la estación se le presenta otra lista con todos los datos de precipitación correspondientes a esa estación. La información "llave" que se presenta es MES/AÑO, y para cada dato se incluye el NOMBRE DE LA ESTACION escogida, el MES/AÑO escogido y una LISTA MENSUAL con 31 valores de PPT.

El rango de los valores de PPT va de 000.0 a 999.9. Para indicar un "valor faltante" debe digitarse un "-999.9" y un "valor dudoso" se especifica introduciendo el dato en forma negativa (por ejemplo, el valor "-80.7" significa el dato 80.7 es "dudoso"). De manera semejante a los datos dudosos de ETP, si se especifica en la sección de "Opciones" de los cálculos (Sección 4.5.6) que se deben utilizar los datos dudosos de lluvia, éstos se tomarán como un dato normal, y si se especifica lo contrario, los datos dudosos de lluvia serán tomados como valores faltantes y el cálculo no se efectuará para el ciclo de cultivo que contenga dichos datos.

Al igual que para ETP, al usuario se le ofrece también información adicional sobre los datos de PPT que puede ser útil como forma de control durante la digitación de los mismos. Esta información incluye la SUMATORIA ( $\Sigma$ ) y el PROMEDIO (X) de los datos, en forma decadal y mensual.

La importación de datos de precipitación se puede efectuar utilizando la opción "Importar archivos ASCII" del menú de Utilitarios (Sección 4.3.3).

Una vez terminada la actualización de los datos para una estación dada, se debe presionar la tecla ESC para "volver" a la lista de estaciones meteorológicas.

### 3.3.7 SIEMBROS.

Para poder introducir datos de siembros deben existir estaciones meteorológicas, perfiles, capas y cultivos previamente definidos.

La información de siembros incluye el NOMBRE DEL SIEMBRO, el DIA/MES/AÑO DE SIEMBRA, su AREA de siembra y además un NOMBRE DE PERFIL, un NOMBRE DE CULTIVO y un NOMBRE DE ESTACION METEOROLOGICA. La estación se utiliza para indicar los juegos de datos de ETP y PPT que deben utilizarse para los cálculos, para ese siembro. El nombre del perfil y del cultivo proveen la información restante necesaria.

El dato SIEMBRO es la unidad mínima utilizada para realizar los cálculos; es decir, si se desea realizar algún tipo de cálculo, debe escogerse sobre cuál o cuáles siembros se desea realizarlo. El siembro es el cultivo en estudio, específico espacial y temporalmente. Por ejemplo, una misma variedad de arroz puede sembrarse en varias localidades con diferente clima, o en una misma localidad con diferentes suelos o fechas de siembra, etc. Una consideración a tomarse en cuenta es que el ciclo de vida de un cultivo varía con la temperatura de la localidad. Este tipo de variación implica utilizar una entrada diferente de CULTIVO, aunque sea la misma variedad.

Para realizar los cálculos en base a uno o varios siembros, AQUA permite que sean marcados un máximo de 10 siembros de la lista. La lista de siembros marcados es almacenada en disco una vez que termina el programa, y es de nuevo restaurada al reiniciarse el mismo: esto se hace con el fin de mantener una configuración automática, liberando al usuario de tener que marcar los siembros que le interesan cada vez que entra al programa.

### 3.3.8 DESCRIPCION DEL MANEJO DE LAS LISTAS DE DATOS.

A continuación se presenta una descripción de los comandos permitidos para la actualización de datos, o sea, las funciones existentes para el manejo de las listas de datos que se tienen en la unidad de almacenamiento (disco fijo, duro o flexible). Recuérdese que las listas de datos despliegan los "campos llave" de cada dato; así, para cultivos, capas, perfiles, estaciones, ETP promedio y siembros la llave es el nombre, para ETP mensual la llave es el año y para PPT y ETP diaria es el mes/año. Recuérdese también que el dato sobre el cual pueden aplicarse los comandos está especificado por una barra de escogencia que aparece en "color invertido" en pantalla, para su identificación.

#### FLECHA CURSOR ABAJO

Posicionar la barra de escogencia en el siguiente elemento de la lista.



**FLECHA CURSOR ARRIBA**

Posicionar la barra de escogencia en el elemento anterior de la lista.

**FLECHA CURSOR DERECHA**

Posicionar la barra de escogencia en el primer mes del próximo año. Este comando es únicamente para datos de precipitación y evapotranspiración diaria (cuyas llaves son mes/año) y su función es permitir al usuario "navegar" por la lista de datos más rápidamente, dada la gran cantidad de estos datos climáticos que pueden existir, para una estación meteorológica dada.

**FLECHA CURSOR IZQUIERDA**

Posicionar la barra de escogencia en el último mes del año anterior. Este comando es únicamente para datos de precipitación y evapotranspiración diaria y su función es la misma que la del comando anterior (flecha cursor derecha).

**PG DN**

[Page Down] Posicionar la barra de escogencia una "pantalla" de datos hacia abajo en la lista.

**PG UP**

[Page Up] Posicionar la barra de escogencia una "pantalla" de datos hacia arriba en la lista.

**HOME**

Posicionar la barra de escogencia en el primer elemento de la lista, de la parte actualmente desplegada en pantalla.

**END**

Posicionar la barra de escogencia en el último elemento de la lista, de la parte actualmente desplegada en pantalla.

**CTRL HOME**

Posicionar la barra de escogencia en el primer elemento absoluto de la lista.

-222-

### CTRL END

Posicionar la barra de escogencia en el último elemento absoluto de la lista.

### TAB

Este comando funciona únicamente cuando se están actualizando datos de siembros y se utiliza para Marcar/Desmarcar siembros. Los siembros marcados son identificados con un número a la izquierda de su nombre. El número máximo de siembros que se pueden marcar para una misma corrida es 10.

### INS

Insertar un nuevo dato. Cuando se presiona la tecla INS estando en una lista de datos, aparece la pantalla de entrada de datos respectiva. Una vez que la información del dato es digitada, se debe presionar la tecla F10 para almacenarla, volviendo a aparecer de nuevo la pantalla de entrada de datos vacía, lista para insertar un nuevo dato. Esta operación continuará hasta que se presione la tecla ESC cuando aparece la pantalla de datos vacía.

En la parte inferior de la pantalla aparece un mensaje indicando que actualmente AQUA está en modo de inserción de datos.

### DEL

Eliminar (borrar) el dato actual, o sea, donde se encuentra la barra de escogencia. Por seguridad, antes de eliminarlo se pide una verificación de esta operación.

Por otra parte, nótese la particularidad de los siguientes casos: si se elimina un cultivo o un perfil, en todos los siembros que lo usaban se borra su nombre; si se elimina una capa, en todos los perfiles que la usaban se borra su nombre; si se elimina una estación, en todos los siembros que la usaban se borra su nombre, y además, todos los datos climáticos (los diferentes tipos de ETP y PPT) asociados a esa estación son eliminados automáticamente.

Nótese también que los datos en donde se borran los nombres de cultivos, perfiles, capas o estaciones van a quedar incompletos luego de eliminar el dato asociado, por lo que se recomienda actualizar esa "información perdida". Por ej., si se eliminó la estación meteorológica Cañas de la lista de estaciones y se tiene un siembro que utiliza los datos climáticos de dicha estación, es necesario reasignar ese siembro a otra estación. En todo caso, si faltase alguno de estos nombres durante la ejecución de los cálculos, se dará el respectivo mensaje de error.

## RETURN

[Enter] Modificar la información del dato actual, o sea, donde se encuentra la barra de escogencia. Cuando se presiona la tecla RETURN aparece la pantalla de entrada de datos respectiva con la información actualizada del dato; el usuario puede entonces hacer las modificaciones deseadas y luego presionar la tecla F10 para almacenar el dato ya modificado. La tecla ESC aborta la operación de modificación.

En la parte inferior de la pantalla aparece un mensaje indicando que actualmente AQUA está en modo de modificación de datos.

## CTRL RETURN

Hacer una copia del dato actual, o sea, donde se encuentra la barra de escogencia, cambiándole la información del campo llave. Este comando es similar a INS (Insertar) salvo que la pantalla de entrada de datos no aparece vacía, sino que aparecer "llena" con la información del dato actual. Una vez hechos los cambios deseados se debe presionar la tecla F10 para almacenar el dato. Este es luego insertado como un dato nuevo.

En la parte inferior de la pantalla aparece un letrero indicando que actualmente AQUA está en modo de copiado de datos.

## F10

Esta tecla tiene varios usos no conflictivos. Sirve para almacenar los datos de cualquier pantalla de datos, para aceptar los cambios hechos a algún dato que se esté copiando o cambiando, para salir de las listas de datos, de los menús y del programa y para producir el gráfico que se escoja en la sección de gráficos.

## ESC

Terminar la actualización ("salir" de la lista) y volver al Menú de Datos. Sirve también para abandonar cualquier pantalla de datos sin almacenar los cambios que se le hayan efectuado o los datos que se hayan introducido.

### 3.4 OPCION DE ANALISIS.

---

Esta opción se encarga de la realización de todos los tipos de cálculos que AQUA permite. El Cuadro 3.2 muestra cada uno de los submenús de la opción de ANALISIS. Antes de pasar a explicar cada tipo de cálculo en detalle, nótese las siguientes consideraciones:

- Todos los cálculos toman como datos base a los SIEMBROS actualmente marcados en la lista de SIEMBROS.
- Cada vez que se efectúa un cálculo sus resultados se almacenan temporalmente. Así, si se repite el mismo cálculo, se pregunta al usuario si desea ver los resultados del cálculo previo o si desea rehacerlo. En el caso de que se efectúe un cálculo distinto, los resultados del cálculo previo se sustituyen por los nuevos.
- En el reporte de los resultados de cualquier cálculo se presentan una serie de pantallas con datos indicativos del tipo de cálculo, el SIEMBRO utilizado, etc., además de los resultados mismos. En cada una de estas pantallas el usuario puede presionar la tecla ESC para terminar el reporte y salirse, o cualquier otra tecla para continuar con la siguiente pantalla.

Seguidamente se detalla cada uno de los diferentes tipos de cálculos que se hallan integrados en AQUA:

#### 3.4.1 BALANCE.

Este es el "Cálculo del Balance Hídrico", el cual tiene las siguientes opciones:

##### 3.4.1.1 Incremento de tiempo.

Aquí se especifica el incremento con que se desea que se haga el reporte de los resultados del balance hídrico; esto es, si se desean los resultados cada día, péntada, década, etc.

225

ESCOGENCIA	SUBMENU
Balance	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Incremento de tiempo.</li> <li>■ Datos de balance.</li> <li>■ Efectuar cálculo.</li> <li>■ Reporte en días o mm.</li> </ul>
Precipitación	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Incremento de tiempo.</li> <li>■ Datos de precipitación.</li> <li>■ Días con y sin lluvia.</li> <li>■ Correlación de periodos.</li> <li>■ Acumulados.</li> <li>■ Lluvia probable.</li> <li>■ Criterios.</li> </ul>
Fecha de siembra	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Datos de fecha más temprana.</li> <li>■ Efectuar cálculo.</li> <li>■ Criterios.</li> <li>■ Reporte normal o % de ocurrencia.</li> </ul>
Ultimo día a CC	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Datos de última fecha a CC.</li> <li>■ Efectuar cálculo.</li> <li>■ Reporte normal o % de ocurrencia.</li> </ul>
Riego	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Datos para el calendario.</li> <li>■ Efectuar el cálculo.</li> <li>■ Criterios.</li> </ul>
Opciones	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Datos dudosos.</li> <li>■ Agua hasta PMP.</li> <li>■ Tipo de ETP.</li> </ul>
Siembros	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Lista de manejo de datos de siembros.</li> </ul>
Gráficos	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Gráfico actual.</li> <li>■ Tipo de gráfico.</li> <li>■ Código del vértice.</li> <li>■ Gráfico inverso.</li> <li>☒ Gráfico por impresora.</li> </ul>
Dispositivo	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Pantalla.</li> <li>■ Impresora.</li> <li>■ Disco.</li> </ul>

Cuadro 3.2. Esquema de los submenús que se presentan en cada escogencia del menú de análisis.

### 3.4.1.2 Datos de balance.

Se presenta la lista de SIEMBROS actualmente marcados y se permite especificar un intervalo de años [AÑO INICIAL-AÑO FINAL] para los cuales se va a realizar el cálculo del Balance Hídrico. También se puede especificar un período [DIA/MES INICIAL-DIA/MES FINAL] que limite los datos que se desplegarán en el reporte. Presionando la tecla <F3> se puede averiguar el intervalo máximo de años en los que es posible efectuar el cálculo de balance.

### 3.4.1.3 Efectuar el cálculo.

Se efectúa el cálculo del Balance Hídrico y se hace el reporte respectivo. Durante el cálculo se despliega una pantalla en la que se va indicando el nombre del SIEMBRO para el que se está realizando el cálculo, el intervalo de años utilizado, el período que se desplegará en el reporte y el año actual que se está procesando (de acuerdo al intervalo definido).

### 3.4.1.4 Reporte en...

Esta opción es un "SWITCH" que determina el tipo de datos que aparecerán en el reporte del cálculo del Balance Hídrico, y puede tener dos posibles estados:

#### A. Reporte en días

En este caso, el reporte presentará los siguientes datos, para cada rango de fechas, de acuerdo al intervalo de tiempo definido:

- A.1. DIAS CON DEFICIT
- A.2. DIAS CON EXCESO
- A.3. DIAS CON ESTRES
- A.4. INDICES DE DEFICIT
- A.5. INDICES DE EXCESO
- A.6. INDICES DE ESTRES

También, al final del reporte se presentarán los TOTALES y los PROMEDIOS para cada uno de estos datos.

## **B. Reporte en mm**

En este caso, el reporte presentará los siguientes datos, para cada rango de fechas, de acuerdo al intervalo de tiempo definido:

B.1. BALANCE

B.2. ADC (Agua fácilmente Disponible para el Cultivo)

B.3. BALANCE/ADC

### **3.4.2 PRECIPITACION.**

Esta sección se encarga de toda el área de análisis de precipitación. Para los diferentes cálculos se necesitan los datos de PPT, y éstos deben estar especificados por una Estación Meteorológica. Para esto, se toma como base para cualquier cálculo de PPT la Estación Meteorológica del primer siembro marcado en la lista de SIEMBROS. Si se desea marcar un siembro, se debe entrar en la opción de "Siembros" de las secciones de "Análisis" o de "Datos".

Las opciones de la sección de precipitación son:

#### **3.4.2.1 Incremento de tiempo.**

Aquí se especifica el incremento con que se desea que se haga el reporte de los resultados del Análisis de Precipitación; esto es, si se desean los resultados en días, en péntadas, en décadas, etc.

#### **3.4.2.2 Datos de precipitación.**

En este apartado se especifica el intervalo de años para los cuales se van a realizar los diferentes tipos de cálculos de precipitación. También se especifican dos períodos (un período es el intervalo de días entre dos fechas) que son utilizados de la siguiente forma:

- Los períodos #1 y #2 se utilizan para el cálculo de "CORRELACION DE PERIODOS"; es decir, precipitación en el período #1 versus precipitación en el período #2.
- También se utilizan estos períodos para generar los gráficos Fecha versus Precipitación y Fecha versus Evapotranspiración. El Período #1 especifica el intervalo para el cual se graficarán los datos de PPT y ETP.

2005

- Finalmente, el Período #1 se utiliza en los cálculos restantes "DIAS CON Y SIN LLUVIA", "ACUMULADOS" y "LLUVIA PROBABLE" para limitar el rango de datos de PPT por analizar.

### 3.4.2.3 Días con y sin lluvia.

Ejecuta el cálculo para encontrar los días con y sin lluvia, tomando como criterios para ello los valores definidos por el usuario en la opción CRITERIOS (de este mismo menú).

### 3.4.2.4 Correlación de períodos.

Realiza la correlación o comparación de la precipitación entre dos períodos o intervalos de tiempo. Por ejemplo, se puede hacer la correlación entre 01/05-31/05, Mayo, y 01/11-30/11, Noviembre. Este tipo de correlaciones sirve, por ej., para encontrar en qué medida la fecha del inicio de las lluvias determina la fecha del veranillo o del fin de la época lluviosa para una zona, es decir, se constituye en un enfoque empírico para discernir predecibilidad de la PPT (ver Radulovich, 1987b)

### 3.4.2.5 Acumulados.

Ejecuta el cálculo de acumulados utilizando el incremento de tiempo actualmente activo. Los acumulados son simplemente sumatorias de PPT a intervalos regulares (por ej., acumulados diarios, mensuales, anuales, etc.).

### 3.4.2.6 Lluvia probable.

Ejecuta el cálculo de lluvia probable para el Período #1, lo cual significa, por defecto, la cantidad de PPT que no será superada en un 75% de los años especificados. Para calcular la lluvia probable para una fecha determinada, AQUA ordena de mayor a menor todos los datos que posee para dicha fecha (es decir, todos los años), asignándole una probabilidad de  $(I/NV)*100$  a cada valor (probabilidad de que el valor sea superado), donde I es el orden que ocupó el valor después de ser ordenado (1 para el valor más alto, etc.) y NV es el número de valores (años) de PPT que se tienen para esa fecha.



### 3.4.2.7 Criterios.

Con esta opción el usuario puede cambiar a su escogencia algunos de los parámetros utilizados en los cálculos de Precipitación, que son:

- La probabilidad de que se presente una PPT menor o igual a la calculada (por defecto, 75%). Este parámetro es utilizado únicamente en el cálculo de "LLUVIA PROBABLE".
- La PPT por debajo de la cual se considera al día como seco (por defecto, 5.0 mm). Este parámetro es utilizado únicamente en el cálculo de "DIAS CON Y SIN LLUVIA".
- La PPT por encima de la cual se considera al día como muy húmedo (por defecto, 20.0 mm). Este parámetro (junto con el anterior) es utilizado únicamente en el cálculo de "DIAS CON Y SIN LLUVIA".

### 3.4.3 FECHA MAS TEMPRANA DE SIEMBRA.

Esta sección permite calcular la "FECHA MAS TEMPRANA DE SIEMBRA", y consta de las siguientes opciones:

#### 3.4.3.1 Datos de fecha más temprana.

En este apartado se especifica el intervalo de años para los cuales se va a realizar el cálculo de "FECHA MAS TEMPRANA DE SIEMBRA". Además, puede variarse aquí la fecha de inicio del cálculo, que por defecto es el 15 de Marzo. Estos parámetros pueden especificarse para cada uno de los siembros actualmente marcados.

#### 3.4.3.2 Efectuar cálculo.

Se efectúa el cálculo de la fecha más temprana de siembra y se hace el reporte respectivo. Durante el cálculo se despliega una pantalla en la que se va indicando el nombre del SIEMBRO para el que se está realizando el cálculo, el intervalo de años utilizado, la fecha de inicio del cálculo y el año actual que se está procesando (de acuerdo al intervalo definido).

### 3.4.3.3 Criterios.

Con esta opción el usuario puede cambiar a su escogencia algunos de los parámetros utilizados en el cálculo de la "FECHA MAS TEMPRANA DE SIEMBRA" (ver sección 2.3.1), como lo son:

- Días para establecimiento del cultivo (por defecto, 20 días), contando desde el día de siembra.
- PPT mínima en la década anterior a la siembra (por defecto, 30.0 mm).
- PPT máxima que permite realizar labores (por defecto, 5.0 mm por día).
- Días con PPT menor a PPT máxima (por defecto, 3 días), o días secos.
- Días con PPT nula (por defecto, 2 días), o días secos.
- Uso de días secos consecutivos para siembra (por defecto, "SI"). Este parámetro es un "SWITCH" que toma los valores SI/NO.
- Días permitidos con déficit (por defecto, 1 día para cultivos susceptibles y 2 días para cultivos resistentes).
- Agua residual (por defecto, 5 mm para cultivos susceptibles y 8 mm para cultivos resistentes).

### 3.4.3.4 Reporte...

Esta opción es un "SWITCH" que determina el tipo de datos que aparecerán en el reporte del cálculo de la "FECHA MAS TEMPRANA DE SIEMBRA", y puede tener dos posibles estados:

#### Reporte normal

En este caso, el reporte presentará los siguientes datos, para cada SIEMBRO:

AÑO DE CALCULO

FECHA MAS TEMPRANA DE SIEMBRA

#### Reporte % de ocurrencia

En este caso, el reporte presentará los siguientes datos, para cada SIEMBRO:

FECHA MAS TEMPRANA DE SIEMBRA

% DE OCURRENCIA RESPECTIVO (en orden)

### 3.4.4 ULTIMO DIA A CAPACIDAD DE CAMPO.

Esta sección permite calcular el "ULTIMO DIA A CAPACIDAD DE CAMPO", y consta de las siguientes opciones:

#### 3.4.4.1 Datos de último día a CC.

En este apartado se especifica el intervalo de años [AÑO INICIAL AÑO FINAL] para los cuales se va a realizar el cálculo del "ULTIMO DIA A CAPACIDAD DE CAMPO". Estos parámetros pueden especificarse para cada uno de los siembros actualmente marcados.

#### 3.4.4.2 Efectuar cálculo.

Se efectúa el cálculo del "ULTIMO DIA A CAPACIDAD DE CAMPO" y se hace el reporte respectivo. Durante el cálculo se despliega una pantalla en la que se va indicando el nombre del SIEMBRO para el que se está realizando el cálculo, el intervalo de años utilizado y el año actual que se está procesando (de acuerdo al intervalo definido).

#### 3.4.4.3 Reporte...

Esta opción es un "SWITCH" que determina el tipo de datos que aparecerán en el reporte del cálculo del "ULTIMO DIA A CAPACIDAD DE CAMPO", y puede tener dos posibles estados:

##### Reporte normal

En este caso, el reporte presentará los siguientes datos, para cada SIEMBRO:

AÑO DE CALCULO

ULTIMO DIA A CAPACIDAD DE CAMPO

##### Reporte % de ocurrencia

En este caso, el reporte presentará los siguientes datos, para cada SIEMBRO:

ULTIMO DIA A CAPACIDAD DE CAMPO

% DE OCURRENCIA RESPECTIVO (en orden)

### 3.4.5 RIEGO.

Esta sección permite calcular el "CALENDARIO DE RIEGO" (este es el calendario que muestra las fechas de riego y las cantidades de agua por aplicar) para un siembro (cultivo, fecha de siembra, estación meteorológica y suelo específicos), lo que hace posible, exportando los resultados a disco y utilizando hojas electrónicas o programas de probabilidad, calcular estimados probabilísticos para aplicaciones de diseño. Esta consta de las siguientes opciones:

#### 3.4.5.1 Datos para el calendario.

Se presenta la lista de SIEMBROS actualmente marcados y se permite especificar un intervalo de años [AÑO INICIAL-AÑO FINAL] para los cuales se va a realizar el cálculo del "CALENDARIO DE RIEGO". También se puede especificar un período [DIA/MES INICIAL-DIA/MES FINAL] que limite los datos que se desplegarán en el reporte.

#### 3.4.5.2 Efectuar cálculo.

Se efectúa el cálculo del "CALENDARIO DE RIEGO" y se hace el reporte respectivo. Durante el cálculo se despliega una pantalla en la que se va indicando el nombre del SIEMBRO para el que se está realizando el cálculo, el intervalo de años utilizado, el período que se desplegará en el reporte y el año actual que se está procesando (de acuerdo al intervalo definido). Como resultado, el reporte presentará los siguientes datos, para cada SIEMBRO:

- FECHA DE RIEGO
- NUMERO DE DIAS DESDE EL ULTIMO RIEGO
- LAMINA NETA DE AGUA A REGAR
- VOLUMEN A APLICAR (NETO)
- VOLUMEN A APLICAR (APLICADO)
- CAUDAL MINIMO (NETO)
- CAUDAL MINIMO (APLICADO)

#### 3.4.5.3 Criterios.

Con esta opción el usuario puede cambiar a su escogencia algunos de los parámetros utilizados en el cálculo del "CALENDARIO DE RIEGO", que son:

223

- El porcentaje de ADC (Agua fácilmente Disponible para el Cultivo) aplicado en cada riego (por defecto, 100%).
- La eficiencia de riego (por defecto, 70%).

### 3.4.6 OPCIONES.

Esta sección contiene tres "banderas" indicadoras de la forma en que deben realizarse algunos de los cálculos. Estas son:

#### 3.4.6.1 Datos dudosos.

Este es un "SWITCH" del tipo SI/NO que se utiliza para indicar que los datos de Precipitación y Evapotranspiración almacenados como dudosos (como números negativos) se utilicen como datos válidos, o en caso contrario, sean tomados como datos faltantes (por defecto el "SWITCH" es SI, o sea, que los datos dudosos se toman como datos válidos). Cuando hay datos faltantes en un año, el programa no hace el cálculo para dicho año.

#### 3.4.6.2 Agua hasta PMP.

Este también es un "SWITCH" del tipo SI/NO que se utiliza para indicar la forma en que se desea realizar el cálculo del Balance Hídrico. Cuando el "SWITCH" es SI el Balance se ejecuta tomando en cuenta el agua del suelo que está más allá de la fácilmente disponible (por debajo del coeficiente de agotamiento), hasta llegar al PMP (Punto de Marchitez Permanente); en caso contrario, se realiza de forma normal (por defecto el "SWITCH" es NO, o sea, el cálculo se ejecuta de forma normal). Para entender el funcionamiento en cada caso, ver las secciones 2.1 y 2.2.

#### 3.4.6.3 Tipo de ETP.

Este "SWITCH" se utiliza para indicar el tipo de evapotranspiración que se desea utilizar en los cálculos. Los tres posibles tipos de evapotranspiración son ETP DIARIA, MENSUAL y PROMEDIO (por defecto el "SWITCH" está en evapotranspiración MENSUAL). Esto sólo en caso de que se tenga más de un tipo de ETP en alguna estación meteorológica.

### 3.4.7 SIEMBROS.

Esta sección es idéntica a la que se encuentra en el Menú de Datos y está disponible en la opción de Análisis simplemente para facilitarle al usuario el cambiar rápidamente la información de los SIEMBROS. Así, durante la ejecución de los cálculos el usuario podrá marcar/desmarcar SIEMBROS y variar su estructura de trabajo más fácilmente.

### 3.4.8 GRAFICOS.

Esta sección es la encargada de la generación de gráficos. AQUA permite graficar tanto los resultados de la mayoría de los cálculos como la información climática almacenada en disco. A continuación se detalla cada una de las opciones que se ofrecen:

#### 3.4.8.1 Gráfico actual.

En esta opción se indican las variables que se desean graficar, es decir, las variables correspondientes al Eje X y al Eje Y. Hay 17 variables disponibles, pero no todas se pueden graficar contra todas. Además, es posible graficar sólo un par de variables a la vez, por lo que sólo se produce una curva por gráfico. Cuando hay varios siembros escogidos, se produce un gráfico por aparte para cada siembro. A continuación se listan las variables existentes y los gráficos que pueden ser generados, así como sus requerimientos:

#### VARIABLES:

1. Precipitación (PPT)
2. Evapotranspiración (ETP)
3. Fecha (N)
4. Fecha más temprana de siembra
5. Ultimo día a capacidad de campo
6. Balance ( $B_N$ )
7.  $B_N/ADC_N$
8. Agua fácilmente disponible ( $ADC_N$ )
9. Días con déficit
10. Días con exceso
11. Días con estrés

235

12. Índice de déficit
13. Índice de exceso
14. Índice de estrés
15. Días sin lluvia
16. Días con lluvia
17. % de ocurrencia (de Fecha más Temprana de Siembra o de Última Fecha a Capacidad de Campo)

### GRAFICOS:

#### A. Precipitación vs. Precipitación

REQUIERE: Ejecución previa del cálculo "CORRELACION DE PERIODOS" (en el Menú de Precipitación) y que se active el Tipo de gráfico PUNTUAL.

#### B. Fecha vs. Precipitación

No requiere ningún cálculo previo, graficándose la PPT almacenada en disco para las fechas especificadas en el Período #1 del Menú de Datos de Precipitación.

#### C. Fecha vs. Evapotranspiración

No requiere ningún cálculo previo, y grafica los datos de ETP almacenados en disco para las fechas especificadas en el Período #1 del Menú de Datos de Precipitación.

#### D. Fecha vs. $B_N$

REQUIERE: Ejecución previa del cálculo del Balance Hídrico (en el Menú de Balance).

#### E. Fecha vs. $B_N/ADC_N$

REQUIERE: Ejecución previa del cálculo del Balance Hídrico (en el Menú de Balance).

27/6

**F. Fecha vs. ADC<sub>N</sub>**

REQUIERE: Ejecución previa del cálculo del Balance Hídrico (en el Menú de Balance).

**G. Fecha vs. Días con déficit**

REQUIERE: Ejecución previa del cálculo del Balance Hídrico (en el Menú de Balance).

**H. Fecha vs. Días con exceso**

REQUIERE: Ejecución previa del cálculo del Balance Hídrico (en el Menú de Balance).

**I. Fecha vs. Días con estrés**

REQUIERE: Ejecución previa del cálculo del Balance Hídrico (en el Menú de Balance).

**J. Fecha vs. Índice de déficit**

REQUIERE: Ejecución previa del cálculo del Balance Hídrico (en el Menú de Balance).

**K. Fecha vs. Índice de exceso**

REQUIERE: Ejecución previa del cálculo del Balance Hídrico (en el Menú de Balance).

**L. Fecha vs. Índice de estrés**

REQUIERE: Ejecución previa del cálculo del Balance Hídrico (en el Menú de Balance).

**M. Fecha vs. Días sin lluvia**

REQUIERE: Ejecución previa del cálculo "DIAS CON Y SIN LLUVIA" (en el Menú de Precipitación).



#### N. Fecha vs. Días con lluvia

REQUIERE: Ejecución previa del cálculo "DIAS CON Y SIN LLUVIA" (en el Menú de Precipitación).

#### O. % de ocurrencia vs. Fecha temprana de siembra

REQUIERE: Ejecución previa del cálculo de la "FECHA MAS TEMPRANA DE SIEMBRA".

#### P. % de ocurrencia vs. Ultimo día a CC

REQUIERE: Ejecución previa del cálculo del "ULTIMO DIA A CAPACIDAD DE CAMPO".

### 3.4.8.2 Tipo de gráfico.

Con esta opción se indica el tipo de gráfico que se desea generar. Existen dos tipos:

#### 1. LINEAL

El gráfico estará formado por símbolos y líneas rectas continuas uniendo cada uno de ellos.

#### 2. PUNTUAL

El gráfico estará formado únicamente de símbolos o puntos calculados por el programa, sin líneas rectas que los unan.

### 3.4.8.3 Incremento de tiempo.

Aquí se especifica el incremento con que se desea que se haga el gráfico; esto es, si se desea graficar los resultados en días, en pñtadas, en décadas, etc. El incremento que aquí se especifique puede ser distinto al que se utilizó para efectuar el cálculo respectivo.

258

#### 3.4.8.4 Código del vértice.

Esta opción permite cambiar el símbolo que aparece en los vértices del gráfico. Los posibles símbolos son:

1. NINGUNO (sin símbolos, sólo líneas)
2. + (símbolo más)
3. X (letra X)
4. CUADRO1 (cuadro "vacío")
5. CUADRO2 (cuadro "lleno")
6. ROMBO (figura de un rombo)
7. Y (letra Y)
8. \* (asterisco)
9. O (letra O)
10. . (un punto)

#### 3.4.8.5 Gráfico inverso.

Este es un "SWITCH" del tipo SI/NO que permite cambiar la forma en que se despliega el gráfico en pantalla, de modo NORMAL (blanco sobre negro) a modo INVERTIDO (negro sobre blanco). Por defecto el "SWITCH" es NO, o sea, gráfico NORMAL.

#### 3.4.8.6 Gráfico por impresora.

Este también es un "SWITCH" del tipo SI/NO y se utiliza cuando se desea imprimir el gráfico (papel). Por defecto el "SWITCH" es NO, o sea, el gráfico se desplegará únicamente por pantalla.

#### 3.4.8.7 Generar el gráfico.

Finalmente, falta aclarar cómo se genera un gráfico dadas y configuradas las opciones anteriores. Esto se hace presionando la tecla F10: el gráfico se desplegará por pantalla y se mantendrá así hasta que se presione cualquier otra tecla. En el caso de que se tengan varios SIEMBROS marcados, se irá generando un gráfico tras otro haciendo una pausa entre cada uno (la pausa acaba hasta que se presione cualquier tecla); presionando la tecla ESC se termina la graficación de un conjunto de SIEMBROS. Mientras no se efectúe un nuevo cálculo o no se modifiquen las

opciones de los cálculos o los datos utilizados o no se termine el programa, se puede presionar la tecla F10 para ver de nuevo los gráficos generados.

### **3.4.9 DISPOSITIVO.**

En esta sección se le permite al usuario cambiar el "dispositivo de salida" de los reportes. Hay tres opciones para ello:

#### **3.4.9.1 Pantalla.**

Los reportes se desplegarán únicamente en la pantalla.

#### **3.4.9.2 Impresora.**

Los reportes se desplegarán por pantalla y simultáneamente en impresora. Simultáneamente quiere decir que cada una de las páginas (o pantallas) del reporte se despliega primero por pantalla y luego se imprime, se presiona cualquier tecla y luego se continúa con la siguiente página, que primero se despliega por pantalla y luego se imprime, etc.

#### **3.4.9.3 Disco.**

Los reportes se desplegarán por pantalla, y simultáneamente se grabarán en un archivo ASCII (texto) en disco. Es necesario, por lo tanto, especificar un archivo destino para el reporte, que por defecto tiene extensión TXT. En el caso de que el archivo YA EXISTA, se pregunta al usuario si desea sobrescribir el reporte en él (con lo que se perdería la información anterior) o si desea agregar el reporte actual al final del archivo, con lo que el archivo crece.

## **3.5 OPCION DE UTILITARIOS.**

---

Esta opción contiene tres secciones adicionales que pretenden hacer más versátil el funcionamiento de AQUA. Estas son:

### 3.5.1 DIRECTORIO DE DATOS.

Aquí se permite especificar el directorio que será utilizado para la lectura y escritura de los diferentes tipos de datos (Cultivos, Siembros, PPT, ETP, etc.). Esto facilita el tener varios juegos de datos para diferentes pruebas y análisis, así como el tener por aparte los datos por regiones o tipos de cultivos. De paso, esto evita que los archivos de datos crezcan demasiado.

El directorio de datos es almacenado en el archivo de configuración del Sistema, por lo que cada vez que AQUA se ejecuta se reestablece por defecto ese directorio de datos como el directorio de trabajo actual. Por ej., supóngase que por razones de orden y facilidad de hacer respaldos se desea tener los datos en un directorio llamado "D:\SALVADOR", y que el directorio de datos actual no es éste; para seguir usando dicho directorio, se escoge la opción de "DIRECTORIO DE DATOS" y se especifica el que se desea (ver Fig. 4.4); una vez establecido el directorio a utilizar, el programa lo seguirá usando cada vez que necesite datos.

### 3.5.2 RECUPERAR INDICES.

Permite hacer una reconstrucción de los índices de los archivos de datos, en caso de que un accidente haya ocurrido durante la ejecución de AQUA; por ej., un fallo de energía eléctrica.

### 3.5.3 IMPORTAR ARCHIVOS ASCII.

Permite, de una manera sencilla, importar datos climáticos (Evapotranspiración y Precipitación) de otros paquetes. Existen dos formatos de archivo predefinidos que AQUA soporta:

#### 3.5.3.1 CliCom.

El paquete CliCom exporta sus datos a archivos ASCII con un formato estándar que incluye el código de la estación meteorológica, el código del tipo de dato exportado (ETP, PPT, Temperatura, etc.), la fecha del dato (año y mes) y los valores climáticos propiamente dichos. Así, para importar desde AQUA datos almacenados en CliCom deben seguirse los siguientes pasos:

- A. Exportar los datos deseados utilizando el paquete CliCom a uno o varios archivos ASCII.
- B. Escoger la opción UTILITARIOS\IMPORTAR ARCHIVOS ASCII\CLICOM en AQUA.

C. AQUA le pedirá la siguiente información referente a los datos por importar. Introdúzcala:

C.1. Nombre del archivo ASCII donde se encuentran los datos en formato CliCom.

C.2. Nombre de la estación meteorológica a la que se le añadirán los datos que se van a importar. Esta estación puede no existir aún, pues AQUA se encarga de crearla si se da el caso.

C.3. El tipo de dato por importar. Por medio de un Menú el usuario debe indicar si los datos a importar son de ETP diaria, ETP mensual o PPT. Para el caso de ETP (de cualquier tipo), se pide además un coeficiente de ajuste que será multiplicado por cada valor de ETP. Este coeficiente tiene su razón de uso cuando los datos importados de ETP son obtenidos del tanque de evaporación, y su cálculo depende de condiciones atmosféricas, de la estación de donde proceden los datos y de las características del tanque. Cuando no se desea utilizar este coeficiente introdúzcase un valor de 1.

D. Se procederá con la importación de los datos. Si se diera el caso de que para alguna fecha el dato ya existiera en los archivos de datos de AQUA, se le consultará al usuario para saber si desea cambiarlos por los nuevos; en caso contrario, se mantendrán los que ya existen.

### 3.5.3.2 Columnar.

El formato columnar es un formato predefinido por AQUA que puede utilizarse para importar datos climáticos desde muy variadas fuentes. Por ejemplo, si se tienen datos almacenados en hojas electrónicas como LOTUS, QUATTRO o SMART, estos pueden ser exportados a archivos ASCII en forma columnar, y luego importarse utilizando AQUA. En el Cuadro 3.3 se presenta la forma en que debe estar un archivo para poder ser importado en formato columnar:

#### IMPORTACION DE DATOS ASCII, METODO COLUMNAR:

- 1- Al convertir a ASCII un registro de datos desde cualquier paquete manejador de datos, las columnas deben ser de igual tamaño y con un ancho mínimo de 6 espacios columnares.
- 2- El archivo en ASCII no tiene que contener líneas, columnas o espacios no deseados, según el formato del cuadro 3.3.
- 3- Todo dato faltante debe ser reemplazado por la letra F.
- 4- Todos los meses del año deben de tener los datos correspondientes a la duración del mes, inclusive los bisiestos.
- 5- El número de espacios columnares a descartar debe incluir todas las columnas anteriores a la primera del mes de enero.

2/12

Archivo: PRUEBA.TXT

Línea 01													
Línea 02													
Línea 03		MES											
Línea 04		E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Línea 05													
Línea 06	01	0.0	0.9	4.4	4.3	3.2	1.2	1.1	0.0	0.2	4.4	F	1.2
Línea 07	02	0.0	6.4	0.0	F	2.2	9.5	4.3	4.2	0.0	3.2	0.2	2.3
Línea 08	03	0.0	0.0	2.4	3.3	6.6	8.3	2.4	7.4	3.4	F	2.3	F
Línea 09	04	0.1	2.3	5.4	0.0	4.4	6.4	F	4.4	4.2	4.4	6.2	4.3
Línea 10	05	0.0	0.0	3.3	3.3	3.3	F	F	3.3	6.4	3.3	7.4	3.3
Línea 11	06	0.0	0.9	4.4	4.3	3.2	1.2	1.1	0.0	0.2	4.4	F	1.2
Línea 12	07	0.0	0.0	2.4	3.3	6.6	8.3	2.4	7.4	3.4	F	2.3	0.0
Línea 13	08	0.0	0.0	3.3	3.3	3.3	F	0.0	3.3	6.4	3.3	7.4	3.3
Línea 14	09	0.1	2.3	5.4	0.0	4.4	6.4	0.0	4.4	4.2	4.4	6.2	4.3
Línea 15	10	0.0	0.0	2.4	3.3	6.6	8.3	2.4	7.4	3.4	F	2.3	0.0
Línea 16	11	0.0	0.9	4.4	4.3	3.2	1.2	1.1	0.0	0.2	4.4	0.0	1.2
Línea 17	12	0.0	0.0	3.3	3.3	3.3	F	F	3.3	6.4	3.3	7.4	3.3
Línea 18	13	0.0	6.4	0.0	0.0	2.2	9.5	4.3	4.2	F	3.2	0.2	2.3
Línea 19	14	0.0	6.4	0.0	0.0	2.2	9.5	4.3	4.2	F	3.2	0.2	2.3
Línea 20	15	0.0	0.0	2.4	3.3	6.6	8.3	2.4	7.4	3.4	F	2.3	0.0
Línea 21	16	0.1	2.3	5.4	0.0	4.4	6.4	F	4.4	4.2	4.4	6.2	4.3
Línea 22	17	0.0	0.0	3.3	3.3	3.3	F	F	3.3	6.4	3.3	7.4	3.3
Línea 23	18	0.0	6.4	0.0	0.0	2.2	9.5	4.3	4.2	F	3.2	0.2	2.3
Línea 24	19	0.1	2.3	5.4	0.0	4.4	6.4	F	4.4	4.2	4.4	6.2	4.3
Línea 25	20	0.0	0.0	3.3	3.3	3.3	F	F	3.3	6.4	3.3	7.4	3.3
Línea 26	21	0.1	2.3	5.4	0.0	4.4	6.4	F	4.4	4.2	4.4	6.2	4.3
Línea 27	22	0.0	0.9	4.4	4.3	3.2	1.2	1.1	0.0	0.2	4.4	0.0	1.2
Línea 28	23	0.1	2.3	5.4	0.0	4.4	6.4	F	4.4	4.2	4.4	6.2	4.3
Línea 29	24	0.0	0.0	3.3	3.3	3.3	F	F	3.3	6.4	3.3	7.4	3.3
Línea 30	25	0.0	6.4	0.0	0.0	2.2	9.5	4.3	4.2	F	3.2	0.2	2.3
Línea 31	26	0.0	0.0	2.4	3.3	6.6	8.3	2.4	7.4	3.4	7.3	2.3	7.3
Línea 32	27	0.0	0.0	3.3	3.3	3.3	F	7.3	3.3	6.4	3.3	7.4	3.3
Línea 33	28	0.0	6.4	0.0	0.0	2.2	9.5	4.3	4.2	F	3.2	0.2	2.3
Línea 34	29	0.1	2.3	5.4	7.3	4.4	6.4	F	4.4	4.2	4.4	6.2	4.3
Línea 35	30	0.0		3.3	6.6	8.3	2.4	7.4	3.4	7.3	2.3	7.3	1.0
Línea 36	31	0.0		4.3		1.2		0.0	0.2		F		0.9
Línea 37													

Cuadro 3.3. Ejemplo de formato columnar de un archivo de datos (ASCII) para importarlo.

243

También deben tomarse en cuenta las siguientes consideraciones respecto al formato del archivo precedente:

- Hay cinco líneas sin datos al inicio del archivo. El usuario debe indicar cuantas líneas sin datos (vacías o con títulos) hay en el encabezado del archivo para que la rutina de importación de datos no las tome en cuenta (ver Fig. 4.8).
- La primera columna de datos se inicia en la columna 6. El usuario debe indicar cuantas columnas sin datos (vacías o con títulos) hay a la izquierda del archivo para que la rutina de importación no las tome en cuenta (ver Fig. 4.8).

Así, para importar desde AQUA datos almacenados en otro paquete que permita crear archivos ASCII deben seguirse los siguientes pasos:

- A. Exportar los datos deseados utilizando el paquete correspondiente a uno o varios archivos ASCII, siguiendo el formato ya especificado. Se debe notar que es necesario crear un archivo ASCII por cada año de datos.
- B. Escoger la opción UTILITARIOS\IMPORTAR ARCHIVOS ASCII en AQUA.
- C. AQUA le pedirá la siguiente información referente a los datos por importar. Introdúzcala:
  - C.1. Nombre del archivo ASCII donde se encuentran los datos.
  - C.2. Nombre de la Estación Meteorológica a la que se le añadirán los datos que se van a importar. Esta estación puede no existir aún, pues AQUA se encarga de crearla si se da el caso. También se debe especificar el año al que pertenecen los datos.
  - C.3. El número de líneas y de columnas que se deben descartar del inicio del archivo, las cuales pueden estar con blancos o con títulos (nombre del mes, día del mes, etc).
  - C.4. El código que se utiliza en el archivo para indicar que un día faltó el dato (ej. F). Al importar los datos el programa convierte ese código en -999.9, para indicar que es un dato faltante.
  - C.5. El tipo de dato por importar. Por medio de un Menú el usuario debe indicar si los datos a importar son de ETP diaria, ETP mensual o PPT.
- D. Se procederá con la importación de los datos. Si se diera el caso de que para alguna fecha el dato ya existiera en los archivos de datos de AQUA, se le consultará al usuario para saber si desea cambiarlos por los nuevos; en caso contrario, se mantendrán los que ya existen.

---

## 4. USO Y APLICACIONES.

---

### 4.1 INTRODUCCION.

---

Las siguientes páginas están dedicadas a hacer un recorrido general por todo el programa AQUA, y a la vez dar un ejemplo del análisis de una región. Se muestran las pantallas más relevantes y los reportes impresos que el programa genera.

Para realizar el análisis se escogió la estación meteorológica de la Estación Experimental Fabio Baudrit Moreno, de la Universidad de Costa Rica, debido a que es uno de los sitios donde se ha realizado la mayor parte de los experimentos de campo del Proyecto que conllevaron a esta versión del modelo (ver Figura 1.1 para distribución de lluvias en esta localidad).

245



## 4.2 PRESENTACION.

---

Al iniciar el uso del programa aparece la pantalla de presentación mostrada en la Figura 4.1.

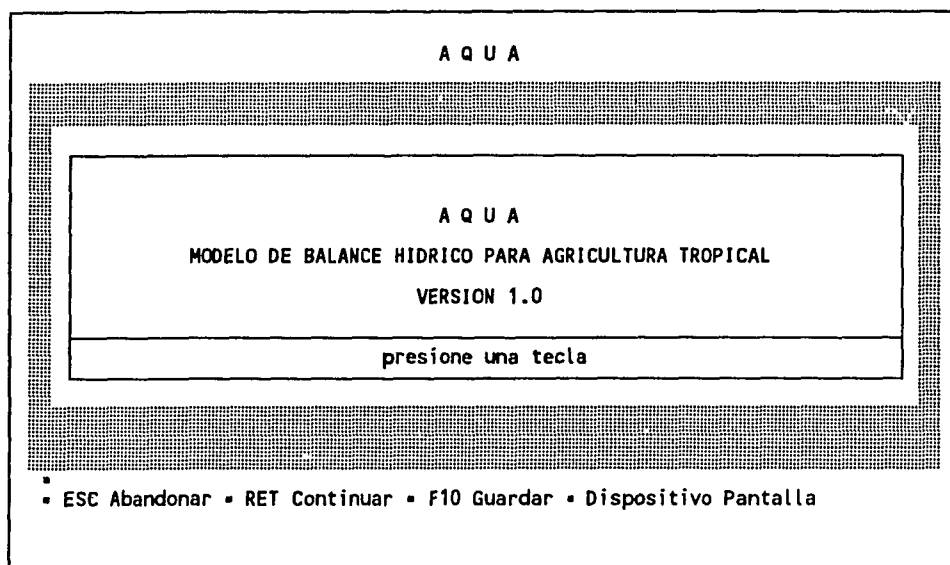


Figura 4.1. Pantalla de presentación del programa.

Luego de presionar cualquier tecla, aparece el menú principal del programa, el cual se muestra en la Figura 4.2.

246

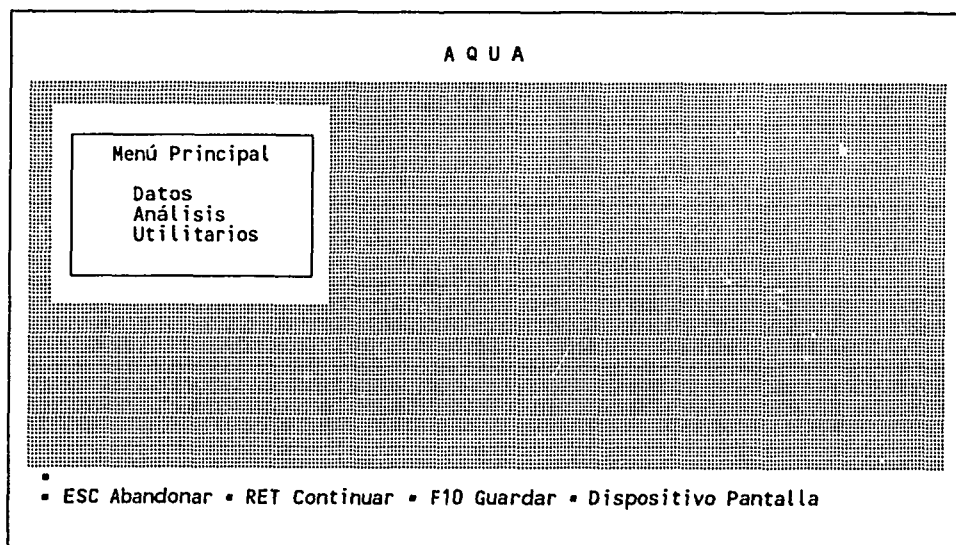


Figura 4.2. Menú principal del programa.

A partir de este menú se puede entrar a las tres secciones del programa: Datos, Análisis o Utilitarios.

En el caso del estudio de la Estación Experimental Fabio Baudrit, lo primero que se realizó fue la importación de los datos climáticos a partir de los datos que fueron proporcionados. Dichos datos se encontraban en el formato utilizado por el programa CLICOM, el cual es promovido por la Organización Meteorológica Mundial. Dado que para importar datos es necesario ingresar en la sección de Utilitarios, ésta será la primera sección que se recorrerá.

## 4.3 SECCION DE UTILITARIOS.

En la Figura 4.3 se muestra el menú correspondiente a la sección de Utilitarios, al cual se llegó colocando la barra de selección (usando las teclas para mover el cursor; ver sección 3.3.8) en la opción Utilitarios del menú principal (Figura 4.2) y presionando la tecla RETURN.

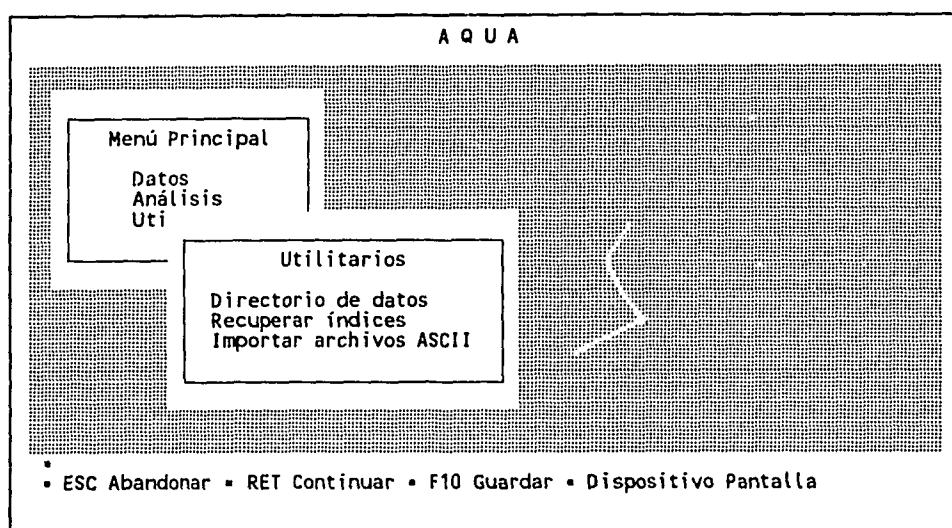


Figura 4.3. Menú de la sección de Utilitarios.

### 4.3.1 DIRECTORIO DE DATOS.

La primera opción del menú de Utilitarios sirve para cambiar el subdirectorio de datos, con lo cual se pueden tener datos en diferentes directorios e incluso en diferentes unidades de disco. Para el caso que se está estudiando no se utilizó esta opción, puesto que todos los datos necesarios se encontraban en el disco y directorio del programa principal.

En la Figura 4.4 se puede observar la pantalla donde se establece el directorio que se usará para leer los datos.

245

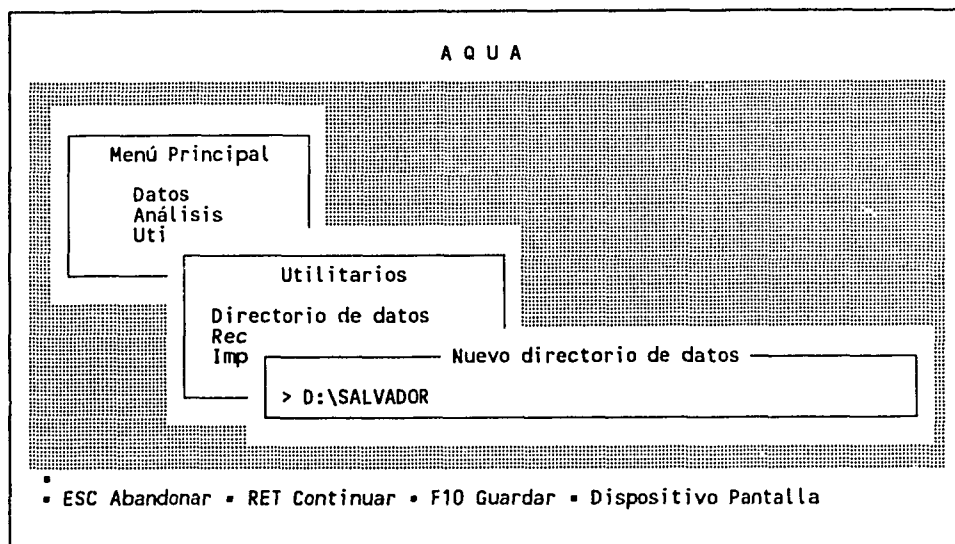


Figura 4.4. Pantalla donde se establece el directorio en el que están los datos.

### 4.3.2 RECUPERACION DE INDICES DE LOS DATOS.

La segunda opción del menú de Utilitarios (Figura 4.3) se utiliza cuando por alguna razón se dañan los archivos de índices de los datos del programa. Dichos índices son un mecanismo que usa el programa para localizar en forma rápida la información (*no se deben confundir con los índices de déficit, exceso o estrés*). Al ser escogida esta opción, el programa empieza inmediatamente a reconstruir los archivos de índices a partir de los archivos de datos.

### 4.3.3 IMPORTACION DE ARCHIVOS ASCII.

La tercera opción del menú de Utilitarios es la usada para importar datos de diferentes fuentes. En la Figura 4.5 se muestra el submenú en el que se puede escoger el formato desde el cual se importarán los datos.

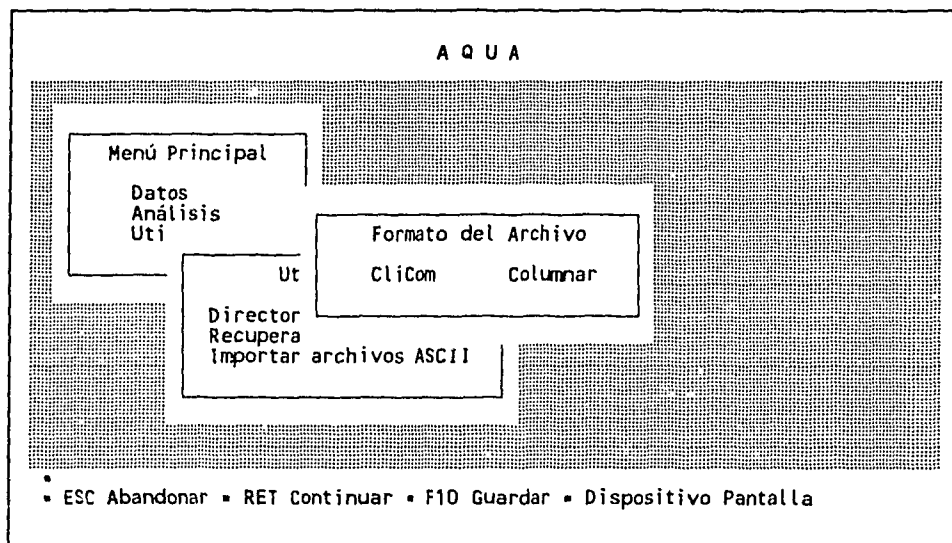


Figura 4.5. Menú donde se escoge el formato en el que se encuentran los datos a importar.

Para el caso de la Estación Fabio Baudrit, los datos climáticos se obtuvieron en formato ASCII de CLICOM. Al escoger la opción de formato CLICOM en el menú de la Figura 4.5, aparece la pantalla mostrada en la Figura 4.6, donde se pregunta el nombre del archivo donde se encuentran los datos, el nombre de la estación a la que se quieren añadir los datos y si se van a importar valores de ETP diaria o ETP mensual o PPT diaria.

A Q U A

Menú Principal  
 Datos  
 Análisis  
 Uti

Formato del Archivo  
 CliCom    Columnar

Ut

Di  
 Re  
 Im  
 Nombre del archivo : PCENTRAL.DAT  
 Estación : FABIO BAUDRIT  
 Tipo de dato : ETP diaria    ETP mensual    PPT

▪ ESC Abandonar ▪ RET Continuar ▪ F10 Guardar ▪ Dispositivo Pantalla

Figura 4.6. Pantalla donde se especifican los parámetros necesarios para importar datos de CLICOM.

Si se están importando datos de ETP, luego de llenar la pantalla mostrada en la Figura 4.6, aparece otra pantalla (Figura 4.7) donde se pregunta un valor de ajuste en caso de que los datos que se estén importando sean datos del tanque de evaporación. El valor de ETP que se introduce al programa es el producto del coeficiente del tanque por el valor que viene en el archivo ASCII. En el caso de la Fabio Baudrit, se usó un valor de 0.7 para ajustar los valores del tanque de evaporación a valores de evapotranspiración potencial. Si los valores importados son directamente ETP, entonces el coeficiente de ajuste es 1.0.

Una vez entrado el coeficiente (dando RETURN) el programa procede a importar los datos.

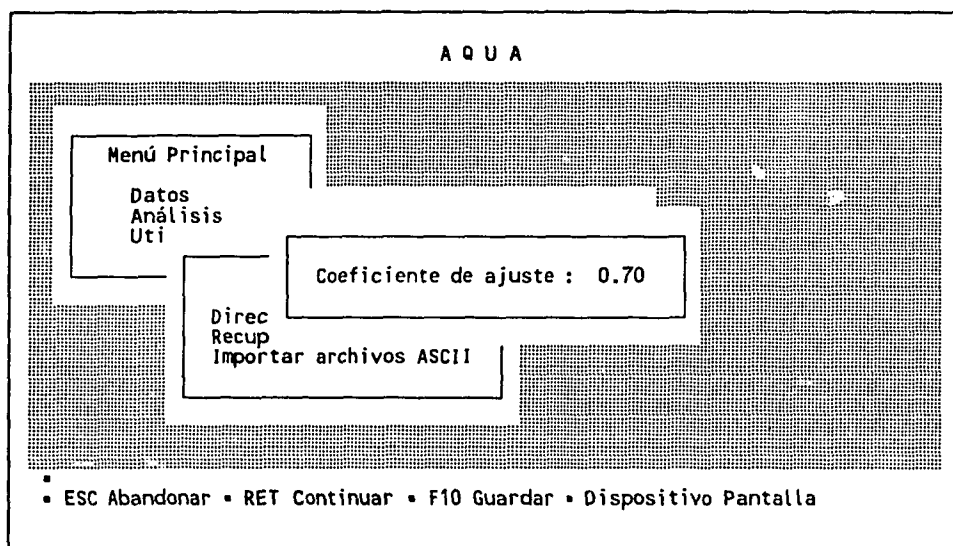


Figura 4.7. Pantalla para introducir un coeficiente de ajuste cuando se importan datos de ETP.

Si en el menú de la Figura 4.5 se escoge el formato columnar, aparecerá la pantalla de la Figura 4.8, en la que se establecen, además del nombre de la estación, el nombre del archivo de datos ASCII y el tipo de dato (ETP o PPT diaria), el año al que corresponden los datos, el número de líneas (filas) y columnas que se deben descartar del archivo ASCII y el código de caracteres que se usa en el archivo ASCII para representar un dato climático faltante. Luego de esta pantalla, si se están importando datos de ETP diaria aparecerá la pantalla mostrada en la Figura 4.7 para realizar la conversión de datos de evaporación de tanque a ETP, de ser el caso.

A Q U A

Menú Principal

Datos  
Análisis  
Uti

Ut

Director  
Recupera  
Importar arc

Nombre del archivo :  
Estación :  
Año : 1980

# líneas descartar : 0  
# columnas descartar : 0  
Hilera dato faltante :

Tipo de dato : ETP PPT

▪ ESC Abandonar ▪ RET Continuar ▪ F10 Guardar ▪ Dispositivo Pantalla

Figura 4.8. Datos requeridos por el programa para importar valores desde archivos ASCII en formato columnar.



## 4.4 SECCION DE DATOS.

Luego de leer los datos climáticos de los archivos ASCII, o si se desea digitar dichos datos directamente en el programa, se puede entrar a la Opción de Datos del menú principal (Figura 4.2). Cuando se entra en esta opción, aparece el menú que se ve en la Figura 4.9, desde el cual se puede escoger qué tipo de dato se quiere modificar, borrar o insertar.

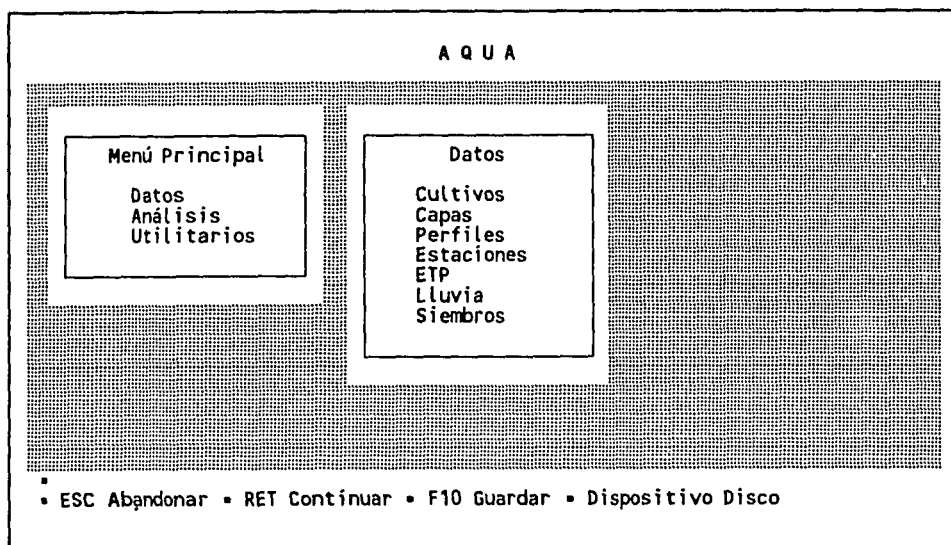


Figura 4.9. Menú de la sección de datos, donde aparecen todos los tipos de datos utilizados por el programa.

El orden en que aparecen los datos en el menú de la Figura 4.9 es el orden lógico en el que se pueden introducir. Para introducir datos de perfiles, es necesario introducir primero datos de capas, para introducir datos climáticos es necesario definir primero estaciones meteorológicas y para poder definir siembros deben existir todos los demás datos.

254

#### 4.4.1 CULTIVOS.

Al escoger la opción de cultivos en el menú de datos, aparece la lista de cultivos mostrada en la Figura 4.10. Dicha lista se maneja según se especifica en la Sección 3.3.8 de este documento.

A Q U A	
Menú Principa Datos Análisis Utilitarios	Datos de Cultivos 1 ARROZ 2 BOSQUE JOVEN 3 BOSQUE VIEJO 4 COYOLILLO 5 CULT. P/ ULTIMA CC 6 EN ESTABLECIMIENTO 7 ESTABLECIDO ANUAL 8 FRIJOL 9 MAIZ 10 RESISTENTE
INS·Insertar DEL·Eliminar	CTRL-RET·Copiar RETURN·Modificar ↓↑·Escoger
ESC Abandonar    RET Continuar    F10 Guardar    Dispositivo Pantalla	

Figura 4.10. Ejemplo de lista de cultivos.

Cuando se insertan, copian o modifican datos de cultivo, aparece la pantalla de introducción de datos que se ve en la Figura 4.11. En el caso mostrado en la figura, se están modificando los datos correspondientes al cultivo de arroz utilizado para hacer algunos de los análisis enumerados en este documento.

El funcionamiento de esa pantalla de introducción de datos, y de todas las restantes del programa, se explica en la Sección 3.3.8 de este manual.

A Q U A

Nombre		: ARROZ	
Duración efectiva (días)		: 110	
Lámina para exceso (mm)		: 25	
Resistente o Susceptible (R/S)		: R	
Tipo de datos para las etapas (1/2)		: 2	

Etapa	Duración días	KC	CA	%	PR cm
1. PRE-EMERGENCIA	5	0.50	50		25.00
2. ESTABLECIMIENTO	20	0.50	50		25.00
3. ESTABLECIMIENTO2	25	0.50	50		50.00
4. VEGETATIVO	40	0.75	50		50.00
5. VEGETATIVO2	50	0.75	50		80.00
6. MADUREZ	110	1.00	50		80.00
7.	0	0.00	0		0.00

• Modificando datos de Cultivos ...  
 • ESC Abandonar • RET Continuar • F10 Guardar • Dispositivo Disco

Figura 4.11. Ejemplo de pantalla de introducción de datos de cultivo.

La "Lámina para exceso" mostrada en la Figura 4.11 es la cantidad de milímetros de agua en que debe sobrepasarse el límite máximo ( $ADC_N$ ) del balance hídrico  $B_N$  para que el cultivo entre en estrés hídrico por exceso de agua. Dicho valor depende de la capacidad del cultivo para soportar condiciones de anegamiento.

El campo "Resistente o Susceptible" de la pantalla mostrada en la Figura 4.11 solo puede tomar dos valores: R o S, y con dicho valor se indica al programa cómo debe considerar el cultivo en caso de analizarse para fecha más temprana de siembra: como un cultivo resistente o susceptible al déficit hídrico en la etapa de establecimiento.

El campo "Tipo de datos para las etapas" de dicha pantalla sirve para indicarle al programa si los valores de Kc, CA y PR que se asignan a cada etapa representan valores promedio mantenidos durante toda la etapa o más bien son

256

valores puntuales encontrados al final de cada etapa, por lo que los valores para cada día de la etapa se calculan por interpolación lineal.

Las duraciones de cada etapa se dan como el número de días desde la siembra hasta el cual la etapa llega. Por ejemplo, en el cultivo mostrado en la Figura 4.11 la etapa de pre-emergencia va desde la siembra hasta el quinto día, la etapa de establecimiento va desde el sexto día hasta el veinteaño día después de la siembra y así sucesivamente.

Si al estar en la lista de cultivos (Figura 4.10) se presiona la tecla <DEL> o <SUPR>, el programa preguntará si se desea borrar el dato sobre el que se encuentra posicionado el cursor (Figura 4.12). Si se responde afirmativamente, el programa borrará dicho dato.

A Q U A

---

Datos de Cultivos

1	ARROZ
2	ARROZ 0
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	

¿ Está seguro que desea eliminar este dato ? (Si/No) S  
 ¡ Datos ligados a él pueden ser borrados !

INS Insertar  
DEL Eliminar

CTRL-RET Copiar  
RETURN Modificar

F1 Escoger

ESC Terminar

Opciones

• ESC Abandonar • RET Continuar • F10 Guardar • Dispositivo Disco

Figura 4.12. Mensaje que aparece cuando se intenta borrar un dato de una lista.

251

#### 4.4.2 CAPAS DE SUELO.

Al entrar en la opción de capas del menú de datos (Figura 4.9), aparece una lista de capas de suelo similar a la lista de cultivos. Cuando en dicha lista se modifica, añade o copia una capa, aparece la pantalla de introducción de datos que se ve en la Figura 4.13.

**A Q U A**

---

Datos de Capas

1	AQUA
2	ARCILLA
3	AREN
4	!IMO

Nombre : AQUA

Capacidad (mm/m) : 100.00

---

INS Insertar DEL Eliminar	CTRL-RET Copiar RETURN Modificar	F1 Escoger	ESC Terminar	Opciones
------------------------------	-------------------------------------	------------	--------------	----------

▪ Modificando datos de Capas ...  
 ▪ ESC Abandonar ▪ RET Continuar ▪ F10 Guardar ▪ Dispositivo Disco

Figura 4.13. Ejemplo de lista de capas con la pantalla de introducción de datos de la capa hipotética AQUA con una capacidad de almacenamiento de agua disponible a cultivos de 100 mm de agua por metro de suelo.

2

### 4.4.3 PERFILES DE SUELO.

A partir de las capas que se definan, se pueden crear perfiles de suelo entrando en la opción de perfiles del menú de datos (Figura 4.9). De igual forma que para cultivos y capas, aparece una lista de perfiles en la que al hacer una operación de inserción, modificación o copiado de un perfil, se despliega la pantalla de introducción de datos de perfil mostrada en la Figura 4.14. En la misma se pueden definir hasta cinco capas con diferentes espesores para cada perfil de suelo.

A Q U A

---

Datos de Perfiles

1 2 3	AQUA ARCIL COMPU	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td colspan="2">Nombre : AQUA</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Capa</td> <td style="text-align: center;">Espesor</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">1. AQUA</td> <td style="text-align: center;">200.00 cm</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">2.</td> <td style="text-align: center;">0.00</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">3.</td> <td style="text-align: center;">0.00</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">4.</td> <td style="text-align: center;">0.00</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">5.</td> <td style="text-align: center;">0.00</td> </tr> </table>	Nombre : AQUA		Capa	Espesor	1. AQUA	200.00 cm	2.	0.00	3.	0.00	4.	0.00	5.	0.00
Nombre : AQUA																
Capa	Espesor															
1. AQUA	200.00 cm															
2.	0.00															
3.	0.00															
4.	0.00															
5.	0.00															
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 25%; padding: 2px;">INS Insertar</td> <td style="width: 25%; padding: 2px;">RETURN Modificar</td> <td style="width: 25%; padding: 2px;">T Escoger</td> <td style="width: 25%; padding: 2px;">ESC Terminar</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">DEL Eliminar</td> <td colspan="3" style="text-align: right; padding: 2px;">Opciones</td> </tr> </table>		INS Insertar	RETURN Modificar	T Escoger	ESC Terminar	DEL Eliminar	Opciones									
INS Insertar	RETURN Modificar	T Escoger	ESC Terminar													
DEL Eliminar	Opciones															

• Modificando datos de Perfiles ...  
 • ESC Abandonar • RET Continuar • F10 Guardar • Dispositivo Disco

Figura 4.14. Pantalla de entrada de datos de perfiles de suelos con el ejemplo del suelo hipotético AQUA que es de 200 cm de profundidad con una misma capa u horizonte.

#### 4.4.4 ESTACIONES METEOROLOGICAS.

De la misma manera que para los anteriores tipos de datos, al entrar en la opción de estaciones meteorológicas del menú de datos (Figura 4.9), aparece una lista con los nombres de las diferentes estaciones meteorológicas que se han definido. Al añadir, modificar o copiar los datos de alguna estación, aparecerá la pantalla mostrada en la Figura 4.15.

**A Q U A**

---

Datos de Estaciones

1	CAÑAS, SAN LUIS
2	CAÑA
3	FABI

Nombre	:	FABIO BAUDRIT	
Elevación (msnm)	:	840	
Latitud	:	10° 1'	Tipo : A
Longitud	:	84°16'	

INS Insertar DEL Eliminar	CTRL-RET Copiar RETURN Modificar	↑ Escoger	ESC Terminar	Opciones
------------------------------	-------------------------------------	-----------	--------------	----------

■ Modificando datos de Estaciones ...  
 ■ ESC Abandonar ■ RET Continuar ■ F10 Guardar ■ Dispositivo Disco

Figura 4.15. Pantalla de introducción de datos de estaciones meteorológicas con un ejemplo.

#### 4.4.5 EVAPOTRANSPIRACION POTENCIAL.

La opción de datos de ETP (evapotranspiración potencial) del menú de datos (Figura 4.9) presenta algunas diferencias con las anteriores. Al entrar en dicha opción, se presenta otro menú en el que el usuario puede escoger el tipo de dato de ETP que desea manejar (Figura 4.16). Si se escoge ETP promedio, el programa muestra la lista de estaciones meteorológicas que poseen dicho tipo de dato (Figura 4.17), y si se escoge insertar datos de ETP promedio, aparece la pantalla mostrada en la Figura 4.18.

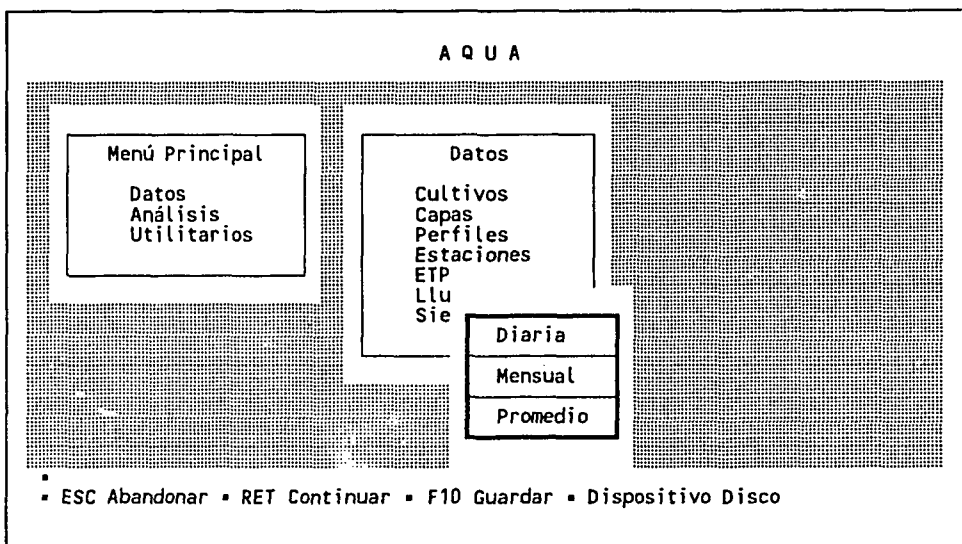


Figura 4.16. Menú de escogencia del tipo de dato de ETP que se desea manejar.

261



A Q U A

Datos de Estaciones

1	CAÑAS, SAN LUIS
2	CAÑAS, TABOGA
3	FABIO BAUDRIT
4	PRUEBA

INS·Insertar DEL·Eliminar	CTRL-RET·Copiar RETURN·Modificar ↑·Escoger
------------------------------	--

Menú Principa  
Datos  
Análisis  
Utilitarios

▪ ESC Abandonar ▪ RET Continuar ▪ F10 Guardar ▪ Dispositivo Pantalla

Figura 4.17. Ejemplo de pantalla con la lista de estaciones que poseen datos de ETP promedio.

A Q U A

Promedio diario mensual

Estación :

Mes	ETP	Mes	ETP
	mm		mm
Enero		Julio	
Febrero		Agosto	
Marzo		Setiembre	
Abril		Octubre	
Mayo		Noviembre	
Junio		Diciembre	

> Promedio : 0.000      > Σ : 0.000

No hay DAT  
Opciones v

Ins·Insert Del·Elimin	Opciones
--------------------------	----------

▪ Insertando datos de Evapotranspiración promedio ...  
▪ ESC Abandonar ▪ RET Continuar ▪ F10 Guardar ▪ Dispositivo Pantalla

Figura 4.18. Pantalla para la introducción de datos de evapotranspiración promedio. Los datos introducidos son en mm/día.

262

Al escoger ETP mensual el programa muestra la lista de estaciones meteorológicas que están definidas (muy similar a Fig. 4.17) y al escoger una estación, aparece la lista de años de los que se poseen datos; si se escoge modificar, insertar o copiar datos de ETP mensual, se verá la pantalla de introducción de datos mostrada en la Figura 4.19.

Cuando se escoge ETP diaria, aparece una lista de estaciones que muestra las que poseen datos de ETP diaria (casi igual a la lista mostrada en la Fig. 4.17). Al escoger una estación, aparece la lista de meses de los cuales se tienen datos (Fig. 4.20, que es muy similar a la lista de años que aparece para ETP mensual), y si se escoge introducir, modificar o copiar, aparece la pantalla mostrada en la Fig. 4.21.

A Q U A

Dat 1 1 2 1 3 1 4 1 5 1 6 1 7 1 8 1 9 1 10 1	Promedio diario mensual Estación : FABIO BAUDRIT Año : 1970	RIT           Opciones																																																								
	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 50%;">Mes</th> <th style="width: 25%;">ETP</th> <th style="width: 20%;"></th> <th style="width: 5%;">mm</th> <th style="width: 50%;">Mes</th> <th style="width: 25%;">ETP</th> <th style="width: 20%;"></th> <th style="width: 5%;">mm</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Enero</td> <td>4.0</td> <td></td> <td></td> <td>Julio</td> <td>2.3</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Febrero</td> <td>5.7</td> <td></td> <td></td> <td>Agosto</td> <td>2.4</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Marzo</td> <td>4.8</td> <td></td> <td></td> <td>Setiembre</td> <td>2.5</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Abril</td> <td>4.3</td> <td></td> <td></td> <td>Octubre</td> <td>2.4</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Mayo</td> <td>3.7</td> <td></td> <td></td> <td>Noviembre</td> <td>2.4</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Junio</td> <td>2.7</td> <td></td> <td></td> <td>Diciembre</td> <td>3.0</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Mes	ETP		mm	Mes	ETP		mm	Enero	4.0			Julio	2.3			Febrero	5.7			Agosto	2.4			Marzo	4.8			Setiembre	2.5			Abril	4.3			Octubre	2.4			Mayo	3.7			Noviembre	2.4			Junio	2.7			Diciembre	3.0			
Mes	ETP		mm	Mes	ETP		mm																																																			
Enero	4.0			Julio	2.3																																																					
Febrero	5.7			Agosto	2.4																																																					
Marzo	4.8			Setiembre	2.5																																																					
Abril	4.3			Octubre	2.4																																																					
Mayo	3.7			Noviembre	2.4																																																					
Junio	2.7			Diciembre	3.0																																																					
InsInsert DelElimin	> Promedio : 3.335    > Σ : 1217.200																																																									

• Modificando datos de Evapotranspiración mensual ...  
 • ESC Abandonar • RET Continuar • F10 Guardar • Dispositivo Pantalla

Figura 4.19. Ejemplo de la pantalla de introducción de datos de ETP mensual.

A Q U A

ETP diaria -> FABIO BAUDRIT

<p>Menú Principa</p> <p>Datos</p> <p>Análisis</p> <p>Utilitarios</p>	<p>1 01/1962</p> <p>2 02/1962</p> <p>3 03/1962</p> <p>4 04/1962</p> <p>5 05/1962</p> <p>6 06/1962</p> <p>7 07/1962</p> <p>8 08/1962</p> <p>9 09/1962</p> <p>10 10/1962</p>	
	<p>INS·Insertar    CTRL-RET·Copiar</p> <p>DEL·Eliminar    RETURN·Modificar</p> <p>                  ↑↑·Escoger</p>	

▪ ESC Abandonar ▪ RET Continuar ▪ F10 Guardar ▪ Dispositivo Pantalla

Figura 4.20. Ejemplo de lista de fechas (meses) que poseen datos de ETP diaria para una estación.

Valores diarios (en mm)

		Estación : FABIO BAUDRIT				Año : 1970		Mes : 01	
1		1	1.5	11	2.5	21	3.5		
1		2	5.2	12	3.7	22	4.2	X : Promedio	
1		3	3.4	13	2.8	23	4.8	Σ : Sumatoria	
1		4	5.7	14	2.4	24	3.0	TOTAL	
1		5	4.6	15	2.7	25	6.6	X : 3.9774	
1		6	3.4	16	2.7	26	4.0	Σ : 123.300	
1		7	4.8	17	1.5	27	4.2	nes	
1		8	5.2	18	1.6	28	4.1		
1		9	4.8	19	1.7	29	3.4		
2		10	6.3	20	3.8	30	6.8		
						31	8.4		
Ins	Del	X : 4.4900 Σ : 44.900		X : 2.5400 Σ : 25.400		X : 4.8182 Σ : 53.000			

▪ Modificando datos de Evapotranspiración diaria ...  
▪ ESC Abandonar ▪ RET Continuar ▪ F10 Guardar ▪ Dispositivo Pantalla

Figura 4.21. Ejemplo de la pantalla de introducción de datos de ETP diaria.

264

Debe notarse que tanto los promedios como las sumatorias mostrados en las Figuras 4.18, 4.19 y 4.21 se calculan luego de que se sale de la pantalla, por lo que es necesario que el usuario entre de nuevo en la pantalla luego de haber introducido los datos para que se muestren dichos valores ya calculados.

#### 4.4.6 LLUVIA.

Para introducir datos de PPT se entra en la opción de manejo de datos de lluvia del menú de datos (Figura 4.9). Aparece entonces la lista de estaciones existentes para datos de precipitación (Figura 4.22). Para modificar, añadir o copiar un dato de PPT se utiliza la pantalla mostrada en la Figura 4.23.

A Q U A

---

Estaciones existentes para precipitación

1	CAÑAS, SAN LUIS
2	CAÑAS, TABOGA
3	FABIO BAUDRIT

---

Ins  Insertar	Shft-Ins  Copiar	↑  Escoger	Esc  Terminar	Opciones
Del  Eliminar	Return  Modificar			

▪ ESC Abandonar ▪ RET Continuar ▪ F10 Guardar ▪ Dispositivo Pantalla

Figura 4.22. Ejemplo de la lista de estaciones meteorológicas definidas en este caso que pueden ser usadas para manejo de datos de PPT diaria.

263

Valores diarios (en mm)					
Estación : FABIO BAUDRIT			Año : 1962		Mes : 01
1	0.0	11	0.0	21	0.4
2	0.0	12	0.0	22	0.0
3	0.0	13	0.0	23	0.0
4	0.0	14	0.0	24	0.0
5	0.0	15	0.0	25	0.0
6	0.1	16	0.0	26	0.0
7	0.0	17	0.0	27	0.0
8	0.0	18	0.0	28	0.0
9	0.0	19	0.0	29	0.0
10	0.0	20	0.0	30	0.0
				31	0.0
				X : Promedio	
				Σ : Sumatoria	
				TOTAL	
				X : 0.0161	
				Σ : 0.500	
In	X : 0.0100	X : 0.0000	X : 0.0364		
De	Σ : 0.100	Σ : 0.000	Σ : 0.400		

es

- Modificando datos de Lluvia ...
- ESC Abandonar • RET Continuar • F10 Guardar • Dispositivo Pantalla

Figura 4.23. Ejemplo de la pantalla de introducción de datos de PPT diaria.

Los promedios y las sumatorias mostrados en la Figura 4.23 se calculan luego de que se guardan los datos, por lo que si el usuario desea ver esos valores calculados correctamente debe salir de la pantalla de entrada de datos con la tecla F10 y volver a entrar en ella.

#### 4.4.7 SIEMBROS.

Al entrar en la opción de siembros del menú de datos (Figura 4.9), aparece la lista de siembros mostrada en la Figura 4.24. Cuando se modifica, inserta o copia algún siembro, aparece la pantalla que se ve en la Figura 4.25.

La lista de siembros (Figura 4.24) tiene una particularidad: en ella se indican cuáles siembros serán los utilizados para efectuar los análisis. Con la tecla <TAB> se marca o desmarca el siembro sobre el que se encuentra el cursor. Se pueden marcar hasta un máximo de 10 siembros. Como se puede observar en la Figura 4.24, en este caso sólo está marcado un siembro: "ARROZ" con el No.1.

A Q U A	
Datos de Siembros	
1	1 ARROZ
2	BALANCE ANUAL
3	BOSQUE
4	COYOLILLO
5	FRIJOL
6	MAIZ
7	RESISTENTE
8	SUSCEPTIBLE
9	ULTIMA FECHA A CC
INS·Insertar	CTRL-RET·Copiar
DEL·Eliminar	RETURN·Modificar
	↓↑·Escoger
■ ESC Abandonar ■ RET Continuar ■ F10 Guardar ■ Dispositivo Pantalla	

Figura 4.24. Ejemplo de la lista de siembros hipotéticos utilizados aquí, con ARROZ como único siembro marcado con el No.1.

A Q U A

----- Datos de Siembros -----

1	
2	
3	
4	Siembro : ARROZ
5	Area (Ha) : 100.00
6	Cultivo : ARROZ
7	Fecha de siembra : 13/1/1969
8	
9	Perfil del suelo : AQUA
10	Estación meteorológica : FABIO BAUDRIT

ciones

Ins In	Return Modificar	↑ Escoger	Esc Terminar
Del Eliminar			

- Modificando datos de Siembros ...
- ESC Abandonar • RET Continuar • F10 Guardar • Dispositivo Pantalla

Figura 4.25. Ejemplo de la pantalla de introducción de datos de siembros para el siembro ARROZ. El año que se pone con la fecha de siembra es tomado por defecto por el programa como año inicial para empezar cálculos. Esto es modificable en cada sección de "Datos..." del menú de análisis (ver, por ej., la sección 4.5.1.1).

## 4.5 SECCION DE ANALISIS.

Luego de introducir los datos pertinentes, el usuario puede efectuar diferentes cálculos para analizar uno o más siembros o una región. Para hacerlo, el usuario debe escoger la opción "Análisis" del menú principal del programa (Figura 4.2). Al entrar en dicha opción, el programa despliega el menú mostrado en la Figura 4.26.

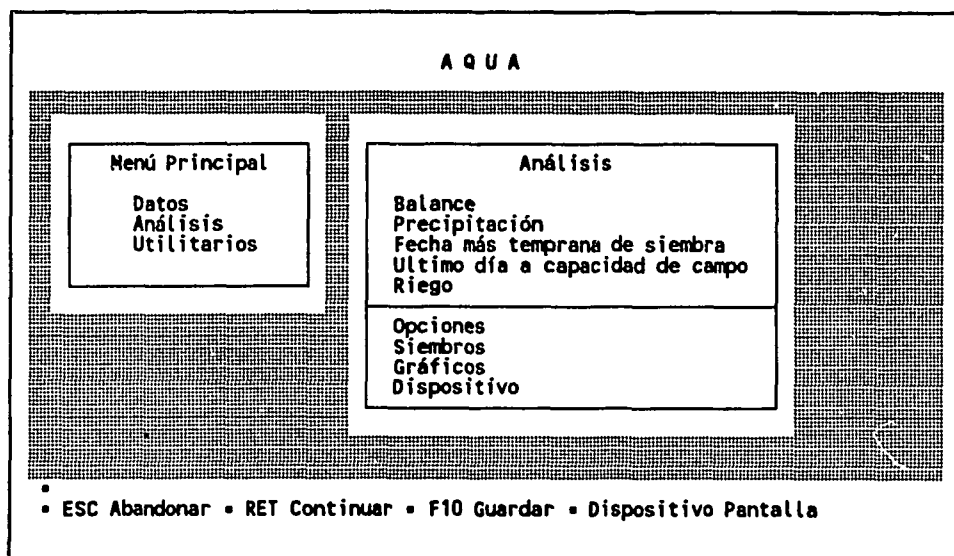


Figura 4.26. Menú de la sección de "Análisis".

A continuación se describirán cada una de las opciones de este menú, dándose ejemplos de cada cálculo.



#### 4.5.1 BALANCE HIDRICO.

La opción "Balance" del menú de "Análisis" (Figura 4.26) despliega el menú mostrado en la Figura 4.27.

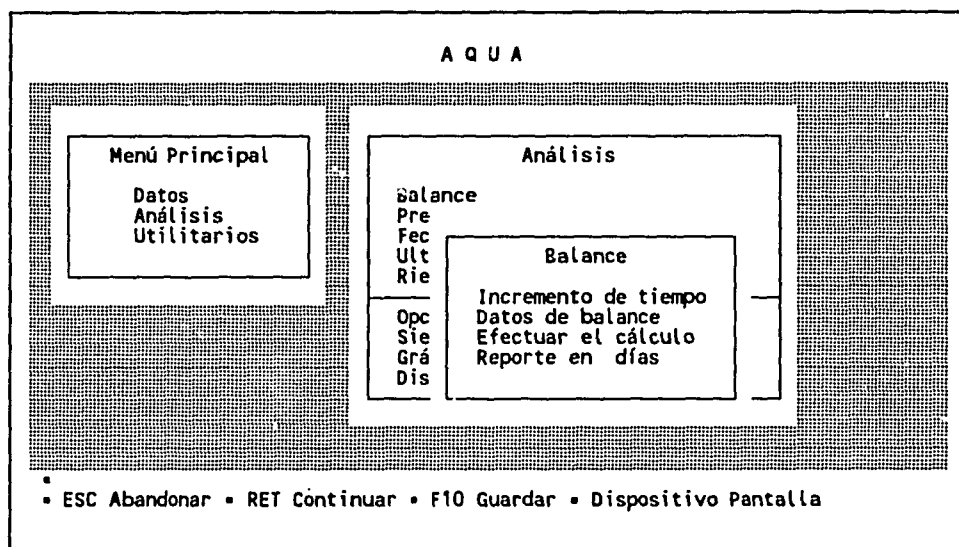


Figura 4.27. Menú de "Balance" de la sección de Análisis.

#### 4.5.1.1 Datos de balance.

En esta opción el usuario puede definir los años para los que desea efectuar el cálculo de balance para cada uno de los siembros definidos (Figura 4.28).

A Q U A

Datos para el Cálculo de Balance

Nombre del siembro	Intervalo de años		Período	
	Año inicial	Año final	Inicio	Final
1 ARROZ	1969	1969	01/01	31/12
2			/	/
3			/	/
4			/	/
5			/	/
6			/	/
7			/	/
8			/	/
9			/	/
10			/	/

• ESC Abandonar • RET Continuar • F10 Guardar • Dispositivo Pantalla

Figura 4.28. Ejemplo de la pantalla donde se definen los intervalos de años en los que se desea realizar el balance hídrico.

Al estar en la pantalla de datos de balance (y en cualquier pantalla de datos de los diferentes análisis), presionando la tecla <F3> se puede averiguar el intervalo máximo de años en los que es posible efectuar el cálculo de balance (Figura 4.29). Este intervalo se basa en el hecho de que para poder efectuar el balance en un año deben existir datos tanto de PPT como de ETP para ese año, salvo que se esté usando ETP promedio.

A Q U A				
Datos para el Cálculo de Balance				
Nombre del siembro	Intervalo de años	Período		
			al	
1	> Intervalo máximo : [1969-1989] Presione cualquier tecla para continuar ...			12
2				
3				
4				
5				
6			/	/
7			/	/
8			/	/
9			/	/
10			/	/

• ESC Abandonar • RET Continuar • F10 Guardar • Dispositivo Disco

Figura 4.29. Ejemplo de la pantalla que reporta el intervalo máximo de años en los que puede efectuarse un cálculo, producto de presionar la tecla <F3>.

Luego de que el usuario ha escogido el intervalo en el que desea hacer el cálculo, presiona la tecla <F10> para hacer válido dicho intervalo; si cometió algún error al digitar el intervalo, como por ejemplo poniendo un año inicial mayor al final, el programa reportará un error (Figura 4.30). Dicho reporte de error también se da en cualquier otro tipo de análisis en el que se defina erróneamente el intervalo de años.

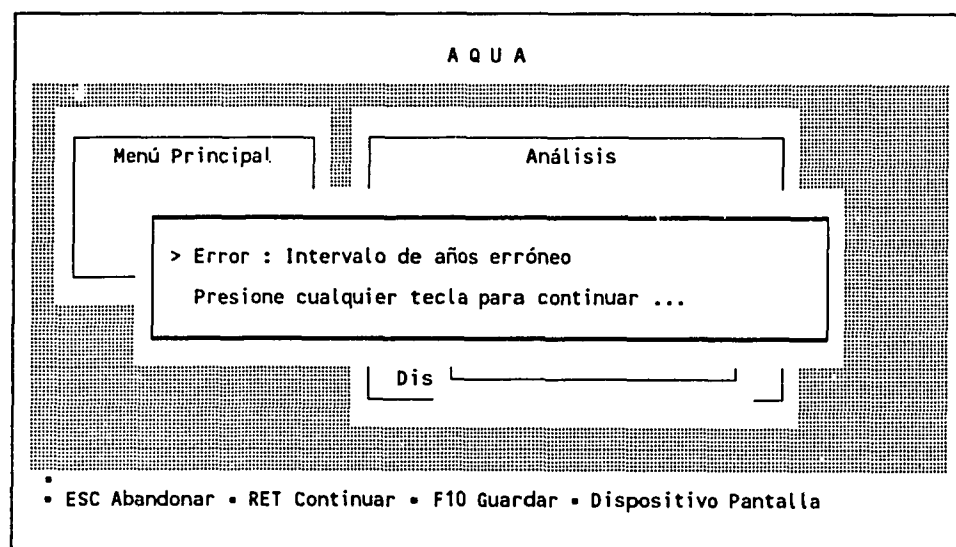


Figura 4.30. Pantalla de reporte de error al definir incorrectamente un intervalo de años, que es función de los datos disponibles.

#### 4.5.1.2 Efectuando el cálculo.

Para efectuar el cálculo debe escogerse la opción "Efectuar el cálculo" del menú de "Balance" (Figura 4.27). Una vez terminado el cálculo, el programa pregunta al usuario si desea ver el reporte de los resultados (Figura 4.31); dicha pantalla se despliega siempre que se realiza exitosamente un análisis de cualquier tipo.

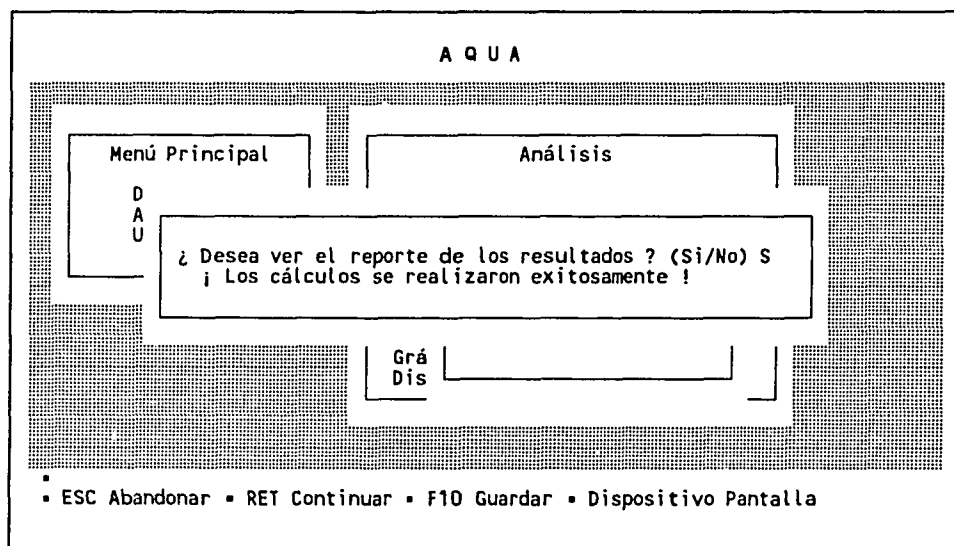


Figura 4.31. Pantalla desplegada al finalizar exitosamente cualquier análisis.

Si el usuario responde afirmativamente a la pregunta mostrada en la Figura 4.31, el programa inicia el despliegue del reporte de resultados. Para el caso del balance hídrico, el reporte por pantalla consta de cuatro partes: un encabezado (Figura 4.32), una pantalla de resultados para cada año y siembro usado para hacer el cálculo (Figura 4.33), una pantalla de resumen de resultados (Figura 4.34) y una pantalla para finalizar el reporte (Figura 4.36). La pantalla que finaliza el reporte es la misma para todos los tipos de análisis. Las Figuras 4.33 y 4.34 aparecen cuando se ha escogido la opción "Reporte en días" (ver sección 3.4.1.4 y Figura 4.27); si se escoge la opción "Reporte en mm" se presenta la pantalla mostrada en la Figura 4.35.

**A Q U A**

Menú Sistema AQUA

---

Reporte de los resultados de los cálculos

Tipo de cálculo : Balance  
 No. de siembros : 1

Reporte por : Pantalla

---

Esc No generar reporte █ Otra tecla Continuar

• ESC Abandonar • RET Continuar • F10 Guardar • Dispositivo Pantalla

Figura 4.32. Ejemplo de la pantalla de encabezado del reporte de los resultados del balance hídrico.

**Reporte de Balance en DIAS**

Siembro No. 01 : FRIJOL

FECHA	DIAS			INDICES		
	Déficit	Exceso	Estrés	Déficit	Exceso	Estrés
12/04/1990	0	0	0	100.00	100.00	100.00
16/04/1990	3	0	3	40.00	100.00	40.00
21/04/1990	5	0	5	0.00	100.00	0.00
26/04/1990	0	1	1	100.00	80.00	80.00
01/05/1990	0	0	0	100.00	100.00	100.00
06/05/1990	0	0	0	100.00	100.00	100.00
11/05/1990	0	3	3	100.00	40.00	40.00
16/05/1990	0	1	1	100.00	80.00	80.00
21/05/1990	0	2	2	100.00	60.00	60.00
26/05/1990	0	0	0	100.00	100.00	100.00

Esc Terminar reporte █ Otra tecla Continuar

• ESC Abandonar • RET Continuar • F10 Guardar • Dispositivo Pantalla

Figura 4.33. Ejemplo de la pantalla principal del reporte de resultados del balance hídrico en días, con acumulados cada 5 días (intervalo libre de 5 días).

A Q U A

RESUMEN

	DIAS			INDICES		
	Déficit	Exceso	Estrés	Déficit	Exceso	Estrés
TOTALES	8	12	20	89.33	84.00	73.33
PROMEDIOS	0.53	0.80	1.33	89.33	84.00	73.33
Esc Terminar reporte █ Otra tecla Continuar						

▪ ESC Abandonar • RET Continuar • F10 Guardar • Dispositivo Pantalla

Figura 4.34. Ejemplo de la pantalla resumen del reporte de resultados del balance hídrico en días.

A Q U A

Reporte de Balance en MM

Siembro No. 01 : FRIJOL				
	FECHA	Balance	ADC	Balance/ADC
Menú Pri Datos Análisis Utilit	12/04/1990	5.63	12.50	0.45
	16/04/1990	1.45	12.50	0.12
	21/04/1990	0.00	12.50	0.00
	26/04/1990	11.27	12.50	0.90
	01/05/1990	15.20	20.00	0.77
	06/05/1990	16.82	25.00	0.67
	11/05/1990	25.00	25.00	1.00
	16/05/1990	24.20	25.00	0.97
	21/05/1990	33.54	34.00	0.99
	26/05/1990	39.27	40.00	0.98
Esc Terminar reporte █ Otra tecla Continuar				

▪ ESC Abandonar • RET Continuar • F10 Guardar • Dispositivo Pantalla

Figura 4.35. Ejemplo de la pantalla del reporte de resultados del balance hídrico en milímetros.

276

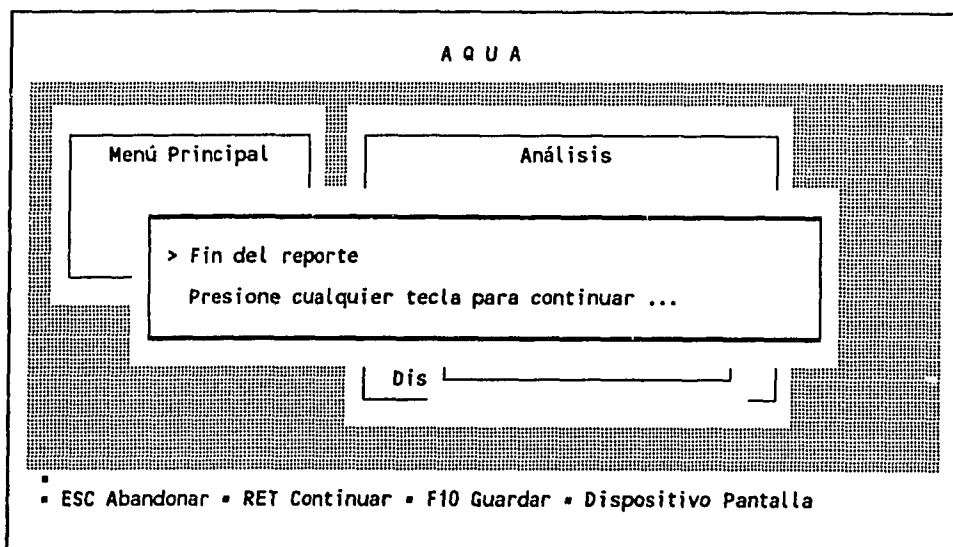


Figura 4.36. Pantalla que finaliza todos los reportes de los resultados de los análisis.



### 4.5.1.3 Análisis del balance de una región.

Un cálculo muy útil para caracterizar una región es el efectuar el balance hídrico para todos los años de los que se tengan datos. Para ejemplificar, se hizo ese cálculo para la Estación Fabio Baudrit con dos cultivos diferentes: un cultivo establecido y otro en establecimiento. Los resultados de ambos casos se muestran en los Cuadros 4.1 y 4.2, los cuales fueron generados como reportes a disco por el programa (ver Sección 4.5.9). Esta capacidad de escribir los reportes de los cálculos a archivos ASCII en disco sirve para EXPORTAR información a otros paquetes, como hojas electrónicas o programas de graficación, para hacer otros análisis que AQUA no posee actualmente. El resumen de los resultados se muestra en el Cuadro 4.3.

Sistema AQUA  
Reporte de los resultados de los cálculos

Tipo de cálculo : Balance  
 No. de siembras : 1  
 Siembro No. 1 : BALANCE ANUAL  
 Fecha de siembra : 01 de Enero  
 Duración efectiva : 364 día (s)  
 Fin del ciclo : 31 de Diciembre  
 Estación : FABIO BAUDRIT  
 Cultivo : CULTIVO ESTABLECIDO  
 Perfil : AQUA  
 Intervalo de años : 1971-1989  
 Período : 01/01 -> 31/12

Año	Días			Indices		
	Déficit	Exceso	Stress	Déficit	Exceso	Stress
1971	123	97	220	66.21	73.35	39.56
1972	99	65	164	72.80	82.14	54.95
1973	129	97	226	64.56	73.35	37.91
1974	133	78	211	63.46	78.57	42.03
1975	144	104	248	60.44	71.43	31.87
1976	126	62	188	65.38	82.97	48.35
1977	148	69	217	59.34	81.04	40.38
1978	116	79	195	68.13	78.30	46.43
1979	101	93	194	72.25	74.45	46.70
1980	119	82	201	67.31	77.47	44.78
1981	114	104	218	68.68	71.43	40.11
1982	155	65	220	57.42	82.14	39.56
1983	115	60	175	68.41	83.52	51.92
1984	113	91	204	68.96	75.00	43.96
1985	127	74	201	65.11	79.67	44.78
1986	163	59	222	55.22	83.79	39.01
1987	152	50	202	58.24	86.26	44.51
1988	133	80	213	63.46	78.02	41.48
1989	130	83	213	64.32	77.20	41.48
			TOTALES			
	2604	1701	4305			
			PROMEDIOS			
	124	81	205	65.95	77.83	43.77

¡ Fin del reporte !

Cuadro 4.1. Ejemplo del reporte obtenido al efectuar el balance anual para todos los años de registro de la Estación Fabio Baudrit, para un Cultivo Establecido hipotético.

Sistema AQUA						
Reporte de los resultados de los cálculos						
Tipo de cálculo : Balance						
No. de siembros : 1						
Siembro No. 1 : BALANCE ANUAL						
Fecha de siembra : 01 de Enero						
Duración efectiva : 364 día(s)						
Fin del ciclo : 31 de Diciembre						
Estación : FABIO BAUDRIT						
Cultivo : EN ESTABLECIMIENTO						
Perfil : AQUA						
Intervalo de años : 1971-1989						
Período : 01/01 -> 31/12						
Año	Días			Indices		
	Déficit	Exceso	Stress	Déficit	Exceso	Stress
1971	163	102	265	55.22	71.98	27.20
1972	170	73	243	53.30	79.95	33.24
1973	163	104	267	55.22	71.43	26.65
1974	173	83	256	52.47	77.20	29.67
1975	161	109	270	55.77	70.05	25.82
1976	173	67	247	52.47	81.59	34.07
1977	186	79	265	48.90	78.30	27.20
1978	150	83	233	58.79	77.20	35.99
1979	132	96	228	63.74	73.63	37.36
1980	162	94	256	55.49	74.18	29.67
1981	147	111	258	59.62	69.51	29.12
1982	195	76	271	46.43	79.12	25.55
1983	180	77	257	50.55	78.85	29.40
1984	151	100	251	58.52	72.53	31.04
1985	167	80	247	54.12	78.02	32.14
1986	205	69	274	43.68	81.04	24.73
1987	203	60	263	44.26	83.52	27.75
1988	177	85	262	51.37	76.65	28.02
1989	166	91	257	54.40	75.00	29.40
-----			TOTALES	-----		
	3486	1848	5334			
-----			PROMEDIOS	-----		
	166	88	254	54.46	75.71	30.17
¡ Fin del reporte !						

Cuadro 4.2. Ejemplo del reporte obtenido al efectuar el balance anual para todos los años de registro de la Estación Fabio Baudrit, para un Cultivo en Establecimiento hipotético.

CULTIVO	Días			Indices(%)		
	Déficit	Exceso	Stress	Déficit	Exceso	Stress
ESTABLECIDO	124	81	205	65.95	77.83	43.77
EN ESTABLECIMIENTO	166	88	254	54.46	75.71	30.17

Cuadro 4.3. Resumen de los resultados del balance efectuado para la estación Fabio Baudrit; se presentan los promedios obtenidos de los Cuadros 4.1 y 4.2 para comparación.

Como se podía esperar, la cantidad de días con déficit, exceso y estrés del cultivo en establecimiento son mayores que los del cultivo establecido. Comparando los resultados de esta región con los obtenidos haciendo el mismo análisis para otra región, se puede establecer cuál de ellas es más problemática desde el punto de vista hídrico, ya sea en cuestión de déficit o de exceso.

También se puede utilizar el balance para encontrar qué época del año en determinada región es la más problemática. Para hacerlo, el usuario puede calcular el balance año a año e imprimir el gráfico de  $B_N/ADC_N$  vs Fecha (ver Sección 3.4.8). Una muestra de dichos gráficos generados para un cultivo establecido y otro en establecimiento se puede ver en las Figuras 4.37 y 4.38, las cuales son para la Fabio Baudrit en el año 1969.

En un gráfico de  $B_N/ADC_N$  vs Fecha las épocas de déficit y exceso se detectan muy fácilmente. Cuando el valor de  $B_N/ADC_N$  llega a cero se presenta el déficit hídrico, y cuando llega a 1 se presenta el exceso hídrico. Por ejemplo, de las Figuras 4.37 y 4.38 se puede apreciar que en la Fabio Baudrit en el año 1969 las épocas de exceso hídrico se dieron principalmente en los meses de mayo a noviembre. La época de déficit hídrico está claramente marcada de enero a mediados de abril para el cultivo establecido, mientras que el cultivo en establecimiento sufre déficit desde enero hasta finales de mayo, se ve afectado por el veranillo, por lo que sufre déficit en julio, y sufre de déficit desde inicios de diciembre.

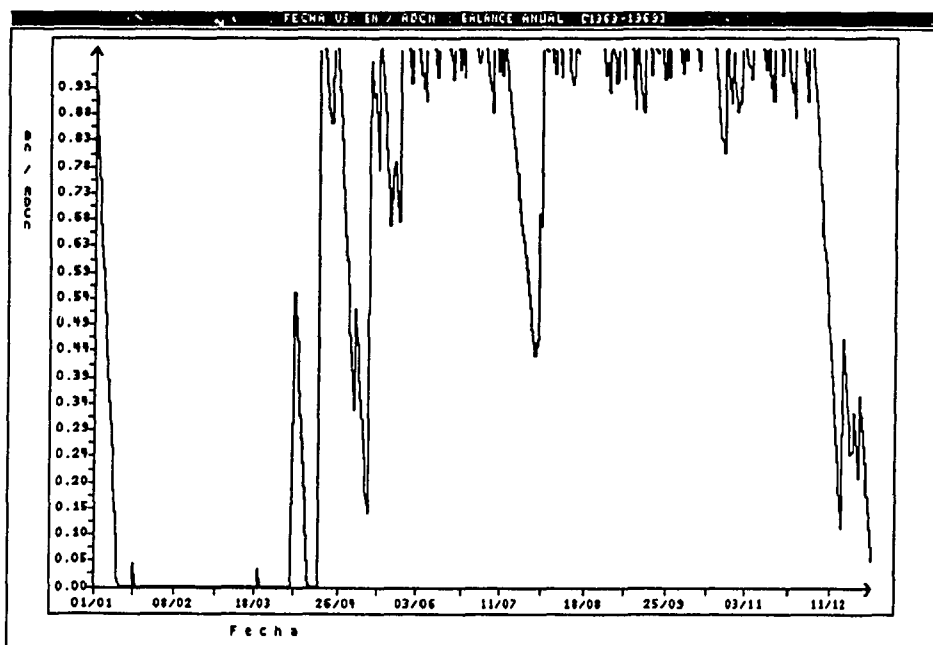


Figura 4.37. Ejemplo del gráfico de fecha vs.  $B_N/ADC_N$  generado por el programa AQUA a partir del cálculo del balance hídrico para un cultivo establecido hipotético en la Estación Experimental Fabio Baudrit, 1969.

282

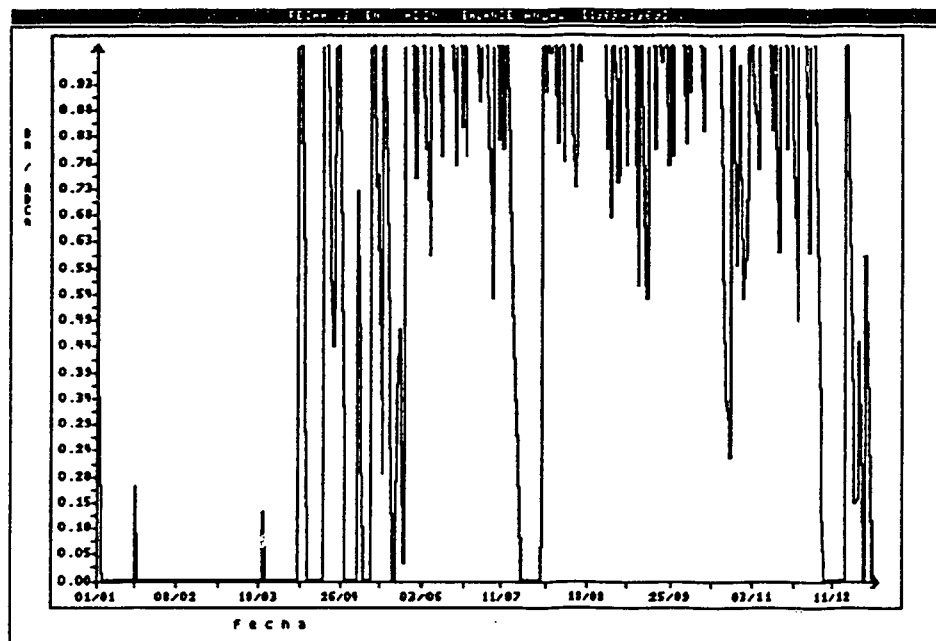


Figura 4.38. Ejemplo del gráfico de fecha vs  $B_N/ADC_N$  generado por el programa AQUA a partir del cálculo del balance hídrico para un cultivo en establecimiento hipotético en la Estación Experimental Fabio Baudrit, 1969.

#### 4.5.1.4 Análisis de secuencias de cultivos.

El balance hídrico sirve también para comparar diferentes cultivos y secuencias de cultivos en una misma región. En la Figura 4.39 se muestra un diagrama de varias secuencias hipotéticas de cultivo. Se tomó como fecha más temprana de siembra el 12 de mayo, ya que el 80% de los años analizados para la Fabio Baudrit la fecha más temprana de siembra se dió en esa fecha o antes (ver Sección 4.5.3).

En la Figura 4.39 se presenta en cada cuadro el nombre abreviado del cultivo (Ar=Arroz, Mz=Mafz, Fr=Frijol) y la fecha de siembra y de finalización del ciclo. Se supuso que cuando se termina el ciclo de un cultivo, inmediatamente se inicia el siguiente en la secuencia.

No se continuaron las secuencias con cultivos que se sembraron el 18/12 porque la última fecha a capacidad de campo se dió antes del 18/12 en casi un 100% de los años analizados (ver Sección 4.5.4). La última fecha a capacidad de campo se dió antes del 13/11 en aproximadamente la mitad de los años, por lo que sí se consideró factible sembrar cultivos de las secuencias en esa fecha.

PRIMER CULTIVO	SEGUNDO CULTIVO	TERCER CULTIVO
Ar 12/05-30/08 ó Mz 12/05-30/08	Ar 30/08-18/12	
	Mz 30/08-18/12	
	Fr 30/08-13/11	Ar 13/11-02/03 Fr 13/11-27/01 Mz 13/11-02/03
Fr 12/05-28/07	Ar 28/07-13/11 ó Mz 28/07-13/11	Ar 13/11-02/03
		Mz 13/11-02/03
		Fr 13/11-27/01
	Fr 28/07-09/10	Ar 09/10-27/01
		Mz 09/10-27/01
		Fr 09/10-23/12

Figura 4.39. Diagrama de las secuencias hipotéticas utilizadas para hacer el análisis de la Estación Experimental Fabio Baudrit utilizando el balance hídrico. Ar: arroz, Fr: frijol, Mz: maíz. Después de cada abreviación se da fecha de siembra y de cosecha.

255



Secuencia	Días			Indices		
	Déficit	Exceso	Estrés	Déficit	Exceso	Estrés
Ar	4	8	12	96.80	92.73	89.52
Fr	2	11	13	97.21	85.71	82.92
Mz	3	4	7	97.06	96.75	93.81
Ar-Ar, Mz-Ar	12	7	19	89.09	93.55	82.64
Ar-Fr, Mz-Fr	0	14	14	99.56	81.65	81.21
Ar-Mz, Mz-Mz	9	3	12	91.91	97.44	89.35
Fr-Ar	1	10	10	99.35	91.34	90.69
Fr-Fr	1	14	15	99.24	81.14	80.38
Fr-Mz	1	4	5	99.35	96.32	95.67
Ar-Fr-Ar, Mz-Fr-Ar, Fr-Ar-Ar, Fr-Mz-Ar	74	0	74	33.00	99.73	32.73
Fr-Mz-Fr, Mz-Fr-Fr, Fr-Ar-Fr, Ar-Fr-Fr	40	1	40	46.87	99.27	46.13
Fr-Mz-Mz, Mz-Fr-Mz, Fr-Ar-Mz, Ar-Fr-Mz	68	0	68	38.27	99.82	38.09
Fr-Fr-Ar	45	3	49	58.68	97.23	55.91
Fr-Fr-Fr	13	6	18	82.98	92.57	75.56
Fr-Fr-Mz	41	1	43	62.55	98.73	61.27

Cuadro 4.4. Promedios de los resultados obtenidos con el balance hídrico para los cultivos de las secuencias estudiadas en la Fabio Baudrit (Figura 4.39). Los datos presentados son para el último cultivo de cada secuencia.

El Cuadro 4.4 no es resultado directo del programa AQUA, sino que es un resumen de los cálculos efectuados utilizando el programa para cada cultivo de la secuencia. Para obtener este cuadro se corrió el balance para cada último cultivo de la secuencia, con la fecha de siembra especificada en la Figura 4.39, con el intervalo en "ciclo de cultivo" y usando "Reporte en días".

Del Cuadro 4.4 se puede concluir que el cultivo sembrado el 12 de mayo que tuvo mejores resultados hídricamente (menos estrés) fue el maíz, y el que se vio más afectado, por leve exceso hídrico, fue el frijol. Para deducir esto se comparan los índices de estrés, puesto que, esperadamente y en función del agua, a mayor índice de estrés mayores serán los rendimientos.

El segundo cultivo de las secuencias que tuvo menos estrés fue el maíz de la secuencia Fr-Mz, y el segundo cultivo que tuvo más problemas fue el frijol de la secuencia Fr-Fr, principalmente por motivos de exceso hídrico. También del Cuadro 4.4 se observa que el tercer cultivo con menos estrés fue el Fr-Fr-Fr, aunque ya presenta algunos problemas de déficit hídrico. El tercer cultivo con más estrés fue el arroz de las secuencias Ar-Fr-Ar, Mz-Fr-Ar, Fr-Ar-Ar y Fr-Mz-Ar, debido todo al déficit hídrico, dado que fue un cultivo de mucha duración sembrado finalizando la estación lluviosa. Para mayores detalles se invita al usuario a consultar la bibliografía.

#### 4.5.2 PRECIPITACION.

Un análisis que algunos investigadores pueden preferir en vez del análisis de balance es el de precipitación, que presenta algunas ventajas en relación a la simplicidad y es más conocido. En la siguiente figura se muestra el menú que aparece al escoger la opción de "Precipitación" en el menú de análisis (Figura 4.26).

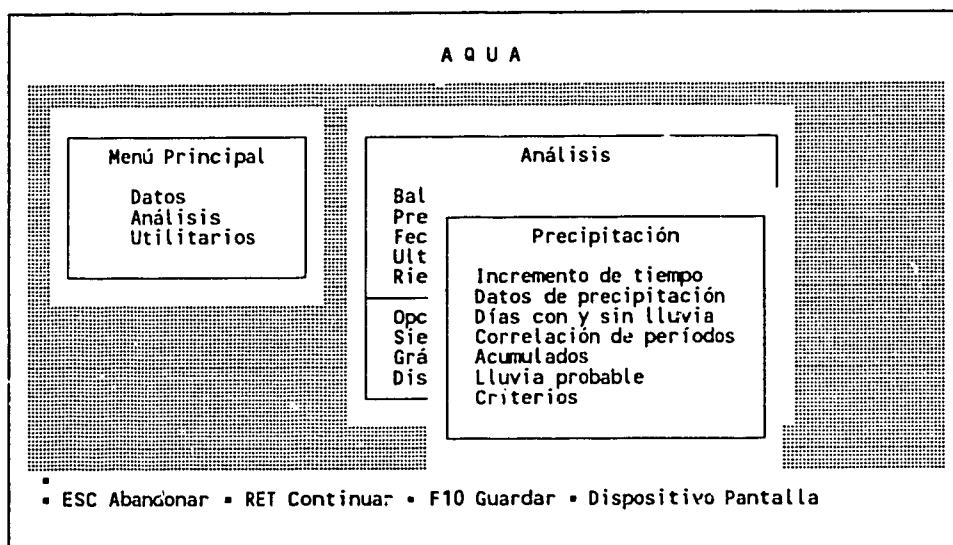


Figura 4.40. Menú de la sección de análisis de precipitación.

#### 4.5.2.1 Incremento de tiempo.

La primera opción del menú de "Precipitación" es la opción de incremento (Figura 4.41), la cual sirve para establecer el incremento de tiempo en el que se harán los acumulados de algunos de los cálculos. Los cálculos de precipitación que se ven afectados por el incremento son "Días con y sin lluvia" y "Acumulados". El cálculo de "Correlación de períodos" hace el acumulado para los períodos completos que se establezcan en la sección de "Datos de precipitación", mientras que el de "Lluvia probable" hace el cálculo día a día.

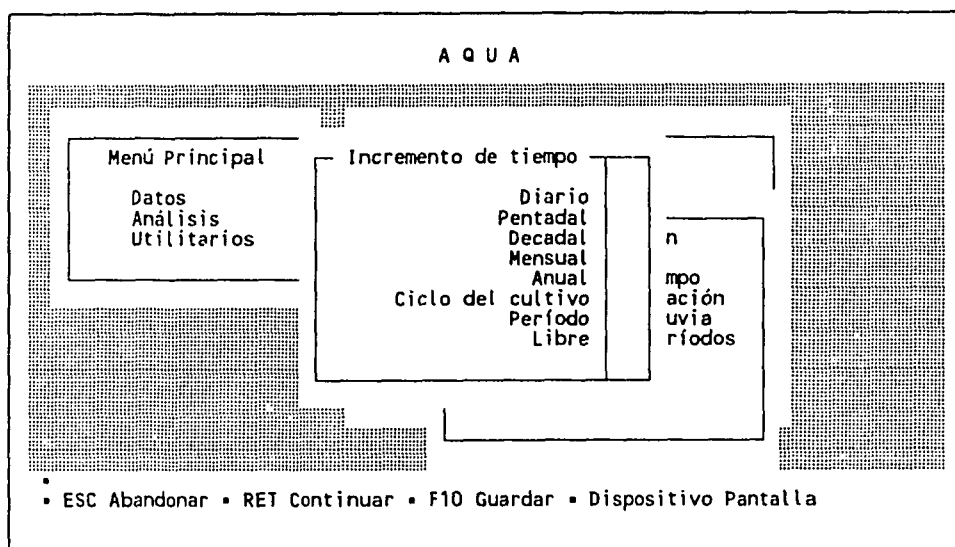


Figura 4.41. Menú de la sección "Incremento de tiempo".

250

#### 4.5.2.2 Datos de precipitación.

La opción de "Datos de precipitación" tiene una función similar a la de "Datos de balance" de la sección de balance. En la Figura 4.42 se muestra la pantalla que aparece al escoger dicha opción. En esa pantalla se define el intervalo de años para el que se desea efectuar cualquiera de los análisis de precipitación, y se definen dos períodos: el primero sirve en todos los cálculos relacionados con precipitación, y el segundo (opcional) se usa para definir el segundo período que se usa solamente en la "Correlación de períodos".

A Q U A

Menú Principal
Análisis

Datos de precipitación

Intervalo de años		Período 1		Período 2	
Año inicial	Año final	Inicio	Final	Inicio	Final
1962	1989	15/05	31/05	01/11	15/11

Criterios

• ESC Abandonar • RET Continuar • F10 Guardar • Dispositivo Pantalla

Figura 4.42. Pantalla que aparece al escoger la opción "Datos de precipitación", con ejemplo de fechas.

De forma similar a la sección de "Datos de balance", al presionar la tecla <F3> estando en la pantalla de la Figura 4.42, el programa calcula el intervalo máximo de años en los que se puede efectuar cualquier cálculo de la sección de precipitación (Figura 4.43). Sin embargo, a diferencia de los intervalos máximos de los otros análisis, el intervalo calculado en esta sección se basa solamente en los datos de precipitación del primer siembro marcado en la lista de siembros, puesto que los cálculos de la sección de precipitación se basan en los datos de precipitación de la estación meteorológica del primer siembro marcado. Si se desea analizar una estación meteorológica diferente a la del primer siembro marcado, el usuario debe entrar en la opción de "Siembros" (Fig. 4.26) y cambiar la estación meteorológica

del primer siembro marcado o escoger como primer siembro marcado alguno que tenga la estación que se desea estudiar.

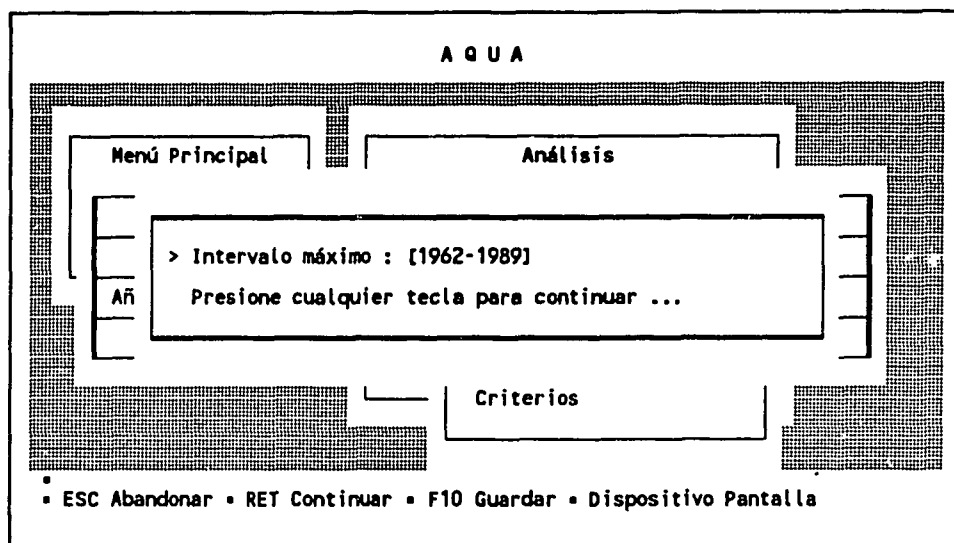


Figura 4.43. Pantalla que reporta el intervalo máximo de años que puede usarse en la sección de "Datos de precipitación".

Al presionar la tecla <F6> en la sección de datos de precipitación, el programa despliega datos relativos al cultivo del siembro que se encuentra marcado primero (Figura 4.44). Esto lo hace para facilitarle al usuario el análisis de la precipitación en un período igual al que ocuparía el cultivo del primer siembro marcado (si está interesado en estudiar cómo afecta el comportamiento de la lluvia a dicho cultivo).

A Q U A

Menú Principal	Análisis	
Inter	Cultivo : CULT. P/ BALANCE	2
Año inic	Duración efectiva : 364 días	Final
1980	Ciclo del cultivo : 01/01->31/12	31/12
	Presione cualquier tecla para continuar ...	
	Criterios	

• ESC Abandonar • RET Continuar • F10 Guardar • Dispositivo Pantalla

Figura 4.44. Ejemplo de la pantalla que reporta las fechas de siembra y de fin de ciclo efectivo para el cultivo del primer siembro marcado, en la sección de "Datos de precipitación". Aparece al presionar la tecla <F6>.

#### 4.5.2.3 Días con y sin lluvia.

Este análisis efectúa un conteo de los días con una precipitación mayor a cierto valor máximo definido por el usuario, y de los días con una precipitación inferior a un valor mínimo también definido por el usuario (secciones 3.4.2.7 y 4.5.2.7). El conteo se efectúa durante el período definido como "Período 1" en la sección de "Datos de precipitación", para todos los años del intervalo definido en esa sección. El programa efectúa el conteo para cada incremento dentro del período definido.

Al escoger esta opción, se efectúa el cálculo y luego se pregunta si se desean ver los resultados (Figura 4.31). Si se contesta afirmativamente, se despliegan las pantallas que reportan los resultados (Figuras 4.45 y 4.46). Para finalizar el reporte, el programa despliega la pantalla mostrada en la Figura 4.36.

A Q U A

----- Sistema AQUA -----

Menú  
 Da  
 An  
 Ut

Reporte de los resultados de los cálculos

Tipo de cálculo : Días con y sin lluvia  
 Estación : FABIO BAUDRIT

Intervalo : 1962 -> 1971  
 Período (s) : 01/01 -> 31/12  
 Incremento : DIARIO

Reporte por : Pantalla

---

Esc No generar reporte █ Otra tecla Continuar

▪ ESC Abandonar ▪ RET Continuar ▪ F10 Guardar ▪ Dispositivo Pantalla

Figura 4.45. Ejemplo del inicio del reporte por pantalla del cálculo de "Días con y sin lluvia".

A Q U A

Reporte de Precipitación

Fecha	Días sin lluvia	Días con lluvia	Comentario
31/12/1962	263	38	
31/12/1963	266	33	
31/12/1964	267	33	
31/12/1965	290	22	
31/12/1966	260	27	
31/12/1967	277	29	
31/12/1968	260	40	
31/12/1969	245	47	
31/12/1970	248	34	
31/12/1971	247	43	

---

Esc Terminar reporte █ Otra tecla Continuar

▪ ESC Abandonar ▪ RET Continuar ▪ F10 Guardar ▪ Dispositivo Disco

Figura 4.46. Ejemplo de la parte central del reporte por pantalla de "Días con y sin lluvia".

La columna titulada "Comentario", que aparece en el reporte por pantalla para el análisis de "Días con y sin lluvia" (Figura 4.46) y en el Cuadro 4.5, sirve para informar al usuario si se dieron días con datos faltantes o dudosos en el período estudiado.

Para ejemplificar el uso de este análisis, se calcularon los días con y sin lluvia para todos los años de datos de precipitación de la Fabio Baudrit. El Cuadro 4.5 fue producido usando el reporte a disco (ver opción de dispositivo) que posee el programa.

Sistema AQUA			
Reporte de los resultados de los cálculos			
Tipo de cálculo : Días con y sin lluvia			
Estación : FABIO BAUDRIT			
Intervalo : 1962 -> 1989			
Período (s) : 01/01 -> 31/12			
Incremento : ANUAL			
Fecha	Días secos	Días muy húmedos	Comentario
31/12/1962	263	38	
31/12/1963	266	33	
31/12/1964	267	33	
31/12/1965	290	22	
31/12/1966	260	27	
31/12/1967	277	29	
31/12/1968	260	40	
31/12/1969	245	47	
31/12/1970	248	34	
31/12/1971	247	43	
31/12/1972	273	37	
31/12/1973	248	39	
31/12/1974	267	34	
31/12/1975	247	37	
31/12/1976	286	26	
31/12/1977	281	22	
31/12/1978	269	33	
31/12/1979	253	35	
31/12/1980	256	29	
31/12/1981	256	39	
31/12/1982	277	24	
31/12/1983	259	41	
31/12/1984	261	39	
31/12/1985	272	36	
31/12/1986	288	18	
31/12/1987	280	25	
31/12/1988	262	36	
31/12/1989	257	29	
! Fin del reporte !			

Cuadro 4.5. Ejemplo del reporte a disco producido por el sistema AQUA para el cálculo de días con y sin lluvia, estación Fabio Baudrit.

Del cuadro se pueden obtener promedios de los días con y sin lluvia para la Fabio Baudrit. El promedio de días sin lluvia es 265, y el de con lluvia es 33.



Comparando estos resultados con los del Cuadro 4.3, calculados con el balance hídrico, se puede ver que el simple análisis de la lluvia (definiendo días sin lluvia aquellos con precipitación menor o igual a 4 mm [suponiendo que la ETP promedio puede ser de unos 4 mm/día] y los días con lluvia aquellos con precipitación mayor o igual a 20 mm, en los criterios de los cálculos de precipitación) pareciera sobreestimar el déficit hídrico y subestimar el exceso hídrico. Es interesante notar que son relativamente pocos los días de cada año que tienen una PPT mayor a 4 mm y menor a 20 mm; por ej., para 1962 solo quedan 64 días con tal característica (365-[38+263]).

#### 4.5.2.4 Correlación de períodos.

El segundo cálculo de la sección de precipitación es el cálculo de correlación de períodos. Este análisis calcula la precipitación acumulada para cada uno de los dos períodos en cada uno de los años del intervalo definidos en la sección de "Datos de precipitación". El objetivo de este cálculo es producir un reporte de acumulados para dos períodos diferentes en un intervalo de años, para que el usuario pueda luego usar algún método de correlación que establezca si ésta existe entre las precipitaciones acumuladas. Al encontrar correlaciones de ese tipo, el usuario puede ayudarse a predecir la precipitación en un período en base a la de otro período (Radulovich, 1987b).

Al entrar en esta opción, el programa efectúa el análisis y luego pregunta si se desean ver los resultados (Figura 4.31). Al contestar afirmativamente, el usuario puede ver el reporte de los resultados, que consta de tres pantallas: un encabezado (Figura 4.47), el centro del reporte (Figura 4.48) y una pantalla de finalización (Figura 4.36).

254

A Q U A

----- Sistema AQUA -----

Reporte de los resultados de los cálculos

Tipo de cálculo : Correlación de períodos  
 Estación : FABIO BAUDRIT

Intervalo : 1962 -> 1989  
 Período (s) : 15/05 -> 31/05 , 01/11 -> 15/11  
 Incremento : DIARIO

Reporte por : Pantalla

Esc No generar reporte █ Otra tecla Continuar

• ESC Abandonar • RET Continuar • F10 Guardar • Dispositivo Pantalla

Figura 4.47. Ejemplo de la pantalla que encabeza el reporte de "Correlación de períodos".

A Q U A

Reporte de Precipitación

Año	Período #1	Período #2	Comentario
1962	122.8	88.3	
1963	168.3	126.7	
1964	49.2	37.7	
1965	148.2	56.8	
1966	136.1	65.8	
1967	54.2	46.2	
1968	262.9	101.3	
1969	181.6	160.7	
1970	253.6	47.8	
1971	373.1	39.8	

Esc Terminar reporte █ Otra tecla Continuar

• ESC Abandonar • RET Continuar • F10 Guardar • Dispositivo Pantalla

Figura 4.48. Ejemplo de la parte central del reporte de "Correlación de períodos".

295

La columna "Comentario", mostrada en la Figura 4.48 y en el Cuadro 4.6, tiene la finalidad de comunicarle al usuario si algún cálculo no se hizo por falta de datos o por datos dudosos.

A continuación se muestran los resultados obtenidos con este análisis para los períodos de la segunda quincena de mayo y la primera de noviembre para la estación Fabio Baudrit. Estos resultados fueron utilizados en Quattro-PRO para calcular un coeficiente de correlación lineal ( $r$ ) entre ambas lluvias acumuladas, el cual dió -0.1982, por lo que se puede concluir que no existe correlación lineal entre ellas. Sin embargo, y como se observa en la Figura 4.49, se aprecia que cuando la PPT de mayo es alta la de noviembre es baja. Esta característica puede utilizarse en planificación según ha sido notado por Radulovich (1987b).

## Sistema AQUA

## Reporte de los resultados de los cálculos

Tipo de cálculo : Correlación de períodos  
 Estación : FABIO BAUDRIT  
 Intervalo : 1962 -> 1989  
 Período (s) : 15/05 -> 31/05 , 01/11 -> 15/11  
 Incremento : DIARIO

Año	Período #1	Período #2	Comentario
1962	122.8	88.3	
1963	168.3	126.7	
1964	49.2	37.7	
1965	148.2	56.8	
1966	136.1	65.8	
1967	54.2	46.2	
1968	262.9	101.3	
1969	181.6	160.7	
1970	253.6	47.8	
1971	373.1	39.8	
1972	224.4	138.6	
1973	276.4	23.0	
1974	163.6	22.5	
1975	154.9	110.1	
1976	221.2	160.0	
1977	200.4	86.6	
1978	187.1	45.2	
1979	91.3	149.0	
1980	118.8	163.0	
1981	144.1	25.5	
1982	341.7	61.3	
1983	94.0	203.7	
1984	261.1	48.0	
1985	77.1	102.8	
1986	310.7	40.5	
1987	78.3	8.0	
1988	193.5	94.6	
1989	112.9	92.5	

¡ Fin del reporte !

Cuadro 4.6. Ejemplo del análisis de "Correlación de períodos" para la estación Fabio Baudrit.

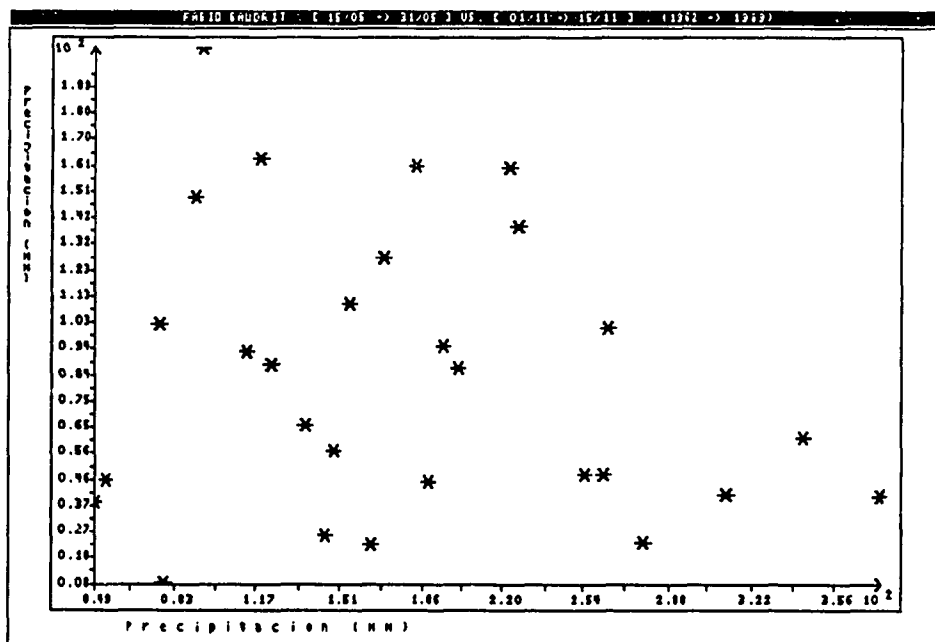


Figura 4.49. Ejemplo del gráfico generado por el programa AQUA para el análisis de correlación de períodos. Basado en el Cuadro 4.6. Eje X: PPT del 15/05 al 31/05. Eje Y: PPT del 01/11 al 15/11. Estación Experimental Fabio Baudrit, 1962-1989.

#### 4.5.2.5 Acumulados.

Este análisis es muy similar al de "Correlación de períodos", ya que calcula acumulados de lluvia, pero a diferencia del anterior análisis, sólo lo hace para el primer período definido en la sección de "Datos de precipitación", y se ve afectado por el incremento de tiempo que se defina.

El reporte producido al ingresar en la sección de acumulados consta de las pantallas mostradas en las Figuras 4.50, 4.51 y 4.36. Antes de desplegarse el reporte, se despliega la pregunta mostrada en la Figura 4.31. En el Cuadro 4.7 se puede ver el análisis de acumulados para cada año completo del registro que se tiene de la Fabio Baudrit.

295

A Q U A

----- Sistema AQUA -----

Menú

Da

An

Ut

Reporte de los resultados de los cálculos

Tipo de cálculo : Acumulados  
Estación : FABIO BAUDRIT

Intervalo : 1962 -> 1989  
Período (s) : 01/01 -> 31/12  
Incremento : PERIODO

Reporte por : Pantalla

Esc No generar reporte ||| Otra tecla Continuar

• ESC Abandonar • RET Continuar • F10 Guardar • Dispositivo Pantalla

Figura 4.50. Ejemplo de la primera pantalla del reporte de resultados por pantalla de la sección de acumulados de precipitación.

A Q U A

Reporte de Precipitación

Menú

Da

An

Ut

Fecha	Acumulado	Comentario
31/12/1962	2021.3	
31/12/1963	1839.0	
31/12/1964	1954.1	
31/12/1965	1443.6	
31/12/1966	1862.9	
31/12/1967	1682.0	
31/12/1968	2064.3	
31/12/1969	2436.9	
31/12/1970	2039.8	
31/12/1971	2412.1	

Esc Terminar reporte ||| Otra tecla Continuar

• ESC Abandonar • RET Continuar • F10 Guardar • Dispositivo Disco

Figura 4.51. Ejemplo de la parte central del reporte por pantalla de "Acumulados".

## Sistema AQUA

## Reporte de los resultados de los cálculos

Tipo de cálculo : Acumulados  
 Estación : FABIO BAUDRIT  
 Intervalo : 1962 -> 1989  
 Período (s) : 01/01 -> 31/12  
 Incremento : ANUAL

Fecha	Acumulados	Comentario
31/12/1962	2021.3	
31/12/1963	1839.0	
31/12/1964	1954.1	
31/12/1965	1443.6	
31/12/1966	1862.9	
31/12/1967	1682.0	
31/12/1968	2064.3	
31/12/1969	2436.9	
31/12/1970	2039.8	
31/12/1971	2412.1	
31/12/1972	1839.7	
31/12/1973	2337.4	
31/12/1974	1959.2	
31/12/1975	2048.7	
31/12/1976	1595.7	
31/12/1977	1660.1	
31/12/1978	2050.2	
31/12/1979	2123.8	
31/12/1980	1853.6	
31/12/1981	2090.8	
31/12/1982	1561.0	
31/12/1983	2219.8	
31/12/1984	2095.6	
31/12/1985	1863.2	
31/12/1986	1449.5	
31/12/1987	1599.0	
31/12/1988	2236.6	
31/12/1989	1865.4	

¡ Fin del reporte !

Cuadro 4.7. Ejemplo de estructuración de reporte a disco producido por el sistema AQUA para la estación Fabio Baudrit, en el análisis de acumulados de precipitación.

#### 4.5.2.6 Lluvia probable.

El análisis de lluvia probable es de gran utilidad para determinar lluvias máximas o mínimas en una región. La probabilidad con que se efectúa el cálculo es la probabilidad de que la precipitación real en cierto día sea igual o mayor a la que se calcula. El valor de la probabilidad se establece en la sección de criterios de precipitación (secciones 3.4.2.7 y 4.5.2.7). Este análisis no se ve afectado por el incremento de tiempo que se defina, es decir, sólo se calcula la lluvia probable día a día y no para péntadas, décadas, etc. El análisis de lluvia probable sí se ve afectado por el intervalo y período que se definan en la sección de "Datos de precipitación", por lo que se puede calcular la lluvia probable usando solamente un conjunto de años (usando el intervalo de la sección de datos) o se puede calcular solamente para una parte del año (usando el período de la sección de datos). Por ejemplo, si el usuario desea calcular la lluvia probable solamente para los meses de octubre y noviembre, debe definir en la sección de "Datos de precipitación" un período 1 que vaya del 01/10 al 30/11. Si desea que el análisis se haga solamente en base a los últimos diez años (y no a todo el registro) debe especificar un intervalo que vaya de 1982 a 1992.

El reporte producido al efectuarse este cálculo consta de las siguientes pantallas (Figuras 4.52, 4.53 y 4.54), las cuales se despliegan luego de que el usuario contesta positivamente a la pregunta mostrada en la Figura 4.31.

A Q U A

----- Sistema AQUA -----

Menú Da An Ut	<b>Reporte de los resultados de los cálculos</b> Tipo de cálculo : Lluvia probable Estación : FABIO BAUDRIT  Intervalo : 1962 -> 1989 Período (s) : 27/02 -> 27/02 Incremento : DIARIO  Reporte por : Pantalla
Esc No generar reporte    Otra tecla Continuar	

■ ESC Abandonar   ■ RET Continuar   ■ F10 Guardar   ■ Dispositivo Pantalla

Figura 4.52. Ejemplo de la pantalla de encabezado del reporte de "Lluvia probable".

301



A Q U A

Reporte de Precipitación

Me	Fecha	Precipitación (mm)	80 %	Comentario
	21/01	0.1		
	22/01	0.3		
	23/01	0.5		
	24/01	0.1		
	25/01	0.1		
	26/01	0.0		
	27/01	0.0		Todos iguales
	28/01	0.5		
	29/01	0.0		
	30/01	0.0		Todos iguales
Esc Terminar reporte █ Otra tecla Continuar				

▪ ESC Abandonar ▪ RET Continuar ▪ F10 Guardar ▪ Dispositivo Pantalla

Figura 4.53. Ejemplo de la pantalla central del reporte de "Lluvia probable".

El programa puede generar reportes a disco que pueden usarse luego con otros programas para generar cálculos o gráficos. A continuación se presenta un gráfico generado con un programa de graficación a partir del cálculo de lluvia probable para parte del año para todo el registro de datos de la Fabio Baudrit (Fig. 4.54). La lluvia con un 80% de probabilidad es aquella que será superada 4 de cada 5 años, mientras que la de un 20% de probabilidad será superada 1 de cada 5 años.

302

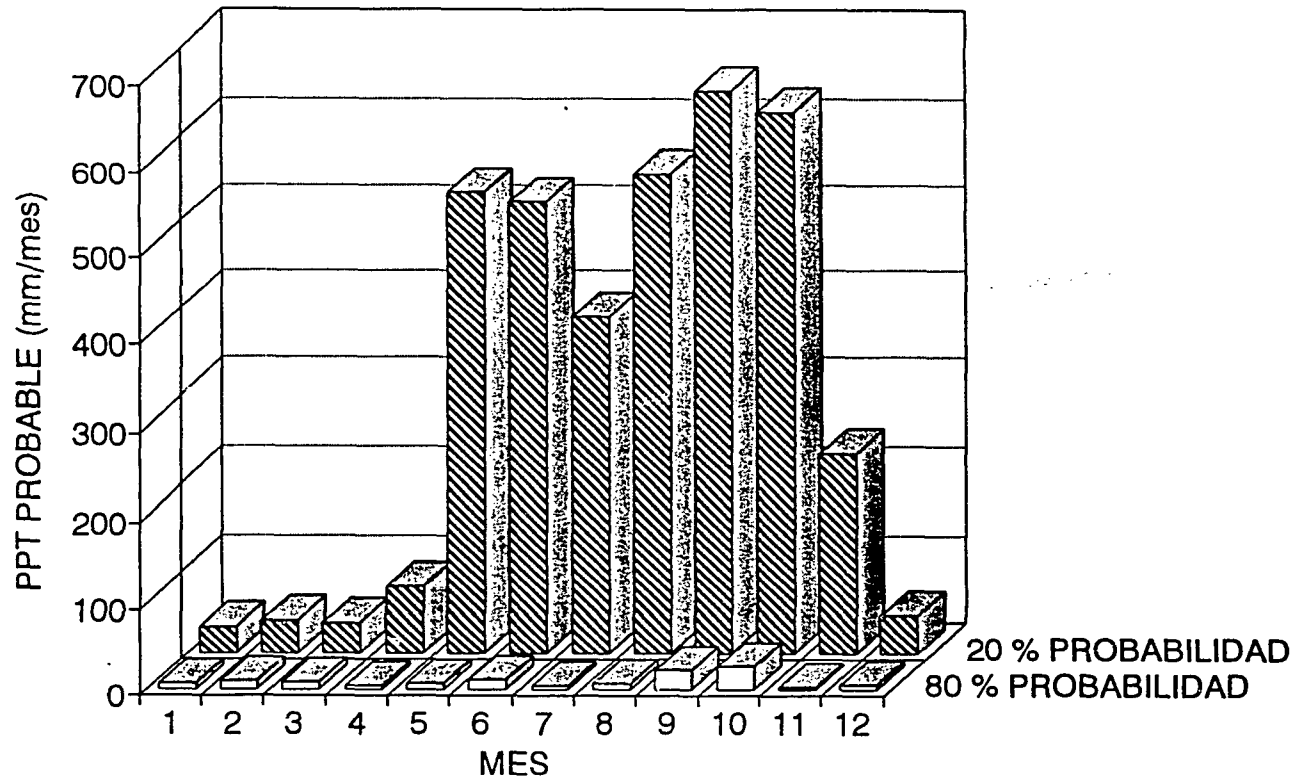


Figura 4.54. Gráfico de precipitaciones probables generado a partir de resultados producidos por AQUA.

#### 4.5.2.7 Criterios de precipitación.

Como se ha explicado en las anteriores secciones, en ésta se definen los criterios usados en los análisis de "Días con y sin lluvia" y "Lluvia probable".

A Q U A

---

Criterios para PRECIPITACION

• Probabilidad de que se presente una PPT mayor o igual a la calculada.	80%
• PPT por debajo de la cual se considera al día como seco.	4.0 mm
• PPT por encima de la cual se considera al día como muy húmedo.	20.0 mm

---

▪ ESC Abandonar ▪ RET Continuar ▪ F10 Guardar ▪ Dispositivo Disco

Figura 4.55. Pantalla en la que se definen los criterios para los cálculos de "Días con y sin lluvia" y "Lluvia probable".

308

### 4.5.3 FECHA MAS TEMPRANA DE SIEMBRA.

La sección de análisis de fecha más temprana de siembra posee el menú mostrado en la Figura 4.56.

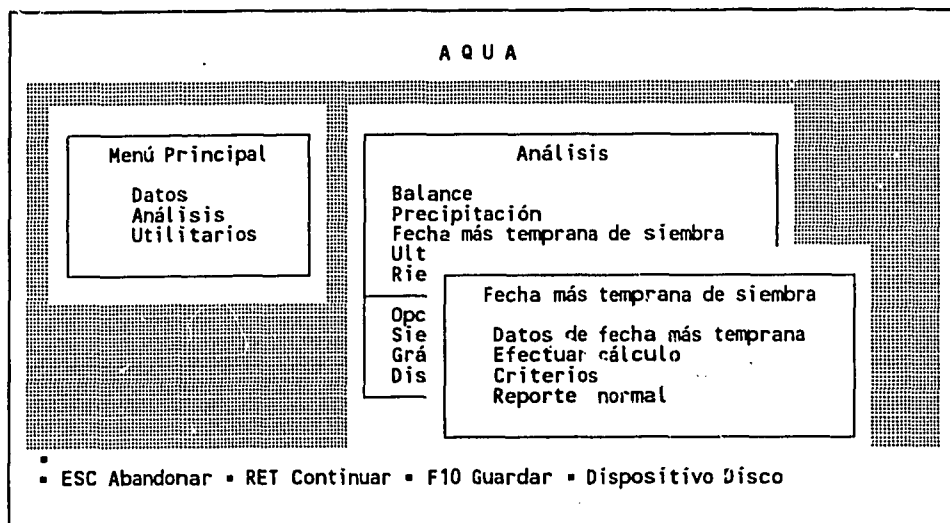


Figura 4.56. Menú de la sección del cálculo de la fecha más temprana de siembra.

### 4.5.3.1 Datos de fecha más temprana de siembra.

En esta sección se define el intervalo de años para calcular la fecha más temprana de siembra para cada siembru marcado (Figura 4.57). También se define el día del año a partir del cual se desea que empiece a buscar la fecha más temprana de siembra, esto porque sería un desperdicio de tiempo buscar la fecha más temprana de siembra en enero para zonas como la Fabio Baudrit, en las que se sabe que las lluvias comienzan después.

A Q U A

Datos para el cálculo de la fecha más temprana de siembra

Nombre del siembru	Intervalo de años		Inicio del cálculo
	Año inicial	Año final	Día/Mes
1 ARROZ	1969	1969	15/03
2			/
3			/
4			/
5			/
6			/
7			/
8			/
9			/
10			/

• ESC Abandonar • RET Continuar • F10 Guardar • Dispositivo Disco

Figura 4.57. Ejemplo de la pantalla en la que se definen los intervalos y las fechas de inicio de cálculo para efectuar el análisis de fecha más temprana de siembra.

### 4.5.3.2 Efectuando el cálculo.

El análisis de fecha más temprana de siembra se basa en los criterios que se definan en la sección de criterios de fecha más temprana (Secciones 3.4.3.3 y 4.5.3.3). Una vez efectuado el cálculo, el programa pregunta si se desean ver los resultados (Figura 4.31), y si el usuario responde afirmativamente se despliegan las siguientes pantallas de reporte (4.58 y 4.59).

A Q U A

Sistema AQUA

Menú

Da  
An  
Ut

Reporte de los resultados de los cálculos

Tipo de cálculo : Fecha más temprana de siembra  
No. de siembros : 1

Reporte por : Pantalla

Esc No generar reporte    Otra tecla Continuar

• ESC Abandonar • RET Continuar • F10 Guardar • Dispositivo Pantalla

Figura 4.58. Ejemplo del encabezado del reporte de fecha más temprana de siembra.

A Q U A

Menú Pri Datos Análisis Utilit	Siembro No. 1 : ARROZ <hr/> Estación : FABIO BAUDRIT Cultivo : ARROZ Perfil : AQUA <hr/> Año                      Fecha más temprana de siembra 1969                      9 de Abril <hr/> Esc Terminar reporte    Otra tecla Continuar	embra rana
---	---	---------------

• ESC Abandonar • RET Continuar • F10 Guardar • Dispositivo Pantalla

Figura 4.59. Ejemplo de la parte central del reporte de fecha más temprana de siembra.

308

El programa puede generar un reporte a disco con los resultados del análisis que se efectúe. En los Cuadros 4.8 y 4.9 se muestran reportes de fecha más temprana de dos cultivos para la estación Fabio Baudrit, para todos los años del registro de datos.

Sistema AQUA	
Reporte de los resultados de los cálculos	
Tipo de cálculo : Fecha más temprana de siembra	
No. de siembras : 1	
Siembro No. 1 : RESISTENTE	
Estación	: FABIO BAUDRIT
Cultivo	: RESISTENTE
Perfil	: AQUA
Año	Fecha más temprana de siembra
1969	08 de Abril
1970	02 de Abril
1971	03 de Mayo
1972	23 de Abril
1973	29 de Abril
1974	13 de Mayo
1975	10 de Mayo
1976	23 de Abril
1977	11 de Junio
1978	29 de Abril
1979	24 de Abril
1980	28 de Abril
1981	24 de Abril
1982	12 de Mayo
1983	13 de Mayo
1984	17 de Abril
1985	04 de Mayo
1986	02 de Junio
1987	09 de Mayo
1988	06 de Mayo
¡ Fin del reporte !	

Cuadro 4.8. Ejemplo de los resultados del cálculo de fecha más temprana de siembra para un cultivo hipotético resistente al déficit hídrico, para la estación Fabio Baudrit.



Sistema AQUA	
Reporte de los resultados de los cálculos	
Tipo de cálculo : Fecha más temprana de siembra	
No. de siembras : 1	
Siembro No. 1 : SUSCEPTIBLE	
Estación	: FABIO BAUDRIT
Cultivo	: SUSCEPTIBLE
Perfil	: AQUA
Año	Fecha más temprana de siembra
1969	08 de Abril
1970	18 de Abril
1971	03 de Mayo
1972	24 de Abril
1973	10 de Junio
1974	13 de Mayo
1975	10 de Mayo
1976	06 de Mayo
1977	11 de Junio
1978	29 de Abril
1979	24 de Abril
1980	30 de Abril
1981	24 de Abril
1982	12 de Mayo
1983	20 de Junio
1984	20 de Abril
1985	16 de Mayo
1986	02 de Junio
1987	29 de Mayo
1988	31 de Mayo
¡ Fin del reporte !	

Cuadro 4.9. Ejemplo de los resultados del cálculo de fecha más temprana de siembra para un cultivo susceptible al déficit hídrico, para la estación Fabio Baudrit.

Basado en los resultados del cálculo de la fecha más temprana de siembra, el programa puede generar gráficos de fecha de siembra versus porcentaje de ocurrencia, los cuales son de gran utilidad para determinar una fecha de siembra con determinada probabilidad de ocurrencia. Las Figuras 4.60 y 4.61 muestran ese tipo de gráficos, generados a partir de los resultados mostrados en los Cuadros 4.8 y 4.9.

De la Figura 4.60 se obtiene que el 80% de los años estudiados la fecha más temprana de siembra se dió antes del 12 de mayo (inclusive) para un cultivo resistente. Esa es la razón por la que esa fecha se tomó como la fecha inicial de las secuencias estudiadas en la sección de balance.

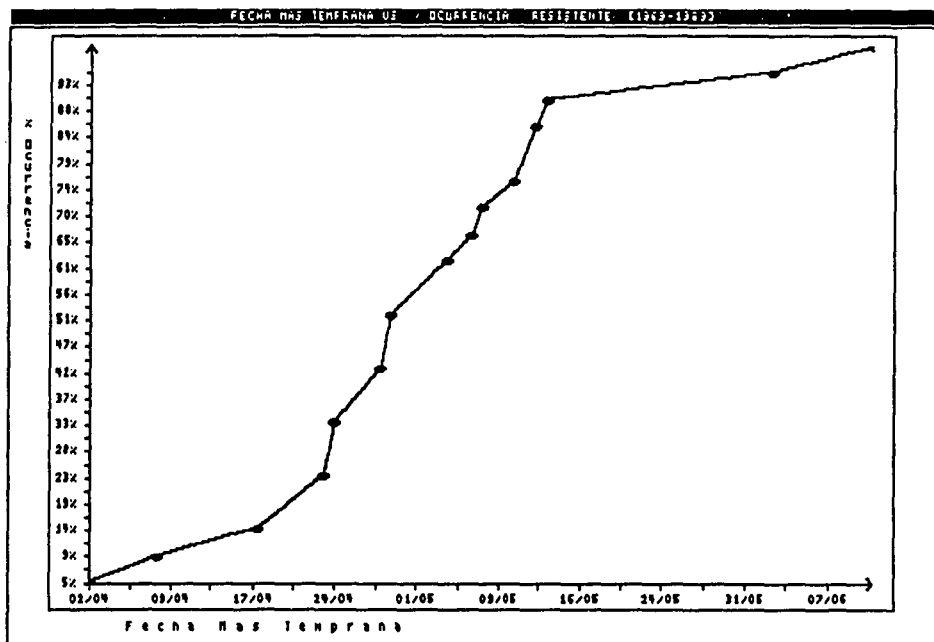


Figura 4.60. Ejemplo del gráfico de porcentaje de ocurrencia de la Fecha más Temprana de Siembra para un cultivo hipotético resistente al déficit hídrico, generado por AQUA para la Estación Experimental Fabio Baudrit para los años 1969-1989. Basado en el Cuadro 4.8.

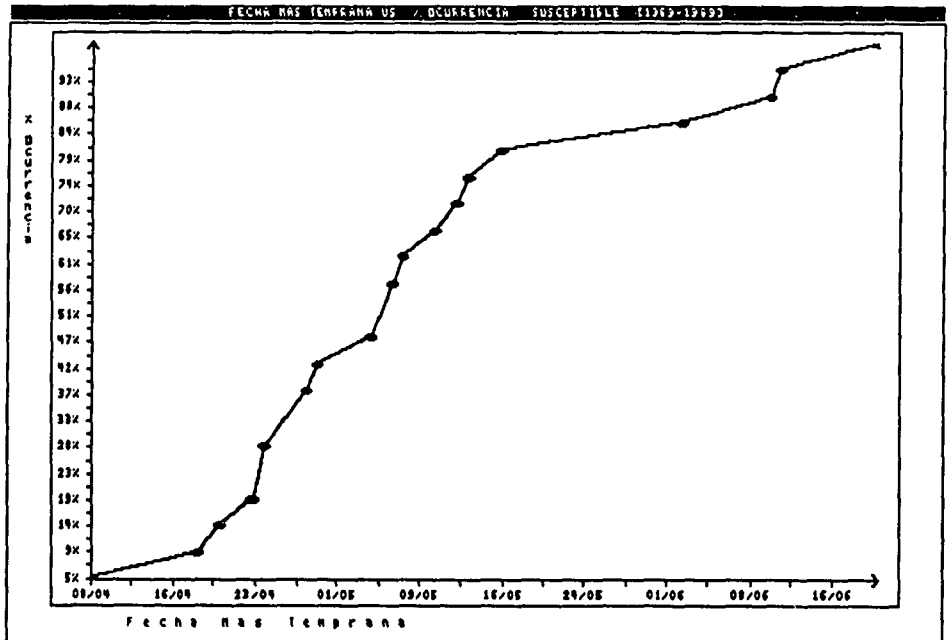


Figura 4.61. Ejemplo del gráfico de porcentaje de ocurrencia de la Fecha más Temprana de Siembra para un cultivo hipotético susceptible al déficit hídrico, generado por AQUA para la Estación Experimental Fabio Baudrit para los años 1969-1989. Basado en el Cuadro 4.9.

### 4.5.3.3 Criterios de fecha más temprana.

En esta sección (Figura 4.62) se pueden variar los criterios que se usan para calcular la fecha más temprana de siembra en caso de que el usuario encuentre que las fechas que el programa está calculando no se ajustan a la realidad de la zona en estudio (ver Sección 2.3.1).

Criterios para FECHA MAS TEMPRANA DE SIEMBRA		
• Días para establecimiento del cultivo.	20 días	
• PPT mínima en década anterior a la siembra.	30.0 mm	
• PPT máxima para labores.	5.0 mm/día	
• Días con PPT menor a PPT máxima.	3 días	
• Días con PPT nula.	2 días	
• Uso de días secos consecutivos para siembra.	1 (1=Si/2=No)	
Criterio	Cultivo	
	SUSCEPTIBLE	RESISTENTE
• Días permitidos con déficit.	1	2
• Agua residual.	5 mm	8 mm

Figura 4.62. Pantalla en la que se definen los criterios usados para calcular la fecha más temprana de siembra. Se muestran los valores que usa el programa por defecto.

#### 4.5.4 ULTIMO DIA A CAPACIDAD DE CAMPO.

En este análisis el programa calcula el último día en que el suelo se encuentra a capacidad de campo para cada uno de los siembros que se encuentren marcados. El menú correspondiente a esta sección se muestra en la Figura 4.63, y los otros pasos se muestran en las Figuras 4.64, 4.65 y 4.66.

El análisis de última fecha a capacidad de campo puede ser de gran utilidad para estimar cuál es el último día del año en el que se puede sembrar un cultivo que crezca con las últimas lluvias del año. Para ello se puede definir un siembro con un cultivo hipotético establecido que se siembre en plena época lluviosa y que dure hasta el fin del año. Este tipo de análisis se hizo para la estación Fabio Baudrit, mostrándose los resultados en el Cuadro 4.10 y en la Figura 4.67, generados por el programa.

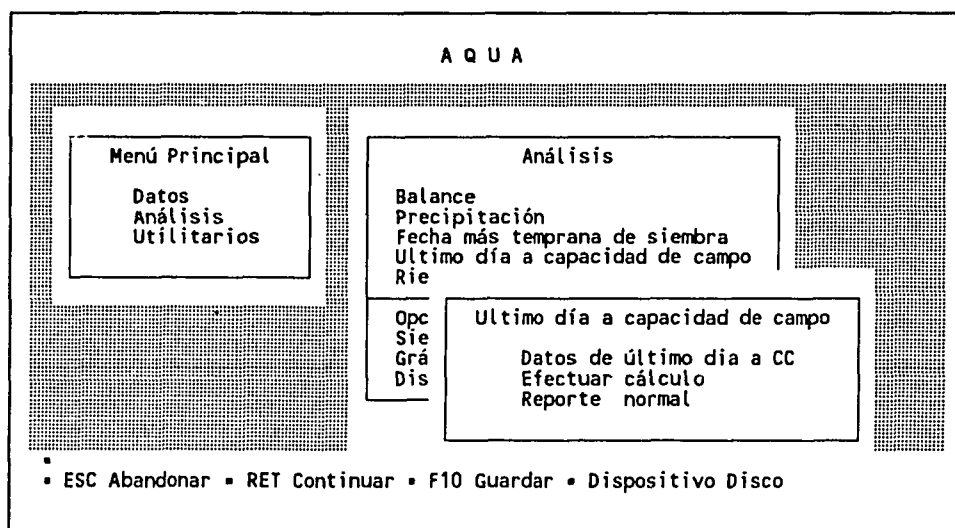


Figura 4.63. Menú del análisis de "Ultimo día a capacidad de campo".

314

#### 4.5.4.1 Datos para último día a capacidad de campo.

Al entrar en esta sección aparece la pantalla mostrada en la Figura 4.64, en la cual el usuario puede especificar el intervalo de años en el que desea efectuar el cálculo para cada uno de los siembros marcados.

A Q U A

Datos para el Cálculo del Ult. Día a Cap. Campo

Nombre del siembro	Intervalo de años		Período	
	Año inicial	Año final	Inicio	Final
1 ARROZ	1969	1969	01/01	31/12
2			/	/
3			/	/
4			/	/
5			/	/
6			/	/
7			/	/
8			/	/
9			/	/
10			/	/

• ESC Abandonar • RET Continuar • F10 Guardar • Dispositivo Pantalla

Figura 4.64. Ejemplo de la pantalla en la que se definen los intervalos de años en los que se desea efectuar el cálculo de último día a capacidad de campo.

#### 4.5.4.2 Efectuando el cálculo.

Después de calcular la última fecha a capacidad de campo, el programa pregunta si se desean ver los resultados (Figura 4.31), y si se responde afirmativamente se despliega el reporte de resultados, que consta de las pantallas mostradas en las Figuras 4.65, 4.66 y 4.36.

A Q U A

Sistema AQUA

---

Reporte de los resultados de los cálculos

Tipo de cálculo : Ultimo día a capacidad de campo  
 No. de siembros : 1

Reporte por : Pantalla

---

Esc No generar reporte    Otra tecla Continuar

Menú  
Da  
An  
Ut

po

• ESC Abandonar • RET Continuar • F10 Guardar • Dispositivo Pantalla

Figura 4.65. Ejemplo del encabezado del reporte de última fecha a capacidad de campo.

A Q U A

<p>Menú Pri</p> <p>Datos</p> <p>Análisis</p> <p>Utilit</p>	<p>Siembro No. 1 : ARROZ</p> <hr/> <p>Fecha de siembra : 13 de Noviembre Fin del ciclo : 2 de Marzo</p> <p>Estación : FABIO BAUDRIT Cultivo : ARROZ Perfil : AQUA</p> <hr/> <p>Año      Ultimo día a capacidad de campo</p> <p>1969      30 de Noviembre</p> <hr/> <p>Esc Terminar reporte    Otra tecla Continuar</p>	<p>campo</p> <p>CC</p>
--	--	------------------------

▪ ESC Abandonar ▪ RET Continuar ▪ F10 Guardar ▪ Dispositivo Pantalla

Figura 4.66. Ejemplo de la pantalla central del reporte del último día a capacidad de campo.



Sistema AQUA	
Reporte de los resultados de los cálculos	
Tipo de cálculo : Ultimo día a capacidad de campo	
No. de siembras : 1	
Siembro No. 1 : ULTIMA FECHA A CC	
Fecha de siembra : 01 de Octubre	
Fin del ciclo : 01 de Enero	
Estación : FABIO BAUDRIT	
Cultivo : CULT. P/ ULTIMA CC	
Perfil : AQUA	
Año	Ultimo día a capacidad de campo
1969	30 de Noviembre
1970	12 de Noviembre
1971	05 de Noviembre
1972	22 de Diciembre
1973	22 de Noviembre
1974	01 de Noviembre
1975	06 de Noviembre
1976	15 de Noviembre
1977	25 de Noviembre
1978	02 de Noviembre
1979	23 de Noviembre
1980	23 de Noviembre
1981	01 de Noviembre
1982	05 de Noviembre
1983	01 de Diciembre
1984	19 de Noviembre
1985	14 de Noviembre
1986	01 de Noviembre
1987	23 de Octubre
¡ Fin del reporte !	

Cuadro 4.10. Resultado del cálculo del último día del año en que el suelo se encuentra a capacidad de campo para la estación Fabio Baudrit.

La Figura 4.67 se utilizó para definir a partir de qué siembra no se continuaban las secuencias estudiadas en la sección de balance (Sección 4.5.1.4). Por ejemplo, se puede ver que para el 13 de noviembre, la última fecha a capacidad de campo se dió ese día o antes para la mitad de los años estudiados, y que para el 18 de diciembre (día de cosecha de algunos siembras de las secuencias estudiadas en la Sección 4.5.1.4), la última fecha a capacidad de campo ya se había dado en casi la totalidad de los años, por lo que decidió no continuar las secuencias con cultivos sembrados el 18 de diciembre o después.

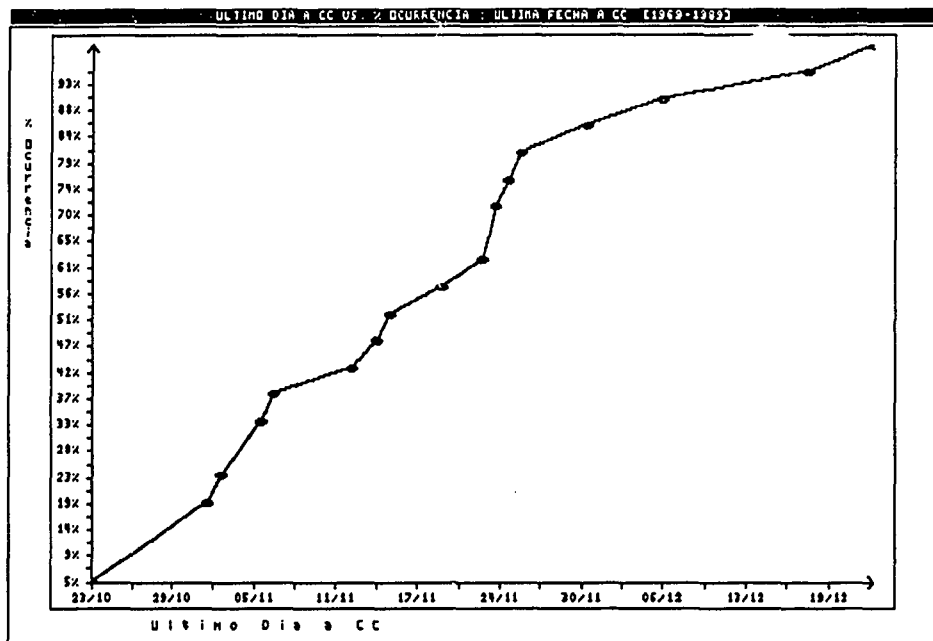


Figura 4.67. Ejemplo del gráfico de porcentaje de ocurrencia de la Ultima Fecha a Capacidad de Campo para un cultivo establecido hipotético, generado por AQUA para la Estación Experimental Fabio Baudrit para los años 1969-1989. Basado en el Cuadro 4.10.

#### 4.5.5 CALENDARIO DE RIEGO.

El menú mostrado en la Figura 4.68 se despliega cuando se entra en la opción "Riego" del menú de análisis (Figura 4.26).

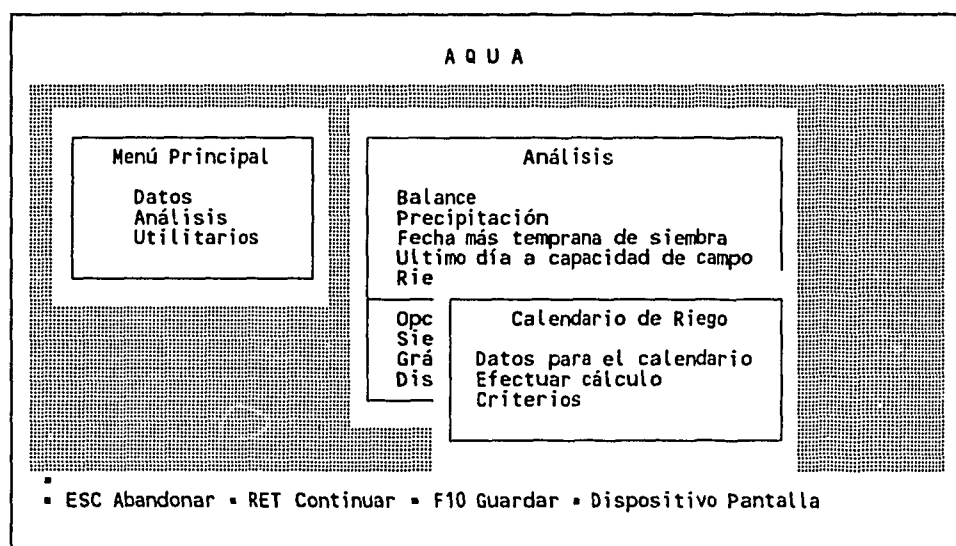


Figura 4.68. Menú de la sección de calendario de riego.

### 4.5.5.1 Datos para el calendario.

El intervalo de años para los que se desea calcular el calendario de riego y el período del año en que se desea ver el calendario de riego se definen en esta sección, para cada uno de los siembros marcados (Figura 4.69). Al igual que para las restantes secciones de datos de los análisis, al presionar la tecla <F3> el programa despliega el intervalo máximo de años en los que se puede calcular el calendario de riego (Figura 4.29).

A Q U A

— Datos para el Calendario de Riego —

Nombre del siembro	Intervalo de años		Período	
	Año inicial	Año final	Inicio	Final
1 ARROZ	1969	1987	01/01	31/12
2			/	/
3			/	/
4			/	/
5			/	/
6			/	/
7			/	/
8			/	/
9			/	/
10			/	/

• ESC Abandonar • RET Continuar • F10 Guardar • Dispositivo Pantalla

Figura 4.69. Ejemplo de la pantalla donde se definen los intervalos y períodos de la sección de calendario de riego.

#### 4.5.5.2 Efectuando el cálculo.

Cuando se hace el cálculo del calendario de riego, el programa pregunta si se desean ver los resultados (Figura 4.31), y si se responde positivamente, despliega el reporte, que consta de dos pantallas de encabezado (Figuras 4.70 y 4.71), una pantalla central (Figura 4.72) y una para finalizarlo (Figura 4.36).

A Q U A	
Sistema AQUA	
Menú Da An Ut	Reporte de los resultados de los cálculos
	Tipo de cálculo : Calendario de riego No. de siembros : 1 Reporte por : Pantalla
	ADC aplicado en cada riego (%) : 100 Eficiencia de riego (%) : 70
	Esc No generar reporte     Otra tecla Continuar

• ESC Abandonar • RET Continuar • F10 Guardar • Dispositivo Pantalla

Figura 4.70. Ejemplo de la primera parte del encabezado del reporte de calendario de riego.

322

A Q U A

Siembro No. 01 : ARROZ

---

M

Area (Ha) : 100.00  
 Fecha de siembra : 13 de Noviembre  
 Duración efectiva : 110 día (s)  
 Fin del ciclo : 02 de Marzo

Estación : FABIO BAUDRIT  
 Cultivo : ARROZ  
 Perfil : AQUA

---

Intervalo de años : 1969-1987  
 Período : 01/01 -> 31/12

---

Esc Terminar reporte █ Otra tecla Continuar

• ESC Abandonar • RET Continuar • F10 Guardar • Dispositivo Pantalla

Figura 4.71. Ejemplo de la segunda parte del encabezado del reporte de calendario de riego.

Reporte de Calendario de Riego

Siembro No. 01 : ARROZ						
FECHA	D I A S	LAMINA (mm)	VOLUMEN A APLICAR (metros cúbicos)		CAUDAL MINIMO (lt/s)	
			Neto	Aplicado	Neto	Aplicado
15/12/1969	32	25	25000	35714	9.0	12.9
08/01/1970	24	40	40000	57143	19.3	27.6
23/01/1970	15	40	40000	57143	30.9	44.1
02/02/1970	10	40	40000	57143	46.3	66.1
10/02/1970	8	40	40000	57143	57.9	82.7
18/02/1970	8	40	40000	57143	57.9	82.7
26/02/1970	8	40	40000	57143	57.9	82.7
23/11/1970	10	13	13000	18571	15.0	21.5
06/01/1971	44	40	40000	57143	10.5	15.0
16/01/1971	10	40	40000	57143	46.3	66.1

Esc Terminar reporte █ Otra tecla Continuar

Figura 4.72. Ejemplo de la pantalla central del reporte de calendario de riego.

Este análisis es de mucha utilidad para el diseño de sistemas de riego. Por ejemplo, si se calcula el calendario de riego para un cultivo durante todos los años de los que se tenga de datos, luego el usuario podría determinar cual es la lámina y el caudal máximo que se ocuparía para satisfacer las necesidades del cultivo, o podría calcular (usando una hoja electrónica) la lámina o caudal máximos que se da cada cierta cantidad de años. Dichos valores máximos, u otros con cierto periodo de retorno, pueden utilizarse para el diseño de un sistema de riego.

Este análisis se hizo para el último cultivo de arroz de las secuencias con más déficit estudiadas en la sección de balance, obteniéndose que el caudal aplicado mínimo que se requeriría para satisfacer las necesidades de este siembro (de 100 ha) en cualquier año sería de 132.3 l/seg, el caudal neto mínimo sería de 92.6 l/seg, la lámina aplicada máxima sería de 40 mm y la mínima separación entre riegos sería de 5 días.

Sistema AQUA						
Reporte de los resultados de los cálculos						
Tipo de cálculo : Calendario de riego						
No. de siembros : 1						
ADC aplicado en cada riego (%) : 100						
Eficiencia de riego (%) : 70						
Siembro No. 01 : ARROZ						
Area (Ha) : 100.00						
Fecha de siembra : 13 de Noviembre						
Duración efectiva : 110 día (s)						
Fin del ciclo : 02 de Marzo						
Estación : FABIO BAUDRIT						
Cultivo : ARROZ						
Perfil : AQUA						
Intervalo de años : 1988-1990						
Período : 01/01 -> 31/12						
FECHA	D I A S	LAMINA (mm)	VOLUMEN A APLICAR (metros cúbicos)		CAUDAL MINIMO (lt/s)	
			Neto	Aplicado	Neto	Aplicado
25/11/1988	12	13	13000	18571	12.5	17.9
12/12/1988	17	25	25000	35714	17.0	24.3
02/01/1989	21	40	40000	57143	22.0	31.5
10/01/1989	8	40	40000	57143	57.9	82.7
20/01/1989	10	40	40000	57143	46.3	66.1
28/01/1989	8	40	40000	57143	57.9	82.7
04/02/1989	7	40	40000	57143	66.1	94.5
11/02/1989	7	40	40000	57143	66.1	94.5
18/02/1989	7	40	40000	57143	66.1	94.5
25/02/1989	7	40	40000	57143	66.1	94.5
¡ Fin del reporte !						

Cuadro 4.11. Ejemplo del reporte a disco generado por el programa para el cálculo de calendario de riego.

324

En el Cuadro 4.11 se presenta un ejemplo de los reportes a disco que genera el programa para el cálculo de calendario de riego. Se hizo para el siembro de arroz referido anteriormente, pero sólo para el año 1989. El reporte para todos los años no se incluyó porque ocupa varias páginas.

#### 4.5.5.3 Criterios para el calendario de riego.

En esta sección el usuario puede definir dos valores que afectan el calendario de riego: el porcentaje del agua disponible para el cultivo (ADC) que se repone en cada riego y la eficiencia del sistema de riego utilizado (Fig. 4.73). El programa trae criterios establecidos por defecto, y si el usuario desea producir un calendario con criterios diferentes debe cambiarlos antes de efectuar el cálculo.

A Q U A

Menú Principal
Análisis

D A U	Criterios para CALENDARIO DE RIEGO
▪	Porcentaje de ADC aplicado en cada riego. <span style="float: right;">100%</span>
▪	Eficiencia de riego. <span style="float: right;">70%</span>

Dis    Efectuar cálculo  
Criterios

▪ ESC Abandonar ▪ RET Continuar ▪ F10 Guardar ▪ Dispositivo Pantalla

Figura 4.73. Pantalla en la que se definen los criterios para calcular el calendario de riego.



#### 4.5.6 OPCIONES PARA EFECTUAR LOS ANALISIS.

La sección de "Opciones" del menú de "Análisis" (Figura 4.26) permite al usuario determinar si desea o no usar los datos meteorológicos dudosos para efectuar los cálculos. Si el marcador (símbolo "■") está en el "si" a la derecha del letrero "Datos dudosos", el programa usará los datos dudosos para efectuar los cálculos, pero si está en el "no", tomará los datos dudosos como faltantes y no efectuará aquellos cálculos que involucren dichos datos. También sirve para indicar si desea que se hagan los cálculos considerando el agua disponible hasta el punto de marchitez permanente (Sección 2.1) y para indicar qué tipo de datos de ETP desea utilizar (diaria, mensual o promedio).

A Q U A

<p>Menú Principal</p> <p>Da</p> <p>An</p> <p>Ut</p>	<p style="text-align: center;">Análisis</p> <p>Opciones</p> <p>Datos dudosos    • Si <input checked="" type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/></p> <p>Agua hasta PMP    Si <input type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/></p> <p>Tipo de ETP        <input checked="" type="checkbox"/> Diaria    <input type="checkbox"/> Mensual    <input type="checkbox"/> Promedio</p>
---	---

• ESC Abandonar • RET Continuar • F10 Guardar • Dispositivo Pantalla

Figura 4.74. Pantalla donde se varían las diferentes opciones que afectan todos los análisis.

3/26

#### 4.5.7 SIEMBROS.

Esta opción del menú de análisis (Figura 4.26) es idéntica a la opción "Siembros" de la sección de datos (Figura 4.9). Se introdujo también en este menú para facilitarle al usuario cualquier cambio que quisiera hacer a los siembros marcados, que son en los que se basan los análisis.

#### 4.5.8 GRAFICOS.

Esta sección tiene por finalidad generar gráficos a partir de los análisis que se efectúen. La Figura 4.75 muestra la pantalla principal de esta sección.

A Q U A

Gráficos

Gráfico actual	EJE X EJE Y	Fecha Balance (mm)
Tipo de gráfico - Incremento de tiempo Código del vertice	LINEAL DIARIO CUADRO-1	
Gráfico inverso Gráfico por impresora	NO NO	

COMANDOS > F10 █ Graficar | RETURN █ Cambiar item | ESC - Terminar

█ ESC Abandonar █ RET Continuar █ F10 Guardar █ Dispositivo Pantalla

Figura 4.75. Pantalla principal de la sección de "Gráficos" de los análisis.

#### 4.5.8.1 Gráfico actual.

Al escoger esta opción de la pantalla principal de gráficos, se despliega la pantalla de la Figura 4.76. En ella el usuario puede escoger qué variable quiere representar en cada eje de coordenadas rectangulares. Los gráficos que se pueden efectuar se listan en el capítulo anterior.

A Q U A	
Gráfico actual	
Eje X Fecha	Eje Y Balance (mm)
V A R I A B L E S	
1. Precipitación (PPT) 2. Evapotranspiración (ETP) 3. Fecha (N) 4. Fecha más temprana de siembra 5. Ultimo día a capacidad de campo 6. Balance (Bn) 7. Bn / ADCn 8. Agua fácilmente disp. (ADCn) 9. Días con déficit 10. Días con exceso	11. Días con estrés 12. Índice de déficit 13. Índice de exceso 14. Índice de estrés 15. Días sin lluvia 16. Días con lluvia 17. % de ocurrencia 18. Fecha de siembra
• ESC Abandonar • RET Continuar • F10 Fin Ejes Dispositivo Pantalla	

Figura 4.76. Pantalla donde el usuario escoge que variables desea graficar.

#### 4.5.8.2 Tipo de gráfico.

El programa puede generar gráficos con líneas, con sólo puntos o con ambos. Si el usuario quiere un gráfico con líneas uniendo los vértices, debe escoger la opción 1 del menú mostrado en la Figura 4.77. Si quiere generar un gráfico con sólo puntos, debe escoger la opción 2. Los gráficos con líneas pueden ser con o sin puntos, lo cual se escoge en la sección de "Código del vértice".

A Q U A	
Gráficos	
Gráfico ac	Tipo de gráfico
Tipo de grá Incremento de ti Código del ver	1. Lineal 2. Puntual
Gráfico inv Gráfico por impresora	NO
COMANDOS > F10 ≡ Graficar   RETURN ≡ Cambiar ítem   ESC - Terminar	
▪ ESC Abandonar ▪ RET Continuar ▪ F10 Guardar ▪ Dispositivo Pantalla	

Figura 4.77. Menú para escoger si se desea un gráfico con líneas uniendo los vértices o con solo puntos en los vértices.

### 4.5.8.3 Código del vértice.

En esta sección el usuario escoge qué tipo de símbolo desea colocar en cada punto. Si desea generar un gráfico con sólo líneas uniendo los vértices, debe escoger la opción 0 del menú mostrado en la Figura 4.78.

A Q U A

Gráfico ac

---

Tipo de grá  
Incremento de ti  
Código del ver

---

Gráfico inv  
Gráfico por impre

Símbolo del gráfico

0. Ninguno  
1. +  
2. X  
3. Cuadro-1  
4. Cuadro-2  
5. Rombo  
6. Y  
7. \*  
8. O  
9. .

COMANDOS > F10 █ Gr                      tem | ESC - Terminar

• ESC Abandonar • RET Continuar • F10 Guardar • Dispositivo Pantalla

Figura 4.78. Menú para escoger el símbolo que se desea colocar en cada punto del gráfico.

### 4.5.8.4 Gráfico inverso y gráfico por impresora.

La opción "Gráfico inverso" de la sección de gráficos (Figura 4.75) sirve para producir un gráfico con los colores invertidos a los que se usan normalmente, es decir, las líneas, letras, números y símbolos se dibujan en negro y el resto en blanco (para despliegue por pantalla).

La opción de "Gráfico por impresora" sirve para reproducir el gráfico en papel. No se recomienda generar un gráfico inverso a impresora, pues gasta demasiada cinta.

178

#### 4.5.8.5 Ejemplos de gráficos.

A continuación se da una breve explicación (o la referencia a una sección anterior del programa) de la mayoría de los gráficos que el programa genera.

##### A. Precipitación vs. Precipitación (para Correlación de períodos).

Ver Figura 4.49, sección de "Correlación de Períodos".

##### B. Fecha vs. Balance (Bn).

En la Figura 4.79 se muestra un ejemplo de este gráfico. El usuario puede ver en este tipo de gráfico la cantidad de agua que le queda disponible al cultivo al final de cada incremento escogido (si se escoge incremento diario, se da el valor diario de Bn).

##### C. Fecha vs. Bn/ADCn.

Ver Figuras 4.37 y 4.38, sección de "Balance".

##### D. Fecha vs. ADCn.

Un ejemplo de este gráfico se puede ver en la Figura 4.80. En él se puede observar la cantidad de agua que el cultivo potencialmente podría tener disponible en cada día.

##### E. Fecha vs. Días con déficit, exceso o estrés.

Las Figuras 4.81, 4.82 y 4.83 dan ejemplos de estos gráficos. En cada uno de ellos se dan acumulados decadales de los días con déficit, exceso o estrés. Son de gran utilidad para localizar las épocas donde hay más estrés y para cuantificar la cantidad de días con problemas.

##### F. Fecha vs. Índice de déficit, exceso o estrés.

Este tipo de gráficos es el más útil para localizar las épocas en que un cultivo podría sufrir déficit, exceso o estrés, ya que el gráfico no da cantidad de días, sino que expresa el porcentaje de los días del incremento (en este caso décadas) que se encuentran sin problemas hídricos. Ejemplos de este tipo de gráficos se pueden observar en las Figuras 4.84, 4.85 y 4.86.

G. Fecha vs. Días sin lluvia o Días con lluvia.

Las Figuras 4.87 y 4.88 son ejemplos de este tipo de gráficos, que se pueden generar al hacer el análisis de "Días con y sin lluvia" en la sección de precipitación.

H. % de ocurrencia vs. Fecha más temprana de siembra.

Ver Figuras 4.60 y 4.61, sección de "Fecha más temprana de siembra".

I. % de ocurrencia vs. Ultimo día a capacidad de campo.

Ver Figura 4.67, sección de análisis de "Ultima fecha a capacidad de campo".

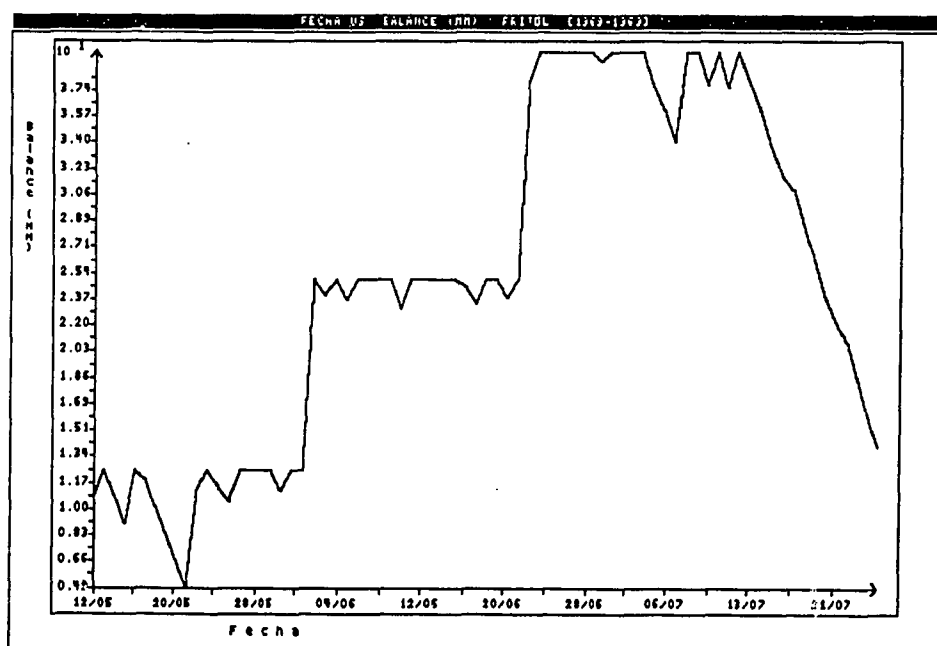


Figura 4.79. Ejemplo de gráfico de Fecha vs. Balance para un cultivo hipotético de frijol sembrado el 12/05/1969 en la Estación Experimental Fabio Baudrit.

332

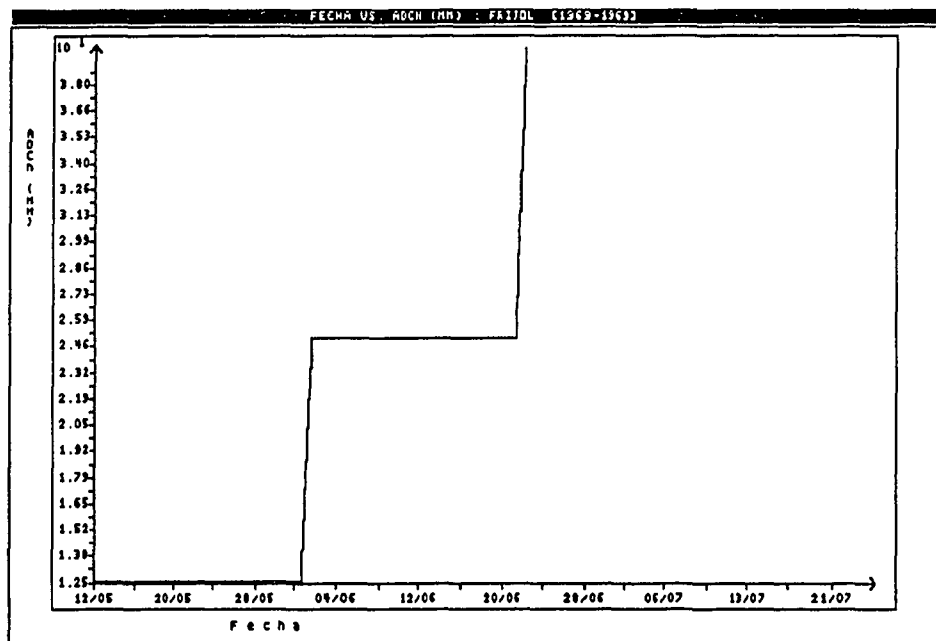


Figura 4.80. Ejemplo de gráfico de Fecha vs. agua fácilmente disponible para un cultivo hipotético de frijol.

233



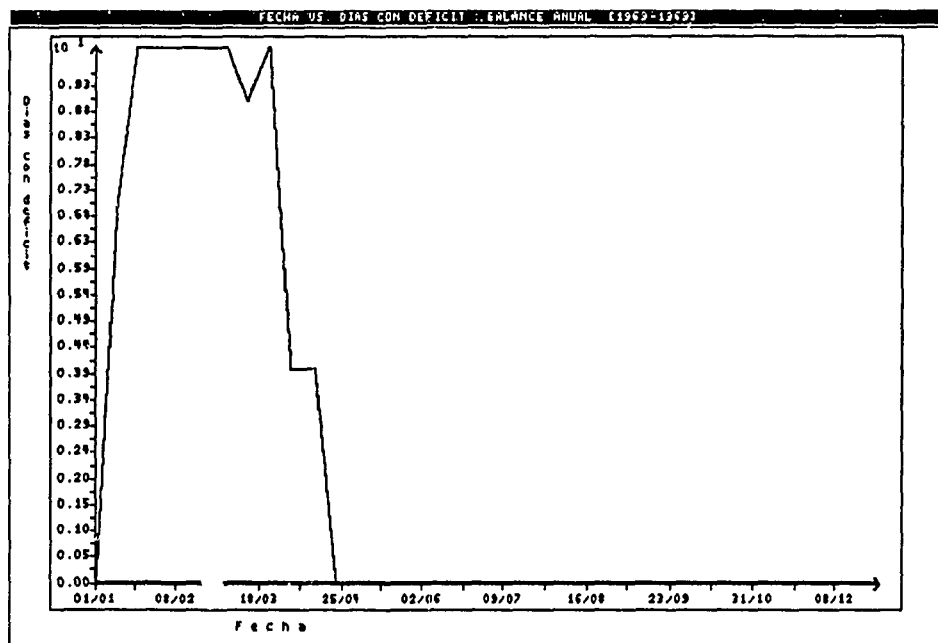


Figura 4.81. Ejemplo de gráfico de Fecha vs. días con déficit cada 10 días (incremento decadal) para un cultivo hipotético establecido, durante 1969 en la Estación Experimental Fabio Baudrit.

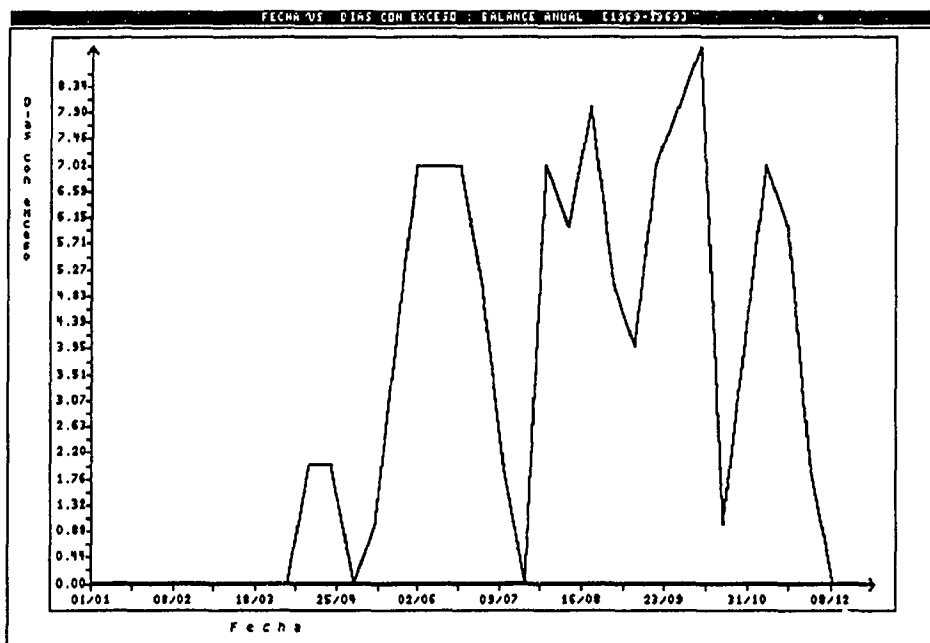


Figura 4.82. Ejemplo de gráfico de Fecha vs. días con exceso cada 10 días (incremento decadal) para un cultivo hipotético establecido, durante 1969 en la Estación Experimental Fabio Baudrit.

23/09

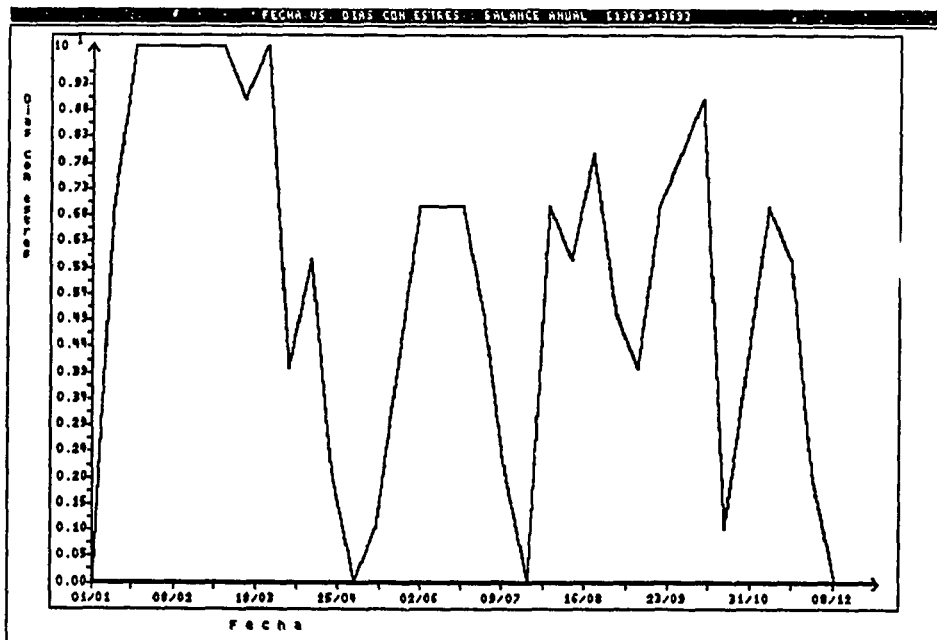


Figura 4.83. Ejemplo de gráfico de Fecha vs. días con estrés cada 10 días (incremento decadal) para un cultivo hipotético establecido, durante 1969 en la Estación Experimental Fabio Baudrit.

336

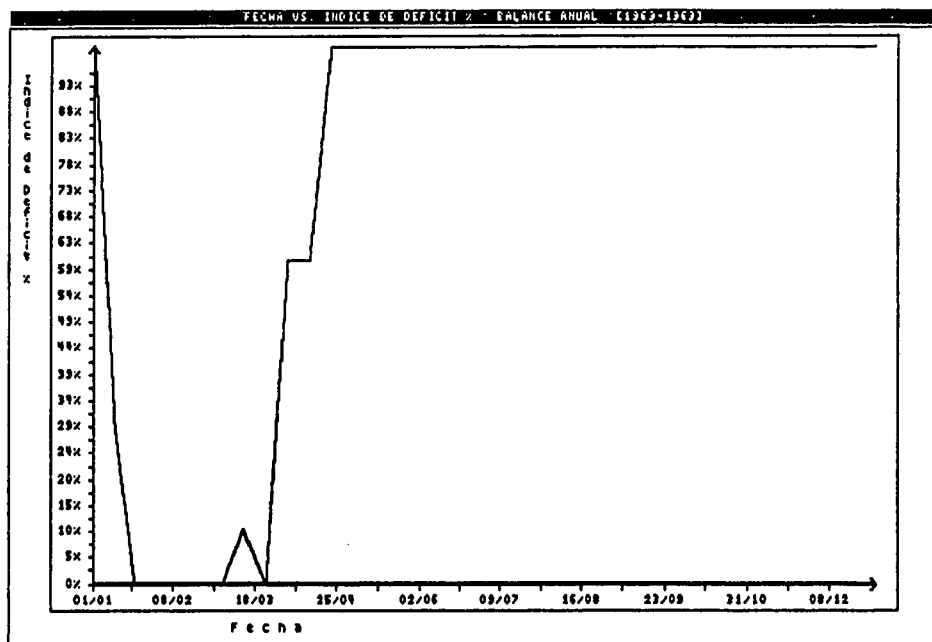


Figura 4.84. Ejemplo de gráfico de Fecha vs. Índice de déficit cada 10 días (incremento decadal) para un cultivo hipotético establecido, durante 1969 en la Estación Experimental Fabio Baudrit.

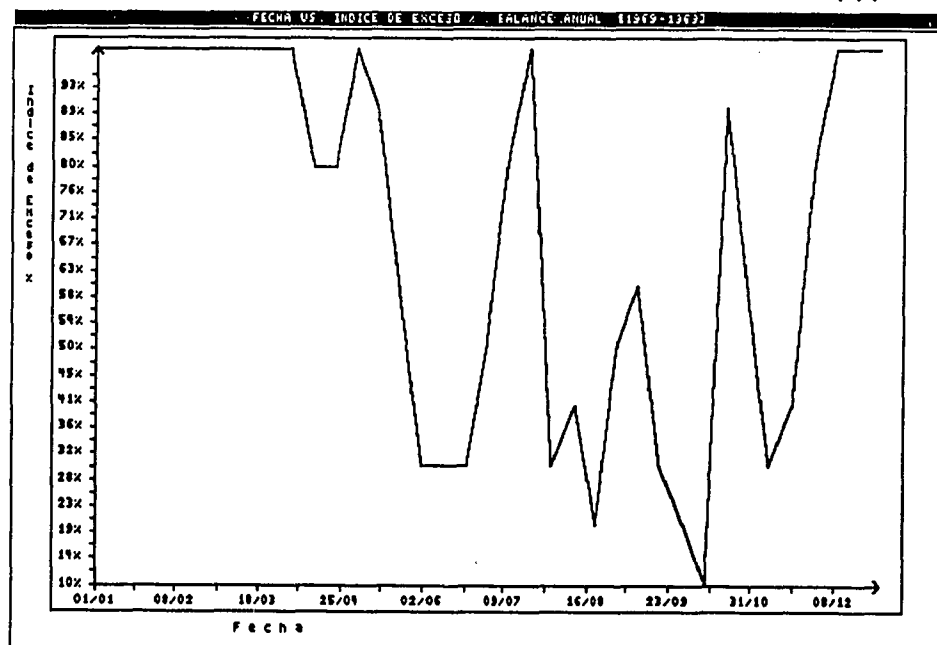


Figura 4.85. Ejemplo de gráfico de Fecha vs. Índice de exceso cada 10 días (incremento decadal) para un cultivo hipotético establecido, durante 1969 en la Estación Experimental Fabio Baudrit.

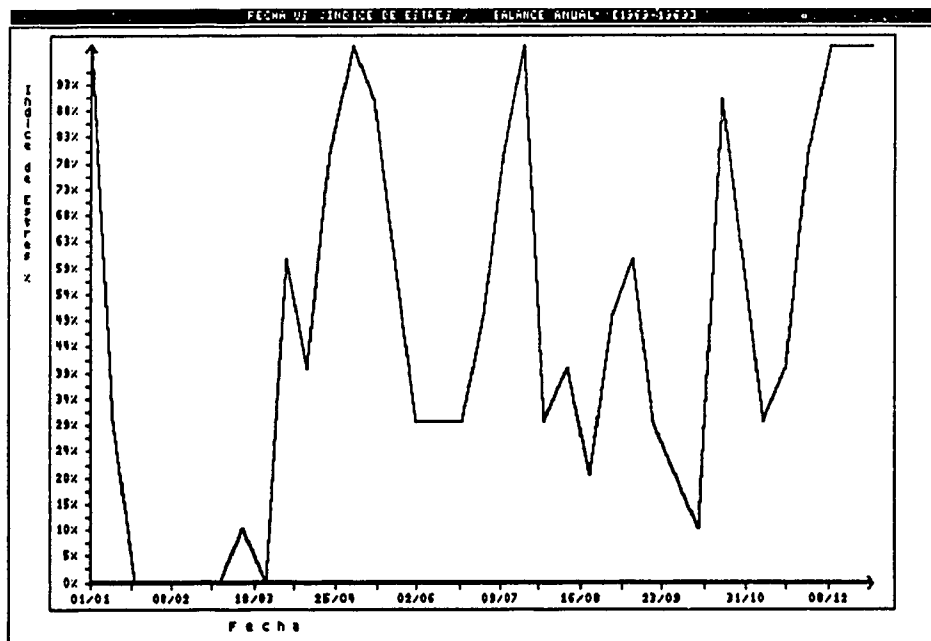


Figura 4.86. Ejemplo de gráfico de Fecha vs. Índice de estrés cada 10 días (incremento decadal) para un cultivo hipotético establecido, durante 1969 en la Estación Experimental Fabio Baudrit.

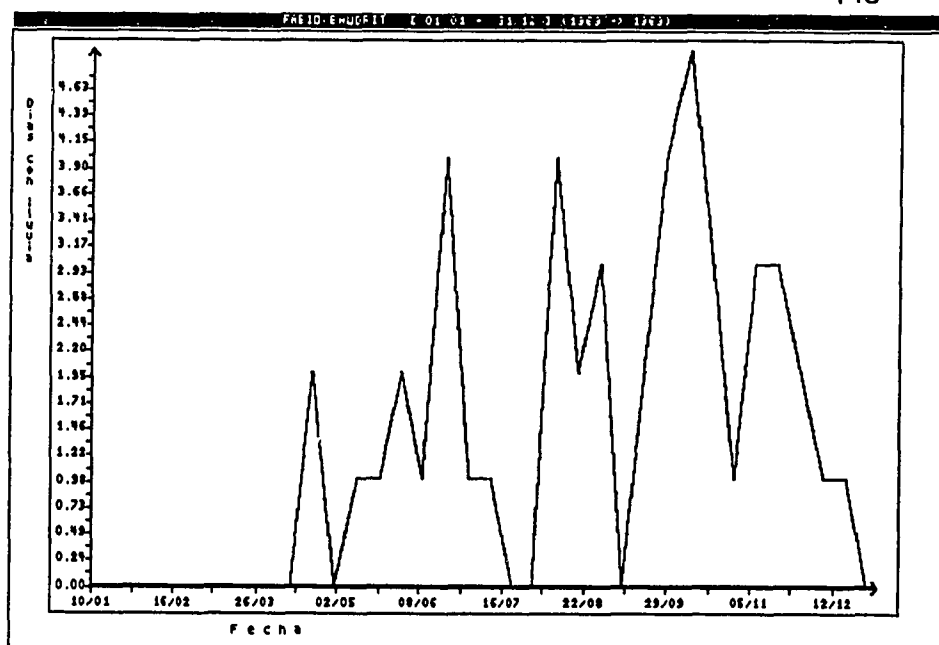


Figura 4.87. Ejemplo de gráfico de Fecha vs. días con lluvia cada 10 días durante 1969 en la Estación Experimental Fabio Baudrit.

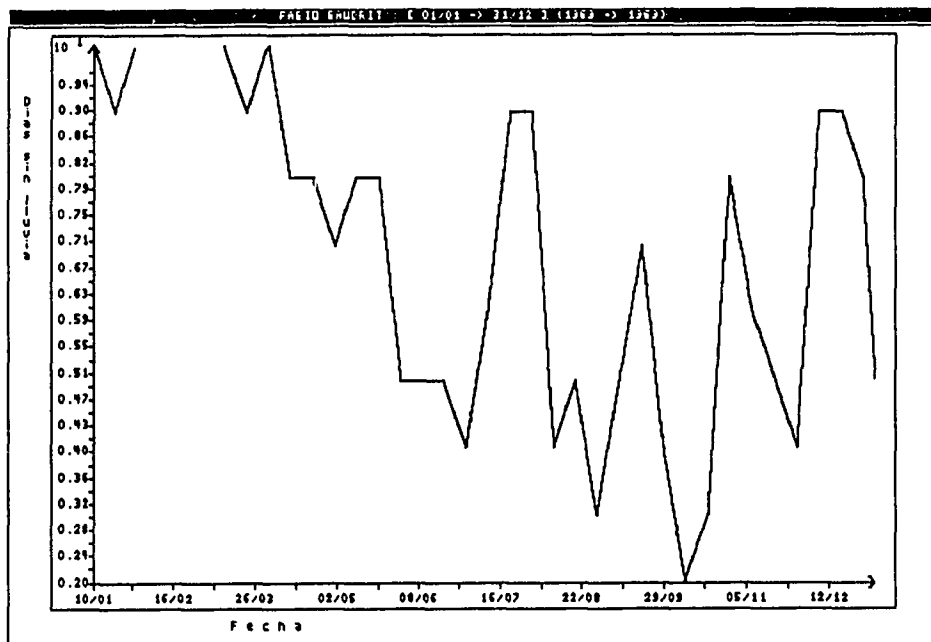


Figura 4.88. Ejemplo de gráfico de Fecha vs. días sin lluvia cada 10 días durante 1969 en la Estación Experimental Fabio Baudrit.

341



#### 4.5.9 DISPOSITIVO DE SALIDA.

La opción "Dispositivo" del menú de "Análisis" (Figura 4.26) tiene por objetivo especificar el dispositivo en el que se generarán los reportes de los análisis.

Como queda claramente especificado en el menú de la Figura 4.89, el programa puede generar los reportes en la pantalla, en la impresora, o en disco. Si el usuario escoge generar los reportes a disco, el programa pregunta el nombre del archivo en el que quiere guardar el reporte (Figura 4.90). Cuando se efectúa el análisis deseado y se responde afirmativamente a la pregunta de la Figura 4.31, el programa crea el archivo con el reporte correspondiente. Si el archivo ya existe, el programa pregunta si se desea sustituir el archivo (Figura 4.91), y si el usuario responde negativamente, el programa pregunta si se desea añadirlo al final del archivo (Figura 4.92); si se responde negativamente a esta última pregunta, el programa no genera el reporte a disco.

A Q U A

Menú Principal

Datos  
Análisis  
Utilitarios

Análisis

Balance  
Precipitación  
Fecha más temprana de siembra  
Ultimo día a capacidad de campo  
Riego

Opc  
Sie  
Grá  
Dis

Dispositivo

Pantalla Impresora Disco

▪ ESC Abandonar ▪ RET Continuar ▪ F10 Guardar ▪ Dispositivo Pantalla

Figura 4.89. Menú para escoger el dispositivo por el que se desea generar los reportes de los análisis.

3/2

A Q U A

<p style="text-align: center;">Menú Principal</p> <p>Datos Análisis Utilitarios</p>	<p style="text-align: center;">Análisis</p> <p style="text-align: center;">Balance</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin: 5px 0;"><p>Nombre del archivo : REPORTE.TXT</p></div> <p style="text-align: right; margin-right: 10px;">ra ampo</p>
<p style="text-align: center;">Grá Dis</p>	<p style="text-align: center;">Dispositivo</p> <p>Pantalla   Impresora   Disco</p>

▪ ESC Abandonar ▪ RET Continuar ▪ F10 Guardar ▪ Dispositivo Pantalla

Figura 4.90. Ejemplo de la pantalla utilizada para especificar el nombre del archivo en disco donde se desea almacenar los resultados de los análisis que se sigan efectuando.

313

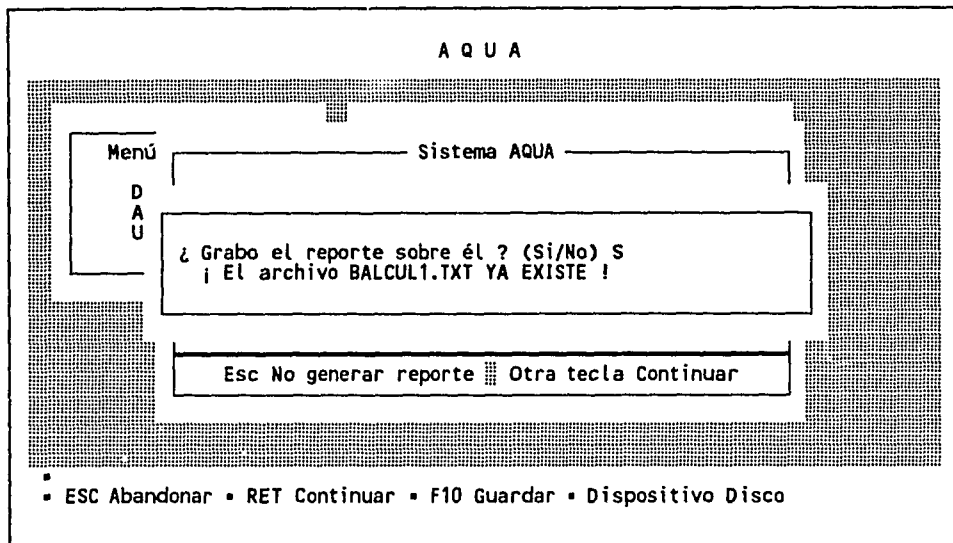


Figura 4.91. Ejemplo del primer mensaje desplegado al intentar generar un reporte a un archivo que ya existe.

3/11

A Q U A

Menú Sistema AQUA

¿ Añado el reporte a él ? (Si/No) S  
¡ El archivo BALCUL1.TXT YA EXISTE !

Esc No generar reporte ||| Otra tecla Continuar

▪ ESC Abandonar ▪ RET Continuar ▪ F10 Guardar ▪ Dispositivo Disco

Figura 4.92. Ejemplo del mensaje donde se pregunta si se desea añadir el reporte que se va a generar al archivo ya existente que se especificó como dispositivo de salida de los análisis.

345

---

## 5. BIBLIOGRAFIA.

---

- Carmona Villalobos, G. 1986. Modelo de balance hídrico para caracterización regional. Tesis de Licenciatura, Escuela de Ingeniería Agrícola, Universidad de Costa Rica.
- Carmona G. y Radulovich R. 1988. Metodología de evaluación de veranillos y de siembra temprana como estrategia para minimizar sus efectos. Turrialba, 38:215-222.
- Doorenbos, J. y A.H. Kassam. 1979. Efectos del Agua Sobre el Rendimiento de los Cultivos. Estudio FAO: Riego y Drenaje No.33. Roma, 177 p.
- Doorenbos, J. y W.O Pruitt. 1986. Las Necesidades de Agua de los Cultivos. Estudio FAO: Riego y Drenaje No.24. Roma, 194 p.
- Espinoza, A. 1992. Estudio agroclimático de los sistemas de cultivo de maíz, frijol y sorgo en las zonas secas de Estelí, Nicaragua. Tesis M.Sc., CATIE, Turrialba. 136 p.
- Mena Acosta, A. A. 1993. Crecimiento y desarrollo de Coyolillo (Cyperus rotundus L.) en dos zonas de Costa Rica. Tesis de Lic. en Ing. Agronómica, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica. (en prensa).
- Radulovich, R. 1986. AQUA, an Integrated Model for Tropical Cropping. Final Report, McNamara Fellowships Program, World Bank, Washington D.C. 114 p.
- Radulovich, R. 1987a. AQUA, a model to evaluate water deficits and excesses in tropical cropping. Agricultural and Forest Meteorology, 40:305-321.
- Radulovich, R. 1987b. Predicción de la precipitación de fin de estación lluviosa en el Régimen del Pacífico. Agronomía Costarricense, 11:55-64.
- Radulovich, R. 1989. Optimization of rainfed tropical cropping in semi dry areas: a case study. Agricultural Water Management, 16:337-352.

- Radulovich, R. 1990. AQUA, a model to evaluate water deficits and excesses in tropical cropping. Part II. Regional yield prediction. *Agricultural and Forest Meteorology*, 40:305-321.
- Radulovich, R., G. Vargas, J.R. Chaves y F. Sánchez. 1989. Agua y cultivos secuenciales en zonas semi-secas: evaluación de campo preliminar. *Agronomía Costarricense*, 13:219-224.
- Sánchez Córdoba, F. 1991. Un modelo de balance hídrico computarizado. *Tesis de Licenciatura, Escuela de Ingeniería Agrícola, Universidad de Costa Rica.*
- Sánchez, F. y R. Radulovich. 1992. El modelo de balance hídrico AQUA. *Memoria del Tercer Seminario Latinoamericano de Agromática, Centro de Investigaciones en Computación, Instituto Tecnológico de Costa Rica. San José, Costa Rica.*