

01183



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

Facultad de Ingeniería
División de Estudios de Posgrado
Sección de Hidráulica

MODELO NUMERICO PARA EL DISEÑO O REVISION
DE SISTEMAS AGRICOLAS CON RIEGO EN DEFICIT
Y SU APLICACION A EPOCAS DE SEQUIA

Tesis que presenta:

NICOLAS ROMERO GOMEZ

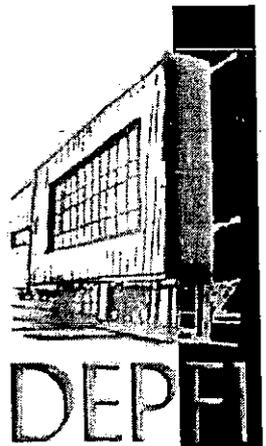
Para obtener el Grado de:

DOCTOR EN INGENIERIA
(HIDRAULICA)

Tutor: DR. JESUS GRACIA SANCHEZ



Cd. Universitaria, mayo de 2001



292947



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Universidad Nacional Autónoma de México
División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería
Sección de Hidráulica

TESIS

**MODELO NUMERICO PARA EL DISEÑO O REVISION DE SISTEMAS AGRICOLAS
CON RIEGO EN DEFICIT Y SU APLICACION A EPOCAS DE SEQUIA**

**PRESENTADA POR:
NICOLAS ROMERO GOMEZ**

**COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN INGENIERIA
(HIDRAULICA)**

JURADO DOCTORAL

PRESIDENTE:	Dr. Carlos Cruickshank Villanueva
PRIMER VOCAL:	Dr. Oscar A. Fuentes Mariles
SEGUNDO VOCAL:	Dr. Jesús Gracia Sánchez
TERCER VOCAL:	Dr. Ramón Domínguez Mora
SECRETARIO:	Dr. Carlos A. Escalante Sandoval
PRIMER SUPLENTE:	Dr. Rolando Springall Galindo
SEGUNDO SUPLENTE:	Dr. Rodolfo Silva Casarín

Ciudad Universitaria, Mayo del 2001.

AGRADECIMIENTO Y RECONOCIMIENTO

Dr. Jesús Gracia Sánchez reciba un sincero agradecimiento por las atenciones que me brindó durante la estancia como estudiante de doctorado en la DEPFI. Desde mi punto de vista, esta tesis es el resultado del esfuerzo y la constancia que dedicó para guiar y orientar mis inquietudes, por lo tanto, considero que fue un acierto haberle pedido que dirigiera esta investigación; admiro de usted la libertad y la confianza que otorga para que sus estudiantes desarrollen el instinto de la investigación, y agradezco su participación como **Segundo vocal** en el Jurado Doctoral.

Dr. Carlos Cruickshank Villanueva, fue un honor para mí, que usted haya sido designado el **Presidente** de mi Jurado Doctoral, le agradezco las finas atenciones que me brindó durante el proceso académico, y manifiesto que las recomendaciones y sugerencias que me hizo antes, durante y después de la revisión de este documento, fueron consideradas sin omitir detalle alguno.

Dr. Oscar Arturo Fuentes Mariles, creo que cuando un estudiante de la DEPFI propone algún procedimiento o método para dar solución a problemas hidráulicos, debe contar con la opinión de una personalidad de la hidráulica como la suya, por esto, me considero afortunado de que usted haya sido designado **Primer vocal** en el Jurado Doctoral.

Dr. Ramón Domínguez Mora, en las dependencias del gobierno e institutos de investigación relacionados con el sector agua (CNA, DGCOH, IMTA y otros...), se dice que cualquier estudio hidrológico en el que usted haya participado, tiene un certificado de calidad, esto pude constatarlo en forma personal, por lo tanto, estoy orgulloso de que usted figure en mi Jurado Doctoral como **Tercer vocal** y le agradezco sus observaciones a las versiones preliminares y final de esta tesis.

Dr. Carlos Agustín Escalante Sandoval, con sus enseñanzas fue posible proponer un modelo integral, ya que, a pesar de lo complicado que son los tópicos de las asignaturas de hidrología que usted imparte, la gran calidad didáctica con la que los expone y explica, facilita su comprensión. Por esto y por haber fungido como **Secretario** en el Jurado Doctoral, agradezco su participación en mi estancia académica.

Dr. Rodolfo Silva Casarín, gracias a usted mejoré el estilo, la redacción y la presentación general de esta tesis, y considero que finalmente resultó un documento que cumple con los requisitos mínimos indispensables de una investigación de tal importancia, por esto y por participar como **Segundo vocal** en el Jurado Doctoral, le expreso mi sincero agradecimiento.

Dr. Rolando Springall Galindo, el conocer su aprobación para realizar esta investigación, fortaleció mi estado de ánimo, porque pensar que si un trabajo como éste, satisface a un galardonado con un el Premio Nacional de Hidráulica "Enzo Levi", es posible que complazca a muchos, y también significa que estoy en el sendero correcto hacia el éxito profesional. Le agradezco su participación como **Primer suplente** en el Jurado Doctoral.

Todos ustedes reciban un reconocimiento por la gran calidad de formadores que para mí representan, y espero que en un futuro no muy lejano, me sea posible adquirir las grandes cualidades y virtudes que tienen, ya que a pesar de que cada uno de ustedes es un modelo a seguir, yo deseo tener mi propia personalidad.....

Resumen

En esta investigación se desarrolló un modelo numérico integral llamado ADEHISIA, para diseñar o revisar sistemas de producción agrícolas de riego, la estructura general del modelo se basa en: la estimación de la disponibilidad de agua mediante un análisis hidrológico y un análisis de sequías, la estimación de la evapotranspiración, el cálculo de un primer nivel de déficit mediante la comparación de la disponibilidad de agua con la evapotranspiración, la definición de funciones de producción, el análisis económico de la producción, el análisis de optimización y la planeación del sistema agrícola ya sea diseño o revisión.

El análisis hidrológico se basó en técnicas estadísticas, para realizar el análisis de sequías se utilizó la técnica de Fernández y Salas (1994, 1996, 1997 y 1998), la estimación de la evapotranspiración se basó en la técnica de Blaney y Criddle, se desarrollaron y se propusieron dos nuevos modelos matemáticos para las funciones de producción de los cultivos (Romero y Gracia, 2000), los cuales se transformaron en modelos polinómicos de segundo grado para representar el beneficio económico, se definieron los modelos lineales para representar los costos de producción, y con los beneficios y costos se realizó el análisis económico de la producción y el análisis de optimización aplicando la técnica de English Marshall (1990), finalmente se definieron las políticas para realizar la planeación del sistema agrícola.

Son tres las principales aportaciones de esta tesis, a saber: el desarrollo de los modelos matemáticos para las funciones de producción de los cultivos, la definición de un procedimiento para establecer políticas de planeación, y la integración de los procesos que intervienen en la producción de un sistema agrícola; también hubo una aportación imprevista que consistió en la corrección de tres ecuaciones de la técnica de English Marshall (1990).

Se aplicó el modelo numérico ADEHISIA en la región Lagunera de México, obteniéndose en el caso de la revisión, resultados semejantes a los que sucedieron durante el ciclo agrícola de Primavera-Verano de 1997, y en el caso del diseño, que tres cultivos que se producen actualmente, deben ser eliminados de la plantilla de cultivos del Distrito de Riego.

Se concluyó que ADEHISIA es un modelo numérico que ofrece mayores ventajas que el modelo de English Marshall (1990) y que el modelo de Mannoichi y Mercarelli (1994) ya que además de incluir procesos que estos no incluyen, se adapta a las condiciones reales de información que existe en México.

Summary

In this investigation was developed an integral numerical model called ADEHISIA to designing or reviewing agricultural production systems, its general structure is based in: the available water valuation with both hydrological and drought analysis, the evapotranspiration valuation, the figure-out of a first water deficit level, comparing both available water and evapotranspiration, the definition crops function production, the economical production analysis, the optimal analysis and the agricultural system planning, design or reviewing.

The hidrological analysis was solved with statistical technics, the Fernandez and Salas' technic (1994, 1996, 1997 y 1998) was used to the drought analysis, the evapotranspiration valuation was done with Blaney and Criddle technic, two crops function production were proposed (Romero and Gracia, 2000), them were translated to second grade polinomical models to get the economical income, the lineal models were gotten to show the production costs and the optimal analysis were done using the English Marshall's technic (1990), finally the planning police were defined.

They are three the main thesis inflows, to know: the mathematical developed models to the crops function production, the procedure to get the planning polices and the integration of all the process that taking place in the agricultural system production; too one unforessen inflow was done, the correction of three ecuations of English Marshall's procedure (1990).

ADEHISIA was applied on the Mexican's Lagunera Region, gotten both, the results like the got in the Spring-Summer agricultural cicle 1997and the police that three crops must be eliminated.

It was concluded that ADEHISIA is a numerical model that having more advantages that both English Marshall (1990) and Mannoichi and Mercarelli (1994) procedures, because them don't included some process, and too that ADEHISIA is adapted to the actual conditions of Mexican's information.

CONTENIDO

Página

INTRODUCCION	1
Suministro adecuado de agua	4
Suministro limitado de agua	4
Suministro limitado totalmente controlado	4
Suministro limitado incontrolado	5
OBJETIVOS	5
ORGANIZACION DE LA TESIS	5
1.- ANTECEDENTES	7
1.1.- Funciones de producción	7
1.2.- Análisis de las Funciones de producción relacionadas con el déficit hídrico	16
1.3.- Modelos numéricos para analizar el riego en déficit	17
2.- ESTRATEGIA DE SOLUCION	25
2.1.- Modelos matemáticos de las Funciones de producción	25
2.2.- Estructura del modelo numérico	25
2.3.- Método de selección de la región de estudio	26
3.- DISPONIBILIDAD	34
3.1.- Objetivos	34
3.2.- Análisis hidrológico	35
3.2.1.- Generalidades	35
3.2.2.- Disponibilidad bruta	35
3.3.- Análisis de precipitación	36
3.3.1.- Generalidades	36
3.4.- Análisis de sequías	40
3.4.1.- Sequía hidrológica mensual (escurrimiento)	40
3.5.- Sequía meteorológica mensual (precipitación)	52
3.6.- Discusión de resultados	58
3.7.- Conclusiones	59
4.- EVAPOTRANSPIRACION	60
4.1.- Objetivos	60

CONTENIDO...(continuación)**Página**

4.2.-	Antecedentes	60
4.3.-	Selección y aplicación del método para estimar la ET_o del cultivo de referencia	62
4.4.-	Método de la temperatura	63
4.5.-	Coefficientes de cultivo	64
4.5.1.-	Determinación de los coeficientes basales del cultivo (K_{cb})	65
4.5.2.-	Factor de tensión del agua (K_s)	66
4.6.-	Evapotranspiración con déficit de humedad	68
4.7.-	El control de la humedad en el suelo durante el ciclo vegetativo del cultivo	73
4.8.-	Ejemplo de aplicación	73
4.8.1.-	Parámetros climáticos y geográficos de ingreso al modelo numérico	73
4.8.2.-	Parámetros agrícolas de ingreso al modelo numérico	75
4.8.3.-	Parámetros hidrodinámicos del suelo, que ingresan al modelo numérico	75
4.8.4.-	Evapotranspiración sin déficit hídrico	75
4.8.5.-	Evapotranspiración en el límite permisible de disminución del rendimiento (control de humedad en el suelo)	76
5.-	DISPONIBILIDAD VS EVAPOTRANSPIRACION	77
5.1.-	Eficiencias de conducción y aplicación	78
5.2.-	Lámina promedio: real (Disponible) y requerida (Evapotranspiración)	78
5.3.-	Ejemplo de aplicación	78
6.-	FUNCION DE PRODUCCION	79
6.1.-	Objetivos	79
6.2.-	Clasificación de cultivos	79
6.3.-	Análisis de las Funciones de Producción	80
6.4.-	Factores de los que depende la producción de los cultivos	81
6.5.-	Aplicación del Teorema P1 (π) de Buckingham-Vaschy para obtener el modelo matemático de las Funciones de producción de los cultivos	82
6.6.-	Modelo de Mitscherlich (1976) modificado	82
6.7.-	Forma generalizada de las Funciones de producción	85
6.8.-	Obtención de los parámetros C_1 y C_2 de la Función de producción	87
6.9.-	Ventajas que ofrecen los modelos matemáticos propuestos en esta investigación	89
7.-	ANALISIS ECONOMICO DE LA PRODUCCION	91
7.1.-	Objetivos	91

CONTENIDO...(continuación)**Página**

7.2.-	Propuesta de solución para el análisis económico y el análisis de optimación	91
7.3.-	Análisis económico de la producción	100
7.3.1.-	Función de beneficios	101
7.3.2.-	Función de costos	101
8.-	ANALISIS DE OPTIMACION	103
8.1.-	Objetivo	103
8.2.-	Estrategia de solución	103
9.-	DISEÑO O REVISION DEL SISTEMA AGRICOLA	106
9.1.-	Objetivo	106
9.2.-	Diseño	106
9.3.-	Revisión	107
9.4.-	Ejemplos de aplicación	107
9.4.1.-	Diseño	107
9.4.2.-	Revisión	108
10.-	METODO DE DISEÑO O REVISION	110
10.1.-	Aplicación del modelo numérico ADEHISIA para el diseño de un sistema agrícola	110
10.2.-	Aplicación del modelo numérico ADEHISIA para la revisión de un sistema agrícola	112
11.-	CONCLUSIONES	113
12.-	REFERENCIAS	117

CUADRO

Página

1.-	Superficie de México en relación con la precipitación	2
2.-	Superficie factible de riego en México por fuente de abastecimiento	3
3.1.-	Características de las cuencas en estudio	35
3.2.-	Características del área de influencia del Distrito de Riego 017 "Región Lagunera"	36
4.1.-	Métodos para el cálculo de la ET_0 y sus variables requeridas	61
4.2.-	Parámetros climáticos y geográficos del área de influencia del Distrito de Riego 017 "Región Lagunera"	74
4.3.-	Parámetros agrícolas del módulo VI "Tlahualilo"	75
4.4.-	Parámetros hidrodinámicos	75
4.5.-	Evapotranspiración Potencial en el área de influencia del módulo VI "Tlahualilo"	76
4.6.-	Evapotranspiración sin déficit hídrico	76
4.7.-	Evapotranspiración en el límite $TSIDRC$	76
5.1.-	Disponibilidad vs Evapotranspiración	77
5.2.-	Eficiencias de conducción en el módulo VI "Tlahualilo"	78
5.3.-	Lámina promedio en el módulo VI "Tlahualilo"	78
7.1.-	Información estadística del ciclo agrícola Primavera - Verano de 1997, del Distrito de Riego 017 "Región Lagunera"	100
7.2.-	Parámetros para la Función de producción, según el modelo de English M. (1990)	101
7.3.-	Parámetros para construir la Función de Beneficios (Pc^* y w), según el modelo de English M. (1990)	101
7.4.-	Parámetros de la Función de Costos $c(w)$, según el modelo de English M. (1990)	102
8.1.-	Niveles óptimos de suministro de agua W	103
8.2.-	Ingreso neto $i(w)$ obtenido con cada nivel de suministro (W)	104
8.3.-	Suministro de agua (W) e ingreso neto ($i(w)$) en el ciclo agrícola de Primavera - Verano de 1997	104
8.4.-	Ponderación de los niveles óptimos de suministro de agua W , para el módulo VI "Tlahualilo" del Distrito de Riego 017	104
8.5.-	Ponderación del ingreso neto $i(w)$ obtenido con cada nivel de suministro (W), para el módulo VI "Tlahualilo" del Distrito de Riego 017	105
9.1.-	Suministro de agua (w) real e ingreso neto ($i(w)$) teórico en el ciclo agrícola de Primavera - Verano de 1997	108

TABLA

Página

2.1.-	Precipitación por Región Administrativa	29
3.1.-	Volumen de agua que ingresó por Cuenca Propia a la Presa Lázaro Cárdenas, Millones de m ³	37
3.2.-	Volumen de agua que ingresó por Cuenca Propia a la Presa Francisco Zarco, Millones de m ³	38
3.3.-	Precipitación sobre el Distrito de Riego "Región Lagunera", mm	39
3.4.-	Características de las cuencas de aportación de escurrimientos	44
3.5.-	Probabilidad de que en un año el volumen mensual sea menor que el volumen establecido como umbral, $p_{F,r}$	44
3.6.-	Valores $N_{FF,D}$ $N_{F,D}$ $N_{SF,D}$ $N_{S,D}$ para la cuenca de la Presa Lázaro Cárdenas	46
3.7.-	Valores $N_{FF,D}$ $N_{F,D}$ $N_{SF,D}$ $N_{S,D}$ para la cuenca de la Presa Francisco Zarco	46
3.8.-	Valores de las probabilidades marginales, $p_{F,D}$ de transición, $p_{FF,D}$ y de la función $q_r(0,l)$ para $l = 1, 2, \dots, 6$ en la cuenca de la Presa Lázaro Cárdenas	47
3.9.-	Valores de las probabilidades marginales, $p_{F,D}$ de transición, $p_{FF,D}$ y de la función $q_r(0,l)$ para $l = 1, 2, \dots, 6$ en la cuenca de la Presa Francisco Zarco	47
3.10.-	Valores de las probabilidades de transición, $p_{SF,D}$ $p_{FF,D}$ y de la función $q_r(S,l)$ para $l = 1, 2, \dots, 6$ en la cuenca de la Presa Lázaro Cárdenas	48
3.11.-	Valores de las probabilidades de transición, $p_{SF,D}$ $p_{FF,D}$ y de la función $q_r(S,l)$ para $l = 1, 2, \dots, 6$ en la cuenca de la Presa Francisco Zarco	48
3.12.-	Período de Retorno* (meses) de sucesiones de r meses seguidos con volúmenes de ingreso inferiores al volumen de umbral	49
3.13.-	Riesgo de tener una sucesión de r meses seguidos con volúmenes de escurrimiento inferiores al volumen de umbral en un periodo de 2 años (24 meses)	49
3.14.-	Características estadísticas de la precipitación en el Distrito de Riego 017 "Región Lagunera"	53
3.15.-	Probabilidad de que en un año la precipitación mensual sea menor que la precipitación establecida como umbral, $p_{F,r}$	54
3.16.-	Valores $N_{FF,D}$ $N_{F,D}$ $N_{SF,D}$ $N_{S,D}$ para el Distrito de Riego "Región Lagunera"	54
3.17.-	Valores de las probabilidades marginales, $p_{F,D}$ de transición, $p_{FF,D}$ y de la función $q_r(0,l)$ para $l = 1, 2, \dots, 6$ en el Distrito de Riego 017 "Región Lagunera"	55
3.18.-	Valores de las probabilidades de transición, $p_{SF,D}$ $p_{FF,D}$ y de la función $q_r(S,l)$ para $l = 1, 2, \dots, 6$ en el Distrito de Riego 017 "Región Lagunera"	55

TABLA...(continuación)**Página**

3.19.-	Período de retorno (meses) de sucesiones de r meses seguidos con precipitaciones inferiores a la precipitación de umbral en el Distrito de Riego 017 "Región Lagunera"	56
3.20.-	Riesgo de tener una sucesión de r meses seguidos con precipitaciones inferiores a la precipitación de umbral en un periodo de 2 años (24 meses)	56

FIGURA**Página**

1.1.-	Función de producción adimensional Agua - Rendimiento, para cultivos no forrajeros	8
1.2.-	Efecto del tratamiento en la relación Agua - Rendimiento	9
1.3.-	Función de respuesta al rendimiento según Mitscherlich, para una variable de entrada, con una constante y sin valor residual de X_1 en el crecimiento medio	11
1.4.-	Representación de la Función de producción de granos, flores o frutos de cultivos anuales (tipo a)	12
1.5.-	Representación de la Función de producción del forraje verde o seco, ya sea de cultivos anuales o semiperennes (tipo b) y cuando el producto esperado sea el fruto de un cultivo perenne (tipo c)	13
1.6.-	Base para formular las Funciones de producción tipo b y c	15
1.7.-	Diversos modelos de las Funciones de producción	17
1.8.-	Funciones de Beneficios y de Costos	21
2.1.-	Secciones del modelo numérico ADEHISIA	28
4.1.-	Coefficiente basal de cultivo del maíz para grano en un medio árido y ventoso	66
4.2.-	Funciones usadas para reducir la evapotranspiración con base en el contenido de humedad del suelo	67
4.3.-	Representación de la Capacidad Específica de un suelo	71
4.4.-	Puntos A y B sobre la curva de la Capacidad Específica de un suelo	72
6.1.-	Desarrollo Fenológico vs Evapotranspiración real óptima acumulada	85
6.2.-	Definición geométrica del valor EVT_{rat}	86
6.3.-	Función de producción generalizada en condiciones de suministro de agua óptimo	86
6.4.-	El modelo de Mitscherlich modificado	87
6.5.-	Producción potencial máxima obtenida de un cultivo, sometido a diferentes condiciones de humedad en el suelo	89
7.1.-	Forma general de la Función de producción de un cultivo	95
7.2.-	Función de Beneficios y Función de Costos	97

PLANO

Página

2.1.-	Regiones Administrativas en la República Mexicana	30
2.2.-	Regiones Hidrológicas en la República Mexicana	31
2.3.-	Distritos de Riego en la República Mexicana	32
2.4.-	Precipitación media mensual de 1941 a 1999 por Región Administrativa	33
1.-	Cuencas hidrológicas de las Presas Lázaro Cárdenas y Francisco Zarco	
2.-	Distribución de estaciones climatológicas sobre el área de estudio	
A.1.-	Distrito de Riego 017 "Región Lagunera"	

GRAFICA

Página

3.1.-	Probabilidades u_{Fn} y $u_{S,n}$ vs Duración n , con $r = 6$ en la cuenca de la Presa Lázaro Cárdenas	50
3.2.-	Probabilidad f_n y Riesgo S_n de sequía con $r = 6$ en la cuenca de la Presa Lázaro Cárdenas	50
3.3.-	Probabilidades u_{Fn} y $u_{S,n}$ vs Duración n , con $r = 6$ en la cuenca de la Presa Francisco Zarco	51
3.4.-	Probabilidad f_n y Riesgo S_n de sequía con $r = 6$ en la cuenca de la Presa Francisco Zarco	51
3.5.-	Probabilidades u_{Fn} y $u_{S,n}$ vs Duración n , con $r = 6$ en el Distrito de Riego 017 "Región Lagunera"	57
3.6.-	Probabilidad f_n y Riesgo S_n de sequía con $r = 6$ en el Distrito de Riego 017 "Región Lagunera"	57

ANEXO

1	Características agrológicas del Distrito de Riego 017 "Región Lagunera"
2	Información relacionada con el cálculo de la evapotranspiración
3	Funciones de producción
4	Análisis de optimación

INTRODUCCION

A través de los años, en México se han registrado cambios climatológicos y fenómenos meteorológicos extremos de sequía que provocan la disminución del agua disponible para los diversos usos, situación que obliga a desarrollar técnicas y establecer procedimientos que efficiencen considerablemente el aprovechamiento y uso del recurso agua.

El principal usuario del recurso hídrico en la República Mexicana es la agricultura de riego, éste consume aproximadamente el 60 % del agua disponible en las fuentes de abastecimiento.

En México existen 82 Distritos de Riego y 39,492 Unidades de Riego (URDERAL) distribuidos principalmente en la porción central y en el norte del país y 16 Distritos de Drenaje que a diferencia de los anteriores, se ubican en su mayoría al sur y sur este.

Cada uno de los Distritos de Riego es considerado un **Sistema de producción agrícola**, en donde se requiere del **Diseño o Planeación** de: las superficies a regar, la plantilla de cultivos por producir, la lámina de riego por abastecer, las políticas de suministro de agua, los rendimientos esperados y análisis financiero de la producción; además, en cada ciclo agrícola se requiere de la **Revisión o Evaluación** de los resultados del sistema al finalizar un determinado ciclo agrícola.

El estudio y la planeación de un sistema de producción agrícola de riego necesita del análisis y la interrelación de las áreas del conocimiento relacionadas con el aprovechamiento y el manejo del agua para uso agrícola, entre las que destacan: diversas ramas de la ingeniería, algunas áreas de la ciencia relacionadas con la atmósfera, la ubicación geográfica de la región estudiada, las características fisiológicas de las plantas, las propiedades de los suelos, los aspectos económicos de la producción, las prácticas de cultivo, y el pensamiento cultural de los productores relacionado con la conveniencia o no de producir un cierto tipo de cultivos; todo esto para alcanzar el objetivo final común que es la producción agrícola.

Específicamente las disciplinas que intervienen en un sistema de producción agrícola son: la Climatología, la Meteorología, la Geografía (ubicación de la región de estudio), la Agronomía (Suelo y Planta), la Hidrología Superficial (fuentes superficiales) o la Geohidrología (fuentes subterráneas), el Análisis de Sequías, la Hidráulica, la Irrigación y el Drenaje Agrícola, la Ingeniería Económica, la Investigación de Operaciones, y finalmente la Planeación.

En términos reales, se ha demostrado que realizar la integración o conjunción de las disciplinas, representa una complicación paulatina del problema, porque para llegar a la solución de éste,

necesariamente deben ser incorporados uno a uno los elementos o disciplinas, lo que hace indispensable su conocimiento, y la adecuada aplicación de sus procedimientos y métodos. Esto lógicamente ha limitado el alcance de las investigaciones realizadas hasta fechas recientes, ya que el ejecutor, en la mayoría de los casos, es únicamente especialista en una o dos de las disciplinas.

Palacios V. E. y Exebio G. A. (1989), exponen que la ingeniería de los recursos hidráulicos es considerada por varios autores como el arte que engloba varias disciplinas, como son: la ingeniería de sistemas, hidráulica, hidrología, estadística, agronomía, economía y otras ciencias sociales. Explica que esta rama de la ingeniería es relativamente reciente, y que su nacimiento fue al rededor de la década de los 50's, siendo probablemente sus cimientos el Programa Hidráulico de Harvard (Harvard Water Program, Hufschidt 1966, cita de los autores) y la creación del centro de Recursos Hidráulicos en la Universidad de California.

Se sabe que el trabajo efectuado por equipos multidisciplinarios, permitió el desarrollo de eficientes técnicas para el análisis de sistemas de recursos hidráulicos, las cuales han sido aplicadas exitosamente en la planeación y desarrollo de los recursos hidráulicos en muchos países incluyendo a México. Sin embargo, como acertadamente lo señala Gilbert F. White (1971, cita de los autores) se les ha dado una amplia difusión y aplicación en los estudios para el desarrollo de los recursos hidráulicos, pero se han hecho mínimas aplicaciones en la evaluación y mejoramiento de las obras en operación.

Bajo tales circunstancias, es indudable que las herramientas de las que dispone la ingeniería de los recursos hidráulicos pueden ser de gran utilidad, si son empleadas en estudios de obras en operación para fines de evaluación y mejoramiento, siempre y cuando se tomen en consideración los factores restrictivos en uso, entre los cuales puede señalarse como importantes: la falta de equipos multidisciplinarios que incluyan personal con amplia experiencia en la operación de las obras de riego y drenaje, la falta de un lenguaje que permita mejorar la comunicación entre los técnicos que operan las obras con los equipos que hacen los estudios, y la falta de información de campo, cuya veracidad sea confiable y permita obtener resultados realistas en la aplicación de los modelos de optimización.

Según Aguilera C. M. y Martínez E. R. (1990), la evolución de la agricultura bajo riego en México ha sido siempre frenada por la falta de interpretación y análisis de las relaciones que existen entre la disponibilidad de agua y las tierras aptas para riego. Por lo tanto, se ha hecho necesario reunir las simplemente, mediante obras que acondicionen las tierras y/o provean de riego a los cultivos, sin algún horizonte de planeación adecuado.

Las peculiaridades del clima en México hacen a la práctica del riego indispensable en gran parte de los terrenos agrícolas, según se puede observar en el cuadro 1. Geográficamente el país está ubicado en su mayor parte entre las latitudes 19° y 31° Norte, que como estableció Koppen (cita de los autores), limitan la faja tanto en el hemisferio Norte como en el hemisferio Sur, donde se localizan los principales y más conocidos desiertos y zonas de mayor aridez del Mundo.

Siguiendo el método de Lowry y Johnson, citado por Orive A. (1970), para determinar las necesidades del riego en un lugar cualquiera se clasificó al país en cuatro diferentes categorías:

Cuadro 1.- Superficie de México en relación con la precipitación.

Clasificación del Clima	Precipitación media anual (mm)	Sup. del territorio nacional (km ²)	% de sup. del territorio nacional	Observaciones
Arido	≤ 400	1,235,390.9	62.8	Riego Indispensable
Semi-árido	401 - 600	613,761.1	31.2	Riego Necesario
Semi-húmedo	601 - 1500	88,523.2	4.5	Riego Conveniente
Húmedo	> 1500	29,507.8	1.5	Riego Innecesario
TOTAL		1,967,183	100	

Fuente: Orive A. (1970). Existe otro dato de mayor detalle y actualizado, sugerido por la GASIR definido en el estudio "Integración de la Lluvia Normal Anual de la República Mexicana (período 1931-1990)", que podría modificar las cantidades de las columnas: Superficie del territorio nacional y % de la superficie del territorio nacional.

No debe pasarse por alto que para determinar la necesidad de riego, también se debe tomar en cuenta la distribución estacional de la lluvia y la temperatura.

En realidad, el principal factor limitante del aprovechamiento agrícola en el país es la aridez, y las posibilidades de explotar este tipo de aprovechamientos se reducen aún más por las condiciones orográficas. México es un país montañoso, esto favorece el contraste y las irregularidades del clima, así como la predominancia de pendientes pronunciadas que limitan seriamente la extensión y calidad de las tierras disponibles para la explotación agrícola.

De los 196.4 millones de hectáreas que comprende el país, 71 millones (36 %) son tierras llanas con pendientes menores a 10 % y 125.4 millones (64 %) son terrenos accidentados. En tales condiciones, la topografía accidentada constituye el segundo factor que limita la utilización agrícola del territorio. Tomando en cuenta estos factores, así como la disponibilidad de agua para riego y la factibilidad de realizar los aprovechamientos, se estimó en la época de auge del desarrollo agrícola, que el área regable en México era de aproximadamente 11 millones de hectáreas, (SRH, 1975, citado por los autores); las cuales pueden ser regadas de la siguientes forma:

Cuadro 2.- Superficie factible de riego en México por fuente de abastecimiento.

Forma de riego	Area regable (Millones de Ha)
Agua superficial	6.9
Agua subterránea	2.0
Mediante Drenaje	2.9
Total con riego y/o drenaje	10.9

En contraste con los datos anteriores, en la actualidad se sabe que la superficie de riego apenas alcanzan los 3.4 millones de hectáreas, a pesar de que se afirma que el futuro agrícola de México se basa en la explotación de 30 millones de Ha, que es la superficie factible de sembrar en condiciones de temporal y bajo riego.

Como lo describen Palacios V. E. y Exebio G. A. (1989), a pesar de la difusión de las técnicas para el análisis de los sistemas de recursos hidráulicos que se han propagado en nuestro país, aún no existe ningún procedimiento establecido que conjunte a los elementos: **AGUA, SUELO, PLANTA, ATMOSFERA** y al **BENEFICIO ECONOMICO**; presentes en los sistemas de producción agrícolas.

La mayoría de los autores han investigado la relación: **AGUA - SUELO - PLANTA - ATMOSFERA (RASP)** de los sistemas de producción agrícolas, la cual comúnmente representan con las llamadas Funciones de producción, sin llegar a relacionar a estas con el beneficio económico.

Las Funciones de producción son representaciones matemáticas del comportamiento que tiene la producción de los cultivos cuando están sometidos a diferentes tratamientos de abastecimiento de agua.

Según Doorenbos *et al* (1980), en la planeación, diseño y explotación de proyectos de riego, los objetivos de la producción deben estar en relación con la base física de los recursos, especialmente el clima, el suelo y el suministro de agua, a fin de garantizar que se puedan lograr y mantener la producción propuesta y los rendimientos previstos. También deben tenerse en cuenta diversos factores técnicos, económicos y de organización, para llegar a un proyecto técnicamente sólido, que pueda funcionar desde el punto de vista de su gestión, y que sea viable económica y financieramente, lo cual está al mismo tiempo de acuerdo con los objetivos de desarrollo y producción.

Un elemento importante para evaluar la producción de un cultivo bajo riego, es el suministro de agua disponible y necesario en el tiempo y en la superficie prevista. Cuando el suministro de agua disponible es adecuado, este se caracteriza por atender plenamente las necesidades del cultivo elegido, de la duración de la etapa vegetativa y de la superficie regada. Cuando el suministro de agua disponible es limitado, la producción está determinada por la medida en que pueden atenderse las necesidades totales de agua mediante el suministro de agua disponible durante todo el ciclo vegetativo.

Cuando el suministro de agua es el factor por analizarse, se tienen dos principales casos de estudio:

- Los sistemas agrícolas con un suministro adecuado de agua (no limitado).
- Los sistemas agrícolas con suministro limitado de agua.

Suministro adecuado de agua

Cuando el suministro de agua disponible atiende plenamente las necesidades del cultivo, la elección de los cultivos y la superficie de éstos, está determinada en primer término por factores distintos de la disponibilidad de agua y de la utilización de ésta, aunque tienen influencia la capacidad y costo del suministro de riego y el sistema de distribución.

Para planificar, diseñar y explotar el suministro de agua y el sistema de distribución para el proyecto, en relación con el agua disponible y con las necesidades de agua, el procedimiento debe considerar:

- La selección de los cultivos, sus características y requerimientos.
- Las necesidades mensuales de suministro (o cada que sea requerido) y las necesidades máximas.
- Programa de suministro de agua de riego durante el ciclo vegetativo.

Suministro limitado de agua

Cuando el suministro de agua es limitado, las consideraciones sobre selección de cultivos y superficies regadas deben basarse en los requerimientos de los cultivos de acuerdo con el efecto que produzca en ellos la proporción con que se atiendan sus necesidades de agua (Evapotranspiración media, ETm) mediante el suministro de agua disponible durante la estación vegetativa. Puede hacerse una primera evaluación, considerando el efecto de un suministro estacional limitado sobre los rendimientos de los cultivos y su producción total. Sin embargo, para una evaluación completa del efecto de un suministro limitado de agua sobre el rendimiento y la producción, debe tenerse en cuenta el efecto de tal suministro limitado durante cada uno de los periodos de desarrollo de los cultivos.

Cuando los cultivos en consideración sean muy sensibles a los déficit de suministro de agua, la programación del suministro se basará en atender todas las necesidades de agua de los cultivos. Cuando los cultivos en consideración sean menos sensibles al déficit de agua y puedan desarrollarse con rendimientos aceptables sin atender todas las necesidades de agua, la programación del abastecimiento se basará en reducir al mínimo los déficit de agua durante los periodos de desarrollo más sensibles.

Durante los periodos de escasez imprevisibles de agua, deben hacerse ajustes en la programación del agua dentro de la temporada, en relación con los distintos efectos, de los déficit de agua sobre el rendimiento de los cultivos, y sobre sus distintos periodos de desarrollo. Esto se aplica al abastecimiento de agua controlado y sin controlar en las cabeceras de distribución.

Para planificar, diseñar y explotar el suministro de agua y el sistema de distribución de un proyecto en relación con el nivel de producción y las necesidades de agua, el procedimiento debe tener en cuenta:

- La adecuada elección de los cultivos, sus características y requerimientos.
- Las necesidades estacionales y mensuales de suministro de agua y la producción del cultivo (rendimiento por unidad de superficie y producción total del proyecto).
- El programa de suministro de agua de riego durante el ciclo vegetativo.

Dentro del suministro limitado de agua, existen dos posibilidades:

Suministro limitado totalmente controlado

Cuando el suministro de agua está plenamente controlado, la superficie regada está determinada principalmente por el suministro total disponible de agua y por el suministro necesario para alcanzar el nivel esperado de rendimiento de los cultivos. La programación del suministro se dirige a reducir al

mínimo los déficit de agua durante cada uno de los períodos de desarrollo con valores elevados de K_y (factor del efecto sobre el rendimiento).

Suministro limitado incontrolado

Cuando el suministro de agua es incontrolado, las superficies bajo riego están determinadas principalmente por el suministro disponible durante los distintos períodos de desarrollo, el efecto de los déficit de agua sobre el rendimiento durante dichos períodos y el nivel de rendimiento elegido. La elección de cultivos y el calendario de éstos deben ajustarse cuando sea posible, de tal modo que los períodos con valores elevados de los coeficientes de los cultivos K_y no coincidan con los períodos de suministro limitado de agua.

En la mayoría de los Distritos de Riego y Distritos de Drenaje de México, se practica el suministro de agua ilimitado, inadecuado y sin control, esto como consecuencia de la falta de planeación en los sistemas de producción agrícola. Lo cual significa que no se está dentro de la clasificación que define Doorenbos *et al* (1980).

Bajo tales circunstancias, en esta investigación doctoral se propone una integración de los elementos: agua, suelo, planta, atmósfera y beneficio económico, bajo condiciones de suministro adecuado (sin déficit) y limitado (con déficit) de agua, mediante el "Modelo numérico para el diseño y revisión de sistemas agrícolas con riego en déficit y su aplicación en épocas de sequía".

OBJETIVOS

Esta investigación doctoral tiene cuatro objetivos fundamentales, a saber:

- Desarrollar y calibrar los modelos de las Funciones de producción (cm vs kg/ha), que se adapten al amplio rango de cultivos que se producen en los Sistemas agrícolas.
- Desarrollar un modelo numérico integral para analizar Sistemas de producción agrícola.
- Calibrar el modelo numérico desarrollado, comparando sus resultados con los obtenidos en un caso real (Revisión).
- Aplicar el modelo numérico desarrollado en la planeación (Diseño) de un sistema agrícola.

ORGANIZACION DE LA TESIS

El documento se integra con doce capítulos básicos y cinco anexos, todos ellos presentados y organizados en forma secuencial para facilitar su explicación, y lograr la adecuada comprensión del lector, para que él a su vez, sea capaz de aplicar el Método en el sistema de producción agrícola que así lo deseé. Cabe señalar que en cada uno de los capítulos se especifican los objetivos particulares y en algunos casos el análisis y la discusión de sus resultados, ya que se consideró que con esto, se reduce la posibilidad de cometer errores por la gran cantidad de información que se maneja en el documento.

El capítulo uno **ANTECEDENTES** contiene el resumen y el análisis del Estado del Arte de investigaciones relacionadas con el tema, que fueron realizadas y difundidas desde el inicio de las investigaciones (resumen), hasta la actualidad.

En el capítulo dos **ESTRATEGIA DE SOLUCION** se explica el procedimiento general con el que fue analizado y solucionado el problema, especificándose la región de estudio, y la justificación del porqué fue estudiada tal región.

El capítulo tres **DISPONIBILIDAD** contiene un Análisis Hidrológico y un Análisis de Sequías, en los que se describen y se aplican los métodos o procedimientos respectivos a la región estudiada, con la finalidad de estimar el volumen o la lámina real de agua disponible para abastecer a los cultivos y para conocer el comportamiento y las características de las sequías de la región.

En el capítulo cuatro **EVAPOTRANSPIRACION** se describen los procedimientos y métodos que forman parte del Modelo numérico, y se aplican a la región bajo estudio para estimar la lámina de agua que los cultivos del sistema agrícola evapotranspiran, bajo una condición de suministro sin déficit hídrico.

El capítulo cinco **DISPONIBILIDAD VS EVAPOTRANSPIRACION** contiene los procedimientos y su aplicación a la región de estudio, para comparar la lámina de agua disponible y la lámina evapotranspirada sin déficit hídrico, y con ello definir el grado de déficit hídrico real que existiría en el caso de que se aplicara la política de regar el total de la superficie agrícola, en lugar de reducirla.

En el capítulo seis **FUNCIONES DE PRODUCCION** se presentan los procedimientos y métodos para obtener los modelos matemáticos de las Funciones de producción de los cultivos, en las que se relaciona el rendimiento esperado de los cultivos, kg/ha, con los diferentes niveles de suministro de agua, cm, así como la aplicación a la región de estudio.

El capítulo siete **ANALISIS ECONOMICO DE LA PRODUCCION** contiene un ejemplo de la información estadística que se requiere de los costos de producción, de los precios de venta de los cultivos y del beneficio económico que se obtuvo (revisión) o se obtendrá (diseño) de la producción.

En el capítulo ocho **ANALISIS DE OPTIMACION** se describe el procedimiento para transformar el modelo matemático de las Funciones de producción, en un modelo matemático para representar al beneficio económico, utilizando para esto la información del capítulo siete, de igual manera, se obtiene un modelo matemático para representar los costos de producción del cultivo, para con ambos, aplicar el procedimiento de optimización analítico que permite evaluar económicamente la factibilidad de considerar o no a un cierto cultivo en la plantilla que será considerada para el diseño.

El capítulo nueve **DISEÑO O REVISION DEL SISTEMA AGRICOLA** presenta un ejemplo de **revisión** y otro de **diseño**, en los que se resume el resultado de los capítulos tres al ocho.

En el capítulo diez **METODO DE DISEÑO O REVISION** se describe la metodología general del Modelo numérico que se propone en esta investigación doctoral, para los casos de Diseño o Revisión de un sistema de producción agrícola.

El capítulo once **CONCLUSIONES** contiene las conclusiones de esta investigación doctoral, y finalmente en el capítulo doce **BIBLIOGRAFIA** se presentan las referencias utilizadas para desarrollo de la investigación doctoral.

1.- ANTECEDENTES

Se expone un resumen del estado del arte que guardan las investigaciones relacionadas con las Funciones de producción de los cultivos y de las investigaciones que contienen aspectos similares a los analizados en esta investigación doctoral, desde sus inicios, hasta la actualidad, especificándose los aspectos más importantes de cada uno de ellos.

1.1.- Funciones de producción

Downey A. LI (1972), analiza el período crítico de estrés en los cultivos, describiendo que los cereales y otros cultivos no forrajeros presentan etapas de crecimiento en las cuales son susceptibles al estrés de agua en el suelo. Lo que explica por qué cierta cantidad de agua, puede dar entre el 40 % y 95 % del rendimiento máximo. Para ilustrar esto, algunos de los casos mejor documentados de la figura 1.1, están mostrados en la figura 1.2, en donde se presenta el tratamiento al cual fueron sometidos.

Los tratamientos analizados fueron: el abastecimiento de agua sin estrés, estrés de agua durante la meiosis masculina (incluye las etapas del ciclo fenológico desde la germinación hasta el desarrollo vegetativo), estrés de agua después de la polinización o de la fecundación a la maduración; problemas de aireación del suelo y estrés durante la meiosis femenina.

El efecto más drástico en la figura 1.2, es el del estrés severo de agua en maíz, durante la meiosis femenina (la meiosis femenina es una etapa temprana en el desarrollo del grano del maíz, en la que vegetativamente la planta ya alcanzó su crecimiento total). Moss y Downey (1971, cita del autor), presentan que la reducción del rendimiento en este lapso, se debió a las anomalías en el desarrollo de la cubierta embrionaria y también a la emergencia tardía. Debe enfatizarse que el período de estrés fue solamente por un corto período (8 días) y que la evapotranspiración fue del 90 % con respecto a la del máximo rendimiento.

Un período de estrés de agua posterior a la polinización del maíz, y continuo hasta la maduración, también da un uso muy ineficiente del agua. El rendimiento fue cercano al 50 % del máximo y la evapotranspiración fue del 90 % respecto a la del rendimiento máximo. Por otro lado, un estrés de agua durante la meiosis masculina (o mientras el cultivo es joven) incrementa la eficiencia en el uso del agua. El grupo de puntos de este tratamiento, cambia a la posición más alta de la línea continua de la figura 1.2. Esto indica que si por necesidad, el agua debe restringirse, la etapa del crecimiento temprano es la más adecuada para hacer dicha restricción.

El estrés severo durante la etapa de meiosis masculina, daña al enramado de la planta del maíz. Sin embargo, cantidades adecuadas de polen fertilizador, son todavía producidas por la maduración posterior ocasionada por las maduraciones posteriores de la parte dañada del enramado.

Campbell, *et al* (1969, cita del autor), relaciona a los problemas de aireación del suelo, como la causa de la disminución del rendimiento en trigo, aunque la evapotranspiración fue igual que la del máximo rendimiento. Si estas condiciones prevalecen durante la etapa de floración la tasa de difusión del oxígeno en el suelo puede provocar una baja en la actividad metabólica básica de las raíces que están inactivas y consecuentemente el rendimiento en grano se disminuye severamente.

La razón por la cual existe una diferencia entre el estrés severo y el estrés de agua en la etapa inicial de desarrollo, es que en el segundo caso, usualmente solo se restringe el tamaño de la planta y el área foliar. Fisher y Wilson (1971, cita del autor) dicen que aproximadamente el 90 % del rendimiento del grano es debido a la fotosíntesis posterior a la floración. Un mínimo en sorgo de aproximadamente el 90 % del rendimiento del grano, es debido a la fotosíntesis en la cúpula vegetal y los cuatro niveles más altos; aunque a la floración, los niveles bajos comprenden cerca del 40 % del total de la superficie foliar, ellos contribuyen únicamente con el 7 % del rendimiento. Consecuentemente es obvio que el estrés después de la floración reduce la asimilación de grano cuando este es máximo. El estrés antes de la floración puede reducir el área foliar, sin embargo hay más normalidad en el llenado del grano que en una superficie fotosintética adecuada.

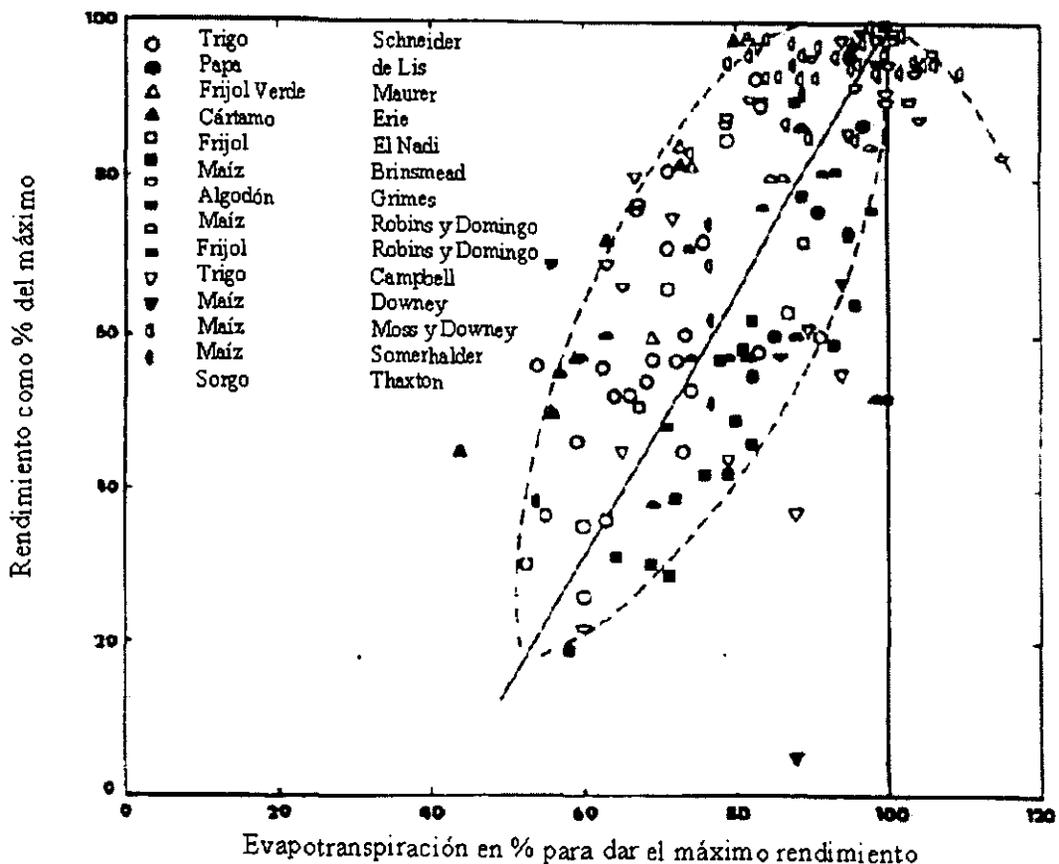


Figura 1.1.- Función de producción adimensional Agua - Rendimiento, para cultivos no forrajeros.

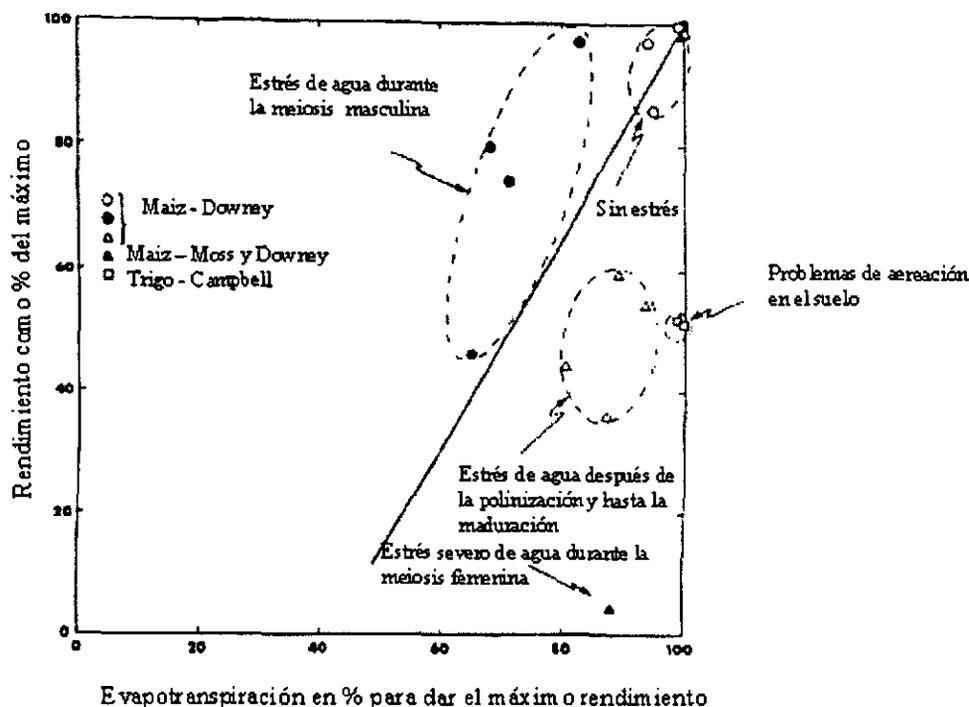


Figura 1.2.- Efecto del tratamiento en la relación Agua - Rendimiento.

Se concluye que un estrés constante en la humedad del suelo tiende a reducir el rendimiento de los cultivos no forrajeros, ajustándose tal comportamiento a una función lineal que depende de la severidad del estrés. El rendimiento es inapreciable donde el cultivo crece bajo un estrés constante de -800 J/kg . En condiciones de campo, los cultivos no crecen bajo condiciones de estrés constante. Pero en donde el agua se abastece con déficit, el rendimiento únicamente se reduce. La magnitud de la reducción del rendimiento no es una función simple de la evapotranspiración. Esta depende de la severidad del estrés y particularmente de la etapa fisiológica en la cual ocurre el estrés. En términos generales puede establecerse que el estrés de agua en cualquier momento de la floración a la maduración es indeseable y provoca un uso ineficiente del agua. Como este también es el período de máxima tasa de evapotranspiración, debe tenerse la asesoría de los ingenieros en irrigación para planear la red de distribución, para que el agua no este restringida en tal periodo; o si esto fuera imposible por razones económicas, la probable reducción del rendimiento debe tomarse en cuenta en un análisis de costos - beneficios.

NOTA IMPORTANTE: Este trabajo constituye el principal sustento de los modelos matemáticos de las Funciones de producción de los cultivos propuestos en esta investigación doctoral, porque en él se presentan resultados experimentales de varios cultivos en un mismo formato, que permite tanto el análisis particular, como el generalizado.

En el apartado 1.2 de esta tesis, se relacionan las etapas fisiológicas descritas por Downey (1972) con las etapas fenológicas consideradas por Doorenbos y Pruitt (1976), para definir la política del déficit hídrico con el que se integrarán los modelos matemáticos de las Funciones de producción de los cultivos.

Hanks J. R. (1974), propone un modelo matemático como Función de producción, para relacionar al rendimiento en grano, con el uso del agua en las diferentes etapas de desarrollo del cultivo. Parte del modelo propuesto por Wit (1958, cita del autor), para calcular el rendimiento en materia seca de un cultivo con la transpiración del mismo.

Begg E. J. y Turner C. N. (1976), realizan una revisión bibliográfica sobre el déficit de agua en los cultivos, en donde, dos de las nueve secciones en las que fue dividido el estudio, tratan el tema de los efectos del déficit de agua en el crecimiento de los cultivos y los efectos del déficit de agua sobre el rendimiento de ellos.

De los efectos del déficit de agua en el crecimiento de los cultivos, se habla sobre la sensibilidad de los cultivos en las diferentes etapas de desarrollo; de los efectos morfológicos y fisiológicos relacionados con: el comportamiento de los estomas (parte de la planta en la hoja que se encarga de regular la salida de agua por medio de su abertura o cierre), la fotosíntesis; la respiración, la asimilación del déficit y la distribución de tal asimilación en la planta; y de la recuperación del cultivo por el déficit de agua.

Por otro lado, de los efectos del déficit sobre el rendimiento, se estudian: los efectos en el rendimiento económico, los efectos en las componentes del rendimiento, como se compensa el rendimiento y la interacción entre la deficiencia de nutrientes y el déficit de agua.

Doorenbos J. y Pruitt O. W. (1976), en una publicación de la Food and Agricultural Organization (FAO) de la Organización de las Naciones Unidas (ONU), denominada "las necesidades de agua de los cultivos", desarrollan y proponen, un modelo para el cálculo de la evapotranspiración de los diferentes cultivos, por medio de un cultivo de referencia y de los llamados coeficientes de cultivo; siendo este, el primer modelo en su tipo, en el que se aplica un procedimiento que integra a los elementos: agua, suelo, planta y atmósfera.

Referente a los efectos ocasionados por el déficit de agua en las diferentes etapas de desarrollo del cultivo y sobre el rendimiento, en la sección "Análisis de los factores que inciden en la evapotranspiración del cultivo en las condiciones locales predominantes", se desarrolla un apartado referido al rendimiento de los cultivos; poniendo énfasis en los períodos críticos al déficit de agua, que provocan la reducción del rendimiento.

Lo interesante de la investigación es que se presentan en ella la lista de cultivos con sus respectivos periodos críticos al déficit de agua que reducen el rendimiento, así como los niveles de agotamiento del agua del suelo, expresados como tensiones de humedad del suelo, tolerados por distintos cultivos para los que la evapotranspiración se mantiene en el nivel previsto y se obtienen unos rendimientos máximos.

El capítulo cuatro contiene el detalle de esta investigación.

Mitscherlich (1976) establece que el rendimiento de un cultivo se determina a través de un incremento en el nivel de los factores de crecimiento, tanto como dichos factores se presenten en las cantidades adecuadas para producir el máximo rendimiento.

Propone una función del tipo:

$$Y = A \left(1 - e^{-c_1 x_1} \right) \quad (1.1.1)$$

donde

Y, es el rendimiento observado del cultivo

A, es el máximo rendimiento cuando x_i se incrementa a su límite.

x_i , es la variable de crecimiento o de entrada.

c_i , es una constante que representa el factor de efecto o eficiencia de x_i , en el rendimiento.

Como se observa en la ecuación 1.1.1, la curva de respuesta al rendimiento según Mitscherlich, toma valores asintóticos hacia al punto A. Por otro lado, cuando se consideran varias variables de entrada, dicha ecuación, se transforma en:

$$Y = A \left[\left(1 - e^{-c_1 x_1} \right) \left(1 - e^{-c_2 x_2} \right) \left(1 - e^{-c_3 x_3} \right) \dots \left(1 - e^{-c_n x_n} \right) \right] \quad (1.1.2)$$

Basándose en relaciones biológicas conocidas, si x_i es por ejemplo el fertilizante, mismo que se suministre en grandes cantidades; provocaría una reducción en el rendimiento y la producción marginal

(PM); además de que x_i tomaría valores negativos. Considerando esta probabilidad, Mitscherlich adecuó la expresión, agregando un factor de ajuste, denotado como k_i en la ecuación 1.1.2, para cada x_i , lo que permite la estimación de la curva de respuesta al rendimiento, tal como lo observado en la figura 1.3 en el tramo de gráfica OC.

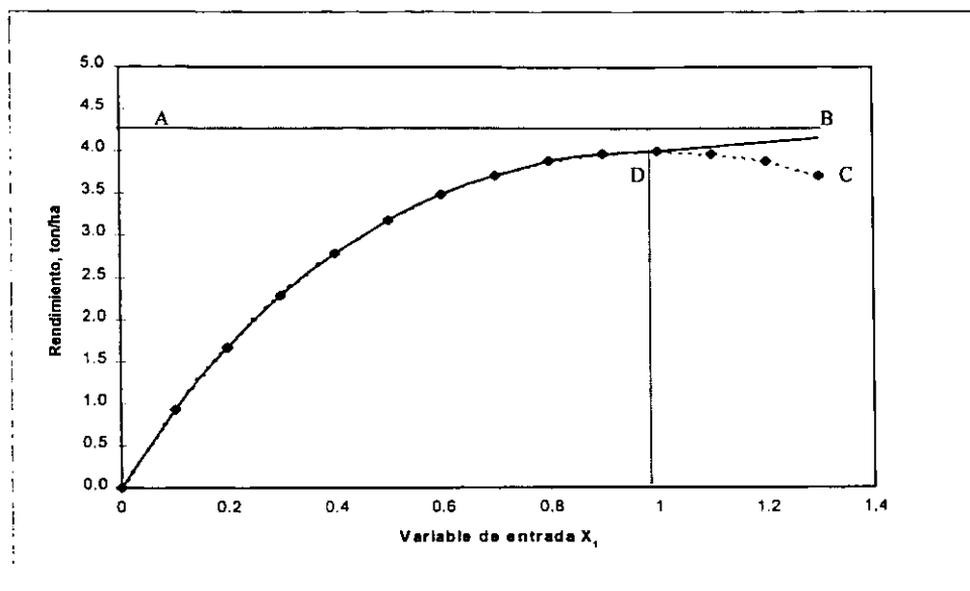


Figura 1.3.- Función de respuesta al rendimiento según Mitscherlich, para una variable de entrada, con una constante y sin valor residual de X_1 en el crecimiento medio.

$$Y = A \left\{ \left(1 - e^{-c_1 x_1} e^{-k_1 x_1^2} \right) \left(1 - e^{-c_2 x_2} e^{-k_2 x_2^2} \right) \left(1 - e^{-c_3 x_3} e^{-k_3 x_3^2} \right) \left(1 - e^{-c_n x_n} e^{-k_n x_n^2} \right) \right\} \quad (1.1.3)$$

que en forma generalizada se transforma en:

$$Y = A \left\{ \left(1 - e^{-c_i x_i} e^{-k_i x_i^2} \right) \right\} \quad (1.1.4)$$

Doorenbos J., Kassam H. A., Bentvelsen C. y Uittenbogaard G. (1979), establecen un modelo matemático que relaciona al rendimiento de los cultivos con el uso de agua el cual al ser integrado para todo el ciclo del cultivo y que tiene una forma geométrica convexa.

Rao H. N., Sarma S. B. P. y Chander S. (1988), hacen una recopilación bibliográfica sobre los diferentes modelos que existen de las Funciones de producción de los cultivos, en donde la principal variable es el uso del agua; para proponer una nueva forma funcional de ellos.

Rao H. N., Sarma S. B. P. y Chander S. (1988), aplican el modelo matemático de Función de producción propuesta por Rao (1987, cita de los autores), al análisis de un sistema agrícola bajo abastecimiento limitado de agua. El modelo aplicado predice los efectos sobre el rendimiento, que ocasiona el déficit de

Wanjura F. D., Hatfield L. J. y Upchurch R. D. (1990), definen el llamado índice de estrés de agua relacionado con la productividad de los (CWSI) para el cultivo del algodón. Para lograr esto, se requirió la información de la línea base de no estrés (NSBL) del cultivo analizado, el cual se obtuvo de experimentaciones realizadas de 1983 a 1987.

Lo interesante de esta investigación es que se cita a Jackson *et al* (1981), quien estableció que el CWSI es teóricamente análogo a la relación $(1-ET_p/ET_p)$. Por lo tanto puede ser sustituido en las Funciones de producción que consideren a esta relación; para conocer los efectos del déficit de agua en cualquier etapa de crecimiento del cultivo, sobre su rendimiento.

Sánchez B. J. L. y Gracia S. J. (1997), aplican el modelo numérico propuesto por Flinn (1971, cita de los autores), con el cual simularon el crecimiento y desarrollo de los cultivos a un nivel de análisis diario, para obtener el valor de la producción y/o rendimiento al finalizar el ciclo vegetativo de los mismos; de acuerdo a diferentes niveles de abastecimiento de agua de riego.

Romero G. N. y Gracia S. J. (2000), proponen una clasificación de cultivos de acuerdo al tipo de producto esperado de ellos, y una modificación al modelo de Mitscherlich (1976) bajo las siguientes consideraciones:

Existen tres modelos de **Funciones de producción** para el amplio rango de cultivos que se explotan con fines de producción, a saber:

- a).- Si el producto esperado es el grano, la flor o el fruto de cultivos anuales.
- b).- Si el producto esperado es el forraje o la materia seca, ya sea de cultivos anuales o semiperennes.
- c).- Si el producto esperado es el fruto de un cultivo perenne.

La representación gráfica de los modelos propuestos para los casos de Funciones de producción de los cultivos de los tipos a, b y c, se representan en las figuras 1.4 y 1.5.

En la mayoría de los modelos existentes de las Funciones de producción, se considera básicamente a las Evapotranspiraciones Real y Potencial, como las variables de mayor importancia de las que depende el rendimiento de los cultivos, sin embargo siempre ha prevalecido latente la posibilidad de demostrarse que la producción de los cultivos también depende de las características hidrodinámicas de los suelos en donde se desarrollen (Gracia S. J. 1997, cita de los autores).

Los modelos de las Funciones de producción que se proponen en esta investigación, son descritos y discutidos en apartados subsecuentes, porque son utilizados en el desarrollo de la investigación.

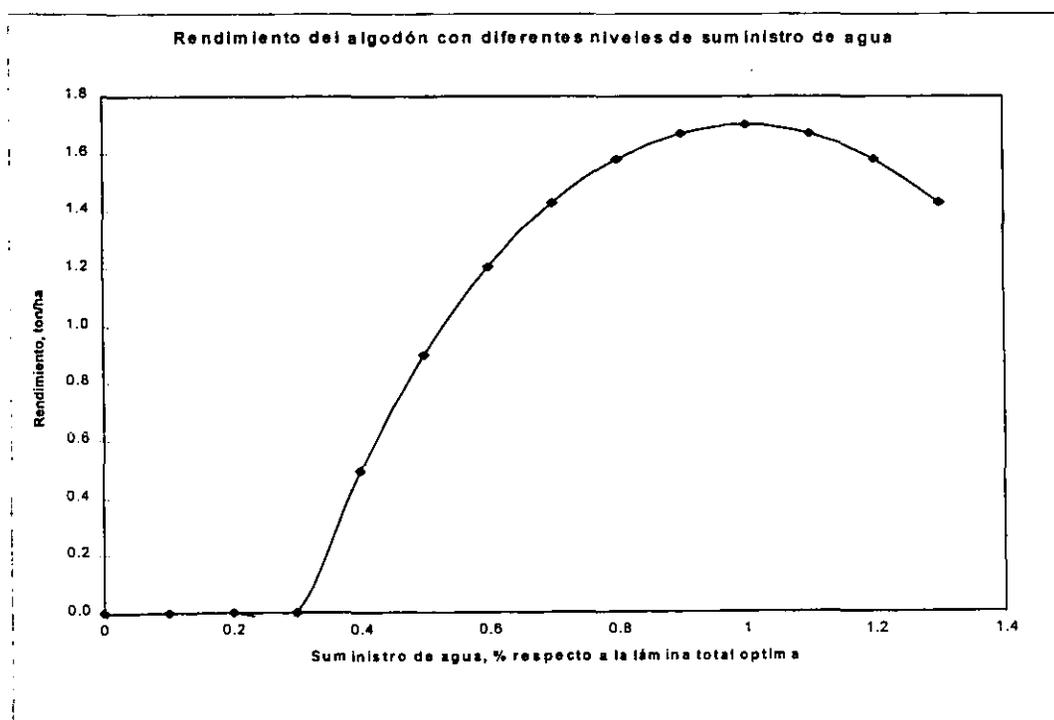


Figura 1.4.- Representación de la Función de producción de granos, flores o frutos de cultivos anuales (tipo a).

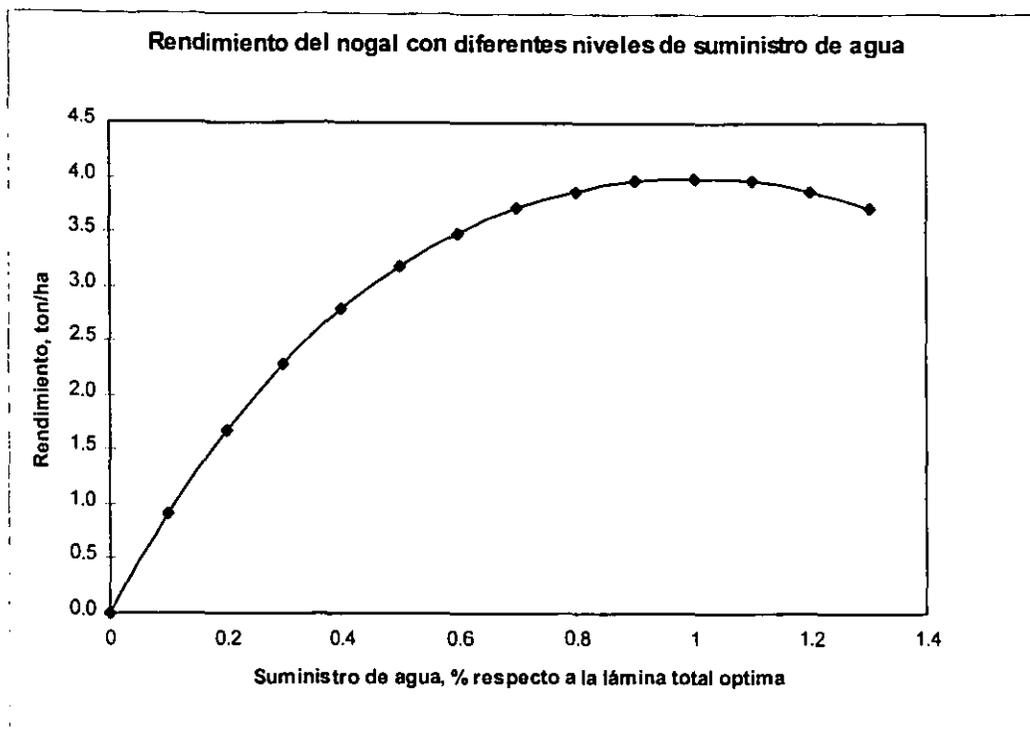


Figura 1.5.- Representación de la Función de producción del forraje verde o seco, ya sea de cultivos anuales o semiperennes (tipo b) y cuando el producto esperado sea el fruto de un cultivo perenne (tipo c).

El detalle de la información se presenta en el capítulo seis de esta tesis.

Análisis de la Función de producción de los cultivos tipo b y c

Para dar sustento a la propuesta de la Función de producción de los cultivos tipo b y c, se presenta a continuación un análisis semejante el realizado por Downey (1972).

Antecedentes

En la investigación doctoral se propusieron dos modelos matemáticos para las Funciones de producción de los cultivos, una denominada Función de producción para los cultivos del tipo a, y otra denominada Función de producción para los cultivos del tipo b y c. El modelo matemático para los cultivos del tipo a se propuso utilizando como base la investigación desarrollada por Downey (1972) y haciendo el análisis agronómico y fisiológico de los cultivos incluidos en tal clasificación; sin embargo, el modelo matemático para los cultivos de los tipos b y c, únicamente fue propuesto con base en el análisis agronómico y fisiológico de los cultivos incluidos en tales clasificaciones, esto porque no se tuvo un trabajo similar al de Downey (1972) aplicado a los cultivos de los tipos b y c.

Objetivo

Integrar un documento en el mismo formato como el desarrollado por Downey (1972), aplicado al caso de cultivos clasificados como tipo b y c, con lo cual se intenta complementar el sustento para el modelo matemático de la Función de producción que se propuso para ellos.

Metodología

- Como primera etapa se hizo una recopilación de información de trabajos relacionados con la producción y el abastecimiento de agua para los cultivos del tipo **b** y **c**.
- Se analizó el detalle de la investigación, y se relacionó con el formato utilizado por Downey (1972).
- Se transformó la información de las investigaciones, al formato utilizado por Downey (1972).
- Se intentó construir gráficas semejantes a las presentadas por Downey (1972) como figuras 2 y 3.
- Se analiza y relaciona los datos experimentales con el modelo matemático propuesto para los cultivos del tipo **b** y **c**.
- Se concluye al respecto del presente análisis y del modelo matemático propuesto.

Resultados

Para obtener los datos con los que se integró este trabajo, se utilizaron las referencias escritas con letra cursivas y subrayadas en el apartado de referencias.

La información de interés fue transformada para construir una figura semejante a la figura 2 de Downey (1972). La información utilizada y su respectiva transformación se incluye en las últimas dos hojas de este documento.

Los datos transformados fueron presentados como una dispersión de puntos en la figura 1.6, la cual corresponde al formato de la figura 2 de Downey (1972).

En la dispersión de datos representada en la figura 1.6, se trazó una línea de correlación del porcentaje de evapotranspiración con el porcentaje del rendimiento y fue extrapolada hacia los ejes cartesianos; se observa que dicha extrapolación confluye al origen de los ejes cartesianos.

Se trazó la envolvente para la dispersión de datos con la finalidad de semejar el formato de Downey (1972).

Las investigaciones revisadas no incluyen el análisis del estrés en el suministro de agua en las diferentes etapas de crecimiento de los cultivos.

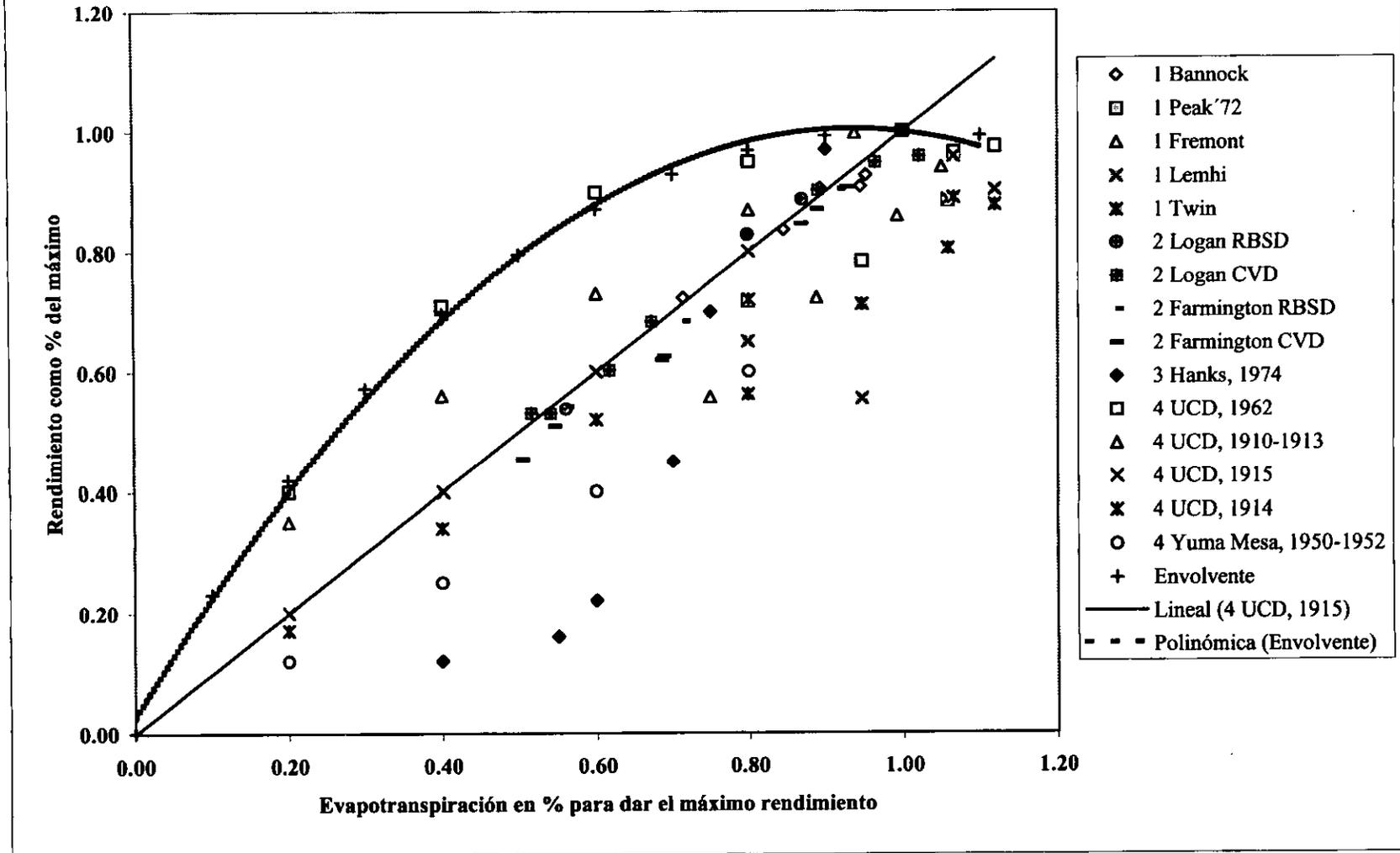
Discusión de Resultados

A diferencia de la figura 2 de Downey (1972, cultivos del tipo **a**), para los cultivos de los tipos **b** y **c**, la línea recta de la figura 1.6, interseca al origen de los ejes coordenados, lo cual en términos funcionales corresponde con la naturaleza del fenómeno, porque en el caso de los forrajes el producto aprovechado es la materia verde o seca y en este caso desde que la planta germina, ya se considera materia verde.

La envolvente trazada se ajusta a la dispersión de datos experimentales y manifiesta una tendencia similar a la representada por Downey (1972) en la figura 2, esto es, cuando se abastece una lámina de agua superior a la que el cultivo requiere, existe un decremento en la producción. Este comportamiento también corresponde a la naturaleza del fenómeno, ya que fisiológicamente después de la maduración, los cultivos entran a una etapa de fermentación y posteriormente a la putrefacción.

Dado que las investigaciones revisadas no incluyen el análisis del estrés en el suministro de agua en las diferentes etapas de crecimiento de los cultivos, no fue posible construir una figura semejante a la figura 3 presentada por Downey (1972).

Figura 1.6.- Base para formular las Funciones de producción tipo b y c



- 1.- Trigo - Rasmussen V. P. y Hanks R. J.
- 2.- Maíz (materia seca) - Bauder J. W., Hanks R. J. Y James D. W.
- 3.- Maíz (materia seca) - Hanks R. J., 1974
- 4.- Alfalfa (materia verde en un ciclo) - Stewart Ian J. Y Hagan M. Robert

Conclusión

El modelo matemático propuesto como Función de producción para los cultivos del tipo **b** y **c**, es adecuado porque se adapta al comportamiento real de ellos, esto es, al igual que con el trabajo realizado por Downey (1972), con los resultados obtenidos en el presente análisis, es viable y confiable suponer que para el caso de los cultivos del tipo **b** y **c**, la producción o rendimiento puede contabilizarse desde el instante en el que se suministra agua al cultivo.

Al igual que lo representado por Downey (1972) para los cultivos del tipo **a**, la envolvente trazada para representar el comportamiento generalizado de los cultivos del tipo **b** y **c**, se adapta a la naturaleza del fenómeno. Lo anterior constituye un punto a favor del modelo matemático propuesto, ya que con él, es posible representar el fenómeno.

1.2.- Análisis de las Funciones de producción relacionadas con el déficit hídrico

Las investigaciones del déficit de agua en las diferentes etapas de crecimiento de los cultivos, indican que fisiológicamente es la etapa de desarrollo temprano (meiosis femenina, Downey A. LI., 1972) en la que el déficit de agua puede ocasionar mayores reducciones en la producción de estos. Por lo tanto, **en esta etapa debe abastecerse completamente el requerimiento.**

Lo anterior significa que para el caso específico de las Funciones de producción donde el producto obtenido sea el grano, la flor o el fruto de cultivos anuales (**tipo a**), la producción debe considerarse nula (porque así sucede en la realidad), hasta la fecha de terminación de la etapa del **desarrollo vegetativo** y el inicio de la etapa **estación media** (Doorenbos J. y Pruitt O., 1976). Por lo que en el tiempo transcurrido del desarrollo fenológico para alcanzar este punto; necesariamente debió existir un consumo de agua sin que haya habido producción (ver figura 1.1 y 1.2, Downey A. LI, 1972).

Comparando los principales modelos de las Funciones de producción (ver figura 1.7), se observó que para definir cada uno de ellos, se consideraron diferentes factores de respuesta al rendimiento, los cuales dependen de la etapa de desarrollo en la que se encuentre el cultivo, y que la producción se inicia a partir de un instante posterior a la siembra (cuando inicia la contabilidad de la evapotranspiración); por lo que las etapas: inicial y desarrollo vegetativo intervienen con un cierto factor de peso en la producción, hecho que se contrapone con lo que sucede realmente para el caso de la producción de granos, flor o fruto de cultivos anuales.

La utilización de los dos modelos de Funciones de producción propuestos, permite por un lado conocer el límite máximo del déficit, para obtener rendimientos iguales a los que ofrece el abastecimiento total de agua en cada una de las etapas del desarrollo fenológico de los cultivos; y por otro se apega en términos reales al fenómeno estudiado.

El rendimiento de los cultivos depende de la interacción entre los elementos naturales atmosféricos y edafológicos; con algunas réplicas artificiales de los mismos (p.e. el riego) y prácticas de manejo.

Con la finalidad de relacionar las variables que intervienen en la producción de los cultivos, se han utilizado desde hace varios años las expresiones matemáticas llamadas **Funciones de producción.**

En la mayoría de los modelos existentes de las Funciones de producción, se considera básicamente a las Evapotranspiraciones Real y Potencial (capítulo 6 "**Funciones de producción**") como las variables de mayor importancia de las que depende el rendimiento de los cultivos; sin embargo, siempre ha estado latente la posibilidad de demostrarse que la producción de los cultivos también depende en un alto grado de las características hidrodinámicas de los suelos en donde se desarrolle la especie.

Como fue presentado en el apartado 1.1, los avances de investigación alcanzados hasta la fecha en nuestro país y en el resto del mundo, indican que aún no existe una Función de producción en la que se hagan intervenir a la mayoría de las variables de las que se relaciona la producción de los cultivos.

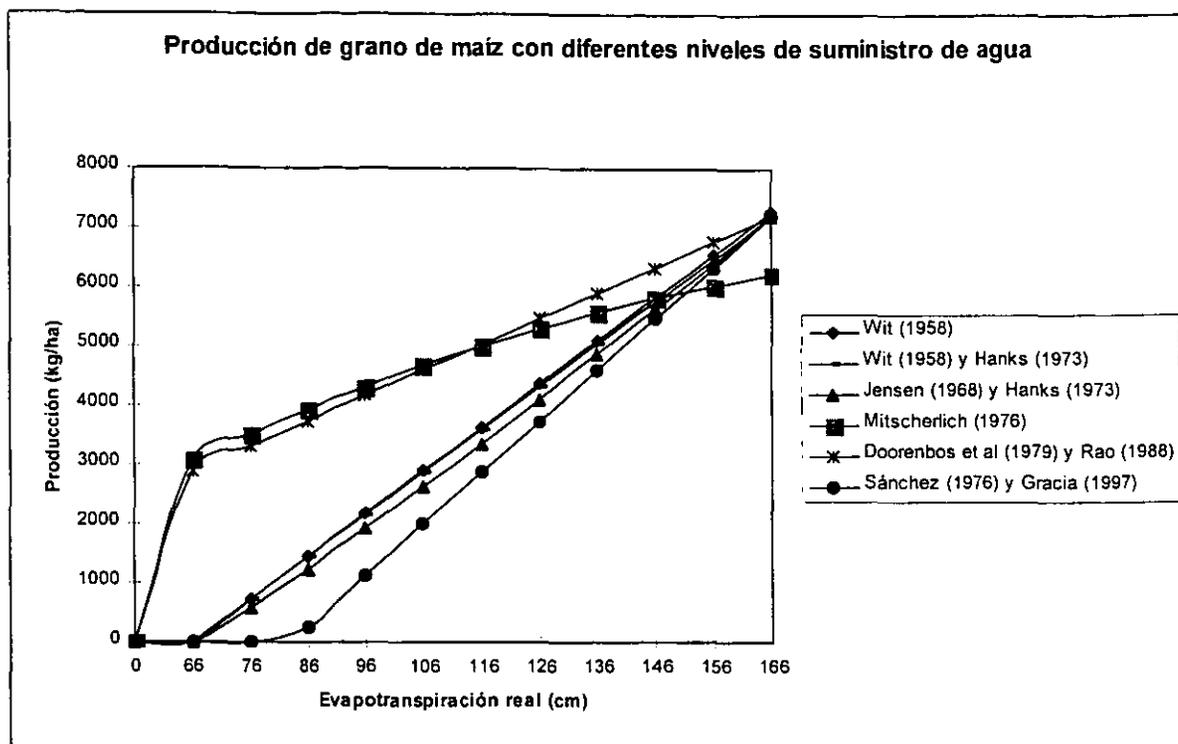


Figura 1.7.- Diversos modelos de las Funciones de producción.

Por otro lado existen antecedentes de investigación aislados, pero que de alguna manera están ligados con el tema, que han sido detalladamente estudiados y comprobados, y que fueron utilizados como una herramienta para dar sustento a los nuevos modelos de **Funciones de producción**, en los que se consideran a todas las variables de las que depende el rendimiento.

1.3.- Modelos numéricos para analizar el riego en déficit

A continuación se presenta un resumen de las principales investigaciones, que están relacionadas con algunos apartados del Modelo numérico que se propone en esta investigación doctoral.

Stewart I. J. y Hagan M. R. (1973), presentan el primer procedimiento general para obtener Funciones que describen los efectos del déficit de agua sobre el rendimiento de los cultivos, las cuales pueden ser utilizadas para llevar a cabo la planeación y el diseño de sistemas agrícolas con riego en déficit.

Hanks J. R. (1974), como fue expuesto en el apartado 1.1, propone un modelo matemático como Función de producción, para relacionar al rendimiento en grano, con el uso del agua en las diferentes etapas de desarrollo del cultivo.

Begg E. J. y Turner C. N. (1976), realizan una revisión bibliográfica sobre el déficit de agua en los cultivos, en donde, siete de las nueve secciones en las que fue dividido el estudio, están relacionadas con los análisis que desde un punto de vista agronómico debe incluir la planeación de los sistemas agrícolas con riego en déficit.

Doorenbos J. y Pruitt O. W. (1976), en una publicación de la Organización de las Naciones Unidas (FAO), denominada "**Las necesidades de agua de los cultivos**", desarrollan y proponen, un modelo para el cálculo de la evapotranspiración de los diferentes cultivos, por medio de un cultivo de referencia y de los llamados coeficientes de cultivo; siendo este, el primer modelo en su tipo, en el que se aplica un procedimiento que integra a los elementos: agua, suelo, planta y atmósfera.

Doorenbos J., Kassam H. A., Bentvelsen C. y Uittenbogaard G. (1979), establecieron el modelo matemático que relaciona al rendimiento de los cultivos con el uso de agua, el cual al ser integrado para todo el ciclo del cultivo, tiene una forma geométrica convexa.

Hugh B. J. W. Y Skogerboe V. G. (1980), analizan las Funciones de producción de los cultivos y la asignación y uso de agua en riego; explican que en la planeación de la irrigación donde está considerado el problema de la óptima lámina de aplicación de riego tiene opiniones divididas por parte de los investigadores.

A diferencia de la propuesta de Stewart *et al* (1973), aquí se clasifica a las Funciones de producción en: lineales y no lineales; involucrando el análisis del tiempo de déficit en el cultivo y la relación funcional entre las relaciones evapotranspiración - rendimiento y rendimiento - láminas de riego aplicadas.

La aportación más significativa de la investigación, es que se propone una estrategia para realizar el análisis económico del sistema agrícola, con el fin de calcular la lámina de agua óptima por aplicarse.

Se estudian los efectos de las Funciones de producción, en los ingresos de la agricultura, definiéndose curvas de eficiencia entre la lámina de agua aplicada y el rendimiento del cultivo.

English J. M. (1981), propone una modificación al modelo matemático de la Función de producción de los cultivos de Stewart y Hagan (1973), el cual calcula el rendimiento potencial de los cultivos.

English J. M. y Nuss S. G. (1982), realizan el análisis comparativo entre los resultados obtenidos de un sistema agrícola que no tuvo limitaciones de abastecimiento de agua y otro sistema que produjo con déficit de agua.

Para desarrollar la investigación, se hicieron las consideraciones y aplicaron los procedimientos a seguir en cada sistema agrícola.

Se concluyó que la irrigación en déficit presenta ventajas sobre la irrigación sin limitaciones de abastecimiento de agua. Para el caso analizado se tuvo un ahorro del 40 % en el consumo de energía eléctrica, y el 24 % de ahorro en el volumen de agua utilizado para uso consuntivo, con el esquema del riego en déficit; obteniéndose en ambos esquemas el mismo ingreso económico neto.

Hargreaves H. G., Samani A. Z. (1984), analizan e interpretan las consideraciones económicas de los sistemas agrícolas bajo déficit de riego, de una amplia serie de experimentos evaluados en otras investigaciones.

En análisis considera los ingresos brutos y los costos de producción de cada uno de los sistemas, donde el objetivo fue encontrar la relación que existe entre las variables: Beneficio Neto, Rendimiento Relativo y Agua Aplicada.

Joseph E. N. (1984), en tesis para obtener el grado de Doctor en Ingeniería Hidráulica, realiza una investigación orientada a la simulación del comportamiento de los cultivos y su aplicación para la determinación de las políticas de riego. Tal simulación se plantea para un nivel de análisis diario, utilizando para ello el modelo de la Función de producción propuesto por Hanks y Hill (1980, cita del autor).

Se incluyen en el modelo, otros factores que tienen influencia sobre el rendimiento de los cultivos; por ejemplo, la salinidad del suelo y agua y la fertilización.

El modelo es aplicado en dos unidades de riego de México, y el resultado finalmente obtenido contiene la siguiente información para un cultivo en específico:

- Diferentes políticas de riego, asociadas al grado de humedad aprovechable en el suelo al que se haya permitido llegar al cultivo.
- La lámina de riego para cada política de riego.
- El calendario de riego.

➤ El rendimiento simulado esperado con la aplicación de las diversas políticas de riego.

Dierckx J., Gilley R. Feyen J. y Belmans Ch. (1988), aplican dos modelos para simular la relación que existe entre la hidrodinámica del suelo y el rendimiento obtenido con déficit de irrigación. El modelo del balance de agua en el suelo *SWATRE* (Soil Water and Actual Transpiration Rate), desarrollado por Feddes *et al* (1978, cita de los autores), fue modificado para combinarse con el modelo *SUCROS* desarrollado por Keulen V. *et al* (1982, cita de los autores), que analiza el crecimiento del cultivo. A ambos modelos se les dan los datos requeridos de entrada, considerándose para el análisis a ocho etapas de crecimiento en que fue dividido el ciclo del cultivo.

Se determina la evapotranspiración acumulada, las variaciones en la humedad del suelo y el rendimiento final, que se tuvieron con diferentes niveles de abastecimiento de agua, para un suelo con baja capacidad de campo y bajo condiciones de alta evaporación.

Stockle O. C. y James G. L. (1989), proponen una estrategia para el análisis del riego en déficit, utilizando la simulación del crecimiento del cultivo. Se probaron cinco niveles de irrigación, utilizando el modelo desarrollado por Stockle y Campbell (1985, cita de los autores) y los datos climáticos del año 1974, de la estación de Davis California.

English M. (1990), hace una integración analítica de los procesos y variables que están presentes en los sistemas agrícolas con déficit de riego. Explica que bajo algunas circunstancias, los ingresos máximos obtenidos en un campo irrigado, pueden ser logrados con el riego en déficit. Tal aseveración está basada por la teoría económica y por investigaciones anteriores (English y Nuss, 1982; Hargreaves y Samani, 1984; James y Lee, 1971, citas del autor). Sin embargo desde el punto de vista ingenieril, tratar al riego en déficit resulta dificultoso. Dependiendo del plan, del diseño, o del manejo del sistema agrícola con déficit de riego, el analista debe basarse en las Funciones de producción de los cultivos, las cuales relacionan el uso del agua con el rendimiento del cultivo. Pero la incertidumbre asociada con dichas Funciones de producción, hace virtualmente imposible la predicción exacta del rendimiento; por lo tanto, es imposible el conocimiento preciso del nivel de agua usado para maximizar las ganancias (English, 1981).

Para definir el modelo de integración, se estudia por un lado a la Función de producción del cultivo generalizada, en la que se identifican dos zonas bajo la curva de dicha función: la zona I que puede caracterizarse como la zona con bajo riego y la zona II como la zona con sobre riego; y por otra parte a las Funciones ingresos y costos. Estas dos Funciones al conjuntarse, definen el límite entre las ganancias y las pérdidas.

En la conjunción de las Funciones anteriores, se analiza el costo de oportunidad del agua, el cual provoca cambios significativos en la localización del límite entre pérdidas y ganancias, si varía de un precio a otro más alto.

Con las consideraciones anteriores, se propone entonces una formulación matemática general para analizar los sistemas agrícolas con déficit de riego.

Asumiendo por el momento, que se tratará únicamente a un solo cultivo, y que cantidades fijas de tierra y agua están asignadas para la producción del cultivo, se tendrá:

A ,	Area total del cultivo que será regada (ha).	(1.3.1)
W_T ,	Agua total disponible para abastecer (m^3).	(1.3.2)
w ,	Agua aplicada por unidad de superficie (m^3/ha).	(1.3.3)
$y(w)$,	Rendimiento por unidad de superficie, expresado como una función de w (kg/ha).	(1.3.4)
$c(w)$,	Costos de producción por unidad de superficie, expresado como una función de w (\$/ha).	(1.3.5)
P_c ,	precio del cultivo (\$/kg).	(1.3.6)
$i_i(w)$,	ingresos netos por unidad de superficie bajo riego (\$/ha).	(1.3.7)
$I_A(w)$,	ingreso neto de la parcela de toda la superficie irrigada (\$).	(1.3.8)

$i_f(w)$ puede ser expresada como una función del ingreso neto por unidad de superficie y el área irrigada.

$$I_f = A(i_f)(w) \quad (1.3.9)$$

El ingreso neto por hectárea es una función del agua aplicada:

$$i_f(w) = (p_c)y(w) - c(w) \quad (1.3.10)$$

El área Irrigada (A) puede ser expresada como una función del uso de agua. Si el agua de abastecimiento es limitada, el agricultor puede poner la suficiente tierra bajo riego, para utilizar únicamente esta agua disponible para el abastecimiento. El área irrigada puede ser entonces:

$$A = \frac{W_T}{w} \quad (1.3.11)$$

De otra manera, si la tierra es un recurso limitado, es razonable esperar que se ponga a producir toda la tierra disponible de la parcela. El área irrigada entonces se hace independiente de w .

El nivel de uso de agua que maximiza al rendimiento (W_m), puede ser determinado derivando la función del rendimiento respecto a w e igualando con cero, así:

$$\frac{\partial y(w)}{\partial w} = 0 \quad (1.3.12)$$

El valor de w que satisface a la ecuación 1.3.12 se denomina W_m .

Para verificar que el valor de w o W_m corresponde a un máximo, éste debe evaluarse en la segunda derivada de la función; si el resultado es negativo, w es un máximo, de lo contrario es un mínimo.

Para determinar el nivel de uso de agua que hace máximo al ingreso neto cuando la superficie de tierra es limitada, puede tomarse a la derivada parcial de la ecuación 1.3.9 con respecto a w .

$$\frac{\partial I_f(w)}{\partial w} = A \frac{\partial i_f}{\partial w} + i_f(w) \frac{\partial A}{\partial w} \quad (1.3.13)$$

Cuando la tierra es limitada, A debe considerarse constante. Igualando la derivada a cero y eliminando A , el nivel óptimo de uso de agua (w_i) debe ser definido por la ecuación:

$$\frac{\partial i_f(w)}{\partial w} = 0 \quad (1.3.14)$$

la cual es la derivada de la ec. 1.3.10, se hace igual a cero.

Cuando el agua esta limitada, A es una función de w , como fue notado, y óptimo uso de agua (W_w) puede ser determinado de la ec. 1.3.13. Las derivadas de las ecs. 1.3.13 y 1.3.14 pueden ser escritas como:

$$\frac{\partial i_f(w)}{\partial w} = p_c \frac{\partial y(w)}{\partial w} - \frac{\partial c(w)}{\partial w} \quad (1.3.15)$$

$$\frac{\partial A}{\partial w} = -\frac{W_T}{w^2} \quad (1.3.16)$$

Las ecuaciones para el óptimo uso de agua son entonces

$$P_c \frac{\partial y(w)}{\partial w} = \frac{\partial \alpha(w)}{\partial w} \quad (1.3.17)$$

Cuando la tierra está limitada, y

$$w \left[P_c \frac{\partial y(w)}{\partial w} - \frac{\partial \alpha(w)}{\partial w} \right] = (P_c)y(w) - c(w) \quad (1.3.18)$$

Cuando el agua es limitada. Resolviendo las ecs. 1.3.17 y 1.3.18, se obtienen los valores de aplicación de agua, w_l y w_w , para el óptimo rendimiento.

La ecuación 1.3.17 es la expresión de un axioma de economía: La cual establece que el óptimo ocurre en el punto donde el costo marginal de producción es igual al valor del producto marginal. El lado izquierdo de la ec. 1.3.17, es una expresión para el valor del producto marginal, donde el lado derecho es el costo marginal. Esto se repite en cualquier momento, en el que el óptimo uso de agua ocurra en el punto donde las pendientes de las dos curvas de la figura 1.7, son iguales (W_l) cuando la superficie de tierra es el factor limitante.

La relación económica expresada en la ec. 1.3.18, es diferente. Las implicaciones son visualizadas más claramente, si se recalca que la ec. 1.3.18 es un resultado de la ec. 1.3.13 evaluada en el óptimo (por ejemplo, cuando la derivada se hace igual a cero). El resultado de la ecuación es:

$$-A \frac{\partial i_l(w)}{\partial w} = i_l \frac{\partial A}{\partial w} \quad (1.3.19)$$

Suponiendo que el uso de agua es reducido en una pequeña cantidad, en todos los campos de la parcela, y el agua ahorrada de esta manera es usada para regar un incremento adicional de tierra. La expresión en el lado izquierdo de la ec. 1.3.19, representará entonces la reducción acumulada en ingreso de todas las tierras originalmente regadas, mientras el lado derecho es el ingreso derivado de regar el incremento adicional de tierra. Cuando estas cantidades se balancean, el óptimo nivel de uso de agua a sido encontrado.

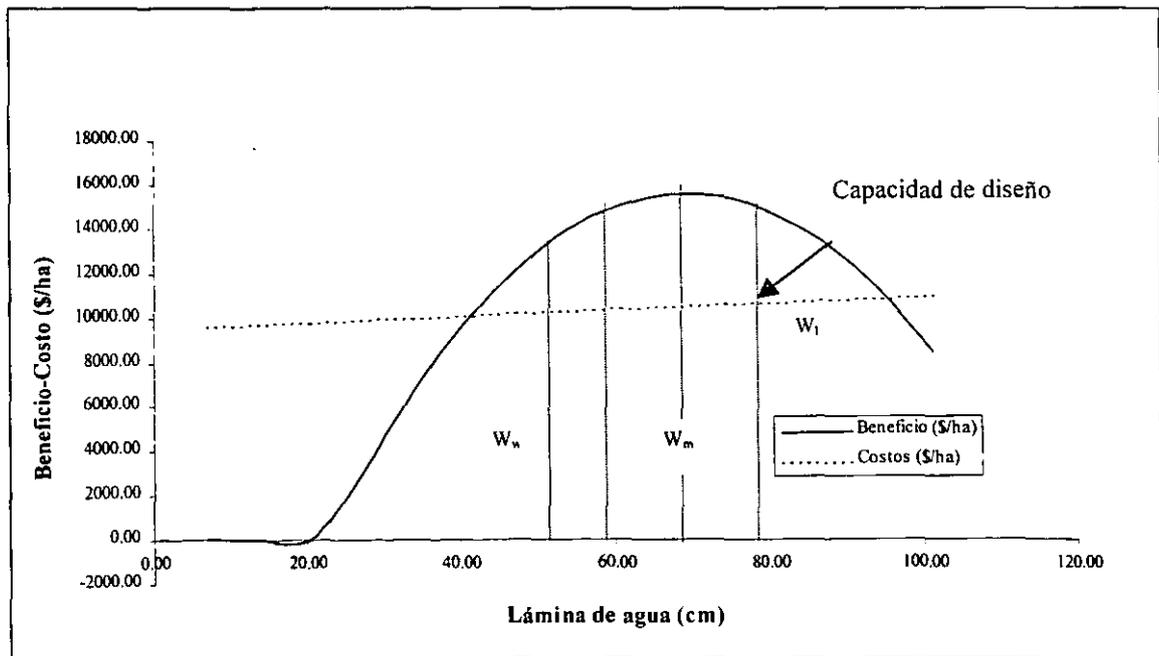


Figura 1.8.- Funciones de Beneficios y de Costos

Las ecuaciones anteriormente mencionadas pueden ser utilizadas para determinar W_m (Ec.1.3.12), W_i , y W_w (Ecs. 1.3.17 y 1.3.18). Los dos niveles de uso de agua equivalentes (W_{ei} y W_{ew}) quedan como variables a determinarse. Por sustitución de W_m en la ec. 1.3.10, el ingreso neto bajo riego total es determinado.

$$i_1(W_m) = (P_c)y(W_m) - c(W_w) \quad (1.3.20)$$

Este ingreso neto puede ser sustituido en el lado izquierdo de la ec. 1.3.10.

$$i_1(W_m) = (P_c)y(w) - c(w) \quad (1.3.21)$$

Las raíces de esta ecuación son el nivel de uso de agua que produce un ingreso por unidad de superficie equivalente al riego total; que es W_{ei} .

Similarmente, el ingreso equivalente en el nivel de riego cuando el agua es limitada, puede ser derivado de la ecs. 1.3.9 y 1.3.11, lo que resulta en:

$$I_f(W_m) = \frac{W_T}{W_m} i_1(W_m) \quad (1.3.22)$$

$$I_f(W_m) = \frac{W_T}{w} i_1(w) \quad (1.3.23)$$

La Ec. 1.3.23 puede ser entonces resuelta para W_{ew} .

Ecuaciones específicas para determinar el óptimo

Las ecuaciones 1.3.12, 1.3.13, 1.3.17, 1.3.18, 1.3.21 y 1.3.23 son expresiones completamente generales. Pueden ser usadas para derivar fórmulas explícitas para el uso óptimo del agua de riego. Para esto, es necesario primero desarrollar modelos específicos de rendimiento y costos ($y(w)$ y $c(w)$), entonces sustituyendo tales modelos en las ecuaciones generales y resolviendo para distintos valores de W .

A manera de ejemplo, supóngase que la función del rendimiento está representada por un polinomio cuadrático:

$$y(w) = a_1 + b_1 w + c_1 w^2 \quad (1.3.24)$$

La forma funcional es consistente con la naturaleza fundamental de la función de aplicación de agua dentro de la Zona I. La función puede ser aproximadamente lineal a los niveles bajos de uso de agua, y entonces la curva sobre una tasa acelerada como sistema ineficiente se incrementa con incrementos en el uso de agua.

El costo funcional que se piensa para el sistema, esta representado por una expresión lineal.

$$c(w) = a_2 + b_2 w \quad (1.3.25)$$

donde los coeficientes a_2 y b_2 , son los costos fijos y los costos variables de producción, respectivamente.

La variación de niveles en los usos de agua de interés en el análisis (W_h , W_w , W_m , W_{ei} , W_{em}) puede ser derivada por sustitución de las ecuaciones 1.3.24 y 1.3.25 en las ecuaciones generales derivadas en primer lugar. Los cinco niveles de uso de agua pueden entonces ser calculados como:

$$W = -\frac{b_1}{2c_1} \quad (1.3.26)$$

$$W_{el} = \frac{b_2 - P_c b_1 + Z_1}{2P_c c_1} \quad (1.3.27)$$

$$W_{ew} = \frac{-Z_2 + [Z_2^2 - 4P_c c_1 (P_c a_1 - a_2)]^{1/2}}{2P_c c_1} \quad (1.3.28)$$

$$W_l = \frac{b_2 - P_c b_1}{2P_c c_1} \quad (1.3.29)$$

$$W_w = \left(\frac{P_c a_1 - a_2}{P_c c_1} \right)^{1/2} \quad (1.3.30)$$

donde

$$Z_1 = \left[(P_c b_1 - b_2)^2 - 4P_c c_1 \left(\frac{P_c b_1^2}{4c_1} - \frac{b_1 b_2}{2c_1} \right) \right]^{1/2} \quad (1.3.31)$$

y

$$Z_2 = \frac{P_c b_1^2 - 4a_2 c_1 + 4P_c a_1 c_1}{2b_1} \quad (1.3.32)$$

La metodología se aplicó al caso del lago Columbia en el que se obtuvieron buenos resultados.

Se concluyó que la conjunción analítica para tratar con el déficit de riego, lleva a la determinación de los cinco niveles de uso de agua: (1) El nivel al cual el rendimiento es maximizado (W_w); (2 y 3) El nivel de déficit al cual el ingreso neto fue igual al ingreso por riego total, con cualquiera de las limitaciones: en la tierra o en el agua (W_{el} o W_{ew}); (4) el déficit al cual los beneficios para la tierra son maximizados (W_w); y (5) el déficit para el cual los retornos para el agua son maximizados (W_w). Para determinar estos cinco niveles de riego, el análisis puede ganar una útil perspectiva en los riesgos y retornos asociado con el déficit de riego.

Por otro lado se derivaron analíticamente las ecuaciones generales para el cálculo de los niveles óptimos (Ecs. 1.3.12, 1.3.17, 1.3.18, 1.3.21 y 1.3.23). Tales ecuaciones pueden ser combinadas con las Funciones de rendimiento y costos para derivar los cinco niveles relevantes del uso de agua. Como un ejemplo ilustrativo, las Funciones de rendimiento y costo fueron derivadas basándose en una Función de producción cuadrática y una lineal para la función de costos. Las ecuaciones resultantes para W_m , W_l , W_w , W_{el} y W_{ew} (ecs. 1.3.28 -1.3.32) proporcionan un algoritmo simple para el análisis del óptimo uso del agua de riego. Las entradas requeridas son los coeficientes en las ecs. 1.3.24 y 1.3.25 y el precio del cultivo.

Mientras que los niveles óptimos de riego no sean estimados, estos no pueden ser conocidos precisamente. Sin embargo, dentro del rango entre W_m y cualquiera de los niveles W_{el} o W_{ew} , el déficit de riego es más provechoso que el riego total. La extensión del rango anterior puede ser vista como un indicador del rango de seguridad del déficit de riego. Conociendo la extensión del rango, un agricultor puede decidir si toma en cuenta la recomendación de aplicar el óptimo uso de agua, la confianza que él tiene en la recomendación y el riesgo atribuible.

Es importante aclarar que las ecuaciones 1.3.28 y 1.3.30, que corresponden a las ecuaciones 28 y 30 de la referencia r, fueron modificadas por Romero G. N. (2000) en esta investigación doctoral, ya que posiblemente existió un error de escritura en la versión original. La bondad de las ecuaciones propuestas se comprobó con la aplicación del procedimiento. Se encontraron resultados similares a los reportados por Englis M. en la referencia s.

Smith M. y la FAO (1991), desarrollan un modelo de cómputo para el cálculo de requerimientos de riego y generación de calendarios de riego, el cual es denominado **CROPWAT**.

En este modelo, los procedimientos para el cálculo de los requerimientos de riego están basados en las metodologías de la FAO descritas en los documentos de Riego y Drenaje No. 24 "Requerimiento de agua por los cultivos" y No. 33 "Agua y Respuesta en el Rendimiento". Los conceptos y procedimientos de cálculo para los calendarios de riego, están presentados en otra publicación de la FAO que hasta el año de 1991, aún estaba en trámite de publicación.

Aguilar Ch. A. (1993), en tesis para obtener el grado de Maestro en Ingeniería Hidráulica, propone un modelo para definir la política de asignación de dotaciones bajo condiciones de déficit hídrico.

Como modelo de Función de producción, se utiliza el propuesto por Doorenbos y Kassam (1979), el cual es modificado para integrarle el concepto de **Déficit Hídrico**.

Mannocchi F. y Mercarelli P. (1994), proponen un procedimiento para el diseño de sistemas agrícolas con déficit de riego. El análisis inicia con la utilización de la Función de producción representada con el modelo de Doorenbos y Kassam (1979), que relaciona al rendimiento del cultivo: actual y máximo, con las evapotranspiraciones: actual y potencial, y con un coeficiente de respuesta al rendimiento (K_y) que depende de la etapa de desarrollo del cultivo.

Gracia S. J. (1997), aplica el modelo numérico propuesto por Flinn (1971, cita del autor) con el cual simula el crecimiento y desarrollo de los cultivos a un nivel de análisis diario, para obtener el valor de la producción y/o rendimiento al finalizar el ciclo vegetativo de los mismos; de acuerdo a diferentes niveles de abastecimiento de agua de riego.

Los detalles del procedimiento fueron descritos en el apartado 1.1, por lo que aquí únicamente se presentan algunas observaciones para él.

2.- ESTRATEGIA DE SOLUCION

Este capítulo consta de tres apartados y el anexo 1. En el primero se explica el procedimiento empleado para definir los modelos matemáticos de las Funciones de producción de los cultivos; el segundo contiene la descripción de cada una de las secciones de las que está integrado el modelo numérico que se desarrolló en esta investigación. En el tercero se explica el procedimiento de selección de la región en la que se aplicó el modelo numérico y finalmente en el anexo 1 se describe el marco de referencia de la zona seleccionada.

2.1.- Modelos matemáticos de las Funciones de producción

Para su obtención se utiliza como base el trabajo de Downey A. Ll. (1972), ya que en éste se expresan en un mismo formato, los resultados obtenidos en diferentes investigaciones realizadas para cultivos particulares, lo cual permite el análisis del comportamiento general de ellos.

Para transformar tal comportamiento general, en un esquema también general en el que se representa el desarrollo fenológico de los cultivos a través de sus diferentes etapas de crecimiento, se utiliza la propuesta de Doorenbos y Pruitt (1976) por considerar a ésta, como la que mejor se adapta al acervo informático que existe en nuestro país.

Finalmente, en el desarrollo de los modelos matemáticos de las Funciones de producción de los cultivos, se aplicó el teorema π (PI) adimensional de Buckingham – Vaschy (citado por Echávez A. G., 1996) para definir las variables de las que depende la producción, y fueron relacionadas con el modelo de Mitscherlich modificado (Romero y Gracia, 2000).

2.2.- Estructura del modelo numérico

Con fines de abreviación para las etapas subsecuentes de esta investigación, el Modelo numérico desarrollado fue denominado **ADEHISIA**, el cual corresponde al nombre: **Análisis del Déficit Hídrico en Sistemas Agrícolas**.

ADEHISIA consta de siete secciones básicas organizadas y desarrolladas en forma secuencial, en las cuales se intentó considerar el total de las áreas del conocimiento que están relacionadas con los sistemas de producción agrícola.

Al igual que cualquier organismo viviente, los cultivos explotados con fines de producción agrícola requieren del agua para llevar a cabo su actividad fisiológica durante su ciclo vegetativo. Desde luego,

esta agua debe provenir desde una fuente, la cual puede ser de cuatro tipos, a saber: subterránea (acuíferos), superficial (presas, lagos, lagunas y ríos), subsuelo (mantos freáticos someros) y atmosférica (precipitación); además el aprovechamiento del agua está sujeto a una cierta disponibilidad para no alterar el equilibrio del ciclo hidrológico, es decir, la estrategia de partida es que únicamente debe utilizarse para cualquier tipo de uso, la cantidad de agua que se tenga disponible en la fuente de abastecimiento.

De esta manera, la determinación de la **DISPONIBILIDAD** de agua, es la primera sección considerada en **ADEHISIA**, y fue dividida para su estudio en un **análisis hidrológico** de la fuente de abastecimiento y en un **análisis de sequías** de la zona específica en la que se realiza la explotación del sistema.

Se conoce que cada sistema agrícola tiene una plantilla de cultivos que se adapta a las condiciones climáticas y edafológicas de la región en la que están establecidos, por lo tanto, la segunda sección que **ADEHISIA** considera, es la estimación de la **EVAPOTRANSPIRACION** que causa cada cultivo incluido en dicha plantilla, en condiciones óptimas de suministro de agua, y para tal región geográfica en específico.

Para verter una primera opinión al respecto del grado de **déficit** que se analizará, **ADEHISIA** considera como tercera etapa la comparación **DISPONIBILIDAD VS EVAPOTRANSPIRACION**, dato que será utilizado en las secciones siguientes, para estimar los resultados que se obtendrán con tal disponibilidad, en el caso particular de cada cultivo.

Mediante la simulación del crecimiento del cultivo, **ADEHISIA** considera la obtención de las **FUNCIONES DE PRODUCCION** de cada uno de los cultivos, en las cuales se relaciona al rendimiento del cultivo (kg/ha) con el abastecimiento de agua (cm). Esta es la cuarta sección del Modelo numérico.

De los resultados obtenidos en ciclos agrícolas anteriores en el sistema de producción, la quinta sección de **ADEHISIA** consiste en realizar un **ANALISIS ECONOMICO DE LA PRODUCCION**, en el que el principal objetivo es transformar las Funciones de producción (kg/ha vs cm) en Funciones de Beneficio Económico (\$/ha vs cm), y obtener una Función de Costos (\$/ha) en la que la variable independiente sea la lámina de agua utilizada en la producción (cm), es decir, que ésta será una función del tipo \$/ha vs cm.

En la sexta sección de **ADEHISIA** llamada **ANALISIS DE OPTIMIZACION**, se aplica una técnica analítica desarrollada por English (1990) para estimar el ingreso neto (\$/ha) que se obtiene de cada cultivo, con la aplicación de la lámina de agua disponible (cm).

Finalmente en la sección siete **PLANEACION DEL SISTEMA AGRICOLA**, para el caso del **diseño** (planeación), **ADEHISIA** define las políticas y acciones que deben aplicarse para obtener resultados óptimos en el sistema de producción, o bien para el caso de la **revisión** (diagnóstico), **ADEHISIA** presenta las acciones que debieron ser aplicadas para las condiciones de disponibilidad de agua que se tenía.

En la figura 2.1 está representado el esquema general de **ADEHISIA** con la secuencia descrita:

2.3.- Método de selección de la región de estudio

Para seleccionar el área de estudio, y entender su procedimiento, es necesario analizar el título de esta investigación doctoral, el cual textualmente es: "Modelo numérico para el Diseño y Revisión de Sistemas Agrícolas con Riego en Déficit y su Aplicación en Epocas de Sequía"; el texto subrayado indica que **ADEHISIA** fue aplicado en un Sistema Agrícola con Riego en Déficit, el cual pudiese ser un Distrito o una Unidad de Riego de la República Mexicana. Por otro lado la Aplicación en Epocas de Sequía, indica que es necesario elegir una Región en la que la presencia de las sequías sea más frecuente.

En este caso, analizando la reciente división de Regiones Administrativas del plano 2.1 y su relación con la tabla 2.1, se tiene que seis de ellas presentan una precipitación promedio anual inferior a 772 mm (promedio nacional, plano 2.4), de ellas, es la Región Administrativa I "Península de Baja California" la

que tiene un valor de 181 mm (plano 2.4), por lo tanto sería lógico seleccionarla como área de estudio, sin embargo, esta no fue seleccionada porque el principal Distrito de Riego llamado 014 "Río Colorado" se abastece desde el Río Colorado, el cual tiene su cuenca de aportación de escurrimientos en las superficies territoriales de México y de Estados Unidos de América, por lo tanto, se decidió seleccionar una Región Administrativa que tuviera su cuenca de aportación de escurrimientos únicamente en el territorio Mexicano; la Región Administrativa que cubrió tal requerimiento fue la VII "Cuencas Centrales del Norte", la cual se ubica en la segunda posición del orden ascendente, con una precipitación anual estimada en 391 mm (plano 2.4).

A su vez, esta Región Administrativa queda contenida en las regiones hidrológicas: RH35 Mapimí, RH36 Nazas-Aguanaval y RH37 El Salado, las cuales están representadas en el plano 2.2.

En el plano 2.3 y se observa que en la Región Administrativa VII Cuencas Centrales del Norte, están establecidos los Distritos de Riego: 017 "Región Lagunera" y 034 "Estado de Zacatecas, de los cuales se tiene que el Distrito 017 es abastecido desde Fuentes Superficiales (presas) y el 034 desde Fuentes Subterráneas (acuíferos).

Se consideró que ADEHISIA incluiría el total de los casos reales que se tienen en la República Mexicana, si se analiza el caso de un abastecimiento desde fuentes superficiales, ya que para estos se requiere de un Análisis Hidrológico (volúmenes) y otro de Sequías: Hidrológicas (volúmenes) y Meteorológicas (precipitación); por lo tanto, fue definido que el modelo se aplicaría en el Distrito de Riego 017 "Región Lagunera" (plano A1.1).

Para validar la selección del área de estudio, se observa en el plano 2.4, que la menor precipitación normal anual en el período 1941-1999, se presentó en el área de Influencia del Distrito de Riego 017 "Región Lagunera", y que este se ubica en la región Hidrológica 36 Nazas-Aguanaval; por lo tanto, con esto se verificó que la selección realizada está dirigida y aplicada en una zona en la que existen problemas de sequía.

Descripción de la figura 2.1

- El color rojo con trama cuadrada significa que dicha sección es la aportación principal de la tesis.
- El color verde con trama en zig-zag significa que tal sección es una aportación no prevista para la tesis, pero que sucedió y era requerida.
- El recuadro en triple línea contiene la aportación general de la tesis, es decir, la integración de los elementos que intervienen en el proceso de producción de un sistema agrícola.

Nota importante: El concepto "Sequía" tiene dos vertientes en esta investigación doctoral. La primera está relacionada con el análisis de sequías hidrológicas y meteorológicas en la región de estudio, y la segunda está relacionada con el análisis del rendimiento (kg/ha) de los cultivos, cuando ellos producen en condiciones de falta de agua o déficit hídrico (sequía), es decir, debido a la baja disponibilidad de agua, no es posible abastecer el 100% del Uso Consuntivo que se demanda durante el ciclo fenológico.

MODELO NUMERICO ADEHISIA

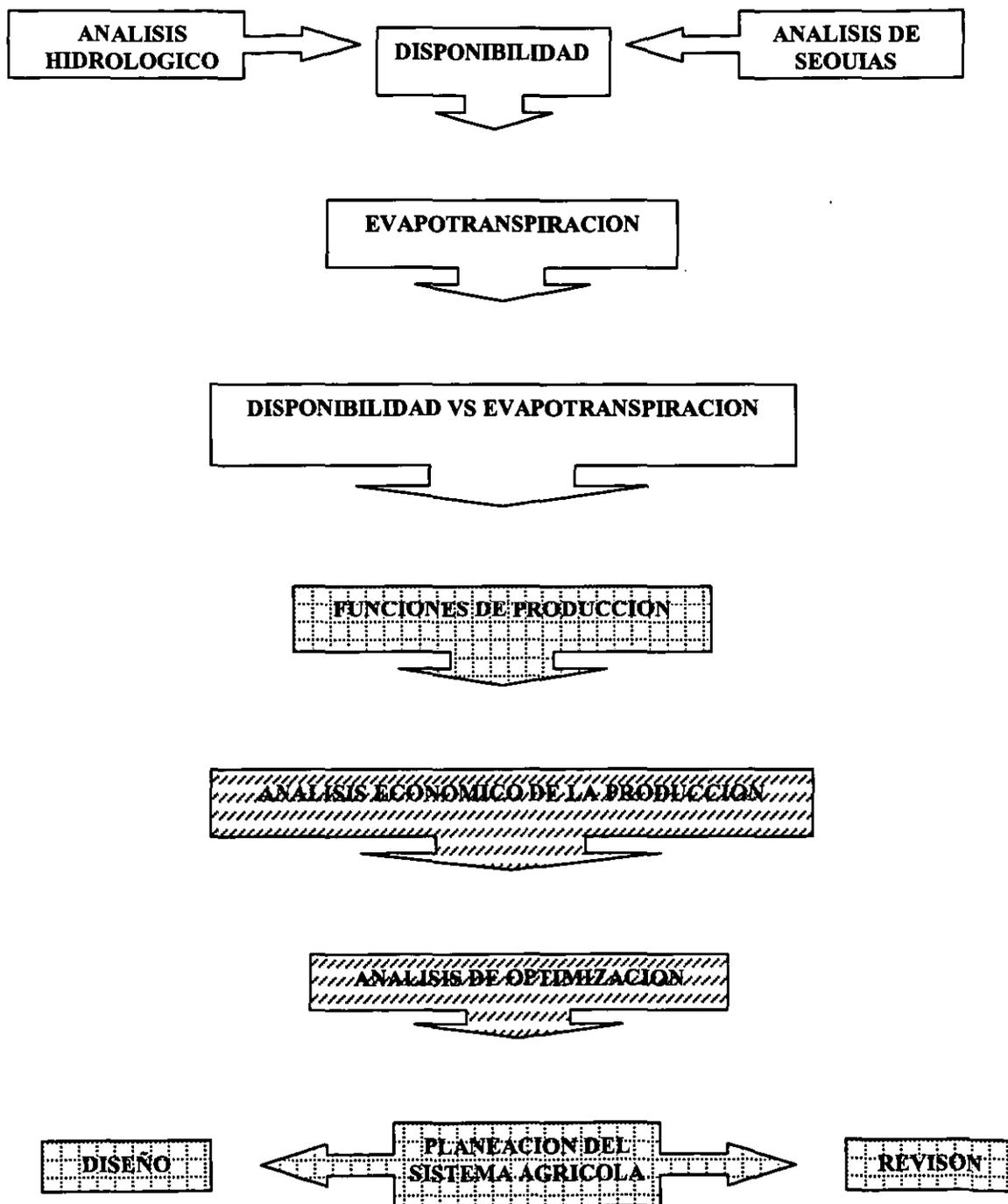
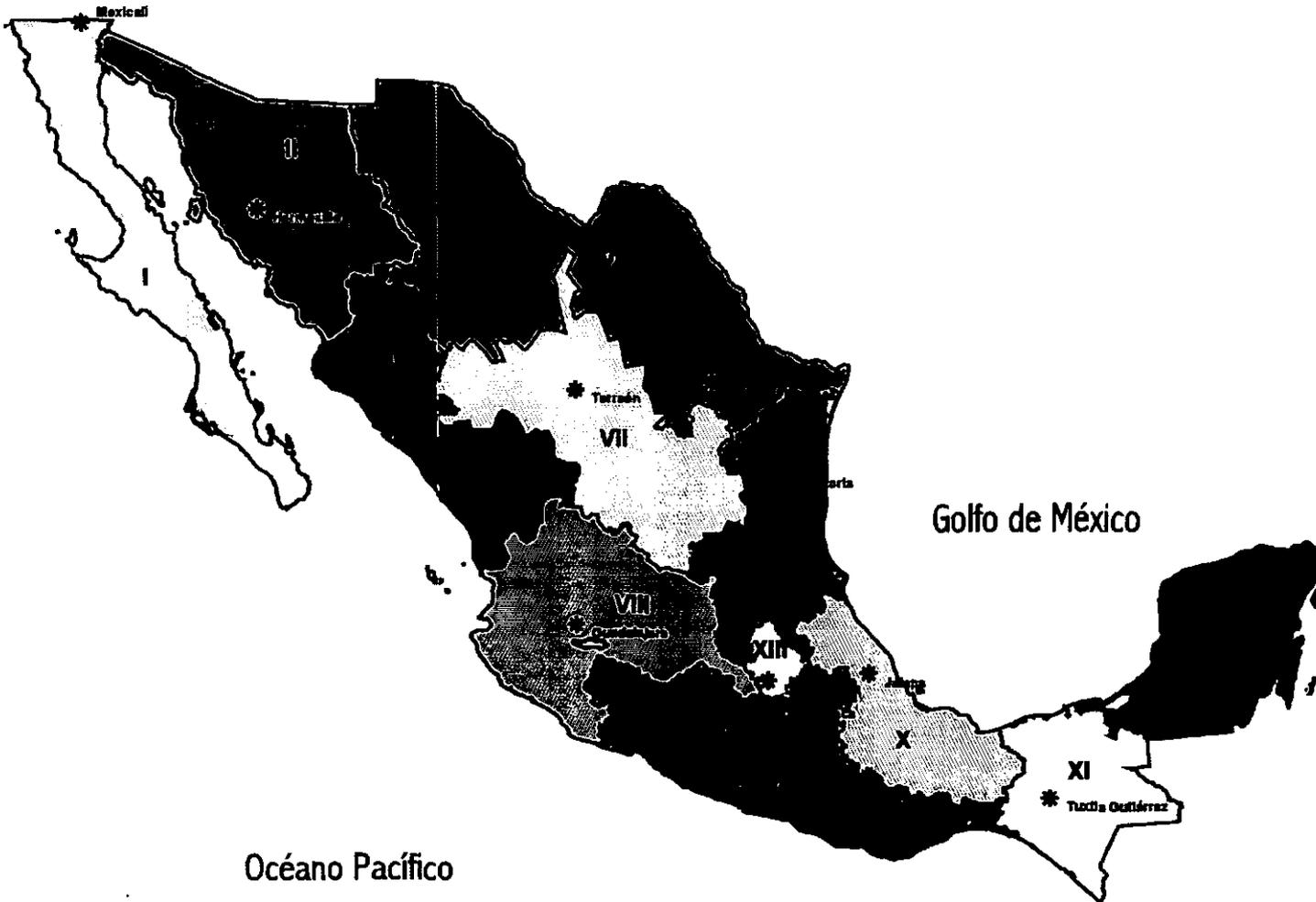


Figura 2.1.- Secciones del modelo numérico ADEHISIA.

Tabla 2.1.- Precipitación por Región Administrativa.

Región	Anual	Precipitación media mensual histórica 1941 – 1999 (mm)											
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
I Península de Baja California	181	18	14	18	4	1	1	13	26	27	16	17	26
II Noroeste	429	22	15	7	5	3	16	102	117	80	23	19	20
III Pacífico Norte	869	25	14	1	8	12	84	211	217	174	65	30	28
IV Balsas	1,099	12	7	3	2	26	165	246	251	243	88	34	22
V Pacífico Sur	1,446	10	9	12	26	104	241	237	249	318	155	57	28
VI Río Bravo	430	20	12	7	19	40	33	65	63	93	33	17	28
VII Cuencas Centrales del Norte	391	10	7	2	10	21	48	72	75	82	30	18	16
VIII Lerma-Santiago-Pacífico	729	12	7	3	14	33	129	176	159	121	49	14	12
IX Golfo Norte	886	27	20	17	39	72	130	125	135	157	72	48	44
X Golfo Centro	1,943	59	42	35	50	92	287	348	290	386	139	103	112
XI Frontera Sur	2,365	97	86	75	73	160	290	316	346	389	276	136	121
XII Península de Yucatán	1,194	44	36	33	30	90	161	175	156	208	118	57	86
XIII Valle de México	716	8	5	10	23	50	125	153	146	126	52	11	7
Nacional	772	26	18	15	19	40	103	139	137	141	73	32	29

Plano 2.1.- Regiones Administrativas en la República Mexicana.



SUBDIRECCIÓN GENERAL DE PROGRAMACIÓN

Simbología

* Sedes Regionales Administrativas

Regiones Administrativas

- Península de Baja California I
- Noroeste II
- Pacífico Norte III
- Balsas IV
- Pacífico Sur V
- Río Bravo VI
- Cimas Centrales del Norte VII
- Sierra Madre Occidental VIII
- Golfo Norte IX
- Golfo Centro X
- Fronteras Sur XI
- Península de Yucatán XII
- Valle de México XIII

Proyección: Cónica Conforme de Lambert

Fuente: Subdirección General de Programación

Procesamiento Geográfico: SIGA

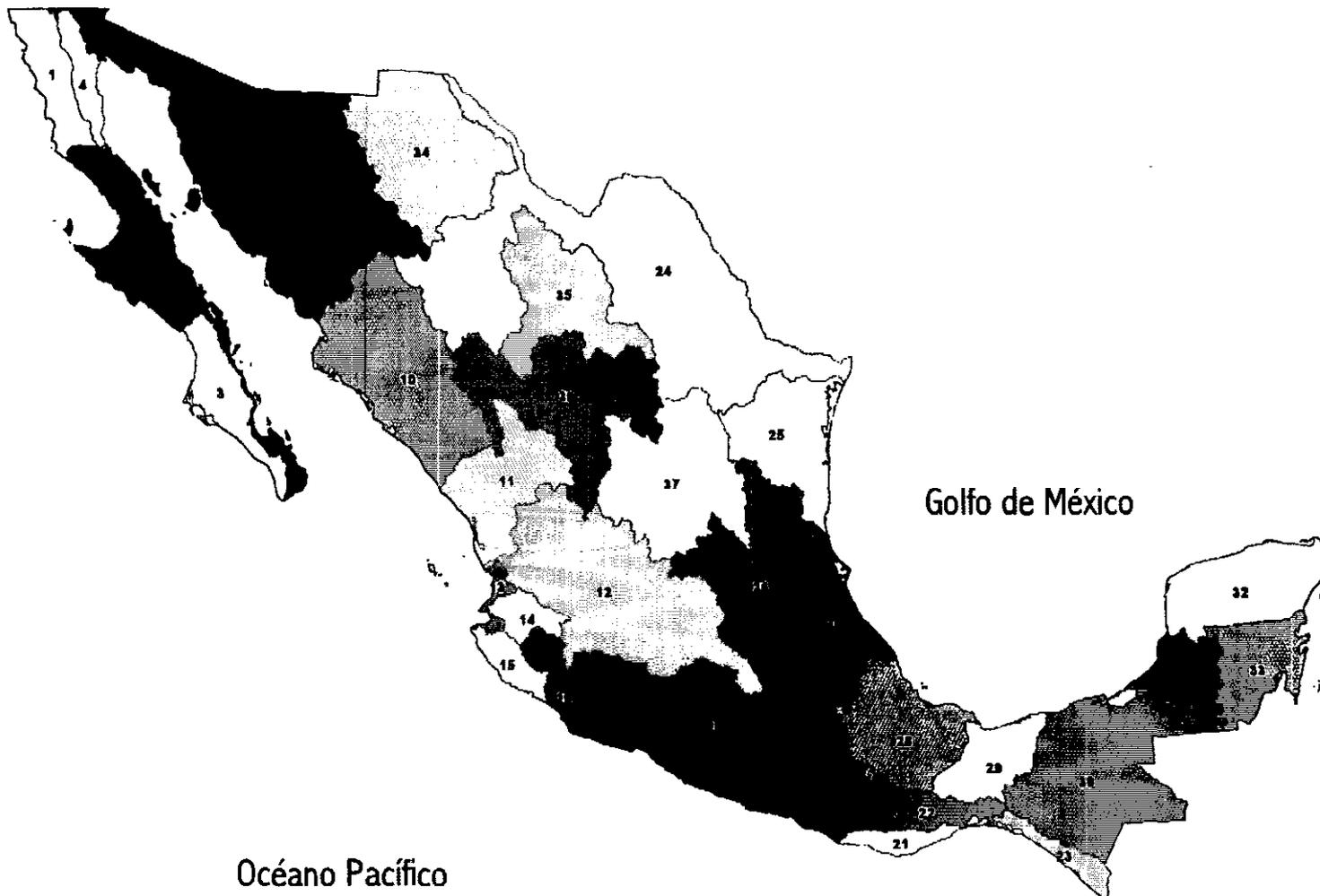
Fecha: Octubre de 2000



Plano 2.2.- Regiones Hidrológicas en la República Mexicana.



SUBDIRECCIÓN GENERAL
DE PROGRAMACION



31



Proyección: Cónica Conforme
de Lambert

Fuente: Subdirección General de Programación

Procesamiento Geográfico: SIGA

Fecha: Octubre de 2000

Plano 2.3.- Distritos de Riego en la República Mexicana.



SUBDIRECCIÓN GENERAL DE PROGRAMACION

Simbología

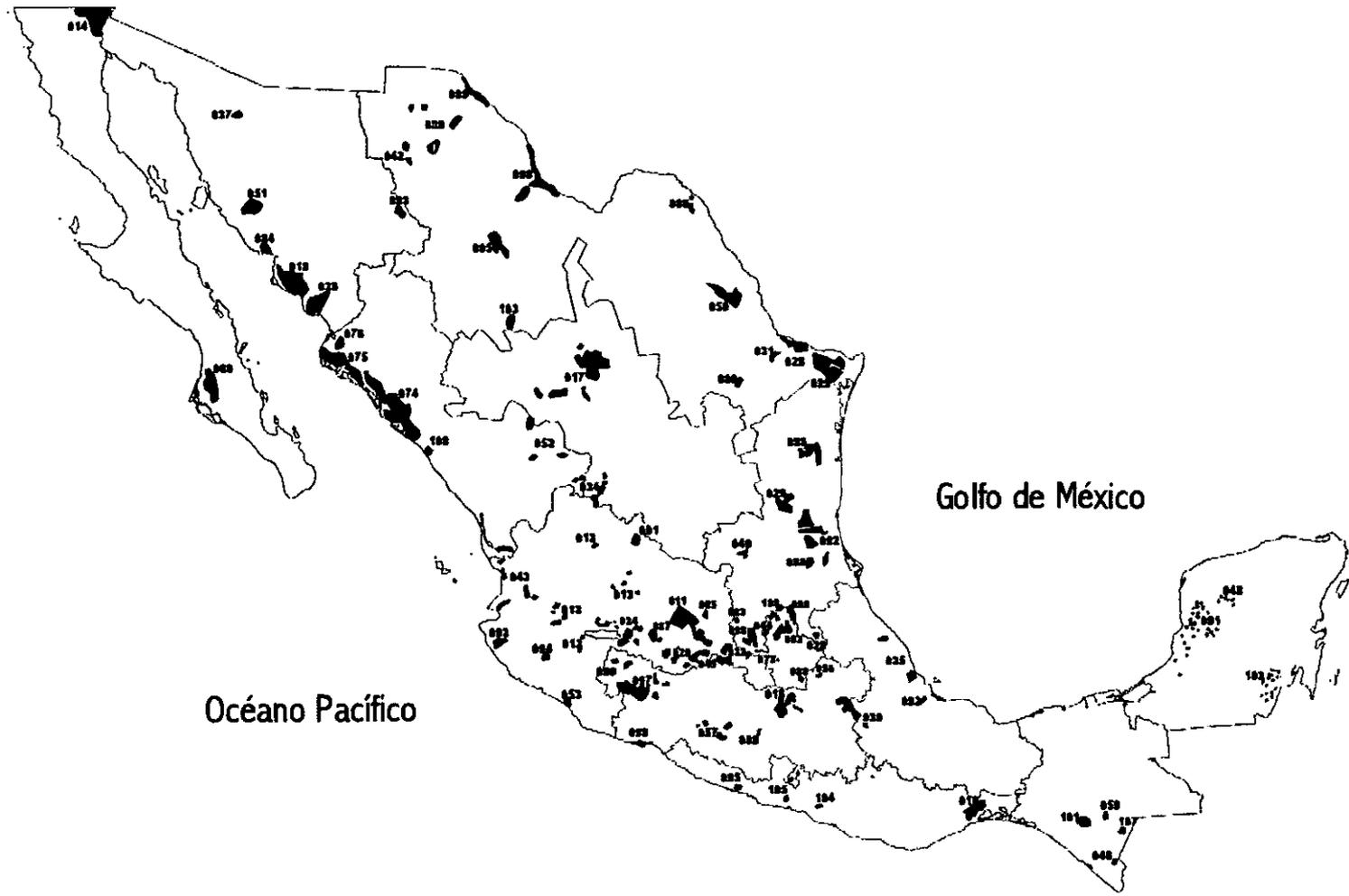
□ Regiones Administrativas

Proyección: Cónica Conforme de Lambert

Fuente: Subdirección General de Operación

Procesamiento Geográfico: SIGA

Fecha: Octubre de 2000



Plano 2.4.- Precipitación media mensual de 1941 a 1999 por Región Administrativa.



SUBDIRECCIÓN GENERAL DE PROGRAMACIÓN

Simbología

~ Regiones Administrativas

Precipitación Media Mensual 1941 a 1998

Expresada en mm.

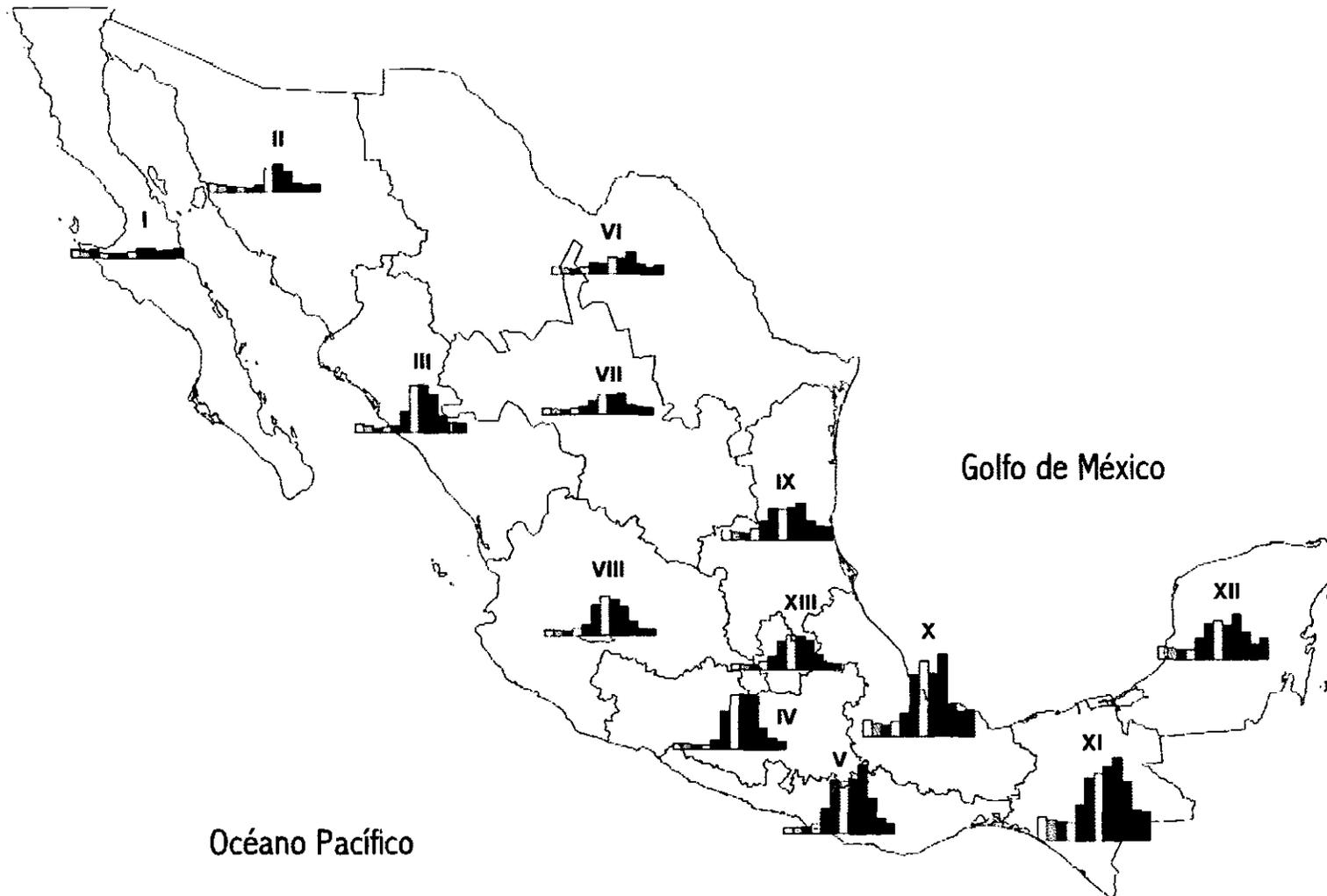


Proyección: Cónica Conforme de Lambert

Fuente: Subdirección General Técnica

Procesamiento Geográfico: SIGA

Fecha: Octubre de 2000



3.- DISPONIBILIDAD

La primera etapa de la investigación sobre disponibilidad consiste en un análisis hidrológico de la zona de estudio para determinar el volumen de agua escurrido hacia las fuentes de abastecimiento que se utilizarán para el riego agrícola durante el ciclo agrícola inmediato siguiente.

Después del análisis hidrológico se continúa con el análisis de sequías hidrológicas (escurrimiento) y meteorológicas (precipitación), para definir el período de retorno o el tiempo en el que se presentará una sequía en eventos sucesivos de una duración de interés.

En los sistemas agrícolas de México (llamados Distritos y Unidades de Riego) el ciclo agrícola anual se inicia el 1 de octubre y finaliza el 30 de septiembre del año siguiente, éste se divide en dos y hasta en tres subciclos agrícolas, los cuales son: Otoño - Invierno, Primavera y Verano. Los subciclos de Otoño – Invierno y Primavera, se producen del 1 de octubre al 31 de enero y del 15 de febrero al 31 de mayo respectivamente, y el subciclo de Verano produce del 15 de junio al 30 de septiembre. El inicio y fin de cada subciclo depende las características climáticas del área geográfica analizada, sin embargo las fechas descritas, representan a la mayoría de los casos del país.

Es claro notar que la división del ciclo agrícola está relacionada con las épocas de lluvia y estiaje, por lo tanto, esta investigación debe incluir la realización de los análisis hidrológicos y de sequía para ambas épocas.

En la estimación de la disponibilidad de agua para el sistema agrícola, se consideró al promedio histórico mensual y anual del escurrimiento como la variable de referencia, y se aplicó el procedimiento de Fernández B. y Salas J. D. (1994) para el análisis de sequías. Ambos procedimientos fueron aplicados utilizando el acervo informático que existente de las cuencas de aportación hacia las Presas Lázaro Cárdenas y Francisco Zarco, ubicadas en el estado de Durango, que a la vez abastecen al Distrito de Riego 017 "Región Lagunera" ubicado en el estado de Coahuila y Durango.

3.1.- Objetivos

- I.- Estimar el volumen de agua disponible en las Presas Lázaro Cárdenas y Francisco Zarco, para abastecer al Distrito de Riego "Región Lagunera" en el ciclo agrícola 2000–2001.
- II.- Describir el comportamiento de las sequías hidrológicas (escurrimientos hacia las presas) y meteorológicas (precipitación en el área de influencia del Distrito de Riego "Región Lagunera").

3.2.- Análisis hidrológico

3.2.1.- Generalidades

Las cuencas de las presas Lázaro Cárdenas y Francisco Zarco se ubican en el estado de Durango en la Región Hidrológica No. 36 formada por los ríos Nazas y Aguanaval. Existe una conexión entre ambas cuencas, la de aguas arriba es la cuenca de la presa Lázaro Cárdenas que se divide en cinco subcuencas y la de aguas abajo es la cuenca de la presa Francisco Zarco que se divide en tres subcuencas (ver plano 1 al final de la tesis). Para fines de estudio, se consideró una sola cuenca de aportación para cada presa, integrándose las siguientes características de cada una de ellas:

Cuadro 3.1.- Características de las cuencas en estudio.

Característica	Lázaro Cárdenas	Francisco Zarco
Area de la cuenca (km ²)	18,321	15,147
Descripción del tamaño de cuenca (Campos A., 1983)	Muy Grande (> 5000 km ²)	Muy Grande (> 5000 km ²)
Ríos y arroyos que forman a la cuenca	Río de Santiago, río de Tepehuanes, arroyo de Potrillos, río San Esteban, río del Oro, arroyo de Mantancitas, arroyo Sardinas y arroyo Grande	Río Nazas, río de San Juan, arroyo de San Luis de Cordero o Boca del Cobre y arroyo de Cuencamé
Período de registro continuo: hidrométrico y/o de funcionamiento de vaso	1929 - 1994	1947 - 1991
Volumen de agua anual máximo (Millones de m ³)	3,571.000	1,512.300
Volumen de agua anual mínimo (Millones de m ³)	264.410	10.320
Volumen de agua promedio anual (Millones de m ³)	1,242.156	233.508
Modelo de drenaje de la cuenca (Campos A., 1983)	Dendrítico Contorneado	Dendrítico
Densidad de drenaje (Campos A., 1983)	Regular	Baja

En las tablas 3.1 y 3.2 se presentan los valores de los volúmenes que ingresaron por cuenca propia a las presa Lázaro Cárdenas y Francisco Zarco respectivamente, los cuales fueron utilizados para realizar el análisis hidrológico.

3.2.2.- Disponibilidad bruta

Escurrimiento.- Utilizando la función de distribución de probabilidad normal para analizar el registro histórico anual de las dos presas, se obtiene que el promedio anual del registro histórico corresponderá al 50 % de probabilidad de ocurrencia, por otro lado, en términos hidrológicos se ha demostrado que tal valor de probabilidad de ocurrencia está relacionado a condiciones óptimas cuando se diseñan obras hidráulicas; por lo tanto, resulta viable estimar la disponibilidad de agua utilizando como información de partida el valor del promedio anual de la serie histórica.

De acuerdo con la información del cuadro 3.1, el volumen de agua que escurre por cuenca propia hacia la presa Lázaro Cárdenas es de 1,242.156 Millones de m³ y hacia la presa Francisco Zarco es de 233.208 Millones de m³, sumando ambos valores resulta un total de 1,475.664 Millones de m³.

De acuerdo con los resultados del Programa Hidráulico de Gran Visión 2001-2020 de la Región VII Cuencas Centrales del Norte, se estimó que la evaporación promedio anual en el vaso de la Presa Lázaro Cárdenas es de 140 Millones de m³ y en el vaso de la Presa Francisco Zarco es de 41 Millones de m³, de esta manera resulta un volumen efectivo de 1,294.664 Millones de m³.

Del funcionamiento de vasos reportado en los boletines hidrológicos se obtuvo que la pérdida por infiltración en el vaso de la presa Lázaro Cárdenas es de 100 Millones de m³ y en el vaso de la presa Francisco Zarco es de 53 Millones de m³, resultando así un volumen anual bruto disponible de 1,141.664 Millones de m³.

En el caso del escurrimiento, el volumen bruto disponible de 1,141.664 Millones de m³ debe ser afectado por la eficiencia total del sistema agrícola (Eficiencia Total = Eficiencia Conducción X Eficiencia Parcelaria).

3.3.- Análisis de precipitación

3.3.1.- Generalidades

El Distrito de Riego 017 "Región Lagunera" se localiza en los estados de Durango y Coahuila. La actividad agrícola es una de las principales fuentes de recursos económicos para sus habitantes, ésta se realiza en las modalidades de riego y temporal. Para el caso de la producción en temporal (conocido comúnmente como subciclo de verano) es necesario e indispensable realizar estudios que permitan proponer la lámina de agua precipitada sobre las áreas agrícolas, y conocer cual será la probable distribución en el tiempo; para prevenir el riesgo de pérdidas económicas ocasionadas por la falta de agua en el suelo.

Cuadro 3.2.- Características del área de influencia del Distrito de Riego 017 "Región Lagunera".

Característica	Distrito de Riego Región Lagunera
Area Total (Ha)	116,300 Ha
Area de Riego (Ha)	116,300 Ha
Area de Temporal (Ha)	50,000 Ha
Estaciones Climatológicas que tienen influencia sobre el Distrito de Riego	Mapimí, Tlahualilo, Agua Nueva, Francisco I. Madero, San Pedro de las Colonias, Concordia, Presa Guadalupe, Presa Coyote, Torreón, Ciudad Lerdo, Cañon Fernández y Viesca.
Período de registro de precipitación con información a nivel mensual en todas las estaciones Climatológicas.	1931 – 1990
Precipitación Media anual (mm)	181.82
Precipitación Máxima anual (mm)	347.50
Precipitación Mínima anual (mm)	61.00

En el plano 2 al final de la tesis se muestran las estaciones climatológicas que tienen influencia sobre las cuencas de aportación de escurrimiento hacia las presas Lázaro Cárdenas y Francisco Zarco, y sobre el Distrito de Riego 017 "Región Lagunera". En la tabla 3.3 se presentan los valores promedio de las láminas de agua precipitadas sobre el Distrito de Riego 017 "Región Lagunera".

Aunque no fue objeto de la tesis, esta información debe ser la base del diseño del sistema agrícola para el subciclo de verano.

Precipitación.- En este caso el valor para diseño sería la suma del promedio mensual de los meses de junio a septiembre, valor que de acuerdo con la tabla 3.3 es de 118.591 mm.

En el caso de la precipitación, la lámina de 118.591 mm deberá ser transformada a precipitación efectiva.

Tabla 3.1.- Volumen de agua que ingresó por Cuenca Propia a la Presa Lázaro Cárdenas, Millones de m³.

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1929	17.25	10.45	8.64	4.81	3.10	1.69	46.01	94.15	63.30	12.75	9.35	8.03	279.53
1930	7.38	8.19	28.94	4.34	2.00	30.07	116.01	146.74	19.15	155.91	94.64	92.73	706.10
1931	155.48	331.54	43.34	5.75	12.16	16.95	159.86	484.53	51.61	30.38	8.35	6.21	1,306.16
1932	5.62	4.40	7.29	3.23	1.16	1.02	70.38	422.38	980.24	382.57	22.34	151.85	2,052.47
1933	23.28	45.49	10.70	5.54	3.34	128.49	234.27	212.27	470.21	119.40	19.44	12.11	1,284.54
1934	9.92	8.02	6.38	3.72	4.06	5.37	158.72	94.97	96.12	24.89	9.47	9.65	431.30
1935	6.86	11.82	6.89	3.12	1.45	17.34	177.39	233.06	1,116.71	98.37	25.85	17.94	1,716.80
1936	13.80	9.47	7.85	4.86	5.41	2.54	56.99	265.52	1,409.05	195.53	35.12	23.17	2,029.31
1937	14.69	9.34	6.84	4.38	2.72	2.08	33.37	21.94	578.78	48.82	15.19	33.65	771.80
1938	26.50	10.02	5.34	2.50	1.60	41.51	834.53	331.87	1,096.24	67.44	20.97	14.14	2,452.65
1939	11.07	9.04	6.27	3.85	2.36	8.58	24.04	353.96	90.00	46.66	22.70	211.36	789.90
1940	64.91	18.10	9.10	3.93	6.72	18.73	21.78	246.72	264.72	26.36	21.66	66.49	769.24
1941	13.98	9.12	5.85	2.80	6.04	15.10	148.28	595.14	956.53	197.99	31.70	127.90	2,150.41
1942	23.35	61.50	17.96	5.74	3.32	4.23	27.52	506.58	649.55	134.43	27.83	15.77	1,477.78
1943	12.92	8.14	5.33	2.80	1.73	109.77	300.92	79.04	747.47	361.25	35.36	82.39	1,747.11
1944	28.87	33.16	36.00	9.76	3.46	8.88	38.52	256.76	1,043.29	68.83	109.07	33.79	1,668.39
1945	25.89	9.78	5.15	2.83	1.96	1.52	190.89	153.85	32.93	166.35	14.03	9.26	614.44
1946	9.55	6.60	4.85	3.97	1.59	1.21	191.10	39.35	213.00	191.50	17.22	24.05	703.98
1947	161.30	32.15	7.90	9.95	11.37	26.37	40.67	1,014.00	746.70	51.47	18.22	23.04	2,143.14
1948	9.79	13.55	17.27	11.28	5.00	30.43	88.52	119.00	260.80	44.74	17.45	13.95	631.78
1949	23.42	34.87	22.87	9.29	11.22	22.86	167.10	201.90	570.60	97.73	19.31	16.63	1,199.80
1950	60.58	22.17	13.81	14.90	8.14	34.68	135.40	200.60	85.91	24.99	9.89	9.02	620.09
1951	8.51	19.09	12.96	8.15	6.64	18.12	58.41	39.90	81.43	13.81	8.92	22.07	299.00
1952	9.18	5.11	8.93	6.03	3.42	25.41	158.50	36.48	5.96	5.50	5.38	5.51	275.40
1953	8.52	8.37	23.31	4.37	4.98	26.96	33.45	137.00	167.60	28.37	7.95	6.70	457.57
1954	20.58	6.88	30.10	4.24	3.33	41.36	103.30	254.10	70.75	72.23	9.10	5.96	621.92
1955	31.78	8.43	38.87	6.27	3.34	33.85	91.06	511.80	474.90	349.90	27.87	15.93	1,593.99
1956	8.71	32.88	44.11	21.66	13.32	54.32	40.81	50.78	119.50	10.70	7.17	7.63	411.58
1957	8.37	12.75	13.31	5.79	3.93	3.94	40.49	116.90	22.47	35.61	10.02	10.37	283.95
1958	14.45	9.22	25.40	4.62	3.31	44.36	38.63	254.40	1,122.00	645.30	20.48	10.13	2,192.30
1959	6.33	5.04	17.56	11.08	6.07	25.18	92.59	394.70	70.67	18.45	9.58	6.99	664.23
1960	116.50	12.73	10.99	13.16	4.70	11.12	181.70	316.50	243.80	35.14	13.63	10.37	970.34
1961	30.55	16.40	7.50	12.92	14.55	74.00	300.30	282.50	208.10	102.10	17.61	22.86	1,089.39
1962	11.14	9.99	12.60	8.50	7.23	5.83	48.78	37.16	46.33	56.91	11.51	8.43	264.41
1963	7.30	6.04	5.14	5.81	7.22	37.35	92.64	282.70	327.20	100.90	13.86	295.40	1,181.55
1964	16.40	10.12	13.11	11.62	12.39	60.12	62.31	254.20	493.60	130.30	14.04	9.23	1,087.44
1965	8.79	12.05	10.56	19.56	14.66	25.58	34.33	74.14	191.00	32.40	12.98	53.83	489.88
1966	23.98	17.67	11.72	13.02	11.87	22.41	23.25	676.10	874.20	81.14	10.99	7.93	1,774.28
1967	8.41	7.70	20.14	9.79	5.72	48.51	240.30	616.40	603.20	63.91	11.66	32.06	1,667.79
1968	8.17	46.59	120.20	57.32	25.45	46.30	508.90	404.90	1,950.00	118.30	16.97	13.80	3,316.90
1969	57.67	11.77	18.75	35.97	22.69	33.35	113.80	59.56	83.03	54.27	11.53	18.88	521.27
1970	38.02	21.57	46.77	39.55	37.13	65.39	132.80	238.20	575.10	157.30	15.93	14.25	1,382.01
1971	11.95	9.36	61.91	18.37	27.17	83.29	120.10	473.70	140.80	175.80	20.51	15.94	1,158.90
1972	29.77	11.92	35.01	23.57	30.53	80.86	150.70	184.40	247.60	98.32	120.20	26.08	1,038.94
1973	14.03	43.27	77.18	18.39	25.69	75.91	205.70	1,623.00	694.80	53.93	13.85	10.66	2,856.41
1974	11.49	8.18	9.91	10.30	25.22	58.32	77.43	217.40	575.00	96.75	39.25	111.70	1,240.94
1975	34.49	15.85	15.46	12.01	46.32	35.54	127.90	303.40	169.10	17.41	11.18	11.84	800.50
1976	11.84	10.86	22.63	14.50	7.72	49.76	834.60	174.30	414.50	99.59	51.39	32.01	1,723.70
1977	53.07	25.01	12.51	13.52	7.74	65.55	128.30	96.37	198.90	18.16	11.92	9.34	640.39
1978	9.93	8.65	21.86	9.88	9.92	4.84	84.20	278.51	1,305.26	208.76	22.07	12.00	1,975.88
1979	80.90	119.99	14.58	8.12	15.62	52.31	45.09	518.92	41.14	11.40	7.55	7.31	922.93
1980	8.36	7.84	8.80	8.22	3.79	7.77	7.29	210.78	659.20	185.20	34.34	20.88	1,162.45
1981	24.19	13.86	34.01	16.57	8.01	15.56	55.58	511.97	643.57	611.30	30.96	13.75	1,979.32
1982	15.23	9.86	8.58	5.86	4.78	5.22	97.19	44.49	116.80	14.65	12.29	38.00	372.96
1983	24.21	26.66	38.85	9.76	3.88	2.85	8.73	293.64	241.96	147.30	34.47	22.60	854.91
1984	30.74	39.45	5.75	9.35	4.84	146.14	827.76	597.06	109.82	38.73	12.75	45.49	1,867.87
1985	221.60	24.21	10.72	14.91	5.60	24.98	105.92	156.15	202.03	48.95	13.37	9.89	838.12
1986	7.46	11.13	6.96	13.45	5.91	42.74	423.44	253.17	1,045.20	213.43	26.30	24.52	2,073.71
1987	12.13	9.56	8.32	15.78	6.95	10.59	242.01	550.84	331.79	109.48	9.46	31.27	1,338.16
1988	14.99	9.97	6.89	12.92	2.73	24.35	662.90	559.59	151.48	23.21	8.90	18.15	1,496.07
1989	11.30	10.17	7.59	14.81	1.98	0.92	4.62	262.12	323.72	31.64	73.64	72.94	815.48
1990	50.26	16.99	6.86	9.55	5.22	1.04	269.44	1,026.45	371.42	380.77	12.58	8.25	2,158.61
1991	11.48	9.12	8.93	6.47	10.34	20.38	737.78	1,100.75	1,309.59	115.00	41.67	199.50	3,571.00
1992	198.79	17.88	36.79	53.30	16.38	13.02	30.23	167.49	104.89	20.41	13.09	13.91	686.16
1993	13.64	12.05	11.26	13.33	2.15	32.21	258.37	64.16	1,469.61	74.48	49.70	33.36	2,034.31
1994	13.35	12.48	11.29	18.51	3.90	12.07	35.82	42.61	66.23	44.42	12.06	9.75	282.49
MEDIA	31.590	22.297	19.079	11.730	9.004	31.820	169.663	315.515	458.305	113.636	23.421	36.096	1242.156
DES.V. EST.	44.202	42.336	19.287	10.501	9.093	30.634	201.846	288.250	442.478	128.431	22.397	53.467	754.241
COEFIC. ASIM.	2.953	6.380	2.971	2.684	2.117	1.646	2.263	2.182	1.225	2.439	2.836	3.079	0.874
CURTOSIS	11.812	48.539	14.864	11.618	7.888	6.357	7.815	9.593	4.134	9.954	11.797	13.410	3.726

Tabla 3.2.- Volumen de agua que ingresó por Cuenca Propia a la Presa Francisco Zarco, Millones de m³.

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1947	0.00	0.00	0.00	18.10	0.00	16.89	1.48	60.96	159.98	0.00	15.73	4.49	277.63
1948	0.00	14.69	34.70	4.24	0.00	16.28	46.15	2.79	38.53	20.11	6.84	3.09	187.41
1949	0.00	28.66	0.00	3.61	0.00	18.12	49.67	48.68	32.12	0.00	19.17	3.72	203.75
1950	0.00	12.56	0.00	28.99	0.00	19.68	16.16	27.54	6.63	0.00	0.00	0.00	113.57
1951	0.00	0.00	3.79	0.00	0.00	13.17	15.32	7.26	25.97	2.66	0.66	0.00	68.83
1952	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	10.09	0.00	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00	10.32
1953	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	0.00	5.55	96.54	109.65	7.50	0.11	0.00	219.56
1954	0.00	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	2.57	52.98	23.04	0.40	0.00	0.00	79.06
1955	0.00	0.00	0.00	1.10	0.00	0.00	0.00	54.33	11.98	19.59	0.00	9.80	96.81
1956	1.60	0.00	0.00	7.15	0.00	0.00	0.00	7.55	50.73	0.44	0.20	0.14	67.80
1957	0.11	0.00	2.50	0.00	7.55	0.00	0.00	4.40	4.38	11.24	0.10	0.00	30.28
1958	0.00	0.00	0.00	0.21	0.00	99.45	0.00	108.24	283.44	264.78	23.95	7.93	788.00
1959	2.70	0.00	0.00	16.58	0.00	0.00	23.41	81.49	17.59	3.09	1.20	0.28	146.34
1960	0.60	0.00	0.00	22.24	0.00	0.00	28.83	79.67	36.64	1.77	0.94	0.53	171.22
1961	1.54	0.74	0.00	9.97	0.00	4.63	47.21	31.68	14.70	9.43	1.65	0.63	122.19
1962	0.85	0.40	0.00	9.84	0.00	0.00	5.66	0.00	2.36	13.91	1.59	0.96	35.57
1963	1.14	0.33	0.00	3.06	2.87	1.98	16.68	28.65	38.57	2.36	0.00	0.00	95.65
1964	0.00	0.00	0.00	10.11	0.00	16.17	0.00	40.96	99.31	24.89	3.59	1.41	196.45
1965	1.64	0.00	0.00	5.97	0.00	0.00	0.00	15.79	28.38	9.47	2.11	1.23	64.58
1966	2.16	0.98	0.00	0.00	4.86	0.00	4.14	187.51	227.65	24.00	7.41	5.83	464.55
1967	4.85	2.33	1.37	0.00	0.00	4.11	41.37	98.94	93.05	9.44	6.29	0.00	261.75
1968	13.09	0.00	7.25	13.57	17.71	0.00	25.32	38.49	1,277.67	104.17	7.90	7.14	1,512.30
1969	14.61	4.30	13.80	3.19	0.00	0.00	4.16	21.28	15.63	6.27	6.64	5.89	95.76
1970	3.91	3.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	139.00	53.13	7.59	5.62	212.33
1971	4.18	1.87	0.00	8.32	0.00	0.00	0.00	114.72	34.69	57.94	9.42	7.84	238.99
1972	6.16	4.19	0.00	8.73	0.00	0.00	0.00	0.00	22.20	11.12	5.56	6.29	64.25
1973	4.29	2.72	0.00	12.66	0.00	0.00	0.00	407.85	251.70	36.75	12.68	9.20	737.85
1974	8.51	5.53	10.90	1.23	0.00	0.00	0.00	0.00	81.35	28.47	8.29	8.03	152.32
1975	8.15	4.92	0.00	2.71	0.00	0.00	24.72	47.94	7.65	2.52	4.33	7.29	110.23
1976	4.38	1.80	0.00	6.86	0.00	8.34	120.83	1.41	62.57	25.19	11.58	11.61	254.56
1977	7.18	3.27	0.00	13.53	0.00	0.00	3.83	21.10	54.73	4.33	4.65	4.61	117.22
1978	1.29	0.00	0.00	10.69	0.00	0.00	17.36	118.23	236.28	44.88	10.24	8.89	447.86
1979	8.90	4.98	0.00	0.78	0.00	0.00	0.00	73.64	8.30	3.09	3.07	5.07	107.81
1980	3.22	0.00	3.09	8.11	0.00	0.00	0.00	78.79	67.83	18.71	4.52	4.13	188.39
1981	4.93	2.71	0.00	16.80	0.00	13.42	8.22	58.46	50.50	19.71	5.97	5.99	186.72
1982	0.90	0.00	0.00	2.75	0.00	0.00	14.21	8.60	3.10	0.00	0.00	0.92	30.48
1983	3.94	1.19	0.00	4.95	0.00	0.00	0.00	77.37	26.06	9.62	2.90	2.03	128.07
1984	3.14	4.71	0.00	9.38	0.00	63.15	174.72	42.07	3.91	8.20	2.67	5.79	317.73
1985	5.15	0.34	0.00	14.79	0.00	9.39	24.06	44.06	24.80	9.23	3.84	4.10	139.76
1986	4.56	0.82	0.00	16.65	0.00	22.42	85.87	17.00	143.41	22.72	8.82	8.95	331.23
1987	6.74	3.66	0.00	20.74	46.79	0.00	23.37	84.30	71.58	24.18	2.50	3.36	287.20
1988	3.79	3.24	0.00	19.41	0.00	6.79	140.48	101.19	27.73	9.06	0.00	3.10	314.80
1989	2.29	0.00	0.00	6.08	0.00	0.00	0.00	46.73	27.07	5.76	5.62	5.87	99.41
1990	4.71	3.73	0.00	14.63	0.00	0.00	66.99	179.40	0.00	88.33	8.85	1.34	367.98
1991	2.21	1.45	0.00	4.84	0.00	0.00	200.17	0.00	64.20	68.56	14.12	7.73	363.30
MEDIA	3.276	2.649	1.721	8.058	1.778	7.647	27.522	58.196	89.080	24.156	5.406	4.018	233.508
DESV. EST.	3.461	5.017	5.769	7.294	7.461	17.823	46.822	70.396	194.716	43.497	5.480	3.375	254.997
COEFIC. ASIM.	1.425	3.763	4.755	0.800	5.453	3.950	2.418	3.072	5.436	4.237	1.393	0.317	3.355
CURTOSIS	5.464	20.116	28.505	3.278	35.056	20.832	8.795	16.559	36.236	24.897	5.400	2.136	17.578

Tabla 3.3.- Precipitación sobre el Distrito de Riego "Región Lagunera", mm.

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1931	20.39	8.48	0.00	3.16	43.45	12.39	48.00	17.51	8.75	1.08	0.25	8.24	167.68
1932	0.29	1.78	1.00	0.00	9.75	2.72	41.87	25.88	53.54	17.09	0.00	0.18	154.08
1933	0.00	8.74	0.00	0.55	2.94	55.28	28.42	25.78	28.41	20.04	0.48	0.00	164.60
1934	0.00	10.14	0.00	5.00	81.88	12.75	58.41	12.00	32.93	0.94	0.00	4.59	218.62
1935	29.42	3.98	0.00	0.00	8.04	49.28	34.09	39.58	127.43	6.09	0.03	6.59	304.49
1936	0.00	0.00	0.28	22.83	12.22	2.74	25.40	29.18	80.75	17.92	7.58	11.59	210.27
1937	1.38	1.00	0.00	8.73	22.53	6.22	19.89	17.37	71.68	5.98	11.00	27.27	191.05
1938	3.85	0.31	1.88	1.50	5.84	45.01	69.93	18.34	42.55	1.03	1.52	8.60	198.14
1939	11.30	0.00	0.97	0.94	9.59	13.13	5.57	70.51	13.02	89.80	0.00	15.11	209.84
1940	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	14.00	121.90	55.00	0.00	0.00	0.00	0.00	190.90
1941	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	32.00	13.00	22.50	0.00	0.00	0.00	0.00	67.50
1942	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	29.00	0.00	0.00	31.00	0.00	0.00	0.00	81.00
1943	23.50	0.00	2.80	3.60	10.10	24.40	22.50	1.30	28.00	50.50	8.40	1.10	178.20
1944	0.50	1.50	8.00	0.00	7.90	18.70	1.00	103.60	33.60	1.70	15.50	9.80	197.80
1945	6.30	18.70	0.00	0.90	0.00	38.90	89.60	22.00	7.00	9.60	0.10	4.50	193.60
1948	15.00	1.00	0.80	34.20	9.70	53.40	39.10	21.20	2.80	13.10	26.80	8.47	225.17
1947	14.00	0.00	0.00	0.00	8.20	78.00	11.40	79.30	81.00	11.50	0.00	0.00	283.40
1948	1.00	4.00	1.50	1.00	0.00	60.00	66.20	0.00	78.50	15.00	7.00	1.00	233.20
1949	4.80	0.80	0.00	0.20	6.30	12.70	28.70	43.80	11.30	1.20	0.00	13.70	123.30
1950	0.30	0.00	0.00	12.70	3.00	4.00	9.20	39.20	2.00	0.50	0.00	0.00	70.90
1951	0.00	0.00	10.70	0.00	4.50	5.10	6.20	18.90	37.40	19.90	6.80	1.20	110.70
1952	0.00	0.00	0.00	6.00	7.00	67.10	5.80	0.90	0.00	0.00	4.90	0.00	91.70
1953	0.00	6.20	0.00	0.00	0.00	3.90	17.00	62.80	25.00	58.50	0.30	0.00	174.70
1954	0.00	1.17	0.00	1.21	2.24	10.69	21.69	27.57	2.78	3.08	0.00	0.99	71.38
1955	14.80	0.04	0.18	0.00	5.09	25.64	21.50	27.28	5.87	20.23	6.47	0.00	128.88
1956	0.00	0.00	0.00	6.00	4.00	7.00	0.00	4.00	33.00	1.00	3.00	3.00	61.00
1957	0.00	41.00	0.00	0.00	19.00	0.00	1.00	7.00	29.00	23.00	0.00	1.00	121.00
1958	17.00	8.00	0.00	4.00	4.00	38.00	14.00	9.00	65.00	20.00	5.00	9.00	191.00
1959	0.00	1.00	0.00	7.00	2.00	7.00	58.00	35.00	4.00	22.00	3.00	1.00	140.00
1960	4.00	4.00	0.00	0.00	0.00	4.00	51.00	58.00	4.00	35.90	3.00	16.00	177.90
1961	2.80	0.00	4.00	6.10	9.00	12.50	3.60	0.00	6.00	0.00	0.50	2.50	47.00
1962	0.00	0.00	0.00	3.00	0.00	6.50	0.00	6.50	16.00	1.50	0.50	21.50	55.50
1963	1.00	0.00	0.00	0.00	50.00	48.50	15.50	17.00	18.00	11.00	4.00	4.00	187.00
1964	5.50	5.00	0.00	0.00	20.50	28.50	28.50	48.50	46.50	5.00	0.00	2.00	188.00
1965	15.00	8.00	0.00	0.00	0.00	1.50	0.00	21.50	51.50	0.00	0.00	16.50	112.00
1966	1.00	0.00	0.00	0.00	97.00	2.00	4.00	31.00	15.00	0.00	0.00	9.00	159.00
1967	15.00	0.00	18.00	5.50	2.00	13.00	14.50	51.50	29.00	24.00	0.00	5.50	178.00
1968	15.00	9.00	37.00	14.00	8.50	1.00	10.00	73.00	83.50	3.50	5.50	19.50	277.50
1969	2.00	0.00	0.00	0.00	3.00	43.50	19.00	19.00	19.00	8.00	14.00	3.00	128.50
1970	4.00	17.50	1.00	0.00	19.00	59.50	2.00	1.00	58.50	0.00	0.00	0.00	182.50
1971	0.00	0.00	0.00	0.00	1.50	49.50	60.50	85.00	32.50	115.00	0.00	3.50	347.50
1972	0.00	0.00	0.00	1.00	36.50	24.00	16.50	21.50	68.50	3.00	37.50	0.00	208.50
1973	0.00	24.00	0.00	0.00	27.00	25.00	57.50	95.50	39.00	8.00	0.00	3.00	279.00
1974	2.00	0.00	1.50	0.00	0.00	0.00	15.00	38.50	28.50	1.50	0.00	14.50	101.50
1975	0.00	0.00	0.00	0.00	20.00	0.00	75.00	12.50	4.50	6.50	0.00	28.00	146.50
1976	0.00	0.00	0.00	4.50	17.00	28.50	106.00	8.00	84.50	15.50	40.50	27.30	311.80
1977	13.50	0.00	0.00	22.50	0.00	43.50	22.00	31.00	11.00	23.50	0.00	0.00	167.00
1978	0.00	0.00	0.00	0.00	49.00	12.00	16.00	81.20	153.50	29.00	0.00	0.00	340.70
1979	1.00	0.00	0.00	2.50	16.50	94.00	22.00	23.00	0.00	0.00	5.50	3.00	187.50
1980	5.00	13.00	0.00	0.00	0.00	13.00	41.00	34.00	18.00	9.20	8.40	8.47	150.07
1981	48.50	1.50	1.00	71.50	79.00	49.00	5.50	0.00	14.00	27.50	0.00	10.50	308.00
1982	0.00	0.00	0.00	6.00	5.00	10.00	68.00	0.00	18.50	0.00	5.29	54.50	187.29
1983	12.50	0.00	3.00	0.00	51.00	22.00	4.50	51.00	21.00	3.00	10.00	0.00	178.00
1984	70.50	1.00	0.00	0.00	14.00	42.00	37.50	3.50	12.00	22.00	0.00	27.00	229.50
1985	38.13	1.15	0.25	14.05	5.40	32.71	22.87	32.28	29.00	30.40	1.71	6.48	214.44
1986	0.00	11.00	0.00	11.00	86.00	79.00	9.50	13.00	70.50	39.50	0.00	23.00	342.50
1987	31.00	9.00	0.00	16.30	57.20	0.00	75.00	19.00	77.50	3.00	3.00	0.00	291.00
1988	0.00	13.50	0.00	2.00	6.50	5.00	84.50	28.50	17.00	0.00	0.00	16.50	173.50
1989	3.00	13.50	0.00	0.00	17.00	0.00	4.00	1.00	9.00	20.00	30.50	23.50	121.50
1990	5.76	28.01	0.98	2.28	27.33	13.44	73.53	25.80	61.89	28.27	6.11	13.20	284.58
MEDIA	7.660	4.416	1.548	4.993	16.883	24.789	30.865	29.363	33.788	14.728	4.732	8.281	181.821
DESV. EST.	13.239	7.780	5.441	10.995	23.434	23.198	29.251	25.717	32.002	20.152	8.798	10.431	75.835
COEFIC. ASIM.	2.744	2.650	5.414	4.348	1.993	1.011	1.161	1.107	1.489	2.744	2.772	1.968	0.387
CURTOSIS	12.198	11.803	35.588	28.371	6.544	3.510	3.901	3.874	5.873	13.388	10.959	8.509	2.881

3.4.- Análisis de sequías

Como fue descrito al inicio de este capítulo, el análisis de las sequías permite conocer cual es el período de retorno para que se presente una secuencia de sequías con cierta duración de interés (p.e. 4, 6, 7, 9, 12 o hasta más meses consecutivos de sequía). Este dato es de utilidad para los ingenieros planeadores de los sistemas agrícolas de riego y temporal, porque con base en él, se realizará la administración de las dotaciones de agua de las fuentes de abastecimiento para riego agrícola, las cuales para el caso de esta investigación son las presas Lázaro Cárdenas y Francisco Zarco; o bien en la agricultura de temporal, se utiliza para definir las épocas en las que con alta probabilidad se presentará una sequía consecutiva de una cierta duración, mismas en las que no es conveniente sembrar porque con toda seguridad habría pérdidas económicas.

La investigación considera el análisis de las sequías hidrológicas (escurrimiento) y el análisis de las sequías meteorológicas (precipitación), aplicando el procedimiento desarrollado por Fernández B. y Salas D. (1994, 1996, 1997 y 1998).

3.4.1.- Sequía hidrológica mensual (escurrimiento)

Desde 1994 hasta la fecha Fernández B. y Salas D., aplican una metodología para calcular el período de retorno y el riesgo de sequías hidrológicas mensuales adaptando el procedimiento de Schwager (1983, cita de los autores). Fernández y Salas (1994) explican que con este procedimiento puede calcularse el riesgo de ocurrencia de la sequía en forma exacta, y que tiene ventajas sobre la propuesta de Feller (1968, cita de los autores), ya que en esta última, los valores obtenidos del riesgo son una aproximación a la solución exacta.

Bajo tales condiciones, se decidió que en esta investigación se aplicaría la metodología desarrollada por Fernández y Salas (1994) para el análisis de las sequías.

Recientemente Fernández y Salas (1997) retoman la idea del período de retorno para ser aplicada a diferentes tipos de eventos hidrológicos como crecidas, caudales mínimos y sequías en series independientes y dependientes estacionarias, ellos proponen para el caso de eventos complejos estimar el período de retorno, T , con un procedimiento numérico para calcular el valor esperado del tiempo, o número de intentos, hasta la primera ocurrencia del evento como:

$$T = E(N) = \sum_{n=1}^{\infty} n f_n \quad (3.4.1)$$

donde $n = 1, 2, 3, \dots$ representa los intervalos de tiempo, medidos en las mismas unidades que T , y f_n corresponde a la función introducida por Schwager (1983, cita de los autores), para calcular las probabilidades de ocurrencia de sucesiones, definidas como:

f_n , Probabilidad de que el evento en cuestión ocurra en el instante n por primera vez.

Para eventos definidos como una sucesión, como es el caso de las sequías, se supone que la ocurrencia se verifica en el instante en que se completa. Además se define la función S_n como:

S_n , Probabilidad de que el evento ocurra en el instante n o antes.

Ambas funciones están relacionadas ya que es evidente que:

$$S_n = S_{n-1} + f_n \quad (3.4.2)$$

Para cada caso particular, el período de retorno se encuentra mediante un algoritmo que permite calcular los valores de f_n y S_n para $n = 1, 2, 3, \dots$. Es conveniente notar que si L es la vida útil de un sistema cuya condición de diseño es el evento en cuestión, entonces S_L corresponde al riesgo de falla de ese sistema.

Sucesiones en procesos con dependencia tipo Markov

Muchos de los procesos hidrológicos típicos presentan una estructura de dependencia temporal. Entre ellos se puede mencionar los gastos medios anuales en la mayoría de los ríos, los gastos mínimos, niveles de lagos, niveles de acuíferos y similares. Para representar esta estructura de dependencia se han propuesto varios modelos estocásticos, entre ellos los del tipo Markov, con dos estados, éxito y fracaso, ocurrencia o no ocurrencia de un evento determinado (crecidas o no crecidas, años secos o húmedos, bajo o sobre un nivel crítico, etc.). La estructura de dependencia temporal en estos procesos se refleja en los elementos de la matriz de probabilidades de transición para cada período $\tau = 1, 2, 3, \dots, \omega$ entre estados para dos intentos sucesivos, dados por:

$$P_{SS;\tau} = \text{Pr ob}(X_\tau = S | X_{\tau-1} = S) \quad (3.4.3a)$$

$$P_{SF;\tau} = \text{Pr ob}(X_\tau = F | X_{\tau-1} = S) = 1 - P_{SS;\tau} \quad (3.4.3b)$$

$$P_{FS;\tau} = \text{Pr ob}(X_\tau = S | X_{\tau-1} = F) \quad (3.4.3c)$$

$$P_{FF;\tau} = \text{Pr ob}(X_\tau = F | X_{\tau-1} = F) = 1 - P_{FS;\tau} \quad (3.4.3d)$$

Si se desconoce el valor en el instante anterior, lo que habitualmente ocurre en el primer intervalo cuando comienza la serie, la probabilidad de observar una falla corresponde a la distribución libre marginal de la variable, que se designa como:

$$P_{F;\tau} = \text{Pr ob}(X_\tau = F) = 1 - P_{S;\tau} \quad (3.4.4)$$

El algoritmo de cálculo de f_n requiere la probabilidad de que en el instante n se complete una sucesión cuyos últimos l valores coinciden con los últimos l valores del conjunto R . Para incorporar la dependencia en el desarrollo del algoritmo de cálculo, esta probabilidad auxiliar considera el estado de la variable inmediatamente antes de comenzar la sucesión y se designa como $q_n(H;l)$, que corresponde a la probabilidad compuesta de observar H , en el período $n-l$ y completar l fallas seguidas exactamente en el instante n . En el caso binario H puede ser la situación normal, S , o de falla, F , de manera que:

$$q_n(H;l) = \text{Pr ob}(X_{n-l} = H; X_{n-l+1} = F; X_{n-l+2} = F; \dots; X_{n-1} = F; X_n = F) \quad (3.4.5)$$

Para variables temporalmente dependientes la función $q_n(H;l)$ se calcula a partir de las probabilidades de transición de cambiar de un estado a otro; $p_{H;l;n}$ que son también función del tiempo o del período τ al cual corresponde n , de manera que en el caso de series periódicas estacionarias se requiere evaluar esta función solamente para cada período $\tau=1, 2, \dots, \omega$ según las expresiones 3.4.3s.

El algoritmo recursivo requiere evaluar la función $q_n(H;l)$ para dos casos: cuando se observan l períodos consecutivos de falla a partir del instante inicial, en el cual se desconoce la historia anterior, $q_n(0;l)$ y para $H=S$, que corresponde a observar un período normal seguido por l valores con falla. Para ambos casos esta probabilidad compuesta es:

$$q_r(0;l) = P_{F;\tau-1+1} \prod_{i=2}^l P_{FF;\tau-1+i} \quad \text{para } H = 0 \text{ y } l = 1, 2, \dots, r \quad (3.4.6)$$

$$q_r(S;l) = P_{SF;\tau-1+1} \prod_{i=2}^l P_{FF;\tau-1+i} \quad \text{para } H = S \text{ y } l = 1, 2, \dots, r \quad (3.4.7)$$

Finalmente para facilitar los cálculos del algoritmo recursivo para f_n , es necesario emplear otra función auxiliar, designada como $u_{H;n}$. Esta función corresponde a la probabilidad de que no se complete el evento, es decir que no ocurra en ninguna de las observaciones hasta n una sucesión de r valores consecutivos de falla, y que en ese instante se observe el valor H .

Las condiciones iniciales del problema son las siguientes:

$$f_n = 0 \quad \text{para } n = 1, 2, \dots, r-1 \quad (3.4.8)$$

$$f_n = q_r(0; r) \quad \text{para } n = r \quad (3.4.9)$$

$$u_{F;1} = p_{F;1} \quad \text{para } n = 1 \quad (3.4.10)$$

$$u_{S;1} = p_{S;1} = 1 - p_{F;1} \quad \text{para } n = 1 \quad (3.4.11)$$

Con la ayuda de las funciones auxiliares ya definidas, las relaciones recursivas para los intervalos de tiempo sucesivos son:

$$u_{F;n} = u_{F;n-1} * p_{FF;n} + u_{S;n-1} * p_{SF;n} - f_n \quad \text{para } n > 1 \quad (3.4.12)$$

$$u_{S;n} = u_{F;n-1} * (1 - p_{FF;n}) + u_{S;n-1} * (1 - p_{SF;n}) p_{SF;n} \quad \text{para } n > 1 \quad (3.4.13)$$

En el caso de las variables binarias la probabilidad de que ocurra la sucesión de r fallas por primera vez en el instante n es igual a la probabilidad de que no haya ocurrido hasta el instante $(n-r)$, que en este instante se observe una condición normal, esto es exactamente la función $u_{S;n-r}$, y que se complete una sucesión de r fallas exactamente en n . Esto es simplemente:

$$f_n = u_{S;n-r} q_n(S; r) \quad \text{para } n > r \quad (3.4.14)$$

Además para completar el algoritmo se considera:

$$S_n = 1 - u_{F;n} - u_{S;n} \quad (3.4.15)$$

Todas las funciones o variables involucradas en los cálculos que son periódicas se evalúan reemplazando n por el valor de τ que le corresponda al intervalo en cuestión.

Para calcular el período de retorno de la serie se utiliza la ecuación (3.4.1) y para obtener el riesgo de falla en L intervalos de tiempo de observación de la serie binaria, basta con encontrar el valor de S_L con (3.4.15). Debe hacerse notar que tanto f_n como $u_{H;n}$ y por lo tanto el período de retorno y el registro, dependen del instante inicial cuando se trabaja con variables no estacionarias.

Sequias hidrológicas mensuales

Interesa estimar el período de retorno de eventos consistentes en varios meses seguidos con caudales escasos en las cuencas de aportación de escurrimiento hacia las presas Lázaro Cárdenas y Francisco Zarco ubicadas en el estado de Durango, en México. La cuenca de la presa Lázaro Cárdenas se caracteriza por presentar altas precipitaciones durante los meses de junio a septiembre y bajas precipitaciones desde octubre hasta los últimos días de mayo, y la cuenca de la presa Francisco Zarco se caracteriza por la escasez de precipitación durante casi todo el año, por lo tanto el volumen de escurrimiento por cuenca propia es bajo en comparación con la época de estiaje en la cuenca de la presa Lázaro Cárdenas (ver las tablas 3.1 y 3.2).

Es común designar como sequías hidrológicas a la escasez de agua en los cauces superficiales. Existen diversos sistemas de aprovechamiento de recursos hídricos para los cuales las demandas varían enormemente de un mes a otro, y no se puede considerar la oferta y la demanda con base en los valores medios anuales. Así sucede con la agricultura de riego en muchas regiones, con las demandas de agua potable y con los caudales ecológicos, todos casos en los cuales la escasez durante algunos meses, o incluso semanas o días, puede causar importantes consecuencias adversas sobre el sistema. En las regiones semiáridas como es el caso de ambas cuencas, los volúmenes de agua escurridos presentan una gran variabilidad mensual, que en ocasiones llegan a ser escasos o nulos. En las presas Lázaro Cárdenas y Francisco Zarco, la disponibilidad de recursos superficiales en los ríos que forman a sus cuencas, es la principal fuente de agua para la agricultura que se practica en el Distrito de Riego 017 "Región Lagunera"; por lo tanto es importante tener estimaciones cuantitativas de la probabilidad y el riesgo de ocurrencia de períodos de escasez de varios meses consecutivos en los cuales la disponibilidad en régimen natural no alcanza a cubrir los denominados volúmenes de umbral que escurren finalmente hacia ambas presas. La tabla 3.4 muestra las principales características de las cuencas de aportación hacia las presas.

Para ambas cuencas se calculó la probabilidad de que en un mes cualquiera, el volumen escurrido sea inferior al volumen de umbral, y los resultados se presentan en la tabla 3.5 para ambas cuencas. En ella queda manifiesto la periodicidad que presentan los volúmenes escurridos mensualmente hacia las presas.

Para definir las probabilidades de la tabla 3.5, se ajustó una función de distribución de probabilidades para Valores Extremos Tipo I (Gumbel).

Tabla 3.4.- Características de las cuencas de aportación de escurrimientos.

Mes	Presa Lázaro Cárdenas			Presa Francisco Zarco		
	Volumen en Millones de m ³			Volumen en Millones de m ³		
	Prom.	Desv. Est.	Umbral	Prom.	Desv. Est.	Umbral
Enero	31.590	44.202	26.852	3.276	3.461	2.785
Febrero	22.297	42.336	18.952	2.649	5.017	2.251
Marzo	19.079	19.287	16.217	1.721	5.769	1.463
Abril	11.730	10.501	9.971	8.058	7.294	6.849
Mayo	9.004	9.093	7.653	1.778	7.461	1.511
Junio	31.820	30.634	27.047	7.647	17.823	6.500
Julio	169.663	201.846	144.213	27.522	46.822	23.394
Agosto	315.515	288.250	268.188	58.196	70.396	49.467
Septiembre	458.305	442.478	389.559	89.080	194.716	75.718
Octubre	113.636	128.431	96.591	24.156	43.497	20.532
Noviembre	23.421	22.397	19.908	5.406	5.480	4.595
Diciembre	36.096	53.467	30.682	4.018	3.375	3.416

Tabla 3.5.- Probabilidad de que en un año el volumen mensual sea menor que el volumen establecido como umbral, $p_{F,r}$

Mes	Lázaro Cárdenas	Francisco Zarco
	Probabilidad	Probabilidad
Enero	0.525	0.510
Febrero	0.537	0.537
Marzo	0.507	0.552
Abril	0.498	0.499
Mayo	0.507	0.555
Junio	0.504	0.543
Julio	0.517	0.533
Agosto	0.500	0.518
Septiembre	0.504	0.542
Octubre	0.514	0.535
Noviembre	0.503	0.507
Diciembre	0.528	0.494

Como propuesta para la investigación interesa analizar todos aquellos eventos que se caracterizan por una sucesión de r meses seguidos durante los cuales el volumen escurrido es inferior al volumen de umbral (Vol_{Um}) definido para ambas cuencas. Esto es $R = (Vol_1 < Vol_{Um}, Vol_2 < Vol_{Um}, \dots, Vol_r < Vol_{Um})$, donde Vol_i , corresponde al volumen escurrido mensual de cada uno de los r meses considerados. Se supone que la serie se inicia en enero. En las tablas 3.8 y 3.9 se resumen los resultados para las cuencas de las presas Lázaro Cárdenas y Francisco Zarco respectivamente.

La función $q_r(0,l)$ para $\tau = 1, 2, \dots, 12$ y $l = 1, 2, \dots, 6$, así como las probabilidades marginales y de transición en relación a la situación de escasez definida por el volumen de umbral se muestran en la tabla 3.8 y 3.9.

Los valores de la probabilidad marginal de falla, $p_{F,\tau}$, como ya se mencionó, se calcularon por medio de la función Gumbel y las probabilidades condicionadas, $p_{FF,\tau}$ y $p_{SF,\tau}$, se estimaron contando las veces que se produjo una transición de falla a falla o normal a falla en dos meses consecutivos, empleando las relaciones:

$$p_{FF,\tau} = \frac{N_{FF,\tau}}{N_{F,\tau}} \quad (3.4.16)$$

$$p_{SF,\tau} = \frac{N_{SF,\tau}}{N_{S,\tau}} \quad (3.4.17)$$

donde $N_{FF,\tau}$ es la cantidad de veces que se produjo una transición desde una situación de falla en el mes $\tau-1$ a otra también de falla en el mes τ . $N_{F,\tau}$ es la cantidad total de fallas en el mes τ . Similantemente se define $N_{SF,\tau}$ (ver resumen en tablas 3.6 y 3.7).

Todas las probabilidades de las tablas 3.8 y 3.9 cambian de un mes a otro, reflejándose claramente la periodicidad de las series. Además, como una demostración empírica de que los procesos son dependientes, los valores de las tres probabilidades, $p_{F,\tau}$, $p_{FF,\tau}$ y $p_{SF,\tau}$, son claramente diferentes para cada mes. Los valores de la función $q_r(0,l)$ para $\tau = 1, 2, \dots, 12$ y $l = 1, 2, \dots, 6$ se calculan sencillamente con las probabilidades estimadas en las mismas tablas 3.8 y 3.9. Así por ejemplo $q_5(0,4)$ de la tabla 3.8, es el resultado de:

$$q_5(0,4) = (0.7619) * (0.6842) * (0.8095) * (0.5371) = 0.2267$$

Las tablas 3.10 y 3.11 presentan el resumen de los valores $q_r(S,l)$, obtenidos con el mismo procedimiento aplicado para las tablas 3.8 y 3.9; los cuales se requirieron para el cálculo f_n de ambas cuencas.

Empleando el algoritmo recursivo para el caso de series periódicas dependientes se calcularon las funciones $u_{S,n}$, $u_{F,n}$, f_n y S_n para $n = 12*(\nu-1) + \tau$ con $\tau = 1, 2, \dots, 12$ y $\nu = 1, 2, \dots$, hasta asegurar la convergencia en la estimación del período de retorno.

En la tabla 3.12 se presenta el período de retorno calculado para las diferentes duraciones de interés y en la tabla 3.13 se presenta el riesgo de que se presente una sequía en un período de 2 años en cada cuenca.

La representación gráfica de los resultados se presenta en las gráficas 3.1, 3.2, 3.3 y 3.4, las cuales son semejantes con las obtenidas por Fernández y Vergara (1998). Lo que significa que los resultados obtenidos para esta investigación son adecuados y por lo tanto aceptables.

Tabla 3.6.- Valores $N_{FF,r}$, $N_{F,r}$, $N_{SF,r}$, $N_{S,r}$ para la cuenca de la Presa Lázaro Cárdenas.

Mes	$N_{FF,r}$	$N_{F,r}$	$N_{SF,r}$	$N_{S,r}$
Enero	37	48	11	18
Febrero	40	49	9	17
Marzo	34	42	8	24
Abril	26	38	12	28
Mayo	32	42	10	24
Junio	29	38	9	28
Julio	25	41	16	25
Agosto	27	39	12	27
Septiembre	24	38	14	28
Octubre	28	36	8	30
Noviembre	30	41	11	25
Diciembre	34	47	13	19

Tabla 3.7.- Valores $N_{FF,r}$, $N_{F,r}$, $N_{SF,r}$, $N_{S,r}$ para la cuenca de la Presa Francisco Zarco.

Mes	$N_{FF,r}$	$N_{F,r}$	$N_{SF,r}$	$N_{S,r}$
Enero	17	24	7	42
Febrero	21	28	7	38
Marzo	24	38	14	28
Abril	17	22	5	44
Mayo	19	40	21	26
Junio	26	31	5	35
Julio	24	31	7	35
Agosto	16	26	10	40
Septiembre	21	33	12	33
Octubre	28	31	3	35
Noviembre	21	23	2	43
Diciembre	18	21	3	45

Tabla 3.8.- Valores de las probabilidades marginales, $p_{F,\tau}$, de transición, $p_{FF,\tau}$ y de la función $q_{\tau}(0,l)$ para $l=1, 2, \dots, 6$ en la cuenca de la Presa Lázaro Cárdenas.

Mes τ	$p_{F,\tau}$	$p_{FF,\tau}$	$q_{\tau}(0,l)$					
			$l=1$	$l=2$	$l=3$	$l=4$	$l=5$	$l=6$
Enero (1)	0.5250	0.7708	0.5250	0.4067	0.2806	0.2097	0.1599	0.1002
Febrero (2)	0.5371	0.8163	0.5371	0.4286	0.3320	0.2291	0.1712	0.1305
Marzo (3)	0.5070	0.8095	0.5070	0.4348	0.3469	0.2687	0.1854	0.1386
Abril (4)	0.4985	0.6842	0.4985	0.3469	0.2975	0.2374	0.1839	0.1269
Mayo (5)	0.5069	0.7619	0.5069	0.3798	0.2643	0.2267	0.1809	0.1401
Junio (6)	0.5037	0.7632	0.5037	0.3868	0.2898	0.2017	0.1730	0.1380
Julio (7)	0.5168	0.6098	0.5168	0.3071	0.2359	0.1767	0.1230	0.1055
Agosto (8)	0.5000	0.6923	0.5000	0.3578	0.2126	0.1633	0.1224	0.0851
Septiembre (9)	0.5039	0.6316	0.5039	0.3158	0.2260	0.1343	0.1031	0.0773
Octubre (10)	0.5139	0.7778	0.5139	0.3919	0.2456	0.1757	0.1044	0.0802
Noviembre (11)	0.5032	0.7317	0.5032	0.3760	0.2868	0.1797	0.1286	0.0764
Diciembre (12)	0.5276	0.7234	0.5276	0.3640	0.2720	0.2074	0.1300	0.0930

Tabla 3.9.- Valores de las probabilidades marginales, $p_{F,\tau}$, de transición, $p_{FF,\tau}$ y de la función $q_{\tau}(0,l)$ para $l=1, 2, \dots, 6$ en la cuenca de la Presa Francisco Zarco.

Mes τ	$p_{F,\tau}$	$p_{FF,\tau}$	$q_{\tau}(0,l)$					
			$l=1$	$l=2$	$l=3$	$l=4$	$l=5$	$l=6$
Enero (1)	0.5098	0.7083	0.5098	0.3496	0.3079	0.2979	0.2722	0.1656
Febrero (2)	0.5371	0.7500	0.5371	0.3823	0.2622	0.2309	0.2234	0.2042
Marzo (3)	0.5517	0.6316	0.5517	0.3392	0.2415	0.1656	0.1459	0.1411
Abril (4)	0.4993	0.7727	0.4993	0.4263	0.2621	0.1866	0.1280	0.1127
Mayo (5)	0.5555	0.4750	0.5555	0.2372	0.2025	0.1245	0.0886	0.0608
Junio (6)	0.5434	0.8387	0.5434	0.4659	0.1989	0.1698	0.1044	0.0743
Julio (7)	0.5332	0.7667	0.5332	0.4166	0.3572	0.1525	0.1302	0.0801
Agosto (8)	0.5177	0.6154	0.5177	0.3281	0.2564	0.2198	0.0938	0.0801
Septiembre (9)	0.5416	0.6364	0.5416	0.3294	0.2088	0.1631	0.1399	0.0597
Octubre (10)	0.5353	0.9032	0.5353	0.4892	0.2976	0.1886	0.1474	0.1263
Noviembre (11)	0.5072	0.9167	0.5072	0.4907	0.4484	0.2728	0.1729	0.1351
Diciembre (12)	0.4936	0.8571	0.4936	0.4347	0.4206	0.3843	0.2338	0.1482

Tabla 3.10.- Valores de las probabilidades de transición, $p_{SF,\tau}$, $p_{FF,\tau}$ y de la función $q_r(S,l)$ para $l=1, 2, \dots, 6$ en la cuenca de la Presa Lázaro Cárdenas.

Mes τ	$p_{F,\tau}$	$p_{FF,\tau}$	$q_r(0,l)$					
			$l=1$	$l=2$	$l=3$	$l=4$	$l=5$	$l=6$
Enero (1)	0.6111	0.7708	0.6111	0.5274	0.2454	0.1088	0.1587	0.0891
Febrero (2)	0.5294	0.8163	0.5294	0.4989	0.4305	0.2003	0.0888	0.1295
Marzo (3)	0.3333	0.8095	0.3333	0.4286	0.4038	0.3485	0.1621	0.0719
Abril (4)	0.4286	0.6842	0.4286	0.2281	0.2932	0.2763	0.2385	0.1109
Mayo (5)	0.4167	0.7619	0.4167	0.3265	0.1738	0.2234	0.2105	0.1817
Junio (6)	0.3214	0.7632	0.3214	0.3180	0.2492	0.1326	0.1705	0.1607
Julio (7)	0.6400	0.6098	0.6400	0.1960	0.1939	0.1519	0.0809	0.1040
Agosto (8)	0.4444	0.6923	0.4444	0.4431	0.1357	0.1342	0.1052	0.0560
Septiembre (9)	0.5000	0.6316	0.5000	0.2807	0.2798	0.0857	0.0848	0.0664
Octubre (10)	0.2667	0.7778	0.2667	0.3889	0.2183	0.2177	0.0667	0.0659
Noviembre (11)	0.4400	0.7317	0.4400	0.1951	0.2846	0.1597	0.1593	0.0488
Diciembre (12)	0.6842	0.7234	0.6842	0.3183	0.1412	0.2058	0.1156	0.1152

Tabla 3.11.- Valores de las probabilidades de transición, $p_{SF,\tau}$, $p_{FF,\tau}$ y de la función $q_r(S,l)$ para $l=1, 2, \dots, 6$ en la cuenca de la Presa Francisco Zarco.

Mes τ	$p_{F,\tau}$	$p_{FF,\tau}$	$q_r(0,l)$					
			$l=1$	$l=2$	$l=3$	$l=4$	$l=5$	$l=6$
Enero (1)	0.3333	0.7083	0.3333	0.0885	0.0578	0.1193	0.5027	0.1684
Febrero (2)	0.4118	0.7500	0.4118	0.2500	0.0664	0.0434	0.0894	0.3770
Marzo (3)	2.0000	0.6316	2.0000	0.2601	0.1579	0.0419	0.0274	0.0565
Abril (4)	0.2174	0.7727	0.2174	1.5455	0.2010	0.1220	0.0324	0.0212
Mayo (5)	4.2000	0.4750	4.2000	0.1033	0.7341	0.0955	0.0580	0.0154
Junio (6)	0.3571	0.8387	0.3571	3.5226	0.0866	0.6157	0.0801	0.0486
Julio (7)	0.4667	0.7667	0.4667	0.2738	2.7006	0.0664	0.4720	0.0614
Agosto (8)	0.5263	0.6154	0.5263	0.2872	0.1685	1.6619	0.0409	0.2905
Septiembre (9)	1.0000	0.6364	1.0000	0.3349	0.1828	0.1072	1.0576	0.0260
Octubre (10)	0.2143	0.9032	0.2143	0.9032	0.3025	0.1651	0.0968	0.9552
Noviembre (11)	0.0952	0.9167	0.0952	0.1964	0.8280	0.2773	0.1513	0.0888
Diciembre (12)	0.1250	0.8571	0.1250	0.0816	0.1684	0.7097	0.2377	0.1297

Tabla 3.12.- Período de Retorno* (meses) de sucesiones de r meses seguidos con volúmenes de ingreso inferiores al volumen de umbral.

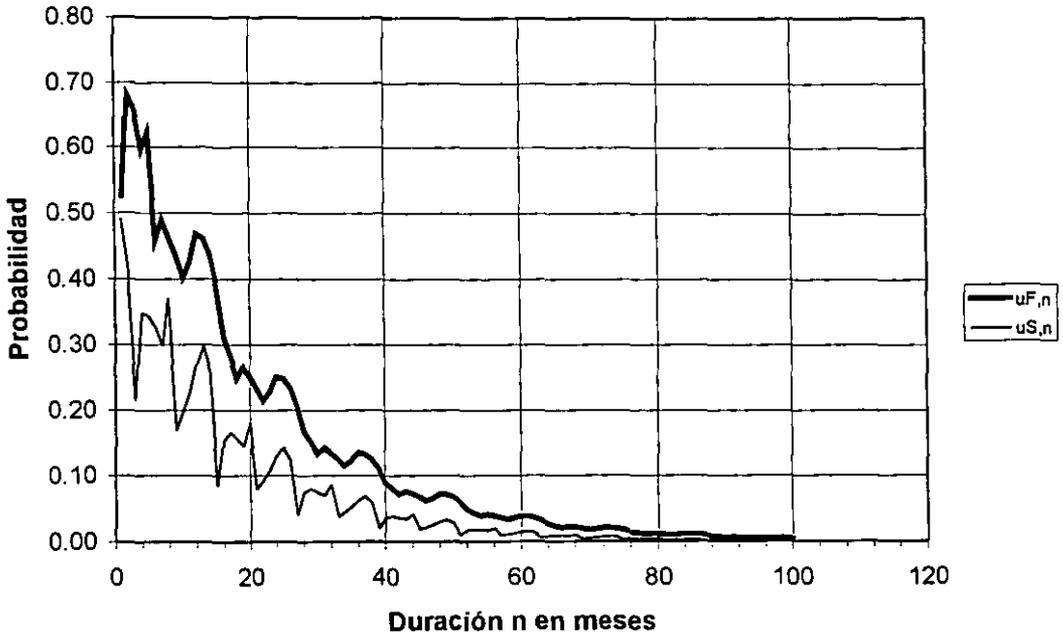
Duración de la sequía, meses	Lázaro Cárdenas	Francisco zarco
	Período de Retorno en meses	Período de Retorno en meses
1	No definido	No definido
2	4.00	3.56
3	6.86	6.94
4	11.09	10.29
5	16.45	15.93
6	23.85	21.68

Tabla 3.13.- Riesgo de tener una sucesión de r meses seguidos con volúmenes de escurrimiento inferiores al volumen de umbral en un período de 2 años (24 meses).

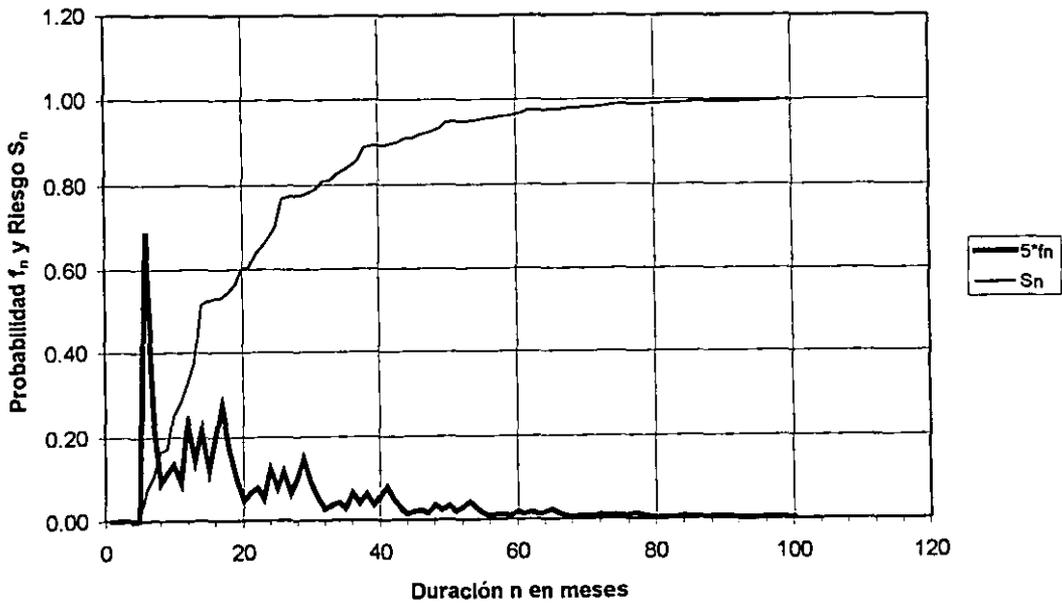
Duración de la sequía, meses	Lázaro Cárdenas	Francisco zarco
	Período de Retorno en meses	Período de Retorno en meses
1	1	1
2	0.9997	1
3	0.9873	0.9953
4	0.9250	0.9699
5	0.7943	0.8196
6	0.6350	0.6759

* Número de meses que el evento tarda en repetirse.

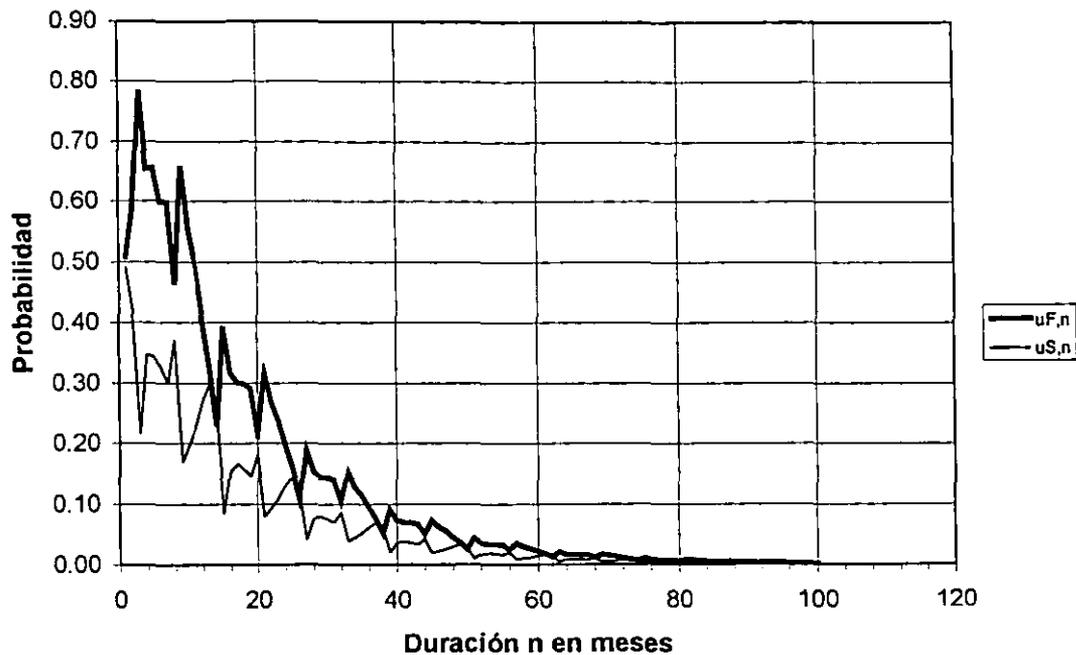
Gráfica 3.1.- Probabilidades $u_{F,n}$ y $u_{S,n}$ vs Duración n , con $r = 6$ en la cuenca de la Presa Lázaro Cárdenas



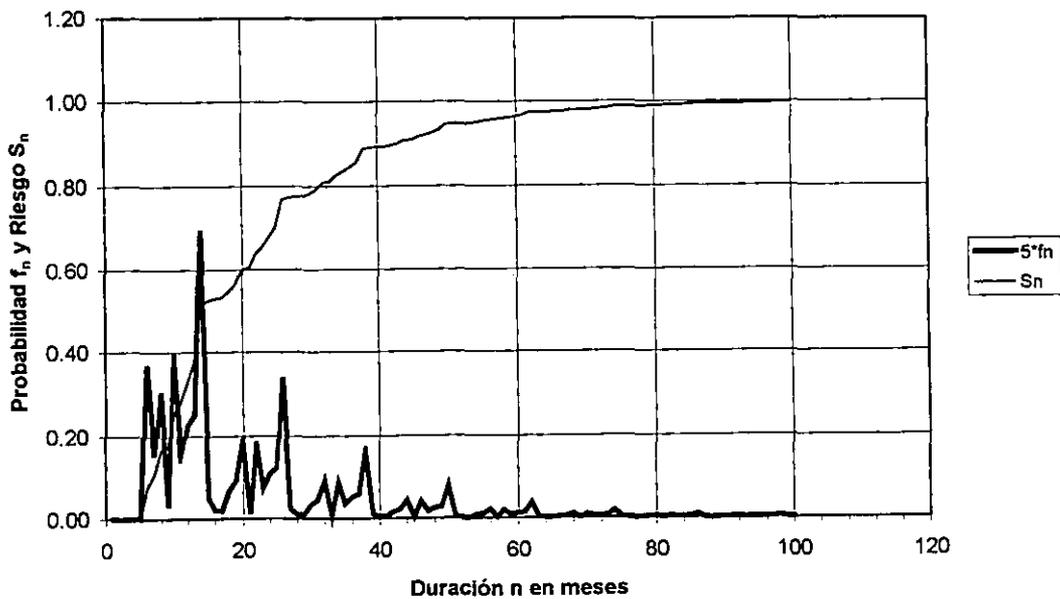
Gráfica 3.2.- Probabilidad f_n y Riesgo S_n de sequías con $r = 6$ en la cuenca de la Presa Lázaro Cárdenas



Gráfica 3.3.- Probabilidades $u_{F,n}$ y $u_{S,n}$ vs Duración n , con $r = 6$ en la cuenca de la Presa Francisco Zarco



Gráfica 3.4.- Probabilidad f_n y Riesgo S_n de sequías con $r = 6$ en la cuenca de la Presa Francisco Zarco



3.5.- Sequía meteorológica mensual (precipitación)

Aplicando el criterio de Anderson (Salas, 1983) se demostró que la precipitación media en el área de influencia del Distrito de Riego 017 "Región Lagunera" puede considerarse como una serie de tiempo independiente, por lo que en este caso el análisis de sequías se realizó considerando las sucesiones en intentos independientes tipo Bernoulli.

Se dice que ocurre una sucesión de intentos independientes tipo Bernoulli cuando los eventos que se observan son independientes y la probabilidad de ocurrencia del evento crítico en cada intento, p , permanece constante. En este caso se supone que el evento de interés se define como una secuencia de resultados simples ininterrumpidos los cuales deben ocurrir durante un determinado número de intentos consecutivos para que el evento crítico se complete. Por ejemplo Yevjevich (1967) propuso usar la teoría de las sucesiones para el estudio de las sequías, según la cual un déficit de agua se define cuando $X < x_0$, y una sequía corresponde a una sucesión de varios períodos consecutivos con déficit. Si el proceso estocástico que representa la oferta de agua al sistema, X , es estacionario se acepta que $p = \text{Probabilidad}(X < x_0)$ es constante. Para que la serie cronológica de este tipo de eventos pueda ser considerada como un proceso de renovación es conveniente considerar los tiempos de llegada desde el fin de una sucesión hasta el fin de la siguiente.

De acuerdo a la metodología desarrollada por Fernández y Salas (1994), para analizar las sequías en este tipo de series de tiempo también puede utilizarse el procedimiento de Schwager (1983) con las siguientes consideraciones:

Para calcular el período de retorno se utiliza la misma fórmula (3.4.1), con las modificaciones descritas en lo subsecuente.

f_n = Probabilidad que el evento analizado ocurra primero que el instante n .

En adición, la función S_n se define como:

S_n = Probabilidad de que el evento ocurra antes del instante n .

n = es el número de intentos para que tiene la serie de tiempo p.e. si se tiene una serie de tiempo de 30 años y el período que se analiza es mensual, n será = $12 \cdot 30 = 3,600$.

Así, se tendrá que el análisis debe realizarse desde $\tau = 1, 2, \dots, n$ en el cual los valores de X_1, X_2, \dots, X_n se obtienen de los valores del período ω analizado. Estas series pueden ser descritas también como $\{X_{\nu, \tau}\}$, donde $\nu = 1, 2, \dots, N$, para el número de años, y $\tau = 1, 2, \dots, \omega$ denota el período analizado.

$q_n(l)$ = Probabilidad de que en cualquier instante n la sucesión se complete por medio de los últimos l valores que satisfacen la condición de los últimos l valores de la función $R (R_1, R_2, \dots, R_l)$, esto es:

$q_n(l) = \text{Prob.}(X_n \text{ coincide con } R_n, X_{n-1} \text{ coincide con } R_{n-1}, \dots, X_{n-l} \text{ coincide con } R_{n-l})$

Si la serie X se obtuvo de las variables estadísticamente independientes y si en la sucesión definida el evento de interés indica el valor mínimo que separa al estado normal de las sequías a cada elemento $R(P_1, P_2, P_3, \dots, P_l)$, la función anterior puede ser calculada como:

$$q_n(l) = \text{Prob}(X_n \leq P_r) * \text{Prob}(X_{n-1} \leq P_{r-1}) * \dots * \text{Prob}(X_{n-l+1} \leq P_{r-l+1}) \quad (3.5.1)$$

En el caso de situaciones periódicas, la condición inicial es:

$$f_n = S_n = 0 \quad (3.5.2)$$

$$f_n = S_n = q_n(l) \quad (3.5.3)$$

$$S_n = S_{n-1} + f_n \quad (3.5.4)$$

La probabilidad de que la sucesión de longitud r ocurra por primera vez en el instante n corresponde a la probabilidad de una sucesión de longitud r en n , esto es, $q_n(r)$, lo anterior se complementa consideración que el evento no ha sucedido ninguna vez antes de ellos.

$$f_n = q_n(r) * \left[1 - S_{n-r} - \sum_{i=1}^{r-1} \frac{f_{n-i}}{q_{n-i}(r-i)} \right] \quad (3.5.5)$$

donde $q_n(r)$ y $q_{n-i}(r-i)$ se calculan con la expresión (3.5.1).

En forma semejante al análisis de sequías hidrológicas, en las tablas 3.14, 3.15, 3.16, 3.17, 3.18, 3.19 y 3.20, se presenta el resumen de las características definidas para el Distrito de Riego 017 "Región Lagunera"; así como su representación visual en las gráficas 3.5 y 3.6.

Con los resultados obtenidos tanto del análisis de sequías Hidrológicas como del análisis de las sequías Meteorológicas, es factible definir las estrategias de combate y prevención de sequías en el Sistema Agrícola Distrito de Riego 017 "Región Lagunera".

Tabla 3.14.- Características estadísticas de la precipitación en el Distrito de Riego 017 "Región Lagunera".

Mes	Precipitación promedio, mm		
	Prom.	Desv. Est.	Umbral
Enero	7.660	13.239	6.511
Febrero	4.416	7.760	3.754
Marzo	1.546	5.441	1.314
Abril	4.993	10.995	4.244
Mayo	16.883	23.434	14.351
Junio	24.769	23.199	21.054
Julio	30.665	29.251	26.065
Agosto	29.363	25.717	24.958
Septiembre	33.788	32.002	28.720
Octubre	14.726	20.152	12.517
Noviembre	4.732	8.798	4.022
Diciembre	8.281	10.431	7.039

Tabla 3.15.- Probabilidad de que en un año la precipitación mensual sea menor que la precipitación establecida como umbral, $p_{F,r}$.

Mes	Probabilidad
Enero	0.534
Febrero	0.534
Marzo	0.553
Abril	0.542
Mayo	0.525
Junio	0.502
Julio	0.503
Agosto	0.497
Septiembre	0.503
Octubre	0.524
Noviembre	0.536
Diciembre	0.520

Tabla 3.16.- Valores $N_{FF,r}$, $N_{F,r}$, $N_{SF,r}$, $N_{S,r}$ para el Distrito de Riego 017 "Región Lagunera".

Mes	$N_{FF,r}$	$N_{F,r}$	$N_{SF,r}$	$N_{S,r}$
Enero	28	43	15	17
Febrero	28	39	11	21
Marzo	31	50	19	10
Abril	35	42	7	18
Mayo	27	39	12	21
Junio	22	32	10	28
Julio	19	36	17	24
Agosto	20	31	11	29
Septiembre	17	35	18	25
Octubre	20	35	15	25
Noviembre	25	40	15	20
Diciembre	28	47	9	23

Tabla 3.17.- Valores de las probabilidades marginales, $p_{F,\tau}$ de transición, $p_{FF,\tau}$ y de la función $q_r(0,l)$ para $l=1, 2, \dots, 6$ en el Distrito de Riego 017 "Región Lagunera".

Mes τ	$p_{F,\tau}$	$p_{FF,\tau}$	$q_r(0,l)$					
			$l=1$	$l=2$	$l=3$	$l=4$	$l=5$	$l=6$
Enero (1)	0.5338	0.6512	0.5338	0.3385	0.2643	0.1614	0.0884	0.0437
Febrero (2)	0.5344	0.7179	0.5344	0.3832	0.2430	0.1898	0.1159	0.0635
Marzo (3)	0.5526	0.6200	0.5526	0.3313	0.2376	0.1507	0.1177	0.0718
Abril (4)	0.5418	0.8333	0.5418	0.4605	0.2761	0.1980	0.1256	0.0981
Mayo (5)	0.5246	0.7000	0.5246	0.3793	0.3223	0.1933	0.1386	0.0879
Junio (6)	0.5018	0.6875	0.5018	0.3607	0.2607	0.2216	0.1329	0.0953
Julio (7)	0.5030	0.5278	0.5030	0.2648	0.1904	0.1376	0.1170	0.0701
Agosto (8)	0.4968	0.6452	0.4968	0.3245	0.1709	0.1228	0.0888	0.0755
Septiembre (9)	0.5026	0.5000	0.5026	0.2484	0.1623	0.0854	0.0614	0.0444
Octubre (10)	0.5240	0.5714	0.5240	0.2872	0.1419	0.0927	0.0488	0.0351
Noviembre (11)	0.5364	0.6250	0.5364	0.3275	0.1795	0.0887	0.0580	0.0305
Diciembre (12)	0.5198	0.7568	0.5198	0.4059	0.2478	0.1358	0.0671	0.0439

Tabla 3.18.- Valores de las probabilidades de transición, $p_{SF,\tau}$, $p_{FF,\tau}$ y de la función $q_r(S,l)$ para $l=1, 2, \dots, 6$ en el Distrito de Riego 017 "Región Lagunera".

Mes τ	$p_{F,\tau}$	$p_{FF,\tau}$	$q_r(0,l)$					
			$l=1$	$l=2$	$l=3$	$l=4$	$l=5$	$l=6$
Enero (1)	0.8824	0.6512	0.8824	0.2548	0.3696	0.1848	0.1006	0.0334
Febrero (2)	0.5238	0.7179	0.5238	0.6335	0.1829	0.2653	0.1327	0.0722
Marzo (3)	1.9000	0.6200	1.9000	0.3248	0.3928	0.1134	0.1645	0.0823
Abril (4)	0.3889	0.8333	0.3889	1.5833	0.2706	0.3273	0.0945	0.1371
Mayo (5)	0.6000	0.7000	0.6000	0.2722	1.1083	0.1894	0.2291	0.0662
Junio (6)	0.3571	0.6875	0.3571	0.4125	0.1872	0.7620	0.1302	0.1575
Julio (7)	0.7083	0.5278	0.7083	0.1885	0.2177	0.0988	0.4022	0.0687
Agosto (8)	0.3793	0.6452	0.3793	0.4570	0.1216	0.1405	0.0637	0.2595
Septiembre (9)	0.5714	0.5000	0.5714	0.1897	0.2285	0.0608	0.0702	0.0319
Octubre (10)	0.6000	0.5714	0.6000	0.3265	0.1084	0.1306	0.0347	0.0401
Noviembre (11)	0.7500	0.6250	0.7500	0.3750	0.2041	0.0677	0.0816	0.0217
Diciembre (12)	0.3913	0.7568	0.3913	0.5676	0.2838	0.1544	0.0513	0.0618

Tabla 3.19.- Período de retorno* (meses) de sucesiones de r meses seguidos con precipitaciones inferiores a la precipitación de umbral en el Distrito de Riego 017 "Región Lagunera de México".

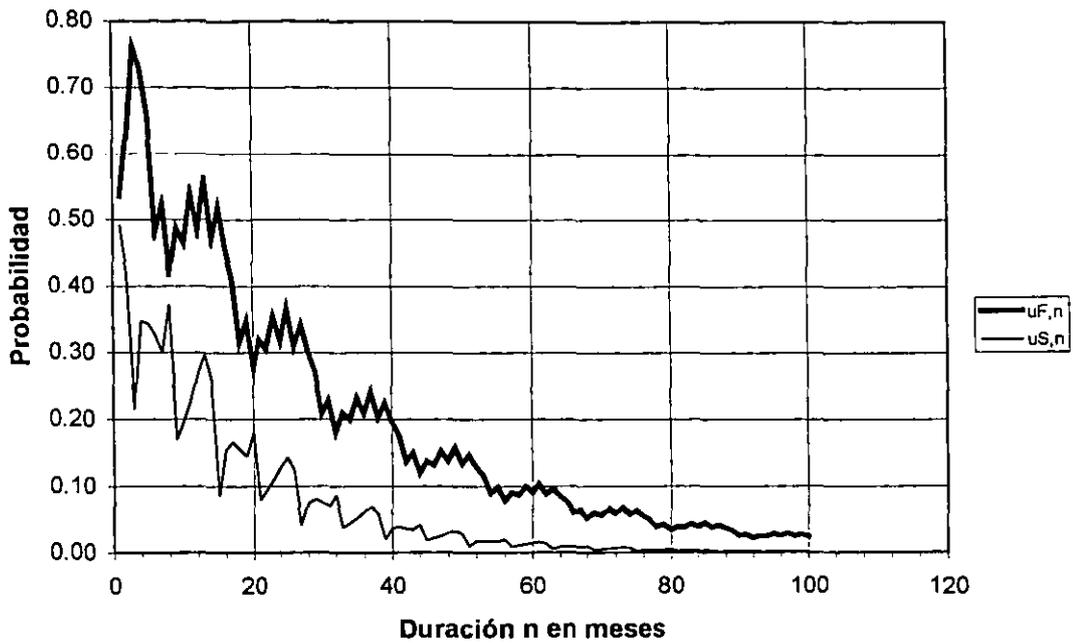
Duración de la sequía, meses	Período de Retorno en meses
1	No definido
2	3.68
3	7.44
4	12.88
5	21.02
6	32.88

Tabla 3.20.- Riesgo de tener una sucesión de r meses seguidos con precipitaciones inferiores a la precipitación de umbral en un periodo de 2 años (24 meses).

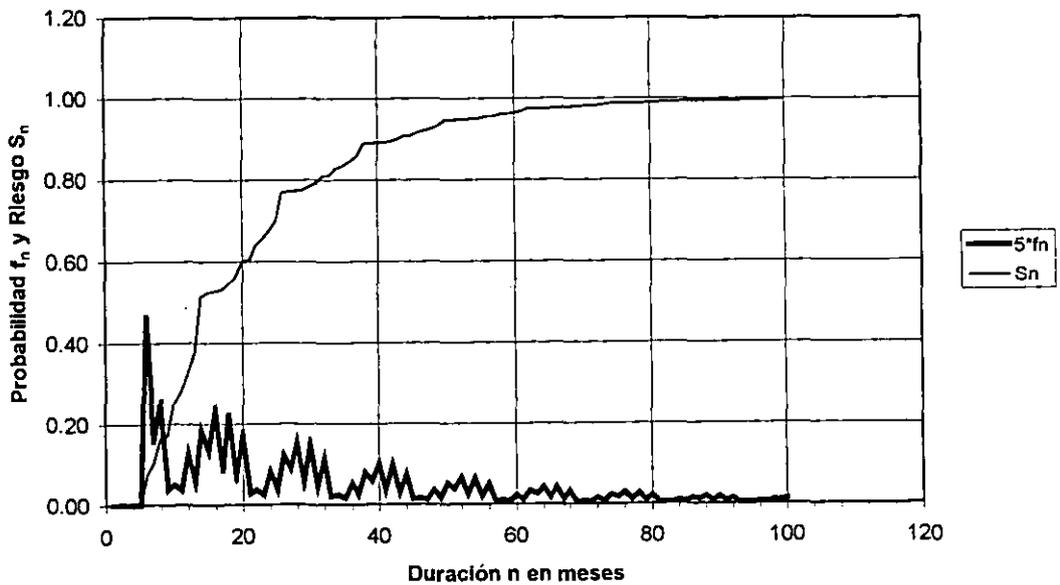
Duración de la sequía, meses	Período de Retorno en meses
1	1
2	1
3	0.9810
4	0.8810
5	0.6778
6	0.4923

* Número de meses que el evento tarda en repetirse.

Gráfica 3.5.- Probabilidades $u_{F,n}$ y $u_{S,n}$ vs Duración n , con $r = 6$ en el Distrito de Riego 017 "Región Lagunera"



Gráfica 3.6.- Probabilidad f_n y Riesgo S_n de sequías con $r = 6$ en el Distrito de Riego 017 "Región Lagunera"



3.6.- Discusión de resultados

Análisis hidrológico

El volumen de 1,141.664 Millones de m³ que resultó como disponibilidad bruta para abastecer al distrito de riego, deberá ser afectado por la eficiencia total del sistema para obtener el volumen neto que teóricamente recibirán los cultivos.

Después de obtener el valor del volumen neto, debe calcularse una lámina media para toda la superficie de riego, la cual tendrá que ser comparada con la lámina ponderada óptima que resulte como requerimiento de los cultivos.

La división de la lámina neta disponible entre la lámina ponderada óptima corresponderá al grado de déficit para el que se realiza el diseño del sistema agrícola.

Análisis de precipitación

La transformación de la precipitación total para el subciclo de verano estimada en 118.591 mm, en precipitación efectiva para el suelo y los cultivos, resulta insuficiente para satisfacer el requerimiento total de cualquier cultivo, por lo tanto, es lógico encontrar que durante este subciclo únicamente se establecen pastos.

Análisis de sequías hidrológicas

El período de retorno de una sequía con duraciones desde 1 hasta 6 meses consecutivos (tabla 3.12), está asociado a una alta probabilidad de ocurrencia o riesgo, como quedó definido en la tabla 3.13. Se observa que los períodos de retorno calculados para ambas cuencas son muy próximos, lo que confirma la homogeneidad regional en el escurrimiento hidrológico de la zona.

El período de retorno de una sequía hidrológica de 6 meses consecutivos, es corto en ambas cuencas 23.85 meses y 21.68 meses, esto significa que el riesgo de que estas se presenten en la zona de estudio es muy alto. Los resultados obtenidos constituyen el mejor sustento para decidir que deben explotarse cultivos de alto rendimiento, que requieran una pequeña lámina de agua para alcanzar su madurez fisiológica y una producción adecuada; así como para programar acciones contra dichas sequías en el Sistema Agrícola Distrito de Riego 017 "Región Lagunera".

La representación gráfica de las sequías hidrológicas con 6 meses de duración (gráficas 3.2 y 3.4) muestra que el riesgo tiene una probabilidad cercana a 1, a partir de los 60 meses, esto es, que cada 5 años se tiene una sequía con duración consecutiva de 6 meses.

Análisis de sequías meteorológicas

El período de retorno de una sequía con duraciones desde 1 hasta 6 meses consecutivos (tabla 3.19) en el caso de la precipitación, también está asociado a una alta probabilidad de ocurrencia o riesgo como quedó definido en la tabla 3.20.

Sin embargo, el período de retorno de una sequía meteorológica de 6 meses consecutivos, es mayor en comparación con los casos de las sequías hidrológicas, lo que significa que la estimación de la precipitación para el ciclo 2000-2001 es adecuada, porque no necesariamente la presencia de una sequía hidrológica implica la presencia de una sequía meteorológica.

La representación gráfica de las sequías meteorológicas con 6 meses de duración (gráfica 3.6) muestra que el riesgo tiene una probabilidad cercana a 1 a partir de los 80 meses, esto es, que cada 6 años con 10 meses, se tendrá una sequía con duración consecutiva de 6 meses.

3.7.- Conclusiones

- Se estima que el volumen disponible bruto para abastecer al Distrito de Riego 017 "Región Lagunera" es de 1,141.475 Millones de m³.
- Se estima que la lámina de agua precipitada sobre el Distrito de Riego 017 "Región Lagunera", durante la época de estiaje (Octubre-Mayo) será del orden de 63.23 mm.
- Se estima que la lámina de agua precipitada sobre el Distrito de Riego 017 "Región Lagunera", durante la época de lluvias (Junio-Septiembre) será del orden de 118.591 mm.
- El período de retorno de las sequías hidrológicas con duraciones hasta de 6 meses consecutivos, tiene un alto riesgo a partir de los 3 años.
- Los dos objetivos planteados para este capítulo, fueron alcanzados satisfactoriamente.

4.- EVAPOTRANSPIRACION

La evapotranspiración expresada como una lámina de agua en unidades de longitud (mm, cm o m), se refiere a la cantidad de agua que los cultivos consumen durante el período de tiempo en el cual están establecidos en el suelo; es decir, es la lámina de agua que requieren para alcanzar la madurez en sus diferentes etapas fisiológicas, esto es, desde que son sembrados, hasta que son cosechados.

Se sabe que el rendimiento de un cultivo es función de la cantidad de agua que le sea suministrada, y de la oportunidad con que se realice dicho suministro. Expresado lo anterior, es obvio inferir que para desarrollar esta investigación doctoral, se requiere el conocimiento de la lámina óptima que demandarán los cultivos en el área de estudio (Distrito de Riego 017 "Región Lagunera").

4.1.- Objetivos

- I.- Elegir entre la gran variedad de los procedimientos que se han desarrollado y difundido para el cálculo de la evapotranspiración, aquel que represente mayores ventajas para su aplicación con el acervo informático real que existe en la República Mexicana.
- II.- Describir con detalle la metodología elegida.
- III.- Aplicar la metodología en el Módulo IV Tlahualilo del Distrito de Riego 017 "Región Lagunera".

4.2.- Antecedentes

Doorenbos J. y Pruitt W. O. (1976), exponen que el clima de una región, es uno de los factores importantes que determinan el volumen de agua utilizado por los cultivos, para llevar a cabo el proceso de evapotranspiración, y al igual que las características del propio cultivo, el medio local, las condiciones de suelo y humedad, los fertilizantes, las enfermedades, plagas, prácticas agrícolas y de riego, así como otros factores, influyen en el crecimiento y rendimiento de ellos.

Actualmente se utilizan diversos métodos para predecir la evapotranspiración a partir de variables climáticas, debido a la dificultad para obtener mediciones directas y exactas en condiciones reales. La mayoría de las fórmulas de predicción recurren a una diferenciación entre los elementos del clima y el cultivo.

Aguilera y Martínez (1990), describen una clasificación general de los métodos para el cálculo de la evapotranspiración, en la que establece lo siguiente:

- a).- **Métodos directos.** Se caracterizan por tener elevados costos de inversión, además de presentar una mayor dificultad en la obtención de resultados. Son aplicables para zonas donde se tiene una agricultura establecida, proporcionan valores muy apegados a la realidad y sirven a la vez para ajustar los parámetros de los métodos empíricos. Los métodos son: Gravimétrico, Lisímetro, Evaporímetro de Thornthwaite y Atmómetros.
- b).- **Métodos indirectos.** Utilizan modelos empíricos que requieren información comúnmente registrada de las variables climatológicas, además de que el costo económico que representan es insignificante. Estos se basan en principios fundamentados, los cuales en términos generales, y de acuerdo con los factores que consideran, pueden agruparse según Días (1977, cita de los autores) en métodos: basados en dispositivos evaporimétricos y los basados en datos climatológicos.

En esta investigación se tomó especial interés por los métodos indirectos, los cuales utilizan un valor de referencia ET_0 , definido como la "Evapotranspiración de una superficie extensa de gramíneas (pasto) verdes de 8 a 15 cm de altura, uniforme, de crecimiento continuo, que cubren totalmente la superficie del suelo y al que no le falta agua".

Doorenbos y Kassam (1980) explican que son cuatro (4) los métodos que utilizan el valor de la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_0), los que comúnmente se utilizan para el cálculo del valor de la variable, para otros cultivos.

Cuadro 4.1.- Métodos para el cálculo de la ET_0 y sus variables requeridas.

Método	Variables Utilizadas						
	Temp.	Humedad	Viento	Insolación	Radiación	Evaporación	C. Loc.
Temperatura	□	Δ	Δ	Δ			Δ
Radiación	□	Δ	Δ	□	(□)		Δ
Penman-Monteith	□	□	□	□	(□)		Δ
Tanque de Evaporación		Δ	Δ			□	□

□ datos medidos; Δ datos estimados; (□) datos medidos cuando puede disponerse de ellos, pero no son indispensables.

El más preciso y completo es el de Penman-Monteith (cita de los autores), y como expuso Allen (1990, referencia b), este método requiere datos climáticos como temperatura, humedad del aire, velocidad del viento y radiación solar. Si existen datos del clima suficientemente precisos, el método puede utilizarse para cálculos diarios de valores de ET_0 .

Un segundo método es el de la radiación, tal como lo presentan Doorenbos y Pruitt (1976), el cual requiere información sobre la radiación solar y temperatura del aire para calcular la evapotranspiración del pasto como cultivo de referencia. Cuando hay datos suficientemente precisos, el método se puede aplicar con confianza para calcular valores medios de evapotranspiración, en periodos de cinco días. Cuando se calcula ET_0 para un día específico, el método de la radiación no es tan confiable como el de Penman-Monteith (cita de los autores).

El tercer método es el de temperatura, basado en el de FAO-Blaney y Criddle, desarrollado por Doorenbos y Pruitt (1976). Este Método se basa en datos de temperatura actual obtenidas como promedios de varios años de observación. Se ha visto que puede proporcionar aceptables estimaciones de promedios de ET_0 en periodos de cinco días. Como el método de la radiación, el de temperatura es menos preciso que el de Penman-Monteith (cita de los autores) para la estimación de ET_0 para un solo día.

Finalmente, el último método, relaciona la ET_0 con la tasa de evaporación medida en un tanque tipo "A". El método de evaporación del tanque se basa en los procedimientos de Doorenbos y Pruitt (1976) para ajustarlo a las condiciones locales de humedad, viento y condiciones de distancia mínima necesaria para

evitar perturbaciones en las mediciones de las variables. Debido a las condiciones de almacenamiento de energía por los evaporímetros, este método se recomienda para hacer estimaciones de valores promedio en períodos de 10 días de ET_o .

4.3.- Selección y aplicación del método para estimar la ET_o del cultivo de referencia

La selección del método más adecuado para calcular la evapotranspiración del cultivo de referencia depende de:

- Tipo, precisión y duración de los datos de clima disponibles.
- Patrones naturales de la evapotranspiración durante el año.
- Uso que se dará a las estimaciones de la evapotranspiración.

El tipo, calidad y períodos de tiempo en que se dispone de los datos climáticos, interviene considerablemente en la selección de un método para la estimación de la ET_o . Algunas aplicaciones para el manejo del riego, requieren de datos en tiempo real, mientras que para el diseño y consideraciones sobre los derechos de agua, se requieren estimaciones a nivel histórico sobre el uso de agua por diferentes patrones de cultivo. Por lo tanto, el período de tiempo para el cual existe información disponible de clima, puede definir el método a usar para la estimación de ET_o . En muchos sitios la temperatura del aire se ha medido durante largos períodos. La velocidad del viento, humedad relativa y radiación solar, tienen menos disponibilidad y hay mayor dificultad para su medición, por lo que este tipo de información es menos confiable. Por lo tanto, en algunos sitios se requiere utilizar el método de la temperatura del aire para estimar la ET_o , mientras que en otros podrían usarse métodos más adecuados. La información climática deberá ser compilada y evaluada antes de iniciar cualquier tipo de cálculo. Los métodos a utilizar se podrán identificar una vez que la calidad de la información disponible se haya determinado.

Las estimaciones diarias de ET_o no son siempre necesarias para algunas aplicaciones de calendario de riego. Si los terrenos se riegan cada 10 días, la estimación del calendario puede efectuarse utilizando los métodos basados en la radiación o temperatura o aún el uso de un evaporímetro puede tener resultados similares al uso del método de Penman-Monteith (cita de los autores). En cambio si se producen cultivos de gran valor comercial en terrenos muy ligeros, será necesario tener estimaciones diarias de ET_o para lograr un adecuado calendario. En estos casos el método de Penman-Monteith (cita de los autores) será el que mejor se adapte.

La selección del método para estimar ET_o con fines de diseño de sistemas de riego, depende de la frecuencia esperada para los riegos. Si los cultivos requieren del riego, frecuentemente debido a suelos poco profundos y texturas ligeras o con consumos de gran cantidad de agua, la tasa de abastecimiento de agua será mucho mayor que para la condición de riegos poco frecuentes. El método de Penman-Monteith (cita de los autores) debe aplicarse cuando sea necesario hacer un diseño para frecuencias de riego a nivel diario. Cualquiera de los métodos de radiación, temperatura o el del tanque de evaporación será suficiente para diseños de riego con frecuencias de cinco a diez días. Además que para el diseño se deberá disponer de información climática de varios años, a fin de estimar probabilidades de ocurrencia. En general se establece que un método menos preciso con suficiente información histórica de clima será preferible a otro más preciso con un número limitado de datos climáticos.

Para el diseño y la operación de un vaso de almacenamiento, o para el establecimiento de los planes de riego, las estimaciones de ET_o en períodos cortos son de menor valor que los promedios mensuales o anuales del patrón de uso de agua. Frecuentemente estos usos requieren de la información de varios cultivos y de muchos sitios, donde no se tiene una información exacta para cada parcela. Por lo tanto, los valores promedio de ET_o a nivel quincenal, mensual o anual, podrían ser adecuados. Para este tipo de aplicaciones, todos los métodos de estimación de ET_o son aceptables y la calidad de la información climática o de evaporación en tanque puede ser el factor decisivo.

Esta investigación está encaminada a definir una metodología general que se adapte a las condiciones que imperan en la República Mexicana, y en especial a sus Distritos y Unidades de Riego. Para

seleccionar el procedimiento de cálculo por aplicarse y obtener el valor de la evapotranspiración del cultivo de referencia ET_o debe considerarse lo siguiente (opinión del autor de esta tesis):

- Con la instrumentación que se cuenta en la red de estaciones climatológicas de la República Mexicana, no es posible registrar algunas variables requeridas por los modelos de Penman-Monteith y el de Radiación.
- La información climatológica histórica confiable que cuenta con un número suficiente de registros (de 1931 a la fecha) en la red de estaciones distribuidas en el territorio nacional, son la precipitación y la temperatura del aire, en los niveles mensuales y anuales.
- Las prácticas de riego generalmente se aplican en un 85 % de la superficie, en la modalidad de riego por gravedad y el restante 15 % con riego presurizado. Motivo por el cual se espera que los periodos entre un riego y otro, sean por lo menos de 15 días o de más tiempo.
- En todos los Distrito y Unidades de Riego existe un patrón o plantilla de cultivos diferente.

Por las condiciones explicadas, se establece que la selección se inclina por el método de temperatura del aire, el cual sin ninguna dificultad, puede ser aplicado para el cálculo de la ET_o del cultivo de referencia en cualquier zona de la República Mexicana.

4.4.- Método de la temperatura

Jensen *et al* (1990, referencia f), encontraron que la versión del método de Blaney y Criddle desarrollado por Doorenbos y Pruitt (1976) basado en la variable temperatura, fue el más preciso de los que se evaluaron para estimar la evapotranspiración del cultivo de referencia ET_o . Esta técnica, a la cual comúnmente se le conoce como el método de FAO- Blaney y Criddle, se describe por:

$$ET_o = C_e [a_t + b_t * p * (0.046 * T + 0.816)] \quad (4.4.1)$$

donde:

ET_o , es la evapotranspiración para pasto podado como cultivo de referencia (cm/d).

p , es el porcentaje medio diario de las horas anuales con sol.

T , es la temperatura del aire en el período (°C).

a_t y b_t , son factores de ajuste basados en datos de clima de la región.

C_e , es el factor de ajuste basado en la elevación sobre el nivel del mar.

Los valores de a_t se muestran en la tabla A2.1 como una función de la humedad relativa media, expresada como un porcentaje (RH_{med}), y la relación de la insolación actual a la potencial (n/N).

Los valores de b_u dependen de la humedad mínima relativa, del porcentaje de insolación, y de la velocidad media del viento. El factor b_t puede ser calculado como:

$$b_t = b_n + b_u \quad (4.4.2)$$

Los valores de b_n y b_u se resumen en las tablas A2.2 y A2.3, respectivamente, así como las ecuaciones que se utilizan para su cálculo.

Los parámetros climáticos usados para el cálculo de a_t y b_t son valores regionales medios, no valores medidos diariamente. Por lo tanto, una vez determinados estos valores para una época del año en una determinada localidad, pueden ser utilizados para el cálculo en diferentes días de esa época, y para todos los años analizados.

El factor de corrección por elevación C_e está dado por:

$$C_e = 1.0 * 10^{-4} * Elev. \quad (4.4.3)$$

donde:

Elev., es la elevación sobre el nivel del mar en metros.

El porcentaje medio diario de horas de insolación anual (p) es la relación entre las horas sol diarias para la mitad del mes considerado, entre el número de horas totales de insolación anual. Los valores de p se muestran en la tabla A2.4 como una función de la latitud. El valor promedio diario de insolación, expresado en porcentaje, se puede calcular con la siguiente expresión:

$$p = 0.00304 * \cos^{-1} \left[\frac{-\text{sen}(\theta_d) * \text{sen}(\text{lat})}{\cos(\theta_d) * \cos(\text{lat})} \right] \quad (4.4.4)$$

con

$$\theta_d = \text{sen}^{-1} \{ 0.39795 * \cos[0.98563 * (\text{DOY} - 173)] \} \quad (4.4.5)$$

donde

θ_d , es el ángulo de declinación solar (grados).

DOY, es el día del año (de 1 a 365 ver tabla A2.5).

Lat, Latitud (°N).

Los cálculos para latitudes del sur requieren un desfase de seis meses como se muestra al pie de la tabla A2.4. Para el hemisferio sur, la constante -173 en la ecuación de p , debe ser reemplazada con +9.5 para su cálculo.

4.5.- Coeficientes de cultivo

La evapotranspiración de un terreno cultivado está compuesta por la transpiración del cultivo y la evaporación del suelo. La tasa de evapotranspiración de un cultivo (ET_c) depende del tipo de cultivo, de la etapa de crecimiento, del contenido de humedad del suelo y de la cantidad de energía disponible para evaporar el agua. La tasa de evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o) se utiliza para representar la tasa base de evapotranspiración para un pasto podado. La evapotranspiración de otros cultivos se calcula en relación con la evapotranspiración del cultivo de referencia. El factor que relaciona el uso actual del agua de un cultivo con la evapotranspiración del cultivo de referencia, se denomina el coeficiente de cultivo (K_c).

Como concepto fundamental debe considerarse que el uso de agua por los cultivos (ET_c) se calcula utilizando la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o) y el coeficiente del cultivo (K_c):

$$ET_c = K_c ET_o \quad (4.5.1)$$

Para tomar en cuenta los factores que tienen influencia en la ET_c , el coeficiente de cultivo generalizado (K_c), puede ser modificado para considerar el efecto de la tensión de humedad y la evaporación de un suelo húmedo. La expresión combinada es la siguiente:

$$ET_c = (K_{cb} * K_s + K_w) * ET_o \quad (4.5.2)$$

donde

ET_c , es la tasa de evapotranspiración actual del cultivo.

K_{cb} , es el coeficiente basal del cultivo.

K_s , es el factor de tensión que reduce el consumo de agua por el esfuerzo de humedad del cultivo.

K_w , es el factor que toma en cuenta el aumento de evaporación por la superficie del suelo húmedo después de una lluvia o un riego.

ET_o , es la tasa de evapotranspiración del pasto podado como cultivo de referencia.

El coeficiente basal del cultivo (K_{cb}) de la ecuación 4.5.2 se aplica en el caso de un cultivo saludable, que no sufre por la tensión del agua en el suelo, cuando éste no tiene suficiente agua. Los coeficientes K_s y K_w se utilizan para ajustarlo, debido al efecto de la tensión por falta de agua y por el aumento de evaporación del suelo en una superficie húmeda, para un terreno específico y un determinado día.

4.5.1.- Determinación de los coeficientes basales del cultivo (K_{cb})

El sistema de coeficientes de cultivo desarrollado por Doorenbos y Pruitt (1976) y modificado por Howell *et al* (1986, referencia f), se utilizará para estimar la evapotranspiración actual de los cultivos.

Para el uso del método de Doorenbos y Pruitt (1976), el ciclo de desarrollo se divide en cuatro etapas:

- **Inicial.** Período que comprende desde la siembra hasta el inicio del crecimiento cuando el suelo no está cubierto, o apenas comienza a cubrirse por el cultivo (cubrimiento del suelo menor al 10 %).
- **Desarrollo del follaje.** Período que comprende desde la etapa inicial hasta el momento en que el cultivo cubre efectivamente la superficie del suelo (cubrimiento del suelo de 70% a 80%).
- **Estación media de crecimiento.** Período a partir del cubrimiento total hasta el inicio de la maduración cuando las hojas empiezan a cambiar de color o inicio de la senescencia.
- **Maduración.** Período que comprende desde el final de la estación media de crecimiento, hasta la maduración fisiológica o cosecha.

Durante la etapa inicial, la causa primaria de la pérdida de agua es la evaporación del suelo. Puesto que la curva basal representa la condición de suelo seco, es constante durante este período. Wright (1982, referencia f) sugiere que el coeficiente basal para un suelo visualmente seco es del orden de 0.25 para pastos como cultivo de referencia, el cual es el mismo valor recomendado por Howell *et al* (1986, referencia f). Wright (1982, referencia f) señala que el coeficiente basal podría bajar alrededor de 0.1 inmediatamente después de la labranza. Sin embargo, debido a que la labranza en raras ocasiones se lleva a cabo después de la siembra y antes de que la planta haya alcanzado un cierto desarrollo, el coeficiente basal durante esta etapa inicial se puede suponer como del orden de 0.25 (figura 4.1).

Para calcular el coeficiente del cultivo durante otros períodos de desarrollo, se requiere definir cuatro puntos en la curva de los coeficientes. El primer punto es cuando la fracción del ciclo de desarrollo coincide con el momento en que se inicia el desarrollo del follaje (punto 1 en la figura 4.1). En este punto el valor de K_{cb} (0.25) es conocido con base en la suposición considerada en el párrafo anterior, de modo que solamente se necesita F_{s1} .

El segundo punto ocurre cuando el follaje se ha desarrollado adecuadamente para dar un cubrimiento efectivo. En este momento el coeficiente basal del cultivo alcanza su máximo valor. Por lo tanto, para conocer el segundo punto (punto 2 en la figura 4.1), se requiere el valor máximo de K_{cb} (K_{cp}) y F_{s2} .

El tercer punto en la figura 4.1 es cuando el cultivo comienza su maduración. El único valor que se requiere para definir este tercer punto es el tiempo (F_{s3}), ya que el valor del coeficiente de cultivo es igual al máximo coeficiente basal.

Dos ubicaciones diferentes se muestran en la figura 4.1 para el cuarto punto. La posición con el valor menor representa al cultivo cuando ha alcanzado la senescencia antes de la cosecha. Para definir este punto, deberá conocerse el coeficiente basal del cultivo a su maduración (K_{cm}). Si el cultivo es cosechado antes de que la planta empiece a madurar, el coeficiente de cultivo permanecerá constante a su valor máximo hasta la cosecha (ver la segunda posición del punto 4 en la figura 4.1).

Las cinco definiciones necesarias para calcular el coeficiente de cultivo (F_{s1} , F_{s2} , F_{s3} , K_{cp} y K_{cm}) se marcan en la figura 4.1. Los valores entre paréntesis que están mostradas en dicha figura son: $F_{s1} = 0.17$, $F_{s2} = 0.45$, $F_{s3} = 0.78$, $K_{cp} = 1.2$ y $K_{cm} = 0.6$.

Modelo para definir el coeficiente basal de cultivo

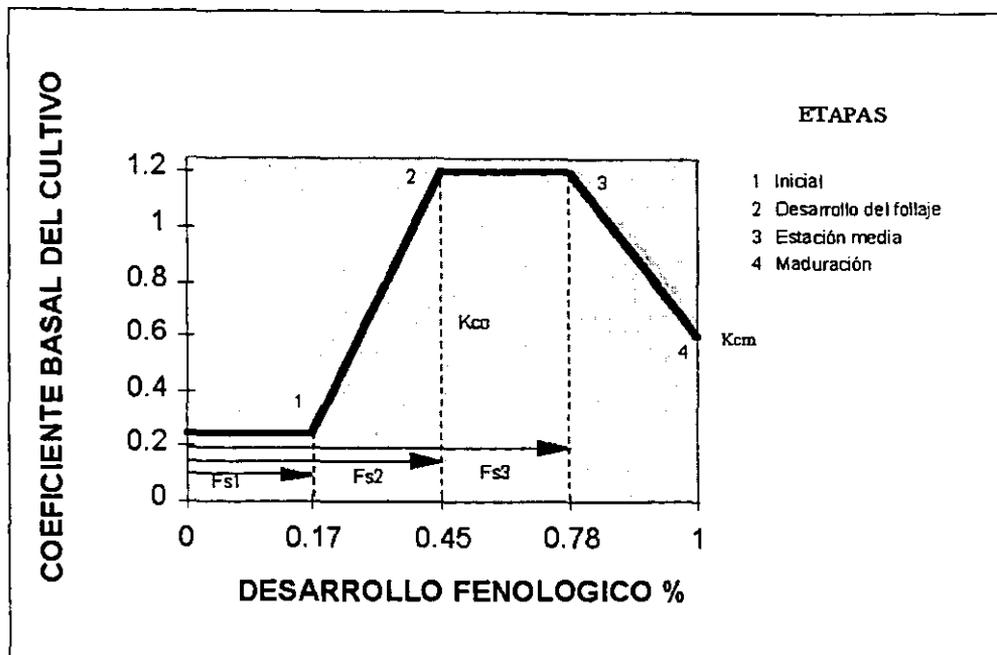


Figura 4.1.- Coeficiente basal de cultivo del maíz para grano en un medio árido y ventoso.

El valor del coeficiente de cultivo depende de las condiciones climáticas que prevalezcan. La evapotranspiración de cultivos de porte alto generalmente es más afectada por el viento que los de porte pequeño, como es el caso de los pastos. Este efecto es más notorio en climas áridos. Por lo tanto, Doorenbos y Pruitt (1976) recomiendan que los coeficientes de cultivo sean ajustados con base en el viento y la humedad. Cuatro condiciones se definen con este propósito:

- > Vientos moderados (recorrido del viento < 400 km/d).
- > Vientos fuertes (recorrido del viento > 400 km/d).
- > climas áridos o húmedos (< 20 % y > 70 % de humedad relativa mínima respectivamente).

El rango de humedad propuesto por Doorenbos y Pruitt es discontinuo. Donde la humedad relativa media mínima es de más de 20 % o de menos de 70 %, el valor del coeficiente de cultivo puede ser interpolado de los datos que se dan. Los datos climáticos usados para ajustar los coeficientes de cultivo son valores promedio para una región, no valores diarios medidos.

Los datos de los coeficientes de cultivo se han agrupado de acuerdo con tipos generales de los cultivos, y algunos valores representativos de coeficientes de cultivo para condiciones típicas se presentan en los cuadros del A2.1 al A2.8.

4.5.2.- Factor de tensión del agua (K_s)

El efecto de la tensión de la humedad del agua en el suelo sobre la evapotranspiración, se puede describir utilizando el factor de tensión K_s , el cual se basa en el contenido de humedad del suelo (figura 4.2). Un método es la función lineal utilizada por Hanks (1974, referencia f) y Ritchie (1973, referencia f). En este método, el factor de tensión se basa en el agua total disponible en el suelo, que está almacenada en la zona radicular de los cultivos. El agua total disponible en el suelo (TAW) es la cantidad de agua que el suelo puede retener entre capacidad de campo (CC) y el punto de marchitamiento permanente, y se calcula con la siguiente expresión:

$$TAW = Pr * \frac{\theta_{CC} - \theta_{PMP}}{100} \quad (4.5.3)$$

donde

TAW , es el agua total disponible (cm).

θ_{CC} , es el contenido de humedad a capacidad de campo (cm^3/cm^3).

θ_{PMP} , es el contenido de humedad a punto de marchitamiento permanente (cm^3/cm^3).

Pr , es la profundidad radicular o la profundidad de riego (cm).

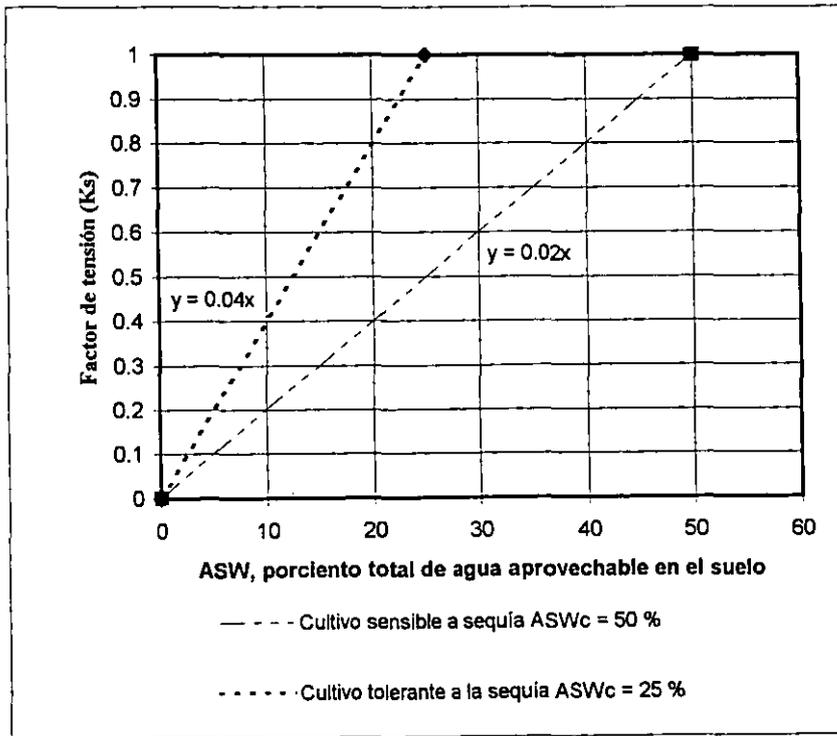


Figura 4.2.- Funciones usadas para reducir la evapotranspiración con base en el contenido de humedad del suelo.

El agua disponible en la zona radicular se calcula por:

$$AW = Pr * \frac{\theta - \theta_{PMP}}{100} \quad (4.5.4)$$

donde

θ , es el contenido de humedad actual (cm^3/cm^3).

El porcentaje de agua total disponible que es almacenado en la zona radicular es igual a:

$$ASW = \frac{AW}{TAW} * 100 \quad (4.5.5)$$

Utilizando estas definiciones, el factor de tensión del agua se puede calcular por:

$$K_s = \frac{ASW}{ASW_c}, \text{ para } ASW < ASW_c \quad (4.5.6)$$

$$K_s = 1.0 \text{ si } ASW \geq ASW_c \quad (4.5.7)$$

El valor crítico de ASW (ASW_c) varía dependiendo de la tolerancia a la sequía del cultivo (figura 4.2). Los cultivos que mantienen una ET_c bajo condiciones de suelo seco, considerados como cultivos tolerantes a la sequía, pueden usar un valor de $ASW_c = 25 \%$. Para los cultivos que son sensibles a la sequía, el valor de ASW_c deberá ser de alrededor de 50% .

Hasta ahora se ha estudiado el procedimiento para el cálculo de la evapotranspiración del cultivo de referencia ET_c . En el que se supuso que el abastecimiento de agua, no era una limitante en el proceso; sin embargo uno de los objetivos de esta investigación es calcular la evapotranspiración, cuando existe un déficit en el suministro de agua.

4.6.- Evapotranspiración con déficit de humedad

El déficit de humedad en la planta se manifiesta en dos etapas, la primera de ellas inicia cuando el contenido de humedad actual del suelo (θ) está por abajo del 25% o 50 % del rango de contenido de humedad entre los llamados contenido de humedad a capacidad de campo (θ_{CC}) y contenido de humedad a punto de marchitamiento permanente (θ_{PMP}), esto según sea la tolerancia de la planta a la sequía.

La segunda etapa de déficit de humedad en la planta, inicia cuando el contenido de humedad actual (θ), llegó al valor del contenido de humedad a punto de marchitamiento permanente (θ_{PMP}). En este momento, la planta detiene todo su proceso metabólico y por lo tanto su crecimiento, lo cual se verá manifestado en el rendimiento obtenido al final del ciclo vegetativo.

Mediante la modelación del crecimiento del cultivo y de los controles de humedad en el suelo, es posible conocer el rendimiento que puede esperarse de dicho cultivo, cuando éste ha sido sometido a distintos tratamientos con déficit de humedad en el suelo.

A continuación se propone un procedimiento que explica la relación que existe entre el déficit de humedad en el suelo, el cultivo en producción y su rendimiento potencial.

En primer lugar, se deben definir las características hidrodinámicas de los suelos, para posteriormente relacionarlas con los cultivos posibles a establecerse en ellos. Tales características hidrodinámicas indispensables a conocer de un suelo son:

a).- De un muestro de campo y análisis de laboratorio, obtener:

- Densidad aparente (Da) en g/cm^3 .
- Contenido de arcilla (Ac) en %.
- Contenido de arena (An) en %.
- Contenido de limo (lm) en %.
- Contenido de carbono orgánico (Co) o de materia orgánica en g/kg de suelo.
- Dar una clasificación textural del suelo de acuerdo al cuadro A2.9.

Jeffrey S. K. (1995), obtiene características hidrodinámicas de 30,035 horizontes de suelo, con el fin de aplicar los modelos existentes de retención de agua por los suelos. Uno de estos modelos es el de Vereecken *et al* (1989, cita del autor), que propone una ecuación para la obtención del contenido volumétrico de humedad a saturación (θ_s) y otra para el contenido de humedad residual del suelo (θ_r); los cuales dependen de las características obtenidas a nivel laboratorio.

$$\theta_s = 0.810 - (0.283 * Da) + (0.001 * Ac) \quad (4.6.1)$$

$$\theta_r = 0.015 + (0.005 * Ac) + (0.014 * Co) \quad (4.6.2)$$

donde:

θ_s , resulta en $\text{cm}^3 \text{H}_2\text{O}/\text{cm}^3$ de suelo.

θ_r , resulta en $\text{cm}^3 \text{H}_2\text{O}/\text{cm}^3$ de suelo.

Los valores de densidad aparente según el cuadro 4.10, fueron medidos a 0.33 atm de presión o 3.33 m. c. a. (metros de columna de agua). Generalmente el procedimiento para obtener la densidad aparente (Da) en laboratorio es a suelo seco. Por lo tanto se hace necesario transformar la $Da_{0.33}$ a Da por medio del modelo de regresión obtenido por el mismo autor que establece:

$$Da_{0.33} = (0.880 * Da) + 0.046 \quad (4.6.3)$$

en la que el $r^2 = 0.89$, para los 30,035 horizontes analizados.

Para dar la clasificación textural y el contenido de carbono orgánico (Co), si este pudo ser obtenido con procedimientos de laboratorio; de acuerdo con el cuadro A2.9, a la Da del suelo seco, debe calcularse su correspondiente $Da_{0.33}$.

b).- En laboratorio deben someterse dos muestras de suelo a diferentes cargas de presión por ejemplo, 0.33, 1, 5, 8 ó 15 atm; para conocer la relación que existe entre el contenido volumétrico de humedad - carga de presión ($\theta - h$), es decir se obtendrán los pares $\theta_1 - h_1$ y $\theta_2 - h_2$.

c).- Aplicar el modelo numérico desarrollado por Romero (1995), para encontrar los valores de los parámetros n y hg que intervienen en el modelo de la curva característica de humedad de Van Genuchten (1980, cita del autor) y las consideraciones de Burdine (1953, cita del autor).

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{1}{\left[1 + \left[\frac{h}{hg} \right]^n \right]^m} \quad (4.6.4)$$

donde:

θ , es el contenido de humedad actual en el suelo, cm^3/cm^3 .

θ_r , es el contenido de humedad residual del suelo, cm^3/cm^3 .

θ_s , es el contenido de humedad a saturación del suelo, cm^3/cm^3 .

h , es el valor de la tensión de humedad actual del suelo, m.

hg y n , son parámetros empíricos que depende del tipo de suelo.

$$m = 1 - \frac{2}{n}$$

La pendiente de la curva característica de humedad, que es el cambio en el contenido de humedad correspondiente a un cambio unitario del potencial de presión (h), es la capacidad específica del suelo:

$$C(h) = \frac{d\theta}{dh}$$

Este concepto es muy importante en relación con el agua disponible para las plantas; ya que cuando la capacidad específica alcanza su valor máximo el esfuerzo que tiene que hacer la planta es mínimo y viceversa. En la figura 4.3, se representa la capacidad específica de un suelo, el valor mínimo corresponde aproximadamente a $h = -40$ cm, equivalente a un grado de saturación de $Sat = 0.97$; si bien es cierto que en este valor es cuando más agua libera el suelo, debido a un cambio unitario en el potencial de presión, este grado de saturación puede ser perjudicial para muchos cultivos como consecuencia de la falta de aire en el suelo. Nótese que para este suelo no es recomendable dejar descender el potencial de presión debajo de $h = -10^3$ cm, ya que a partir de este valor, la planta tiene que hacer un esfuerzo muy grande para absorber agua.

Considerando que la curva característica de humedad del suelo puede representarse con el modelo de Van Genuchten (1980, cita del autor), la capacidad específica correspondiente es:

$$\frac{d\theta}{dh} = -\frac{(\theta_s - \theta_r) * m * n * \left(\frac{h}{h_g}\right)^{n-1}}{h_g * \left[1 + \left(\frac{h}{h_g}\right)^n\right]^{m+1}} \quad h < 0 \quad (4.6.5)$$

$$\frac{d\theta}{dh} = 0 \quad h \geq 0 \quad (4.6.6)$$

d).- Encontrar las coordenadas del punto máximo A en la curva de la capacidad específica y las del punto B, que también pertenece a ella (figura 4.4); de las coordenadas interesan los correspondientes valores de tensión (h_A y h_B), mismos que serán sustituidos en el modelo de Van Genuchten para inferir los valores de θ_A y θ_B que posteriormente serán utilizados para calcular láminas de riego.

Se propone aquí un procedimiento para conocer las relaciones ($\theta_A - h_A$) y ($\theta_B - h_B$):

d.1).- El punto A corresponde a un máximo de la función que describe a la capacidad específica, por lo tanto, es posible aplicar el criterio de la primera derivada a dicha función; para conocer los valores máximos de ella. La primera derivada resultó con la siguiente expresión:

$$C'(h) = \frac{-(\theta_s - \theta_r) * m * n * \left[\left[1 + \left(\frac{h}{h_g}\right)^n\right]^{m+1} * (n-1) * \left(\frac{h}{h_g}\right)^{n-2} - \left(\frac{h}{h_g}\right)^{2*(n-2)} * (m+1) * \left[1 + \left(\frac{h}{h_g}\right)^n\right]^m * n \right]}{h_g^2 * \left[1 + \left(\frac{h}{h_g}\right)^n\right]^{2*(m+1)}} \quad (4.6.7)$$

igualando $C'(h)$ con cero, se obtienen las raíces de la ecuación, y para esta función en particular, la raíz toma el valor de h_g , por lo tanto este será el valor para h_A , lo cual puede comprobarse con el procedimiento numérico iterativo de Newton Rhapsod desarrollado por Romero (1995).

d.2.- El punto B corresponde a un valor de h tal que, éste al ser evaluado en la primera derivada ($C'(h)$) de la función capacidad específica $C(h)$, resulte con un valor igual a 1×10^{-9} , donde "y" depende del resultado de la división de la $C(h_B)$ entre el valor de h_B buscado. Por ejemplo, analizando la gráfica de la curva de capacidad específica representada en la figura 4.3, se observa que el punto B se localiza en la división logarítmica de las abscisas que van de 1000 a 10,000 cm; por lo tanto su valor estará en este

rango. De igual manera, por medio de un análisis ocular, se determinó que el valor de la capacidad específica correspondiente debe tener un valor aproximado de 1×10^{-4} ; por lo tanto al dividir 1×10^{-4} entre 1000, resultará que $\gamma = 7$.

Aplicando el procedimiento numérico de Newton Rhapsod de primer orden, se obtienen los valores de θ_B y h_B .

e).- En el suelo, el déficit de humedad para la planta, estará referido al punto de coordenadas $\theta_B - h_B$ definido, según sea la tolerancia de dicha planta a la sequía. Se sabe (SCS, 1995, referencia f) que el valor crítico del porcentaje de agua total disponible en el suelo (ASWc), es de 25 % para cultivos tolerantes a la sequía y 50 % para los que son sensibles a ella. Relacionando este criterio con el punto de coordenadas conocido, tendremos que la diferencia entre los contenidos de humedad θ_A y θ_B representarán el 25 % o el 50 % de la diferencia que debe existir entre los contenidos de humedad llamados anteriormente como: contenido de humedad a Capacidad de Campo (θ_{CC}) ahora llamado θ_A , y contenido de humedad a punto de marchitamiento permanente (θ_{PMP}) que se calculará con el auxilio de la ecuación:

$$Rango_{ASW} = \frac{\theta_A - \theta_B}{0.25(o)0.50} \quad (4.6.8)$$

misma que al restarse al valor θ_A , dará como resultado el contenido de humedad a punto de marchitamiento permanente (θ_{PMP}); esto es:

$$\theta_{PMP} = \theta_A - \left(\frac{\theta_A - \theta_B}{0.25(o)0.50} \right) \quad (4.6.9)$$

Puede suceder el caso que el θ_{PMP} calculado con la ecuación anterior, resulte menor que el contenido de humedad residual del suelo (θ_r); cuando esto suceda, deberá tomarse como θ_{PMP} , el valor de θ_r .

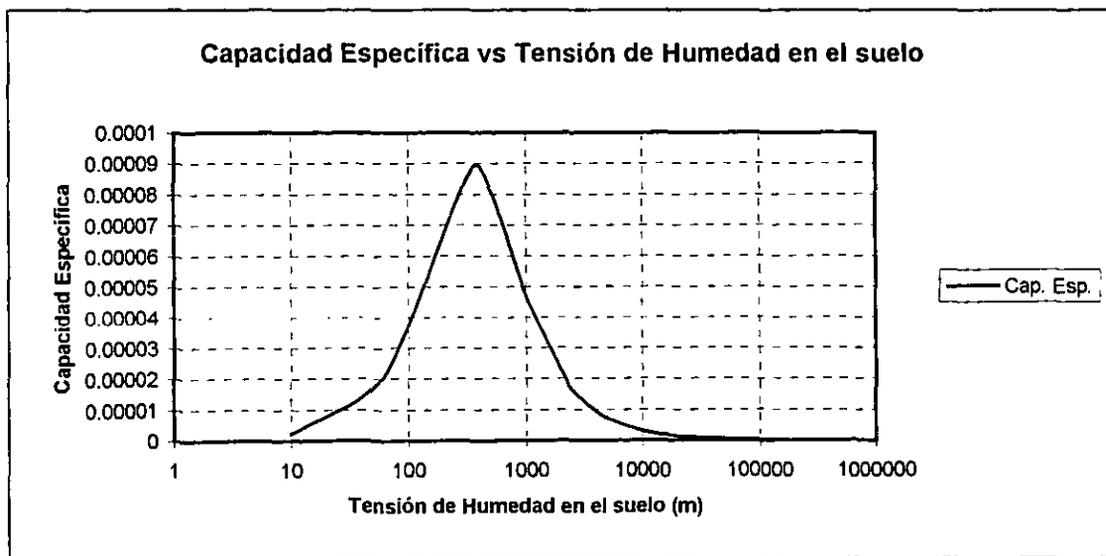


Figura 4.3.- Representación de la Capacidad Específica de un suelo.

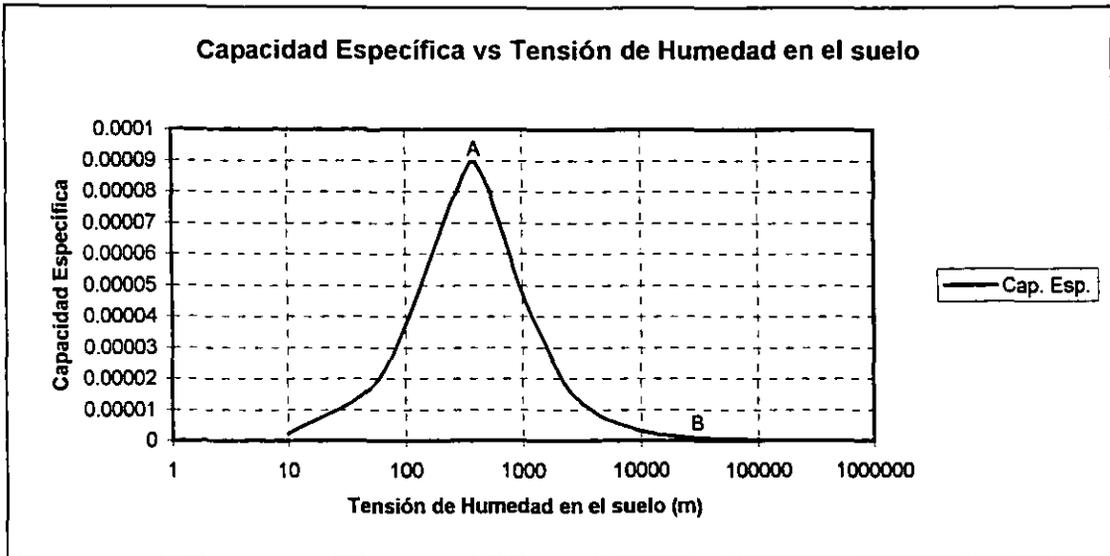


Figura 4.4.- Puntos A y B sobre la curva de la Capacidad Específica de un suelo.

La interpretación de déficit de humedad en el suelo, se visualiza al momento de que el contenido de humedad actual de un suelo (θ), sea menor que el 50 % o el 25 % (según la tolerancia de la planta a la sequía) del porcentaje de agua total disponible que es almacenado para la zona radicular (ASW), el cual se representa como ya se explicó con la siguiente expresión:

$$ASW = \frac{AW}{TAW} * 100 \quad (4.6.10)$$

donde:

AW, es la lámina de agua actual disponible en el suelo (cm).

TAW, es la lámina de agua total disponible en el suelo (cm).

$$AW = Pr * \frac{\theta - \theta_{PMP}}{100} \quad (4.6.11)$$

donde

Pr, es la profundidad de riego (cm).

θ , es el contenido de humedad en el instante del muestreo (cm^3/cm^3).

θ_{PMP} , es el contenido de humedad a punto de marchitamiento permanente (cm^3/cm^3).

$$TAW = Pr * \frac{\theta_{CC} - \theta_{PMP}}{100} \quad (4.6.12)$$

θ_{CC} , es el contenido de humedad a capacidad de campo (cm^3/cm^3).

Cuando esto suceda, entonces la planta disminuirá su proceso de evapotranspiración y por ende su metabolismo de crecimiento; disminuyendo con ello el rendimiento potencial esperado del cultivo.

4.7.- El control de la humedad en el suelo, durante el ciclo vegetativo del cultivo

Esta actividad debe realizarse mediante el muestreo directo en campo y análisis de laboratorio por procedimientos gravimétricos, o bien mediante el control numérico de acuerdo a la evapotranspiración de diseño del sistema.

En este caso se aplicará el control numérico, porque el objetivo de la investigación, es obtener un modelo que detalle los resultados de aplicar diferentes políticas de riego, cuando existe un déficit de agua para el abastecimiento al cultivo.

4.8.- Ejemplo de aplicación

Aquí se aplican los procedimientos y técnicas descritas en los apartados del 4.4 al 4.7 y se consideró conveniente desarrollar una hoja de cálculo en la que fuera posible modificar la política de riego por aplicarse.

Para desarrollar este apartado, se realizó como primera etapa, la recopilación y el análisis de la información de gabinete y campo relacionada con el Distrito de Riego 017 Región Lagunera. Dicha información se obtuvo de revisiones bibliográficas realizadas en bibliotecas nacionales y en el propio Distrito de Riego. La documentación utilizada para el desarrollo de este documento fue:

- a).- Características Generales de las series de suelos en la Región Lagunera Coahuila y Durango, Secretaría de Recursos Hidráulicos, Distrito de Riego 017, oficina de riego y drenaje, laboratorio, 1974.
- b).- Plano de distribución de Suelos, hoja única, Distrito de Riego No. 17 Región Lagunera Coahuila y Durango, Mayo 1973.
- c).- Plano de Salinidad, Plano único, Distrito de Riego No. 17 Región Lagunera Coahuila y Durango, Septiembre de 1979.
- d).- Plano de Eficiencias de Conducción, Plano único, Distrito de Riego No. 17 Región Lagunera Coahuila y Durango, actualizado hasta 1995.
- e).- Epocas de Siembra y Cosecha de los cultivos en el Distrito de Riego No. 17, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Representación en la Región Lagunera (Coahuila y Durango).
- f).- Informe de Producción Agrícola de primavera 1994-1995, 1995-1996, 1996-1997, 1997-1998 y 1998 -1999, Comisión Nacional del Agua, Distrito de Riego No. 17.
- g).- Relación de canales y sus características principales en el Distrito de Riego No. 017 Región Lagunera, Coahuila y Durango, Comisión Nacional del Agua.
- h).- Características de producción de los diferentes cultivos producidos en el Distrito de Riego No. 017 Región Lagunera, Coahuila y Durango, varios autores y diversas fechas.

4.8.1.- Parámetros climáticos y geográficos de ingreso al modelo numérico

Se utilizó la información climatológica de la estación "Torreón, Coahuila" y la ubicación geográfica y altitud que reporta para ella el Servicio Meteorológico Nacional. El resumen de los parámetros que se ingresaron al Modelo Numérico, se presenta en el cuadro 4.2, mismo que se obtuvo con la aplicación de los procedimientos descritos en el apartado 4.4.

Cuadro 4.2.- Parámetros climáticos y geográficos del área de influencia del Distrito de Riego 017 "Región Lagunera".

**CALCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACION POR EL METODO DEL CULTIVO DE REFERENCIA, UTILIZANDO LA VARIABLE TEMPERATURA
FAO-Blaney & Criddle**

ESTACION: Torreón Coahuila
LAT NTE 25°33'
ALTITUD 1137
fac. ajus. 1.1137

VARIABLE	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
TEMP.	15.6	18	21.2	24.2	28.2	28.2	27.7	27.4	26.3	22.4	17.8	15.1
PP	6.4	4.5	2.4	2.2	14.1	22.6	39.3	41.5	47.1	22.3	6.5	8.2
% Hrs Luz	0.24	0.25	0.27	0.29	0.30	0.31	0.30	0.29	0.28	0.26	0.25	0.24
P. de V. S.	17.72	20.63	25.16	30.18	38.22	38.22	37.12	36.47	34.19	27.07	20.37	17.16
P. de V. A.	3.54	4.13	5.03	6.04	7.64	13.38	12.99	12.77	11.97	5.41	4.07	3.43
H.R.med	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	35.00	35.00	35.00	35.00	20.00	20.00	20.00
Rad. Sol. Rs	450.33	500.83	570.33	651.83	707.67	740.17	731.83	684.33	610.83	534.17	470.33	440.33
Rs red.	337.75	375.63	427.75	488.88	530.75	555.13	548.88	513.25	458.13	400.63	352.75	330.25
Rad.Ext. Ra	494.67	596.67	731.67	864.67	947.33	981.00	971.33	916.67	811.67	675.67	544.67	477.00
n/N	0.87	0.76	0.67	0.63	0.62	0.63	0.63	0.62	0.63	0.69	0.80	0.88
N	11	11.5	12	12.6	13.1	13.3	13.2	12.8	12.3	11.7	11.2	10.9
n	10	10.5	11	11.3	12	12	12	11.5	11.5	11	10.8	9.5
at	-0.219	-0.208	-0.199	-0.195	-0.194	-0.189	-0.189	-0.188	-0.189	-0.201	-0.212	-0.221
bn	1.560	1.459	1.374	1.337	1.327	1.220	1.218	1.210	1.217	1.390	1.494	1.578
R. V. d/n	1.500	2.000	2.000	2.500	2.500	1.500	1.500	2.500	3.000	3.200	1.500	2.500
R. V. (km/d)	500.000	550.000	600.000	600.000	650.000	600.000	650.000	700.000	800.000	850.000	900.000	600.000
Ud	300.000	366.667	400.000	428.571	464.286	360.000	390.000	500.000	600.000	647.619	540.000	428.571
bu	0.188	0.229	0.250	0.268	0.290	0.187	0.203	0.260	0.312	0.405	0.338	0.268
bt	1.748	1.688	1.624	1.605	1.618	1.407	1.422	1.470	1.530	1.794	1.831	1.846
ET (cm/d)	0.473	0.541	0.653	0.782	0.926	0.816	0.782	0.776	0.756	0.736	0.597	0.500

% Hrs Luz % de horas luz
P. de V. S. Presión de vapor a saturación (mb)
P. de V. A. Presión de vapor actual (mb)
n/N relación entre las horas de brillo solar actuales (n) y las máximas posibles (N) para un día
R. V. d/n Relación de viento, día a noche

4.8.2.- Parámetros agrícolas de ingreso al modelo numérico

Se analizó el Ciclo agrícola de Primavera - Verano 1997 con los datos del cuadro 4.3.

Cuadro 4.3.- Parámetros agrícolas del módulo VI "Tlahualilo".

Cultivo	Kcp	Kcm	Fs1	Fs2	Fs3	Siembra d/m/a	Ciclo Días	Cosecha d/m/a
A	B	C	D	E	F	G	H	I
Algodón	1.25	0.70	0.15	0.43	0.75	20/03/97	180	16/09/97
Melón	1.20	0.75	0.20	0.50	0.85	15/03/97	100	23/06/97
Sandía	1.20	0.75	0.20	0.50	0.85	15/03/97	100	23/06/97
Maiz de Grano	1.20	0.60	0.17	0.45	0.78	15/03/97	90	13/06/97
Maiz Forrajero	1.20	1.10	0.22	0.56	0.89	15/03/97	90	13/06/97
Sorgo Industrial	1.15	0.55	0.16	0.42	0.75	20/03/97	100	28/06/97
Sorgo de Grano	1.15	0.55	0.16	0.42	0.75	15/03/97	110	3/07/97
Sorgo Forrajero	1.15	0.55	0.16	0.42	0.75	15/03/97	110	3/07/97
Frijol	1.20	0.25	0.25	0.42	0.80	15/04/97	90	14/07/97
Nogal	1.00	0.90	0.30	0.70	0.90	15/03/97	180	11/09/97

La fuente de información de las columnas A, G, H e I, es del propio Distrito de Riego para el ciclo agrícola Primavera – Verano de 1997 obtenida de la recopilación manifestada en este apartado, y las columnas B, C, D, E y F, del apartado 4.5.

4.8.3.- Parámetros hidrodinámicos del suelo, que ingresan al modelo numérico

Se analizó el área de influencia del Módulo VI "Tlahualilo", determinándose para él, las características del cuadro 4.4.

Cuadro 4.4.- Parámetros hidrodinámicos.

A	Suelo: Arcilla Limosa	
B	$\theta_s, \text{cm}^3/\text{cm}^3$	0.4920
C	$\theta_r, \text{cm}^3/\text{cm}^3$	0.2829
D	$n, \text{adim.}$	2.6130
E	hg, cm	-167.2740
F	$m, \text{adim.}$	0.2346
G	CC(%)	41.2916
H	PMP (%)	29.5923

La fuente de información de la fila A es del propio Distrito de Riego obtenida de la recopilación manifestada en este informe, las filas B, C, D, E, F, G y H, se obtuvieron de la referencia f y aplicando el procedimiento del apartado 4.6.

4.8.4.- Evapotranspiración sin déficit hídrico

Se aplicó el procedimiento de Blaney & Cridlle modificado por la FAO, obteniéndose así, los resultados que se presentan en el cuadro 4.5.

Cuadro 4.5.- Evapotranspiración Potencial en el área de influencia del módulo VI "Tlahualilo".				
Mes	ETP Cm/día	días	Fecha al Final mes	ETP cm/mes
Ene	0.4726	31	31/01/98	14.651
Feb	0.5408	28	28/02/98	15.143
Mar	0.6527	31	31/03/98	20.232
Abr	0.7825	30	30/04/97	23.474
May	0.9257	31	31/05/97	28.695
Jun	0.8161	30	30/06/97	24.483
Jul	0.7823	31	31/07/97	24.251
Ago	0.7765	31	31/08/97	24.071
Sep	0.7561	30	30/09/97	22.683
Oct	0.7356	31	31/10/97	22.803
Nov	0.5975	30	30/11/97	17.924
Dic	0.4995	31	31/12/97	15.486

Considerando las fechas de siembra y cosecha del cultivo, la duración del ciclo vegetativo y las etapas de crecimiento, se obtuvieron los resultados del cuadro 4.6.

Cuadro 4.6.- Evapotranspiración sin déficit hídrico.

Cultivo	EVT, cm
Algodón	129.893
Melón	70.962
Sandía	70.962
Maiz de Grano	64.117
Maiz Forrajero	63.581
Sorgo Industrial	69.307
Sorgo de Grano	75.640
Sorgo Forrajero	75.640
Frijol	60.060
Nogal	88.817

4.8.5.- Evapotranspiración en el límite permisible de disminución del rendimiento (control de humedad en el suelo)

En este caso se aplicó procedimiento descrito en el apartado 4.6, considerando el valor límite de la Tensión de Humedad en el Suelo, en el que inicia la disminución del rendimiento del cultivo (*TSIDRC*), y los valores de los parámetros de Capacidad de Campo (*CC*) y de Punto de Marchitamiento Permanente (*PMP*) del suelo, obteniéndose con ello los resultados que se presentan en el cuadro 4.8.

Cuadro 4.7.- Evapotranspiración en el límite *TSIDRC*.

Cultivo	EVT, cm
Algodón	129.714
Melón	67.538
Sandía	67.538
Maiz de Grano	63.015
Maiz Forrajero	63.291
Sorgo Industrial	67.073
Sorgo de Grano	73.950
Sorgo Forrajero	73.950
Frijol	54.880
Nogal	88.185

5.- DISPONIBILIDAD VS EVAPOTRANSPIRACION

Con los resultados del capítulo 3 y los resultados del capítulo 4, se calcula la lámina promedio real (Disponible) para todo el Distrito de Riego, mediante el análisis de las eficiencias de distribución hasta el nivel parcelario, y la lámina promedio requerida (Evapotranspiración) para regar toda la superficie del Distrito de Riego, se hace su comparación y se define si el diseño del sistema será con riego de la superficie total del distrito, o bien la reducción de esta.

Después de realizar el análisis indicado, se obtuvo que la disponibilidad de agua para el Módulo VI "Tlahualilo", en el ciclo de primavera-verano de 1997 fue del 75 % de la lámina óptima que se requería, por lo tanto las láminas de agua estimadas como Disponibilidad, y su comparación contra la Evapotranspiración, se presenta en el cuadro 5.1.

Es importante aclarar que el valor del 75 % considerado en los análisis, no es el que corresponde al Módulo analizado, ya que su valor exacto, debe calcularse por medio de la ponderación que corresponda de tal Módulo, en superficie y tipo de cultivos explotados, con respecto a todo el Distrito de Riego.

Bajo el supuesto de que el déficit hídrico se distribuirá en la misma proporción en los cultivos del Módulo analizado, resultan los valores del cuadro 5.1.

Cuadro 5.1.- Disponibilidad vs Evapotranspiración.

Cultivo	<i>DISP</i> , cm	<i>EVT</i> , cm
Algodón	97.420	129.714
Melón	53.222	67.538
Sandía	53.222	67.538
Maiz de Grano	48.088	63.015
Maiz Forrajero	47.686	63.291
Sorgo Industrial	51.980	67.073
Sorgo de Grano	56.730	73.950
Sorgo Forrajero	56.730	73.950
Frijol	45.045	54.880
Nogal	66.613	88.185

5.1.- Eficiencias de conducción y aplicación

Para fines de cálculo, el Distrito de Riego maneja la información del cuadro 5.2, la cual es el resultado de algunos estudios y análisis realizados en su red de conducción y distribución de agua (no esta especificada la fecha de elaboración).

Cuadro 5.2.- Eficiencias de conducción en el módulo VI "Tlahualilo".

Puntos de Control	Eficiencia		Diferencia
	Normal	Actual	
Presa-Módulo	85	85	0
Módulo-Toma	92	90	2
Toma-Parcela	92	78	14
Aplicación	75	70	5
Total	54	42	12

Para el cálculo de la lámina bruta promedio que se requiere o que se abastecerá de acuerdo a la disponibilidad de agua en las presas, debe utilizarse la eficiencia total del Módulo, ya sea la reportada como Normal o como Actual, esto dependerá de los trabajos de rehabilitación de la red de conducción, que se haya realizado recientemente.

5.2.- Lámina promedio: real (Disponible) y requerida (Evapotranspiración)

Para el cálculo de las láminas promedio Real y Requerida, se realizó la ponderación de superficie cultivada de cada especie, considerando también en dicha ponderación, el valor de las láminas real y requerida para cada una de ellas.

Cuadro 5.3.- Lámina promedio en el módulo VI "Tlahualilo".

Cultivo	Superficie Cultivada, ha	Factor de Ponderación	Real Ponderada, cm	Requerida Ponderada, cm
Algodón	813.0	0.258	33.503	25.128
Melón	687.0	0.218	15.467	11.600
Sandía	358.0	0.114	8.060	6.045
Maiz de Grano	161.0	0.051	3.275	2.456
Maiz Forrajero	500.0	0.159	10.086	7.564
Sorgo Industrial	34.0	0.011	0.748	0.561
Sorgo de Grano	434.0	0.138	10.415	7.811
Sorgo Forrajero	42.0	0.013	1.008	0.756
Frijol	112.0	0.036	2.134	1.601
Nogal	11.0	0.003	0.310	0.232
Total	3,152.0	1.000	63.754	85.005

El resultado indica que de una lámina promedio Requerida en el Módulo de 85.005 cm, únicamente serán abastecidos 63.754 cm, los cuales corresponden al 75 % de la dicha lámina Requerida.

5.3.- Ejemplo de aplicación

Para continuar con el ejemplo, se consideró que el resultado de los análisis económicos indicó que para obtener el mayor beneficio económico, se debería cultivar toda la superficie del Módulo, disminuyendo la lámina Requerida, es decir, practicar la producción con déficit hídrico. Lo anterior se hizo con la finalidad de ser congruente con la secuela de cálculo que deberá aplicarse en el análisis general.

6.- FUNCION DE PRODUCCION

Se ha llamado **Función de producción** de un cultivo, a la representación matemática de las diversas variables como: el suministro de agua en cantidad y oportunidad adecuada, la fertilización, las labores de cultivo antes de la siembra y durante el ciclo vegetativo, el control de enfermedades, la salinidad de los suelos, como variables independientes y al rendimiento del cultivo (masa/superficie, p.e. kg/ha) como la variable dependiente; o bien a su representación gráfica con las variables independientes en el eje de abscisas y las variables dependientes en el eje de ordenadas.

Se consideró en esta investigación que las únicas variables por incluir en la Función de producción, serían las relacionadas con el suministro del agua como variables independientes y al rendimiento del cultivo como variable dependiente, ya que de acuerdo con el objetivo general de ésta, interesa analizar el efecto del déficit hídrico sobre la producción del cultivo (rendimiento)

6.1.- Objetivos

- I.- Realizar una clasificación de los cultivos, para definir el número de modelos matemáticos por desarrollar.
- II.- Analizar el comportamiento de los modelos matemáticos que existen de las Funciones de producción, y especificar la estrategia de que se aplicará en esta investigación.
- III.- Aplicar el criterio de análisis adimensional PI (π) de Buckingham-Vaschi (citado por Echávez, 1996) para definir las variables independientes y las variables dependientes, que deben considerarse en el modelo matemático de las Funciones de producción de los cultivos.
- IV.- Desarrollar los modelos matemáticos de las Funciones de producción, que se adapten a la amplia variedad de cultivos que existen en los Distritos de Riego de México.

6.2.- Clasificación de cultivos

El producto esperado de los cultivos que se producen en los Distritos de Riego de México es de los siguientes tipos:

- Flor
- Fruto de cultivos anuales
- Fruto de cultivos perennes
- Forraje verde (materia verde)

**ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA**

- Forraje seco (materia seca)
- Grano

De acuerdo con estos tipos productos, es posible inferir que los modelos matemáticos de las Funciones de producción necesariamente deben estar definidos con restricciones diferentes, por ejemplo, si comparamos la representación gráfica de la Función de producción del producto Flor, con la representación gráfica de la Función de producción del producto Forraje verde (figura 1.4 y figura 1.5 respectivamente), se tiene que en el caso de la Flor, el inicio del rendimiento (kg/ha) será en el inicio de la etapa de floración del cultivo, y que para llegar hasta esta etapa, necesariamente debió haber existido un consumo previo de agua, desde la emergencia o germinación hasta el inicio de dicha etapa.

Por otro lado, en caso del Forraje verde (materia verde) el rendimiento (kg/ha) debe considerarse desde el momento en que la planta emerge de la tierra o germina, esto es, el rendimiento del cultivo se incrementa conforme se incrementa el abastecimiento del agua, hasta la etapa de maduración, considerada como la última etapa del ciclo vegetativo.

En el caso del Fruto de cultivos perennes (por ejemplo manzana, nuez, etc.), se considerará en esta investigación que el cultivo ya es un árbol, es decir, ya no se requiere la aplicación de agua para las etapas desde la emergencia, hasta el inicio de la floración, por lo tanto, la representación gráfica de la Función de producción será similar a la de los Forrajes.

Bajo estas circunstancias, se concluyó que los productos esperados de los cultivos, se clasifican en dos principales grupos, uno en el que matemáticamente el rendimiento (eje de ordenadas o variable dependiente) se inicia hasta un cierto valor del suministro del agua (eje de abscisas o variable dependiente), es decir, el punto de inicio del rendimiento queda fuera del origen de coordenadas y sobre el eje de las abscisas; y otro en el que matemáticamente el rendimiento se inicia desde que la planta germina o emerge del suelo, es decir, el rendimiento se inicia en el origen de coordenadas. Por lo tanto, serán dos los modelos matemáticos de las Funciones de producción, con los que debe representarse la relación del suministro del agua en cantidad y oportunidad óptimas con el rendimiento del cultivo, a saber:

- a).- Cuando el producto obtenido sea el grano, la flor o el fruto de cultivos anuales.
- b).- Cuando el producto obtenido sea el forraje (verde o seco), ya sea de cultivos anuales o semiperennes y cuando el producto obtenido sea el fruto de un cultivo perenne.

La representación gráfica de los modelos matemáticos propuestos para los casos de Funciones de producción a, b, se tiene en las figuras 1.4, y 1.5 respectivamente.

6.3.- Análisis de las Funciones de producción

Las investigaciones del déficit de agua en las diferentes etapas de crecimiento de los cultivos, indican que fisiológicamente es la etapa de desarrollo temprano (Downey A. LI. 1972, meiosis femenina) en la que el déficit de agua puede ocasionar mayores reducciones en la producción de estos. Por lo tanto, **en esta etapa debe abastecerse completamente el requerimiento.**

Lo anterior significa que para el caso específico de las Funciones de producción donde el producto obtenido sea el grano, la flor o el fruto de cultivos anuales (caso a), la producción debe considerarse nula (porque así sucede en realidad), hasta la fecha de terminación de la etapa del **desarrollo vegetativo** y el inicio de la etapa **estación media**. Por lo que en el tiempo transcurrido del desarrollo fenológico para alcanzar este punto; necesariamente debió existir un consumo de agua sin que haya habido producción (ver figura 1.1 y 1.2, Downey A. LI, 1972).

Analizando la expresión matemática y la representación gráfica de los principales modelos de las Funciones de producción (ver figura 1.6), se observó que en cada uno de ellos intervienen factores de respuesta al rendimiento que dependen de la etapa de desarrollo en la que se encuentre el cultivo, y que la producción se inicia a partir de un instante posterior a la siembra (cuando inicia la contabilidad de la evapotranspiración); por lo que las etapas: inicial y desarrollo vegetativo intervienen directamente en la

producción; lo cual se contrapone con lo sucedido en realidad para el caso de la producción de granos, flor o fruto de los cultivos anuales.

Por otro lado, únicamente el Modelo de Mitscherlich (1978) sugiere un decremento de la producción cuando se abastece una lámina de agua superior al nivel óptimo, esto está relacionado con procesos fisiológicos de la planta que traen consigo la aceleración de la maduración del fruto, y por lo tanto su pérdida de calidad.

En la mayoría de los modelos existentes de las Funciones de producción, se considera básicamente a las Evapotranspiraciones Real y Potencial (ver capítulo 1) como las variables de mayor importancia de las que depende el rendimiento de los cultivos; sin embargo siempre ha estado latente la posibilidad de demostrarse que la producción de los cultivos también depende en un alto grado de las características hidrodinámicas de los suelos en donde se desarrolle la especie.

6.4.- Factores de los que depende la producción de los cultivos

Como etapa inicial para obtener los modelos matemáticos de las Funciones de producción de los cultivos, se propuso una clasificación de las variables o factores que intervienen en el proceso en: **Variables de Referencia**, **Variables Controlables** y **Variables No Controlables**, considerando al concepto **Referencia** como el valor: óptimo, máximo o mínimo para alcanzar el adecuado desarrollo de los cultivos; y **Controlable** a la posibilidad de conocer previamente al análisis (porque no dependen de elementos aleatorios), la influencia que tiene sobre la producción, cualquier variación de los niveles de las variables. Se obtuvo la siguiente división:

Variables de Referencia

- a).- El rendimiento máximo de los cultivos
- b).- La evapotranspiración real para obtener el máximo rendimiento
- c).- El nivel óptimo de fertilización requerido por los cultivos
- d).- El rango de tensión para el óptimo desarrollo de los cultivos

Variables Controlables

- a).- La calidad del agua de riego
- b).- El nivel fertilización en los suelos
- c).- El extracto de saturación de los suelos para conocer su grado de salinización
- d).- Las prácticas o labores de cultivo

Variables No Controlables

- a).- La evapotranspiración real disponible para suministro a los cultivos (lámina de agua real disponible)
- b).- La tensión de humedad del suelo

En esta investigación se tomó interés por analizar únicamente a las variables del tipo **No Controlable**, debido a que con ellas se tuvo la conjunción de los cuatro elementos: AGUA, SUELO, PLANTA y ATMOSFERA, relacionadas con algunas variables de **Referencia**. A diferencia de esto, en las variables del tipo **Controlable** la relación se tiene solamente con dos de los cuatro elementos como máximo, por ejemplo, en la **calidad del agua de riego** se da la relación entre AGUA y PLANTA, quedando fuera del análisis los elementos SUELO y ATMOSFERA.

En tales condiciones, las variables con las que se realizó la propuesta de las Funciones de producción fueron:

- El Rendimiento Máximo de los cultivos, $R_{m\acute{a}x}$.
- La Evapotranspiración Real Óptima Total Acumulada, EVT_{rota} .
- La Evapotranspiración Real Disponible, EVT_{rd} .
- La Tensión de Humedad Mantenido en el suelo TH_m .
- La Tensión de Humedad Óptima requerida por el cultivo TH_o .

En términos funcionales, el rendimiento esperado (R) dependerá de:

$$R = f(R_{max}, EVT_{rota}, EVT_{rd}, TH_m, TH_o) \quad (6.4.1)$$

6.5.- Aplicación del Teorema PI (π) de Buckingham-Vaschy para obtener el modelo matemático de las Funciones de producción de los cultivos

El teorema PI (π) de Buckingham-Vaschy citado por Echávez A. G. (1996), establece que una ecuación dimensionalmente homogénea en donde intervengan m variables y cuyo rango de la matriz de los exponentes sea r , podrá expresarse como una combinación de $m-r$ productos adimensionales; esto es, en cada uno de ellos las unidades fundamentales se presentan de tal forma que se simplifican las del numerador con las del denominador.

Aunque en la mayoría de los problemas r , es igual al número de unidades de referencia, es conveniente comprobarlo construyendo la matriz de exponentes y determinando r .

$$\text{Si } R = f(R_{max}, EVT_{rota}, EVT_{rd}, TH_m, TH_o)$$

entonces, la matriz de exponentes resulta:

	R	$R_{m\acute{a}x}$	EVT_{rota}	EVT_{rd}	TH_m	TH_o
M	1	1	0	0	1	1
L	-2	-2	1	1	-1	-1
T	0	0	0	0	-2	-2

$m = 6$, $r = 3$ $m - r = 3$ números adimensionales.

$$\pi_1 = \frac{R}{R_{max}}$$

$$\pi_2 = \frac{EVT_{rd}}{EVT_{rota}}$$

$$\pi_3 = \frac{TH_m}{TH_o}$$

Aunque la mayoría de los modelos de las Funciones de producción, permiten incluir en su expresión matemática, este tipo de relaciones, se utilizó en esta investigación el modelo de Mitscherlich (1978), para el cual se propuso una modificación en su ecuación original.

6.6.- Modelo de Mitscherlich (1976) modificado

Considerando que en el modelo ya definido (ec. 1.1.13) intervienen solamente dos factores de respuesta al rendimiento (x_i), se utilizó a la relación de evapotranspiraciones del segundo número adimensional (π_2) y a la relación de tensiones de humedad del tercer número adimensional (π_3), como los factores x_1 y x_2 respectivamente; con lo que se obtuvo el modelo de la ecuación 5.6.1.

$$Y = A * \left[\left(1 - e^{-c_1 * x_1} * e^{-k_1 * x_1^2} \right) \right] \quad (1.1.13)$$

$$Y = A * \left[\left(1 - e^{-c_1 * x_1} * e^{-k_1 * x_1^2} \right) * \left(1 - e^{-c_2 * x_2} * e^{-k_2 * x_2^2} \right) \right] \quad (6.6.1)$$

Según la gráfica de la ecuación 1.1.13, la función alcanza un valor máximo en x_i , por lo tanto, derivando la función Y , con respecto a x , se obtiene:

$$f(x) = A * \left[\left(1 - e^{-c * x} * e^{-k * x^2} \right) \right]$$

$$f'(x) = (c + 2kx) * e^{-(c+kx^2)} \quad (6.6.2)$$

Aplicando el criterio de la primera derivada, para encontrar el punto en el que la función alcanza un máximo o mínimo, igualamos con cero a la $f'(x)$.

$$(c + 2kx) * e^{-(c+kx^2)} = 0$$

dividiendo ambos lados de la igualdad, entre $e^{-(c+kx^2)}$, se obtiene:

$$(c + 2kx) = 0$$

$$2kx = -c \rightarrow x = -\frac{c}{2k} \quad (6.6.3)$$

En la relación que tiene la Evapotranspiración Real Disponible con la Evapotranspiración Real Óptima Total Acumulada (EVT_{rd}/EVT_{rota}) y la Tensión de Humedad Mantenido con la Tensión de Humedad Óptima requerida por el cultivo (TH_m/TH_o), el rendimiento alcanza un valor máximo cuando $x=1$; por lo tanto:

$$1 = -\frac{c}{2k}$$

En ambas relaciones se conoció el valor de c , por lo que al despejar el valor de k , resultó:

$$k = -\frac{c}{2} \quad (6.6.4)$$

donde

c , representa el factor de efecto o la eficiencia de la variable analizada sobre el rendimiento, y su rango de valores para tener significado en las ecuaciones 1.1.13 y 5.6.1 o en cualquier otra que se derive de ellas fluctúa de 0 a 1. Se observa entonces que c tiene valores positivos; por lo tanto k resultará negativo.

Al sustituir sus valores en la función original (1.1.13), únicamente se alcanza el punto D y no el punto A de la figura 1.3. Para lograr obtener el punto A, la función debe dividirse entre el valor que toma la misma función en $x=1$, por lo tanto:

$$Y = A * \frac{\left[1 - e^{-(c+kx^2)}\right]}{\left[1 - e^{-(c+k)}\right]} \quad (6.6.5)$$

Con lo que se logra que el punto D de la figura 1.3 alcance el valor de A de la misma, con $x=1$ cuando c es de 100 %.

Si $c = 1$ $(1 - e^{-c/2}) = 0.3934693403$

Utilizando la escala del 0 al 1 para los valores de c , resulta:

$$Y = A * \frac{\left[\left(1 - e^{-\left(\alpha - \frac{c}{2} x^2 \right)} \right) \right]}{\left(1 - e^{-\left(\frac{c}{2} \right)} \right)} = A * \frac{\left[\left(1 - e^{-\left(\alpha - \frac{c}{2} x^2 \right)} \right) \right]}{\left(1 - e^{-\frac{c}{2}} \right)} = A * \frac{\left[\left(1 - e^{-\left(\alpha - \frac{c}{2} x^2 \right)} \right) \right]}{\left(1 - e^{-0.5} \right)}$$

Y la ecuación generalizada cuando son dos las variables de entrada es:

$$Y = A * \frac{\left[\left(1 - e^{-\left(c_1 x_1 - \frac{c}{2} x_1^2 \right)} \right) \right]}{0.393469} * \frac{\left[\left(1 - e^{-\left(c_2 x_2 - \frac{c}{2} x_2^2 \right)} \right) \right]}{0.393469} \quad (6.6.6)$$

donde

$$Y = R, A = R_{max} \quad x_1 = \pi_2 = \frac{EVT_{rd}}{EVT_{rota}} \quad y \quad x_2 = \pi_3 = \frac{TH_m}{TH_o}$$

Para ser congruente con el punto de vista ya explicado sobre el inicio de la producción en los cultivos cuyo producto final es el grano, la flor o el fruto de los cultivos anuales no perennes, se hizo el desfaseamiento del inicio de la producción hasta el momento en el que se cumpla el término de la estación o etapa de desarrollo vegetativo y el inicio de la etapa o estación media; por lo que en la ecuación 6.6.6 se consideró un término adicional en el valor de x_1 resultando el nuevo valor de:

$$x_1 = \frac{EVT_{rd}}{EVT_{rota}} - \frac{EVT_{rofdff}}{EVT_{rota}}$$

donde

EVT_{rofdff} , es la evapotranspiración real óptima acumulada hasta el final de la estación o etapa de desarrollo del follaje (F_{s2}), de acuerdo con el modelo de la gráfica del coeficiente basal de los cultivos propuesto por Doorenbos y Pruitt (1976).

Bajo esta consideración, existen dos condiciones para el cálculo de la producción cuando el producto final es el grano, la flor o el fruto de los cultivos anuales no perennes, a saber:

$$1).- \quad Y = 0 \quad \text{si} \quad EVT_{rd} \leq EVT_{rofdff}$$

$$Y = A * \frac{\left[\left(1 - e^{-\left(c_1 x_1 - \frac{c}{2} x_1^2 \right)} \right) \right]}{\left[\left(1 - e^{-\frac{x_1}{2}} \right) \right]} * \frac{\left[\left(1 - e^{-\left(c_2 x_2 - \frac{c}{2} x_2^2 \right)} \right) \right]}{\left[\left(1 - e^{-\frac{x_2}{2}} \right) \right]} \quad \text{si} \quad EVT_{rd} > EVT_{rofdff}$$

$$\text{con} \quad x_1 = \frac{EVT_{rd}}{EVT_{rota}} - \frac{EVT_{rofdff}}{EVT_{rota}}, \quad x_3 = 1 - \frac{EVT_{rofdff}}{EVT_{rota}} \quad y \quad x_4 = 1$$

Si el producto obtenido es el forraje o la materia seca, ya sea de cultivos anuales o semiperennes o bien sea el fruto de un cultivo perenne; debe utilizarse el modelo de la ecuación 6.6.6 bajo las siguientes condiciones:

2.-
con

$$Y = A * \frac{\left[\left(1 - e^{-\left(c_1 x_1 - \frac{c}{2} x_1^2 \right)} \right) \right]}{0.393469} * \frac{\left[\left(1 - e^{-\left(c_2 x_2 - \frac{c}{2} x_2^2 \right)} \right) \right]}{0.393469}$$

$$x_1 = \frac{EVT_{rd}}{EVT_{rota}}$$

Resultando en la gráfica de dicha función, que la producción se inicia en el origen es decir, cuando la relación EVT_{rd} / EVT_{rota} es mayor o igual que cero.

6.7.- Forma generalizada de las Funciones de producción

Considerando que de acuerdo al beneficio obtenido con la explotación de los cultivos, existen únicamente dos grupos de ellos, los cuales son:

- a).- Cuando el producto obtenido sea el grano, la flor o el fruto de cultivos anuales.
- b).- Cuando el producto obtenido sea el forraje o la materia seca, ya sea de cultivos anuales o semiperenes o bien el fruto de un cultivo perenne.

Se propuso entonces, un modelo de Función de producción para cada uno de ellos, partiendo de la investigación de **Downey (1972)**, a la que se consideró como la condición generalizada de las Funciones de producción

Con el procedimiento a continuación descrito, se define la Función de producción de un cultivo.

- Hacer la simulación del crecimiento óptimo del cultivo considerando el abastecimiento óptimo de agua, y definir el valor de la Evapotranspiración Real Óptima (EVT_{ro}) a nivel diario, así como el valor total acumulado de la misma EVT_{rota} .
- Se construye la gráfica **Desarrollo Fenológico Vs Evapotranspiración Real Óptima Acumulada**, de acuerdo con la simulación de crecimiento diario del cultivo; de lo que resultará una gráfica similar a la representada en la figura 6.1.

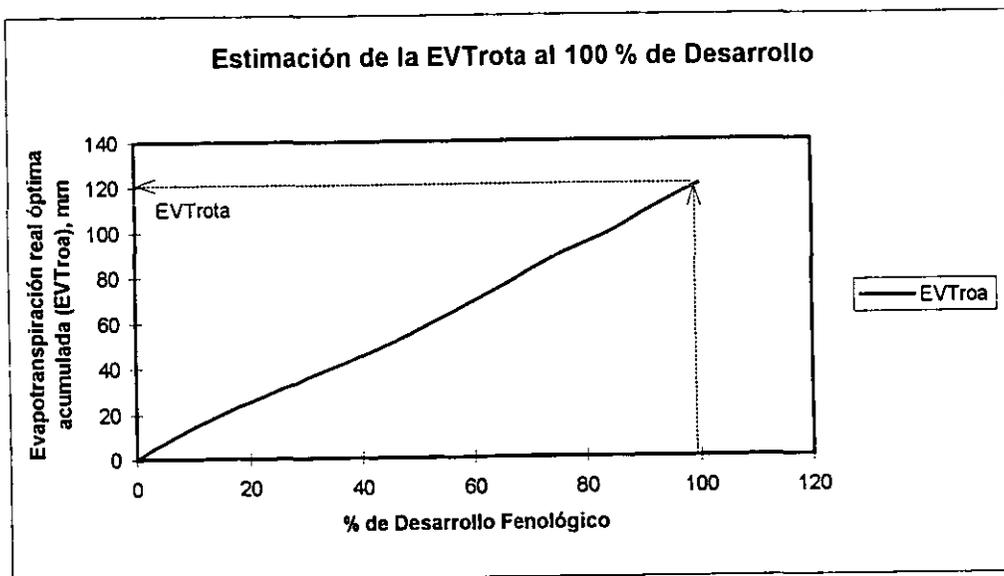


Figura 6.1.- Desarrollo Fenológico vs Evapotranspiración real óptima acumulada.

- Mediante el resultado de la simulación o bien con la gráfica 5.4 obtenida, identificar en el eje del % de Desarrollo Fenológico (eje de las abscisas) el punto que corresponda a la finalización de la estación o etapa de crecimiento vegetativo (que dependerá del cultivo analizado) y conocer el valor de la Evapotranspiración Real Óptima Acumulada (EVT_{roa} , eje de ordenadas) hasta dicho punto; valor al que se le llamará en lo subsecuente como Evapotranspiración Real Acumulada al Final de la estación o etapa del Desarrollo del Follaje, y se designará como EVT_{rfd} .

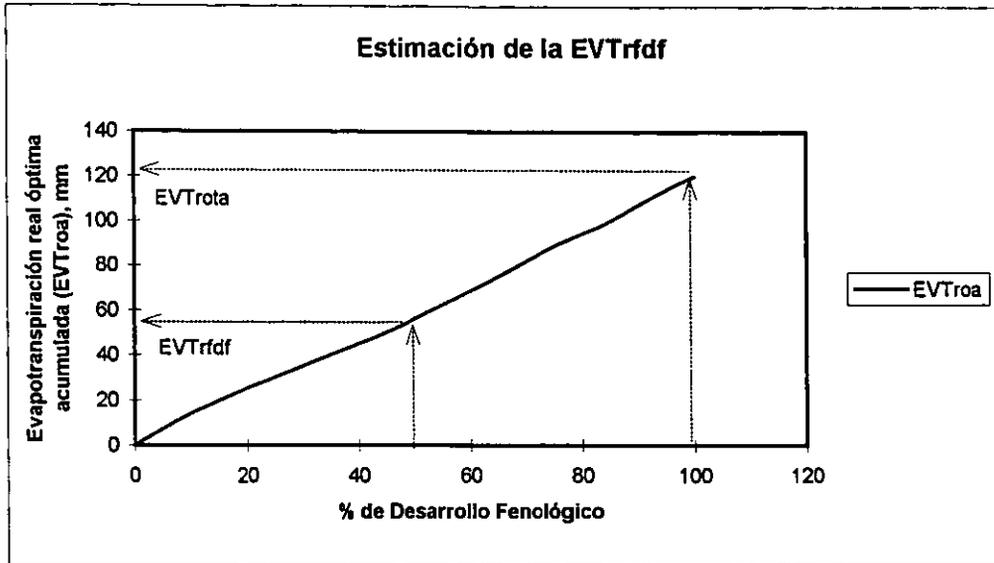


Figura 6.2.- Definición geométrica del valor EVT_{rfd} .

- Utilizando los valores de EVT_{rfd} , EVT_{roa} posteriores a EVT_{rfd} y EVT_{roa} obtenidos de la simulación del cultivo en condiciones de suministro adecuado de agua (sin déficit), construir la gráfica semejante a la representación del modelo obtenido por Downey (1972), poniendo en el eje de abscisas el valor de la división Evapotranspiración Real Óptima Acumulada entre Evapotranspiración Real Óptima Total Acumulada (EVT_{roa} / EVT_{roa}) y en el eje de ordenadas al porcentaje de la producción; indicando que el inicio de la producción es a partir del valor EVT_{rfd} / EVT_{roa} según los resultados de las gráficas de las figuras 1.1 y 1.2, obtenidas por Downey (ver figura 6.3).

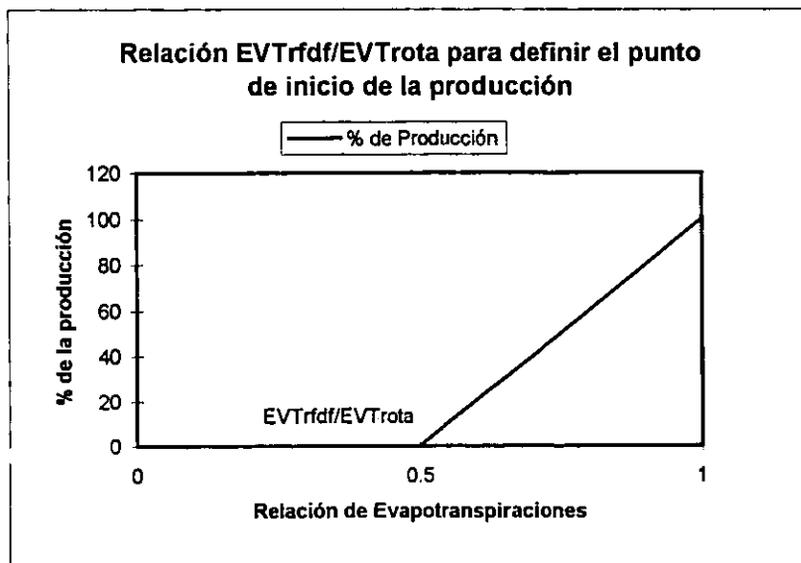


Figura 6.3.- Función de producción generalizada en condiciones de suministro de agua óptimo.

b).- Cuando el producto obtenido sea el forraje o la materia seca, ya sea de cultivos anuales o semiperennes y cuando el producto obtenido sea el fruto de un cultivo perenne

ESTACION DE CRECIMIENTO	Factor de peso para forraje o materia seca	Factor de peso para fruto de cultivos anuales
Inicial	0.30	0.10
Desarrollo del Follaje	0.40	0.10
Media	0.20	0.40
Maduración	0.10	0.40

La variable C_1 se calcula con la expresión:

$$C_1 = FP_i * \left(\frac{EVT_{rdi}}{EVT_{rori}} \right) + FP_{df} * \left(\frac{EVT_{rddf}}{EVT_{rordf}} \right) + FP_{me} * \left(\frac{EVT_{rdme}}{EVT_{rorme}} \right) + FP_{ma} * \left(\frac{EVT_{rdma}}{EVT_{rorma}} \right) \quad (6.8.1)$$

donde

FP_i , es el factor de peso considerado para la estación inicial, adimensional.

FP_{df} , es el factor de peso considerado para la estación del desarrollo del follaje, adimensional.

FP_{me} , es el factor de peso considerado para la estación media, adimensional.

FP_{ma} , es el factor de peso considerado para la estación o etapa de maduración, adimensional.

EVT_{rd} , es la evapotranspiración real disponible para cada estación: *i*, *df*, *me* y *ma*.

EVT_{ror} , es la evapotranspiración real óptima requerida para cada estación: *i*, *df*, *me* y *ma*, obtenida de la simulación del crecimiento óptimo de los cultivos.

Debe cumplirse que:

$$EVT_{rota} = EVT_{rori} + EVT_{rordf} + EVT_{rorme} + EVT_{rorma} \quad (6.8.2)$$

C_2 se definirá como el factor de eficiencia que se obtiene con la relación existente entre el contenido de humedad del suelo, con el rango de contenidos de humedad en el que la planta tiene su máximo rendimiento. Para su comprensión, es necesario referirnos a la figura 6.5.

En el eje de ordenadas se representa a la producción potencial máxima de un cultivo, que puede estar en unidades de ton, o ser adimensional.

En el eje de las abscisas se representa el valor de la relación entre los contenidos de humedad mantenidos (θ_{man}) en el suelo, contra los límites inferior (θ_{inf}) y superior (θ_{sup}), del rango de contenidos de humedad en el que se obtiene la producción potencial máxima del cultivo.

Con la finalidad de que la curva inicie en la abscisa al origen, debe restarse siempre en el numerador y en el denominador, el valor del contenido de humedad residual (θ).

En el eje de las abscisas existirán tres diferentes condiciones para obtener el valor de c_2 , por lo que debe calcularse con cualquiera de las siguientes expresiones:

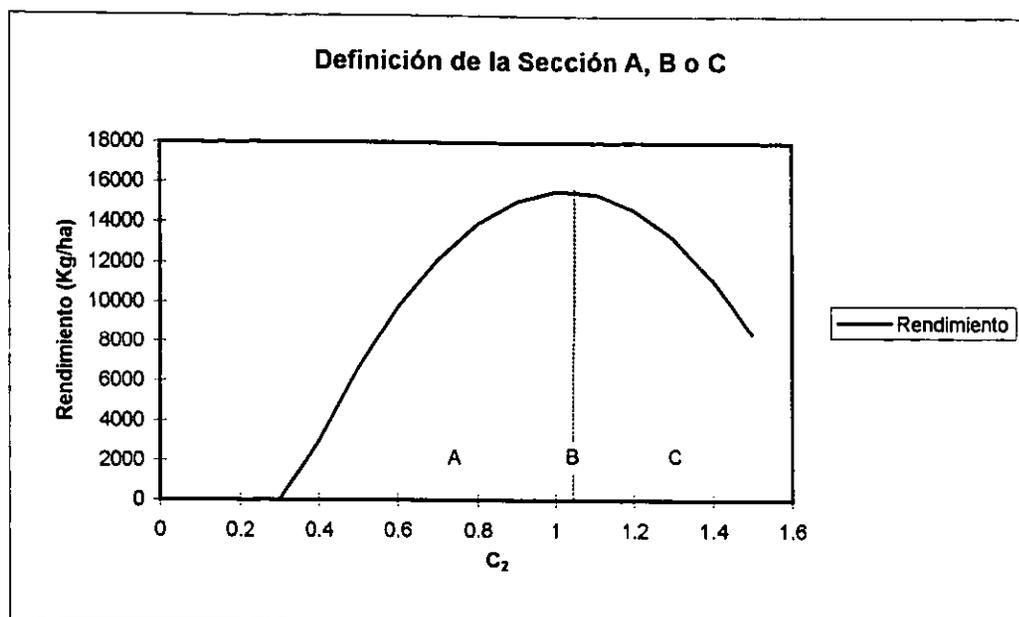


Figura 6.5.- Producción potencial máxima obtenida de un cultivo, sometido a diferentes condiciones de humedad en el suelo.

Sección A

$$C_2 = \frac{\theta_{man} - \theta_r}{\theta_{inf} - \theta_r} \quad \text{para } (\theta_{man} - \theta_r) < (\theta_{inf} - \theta_r) \quad (6.8.3)$$

Sección B

$$C_2 = 1 \quad \text{para } (\theta_{inf} - \theta_r) \leq (\theta_{man} - \theta_r) \leq (\theta_{sup} - \theta_r) \quad (6.8.4)$$

Sección C

$$C_2 = \frac{\theta_{man} - \theta_r}{\theta_{sup} - \theta_r} \quad \text{para } (\theta_{man} - \theta_r) > (\theta_{sup} - \theta_r) \quad (6.8.5)$$

6.9.- Ventajas que ofrecen los modelos matemáticos propuestos en esta investigación

- Para su obtención, es requerida información que es comúnmente registrada en las estaciones de medición de variables relativas al suelo, al agua y a la planta, en la República Mexicana..
- A diferencia de los modelos existentes, con este puede calcularse rápidamente el valor esperado de la producción de los cultivos, de acuerdo a la disponibilidad real de agua, sin la necesidad de realizar simulación del crecimiento cada vez que se modifica el valor de la disponibilidad real.
- En estos dos modelos de las Funciones de producción, queda incluida la gran mayoría de los cultivos explotables con fines de producción, en cambio, si se deseara utilizar los modelos antecedentes, únicamente sería posible analizar el cultivo en específico para el que se obtuvo.

- Según la comparación de la producción que se obtiene con un mismo nivel de abastecimiento de agua, en todos los modelos antecedentes y los dos aquí propuestos, se obtuvo en estos últimos, una mayor eficiencia teórica en el aprovechamiento del agua disponible cuando se produce bajo condiciones de déficit, esto por sus características de forma parabólica, las cuales pueden considerarse como **Envoltentes** para el resto de las Funciones de producción.
- En los dos modelos propuestos se utilizan variables que pertenecen a la RASPA, y que serán requeridas para realizar la conjunción con el **BENEFICIO ECONOMICO**.
- Los modelos de las Funciones de producción propuestos, permiten realizar el análisis integral de un Distrito de Riego, en sus diferentes unidades agrológicas suelo-planta, en cambio, los modelos existentes se aplican para unidades agrológicas suelo-planta únicas.
- Los resultados obtenidos con los modelos de las Funciones de producción propuestos, presentan una adecuada aproximación a los datos reales registrados en investigaciones experimentales realizadas en campo (Downey, 1972).
- Los modelos propuestos, son los primeros en su género que consideran la gran importancia que tiene la Tensión de Humedad del Suelo sobre la producción de los cultivos. Los modelos existentes minimizan dicha importancia incluyéndola en el cálculo de la evapotranspiración real; sin considerar el rango óptimo requerido por el cultivo, para dar la máxima producción.

En el Anexo 3 se presentan dos ejemplos de las fichas de dos diferentes cultivos producidos en el Módulo VI "Tlahualilo", en las que se especifican los parámetros de las Funciones de producción de acuerdo con la propuesta de Romero y Gracia (2000), aplicada en esta Investigación Doctoral.

7.- ANALISIS ECONOMICO DE LA PRODUCCION

En este capítulo se define la información relacionada con los aspectos económicos de la producción en el Módulo VI Tlahualilo, adaptada al método de análisis económico que se utilizó en esta investigación doctoral.

En el apartado "**Propuesta de solución para el análisis económico y el análisis de optimación**", se comparan los principales métodos que existen para optimizar el beneficio económico y la lámina de agua aplicada, se describen las ventajas y desventajas que tiene cada uno de ellos, y se justifica la selección del método que se utilizó en esta **Investigación Doctoral**.

En el apartado "**Análisis Económico**", se define un Modelo Lineal para representar los costos de producción de cada cultivo y otro Modelo Cuadrático para representar al Beneficio Económico, ambos en función de la lámina de agua aplicada.

7.1.- Objetivos

- I.- Comparar con otros métodos y justificar técnicamente, el uso del modelo de optimación propuesto por English M. (1990).
- II.- Con la información estadística que exista sobre los costos de producción de los diferentes cultivos, definir una función lineal en la que se relacione a dichos costos de producción (c) con diferentes niveles de suministro de agua (W).
- III.- Definir una función polinómica de segundo grado, en la que se relacione al rendimiento obtenido (y), con la aplicación de diferentes niveles de suministro de agua (W).

7.2.- Propuesta de solución para el análisis económico y el análisis de optimación

Para hacer el análisis de los sistemas agrícolas donde se practica el riego, debe realizarse como primera etapa, la conjunción de los elementos: agua, suelo, planta y atmósfera, ésta es conocida en el ámbito de la Ingeniería de Riego como "**RASPA**" (Relaciones Agua-Suelo-Planta-Atmósfera), dicha conjunción está representada en la conocida **Función de producción** del cultivo. La segunda etapa es la transformación

de la Función de producción, en una **Función de Beneficio Económico**, utilizando para ello, el precio de venta del cultivo (P_c). Como tercera etapa se define una **Función de Costos de Producción** del cultivo, para finalmente diferenciar con la intersección de ambas funciones (Beneficios y Costos), el área en la cual se tiene un **ingreso neto positivo o de ganancia**, del área en la cual se tiene un **ingreso neto negativo o de pérdida**.

Para desarrollar este apartado, se hizo una revisión de literatura, con la que fue posible definir que los procedimientos y métodos desarrollados sobre este tópico, por diversos investigadores, pueden ser clasificados en dos principales grupos, a saber::

- a).- Métodos que utilizan las **Técnicas de Programación Lineal**.
- b).- Métodos que utilizan las **Técnicas Analíticas**.

El método que mejor representa a los del tipo a, es el desarrollado por **Mannocchi F. y Mecarelli P. (1994)**, en el cual analizan las relaciones Agua -Suelo – Planta – Atmósfera - Beneficio Económico, aplicando técnicas de programación lineal para definir el nivel óptimo económico, de acuerdo con diferentes políticas de humedecimiento del suelo.

El análisis considera el uso del modelo de la Función de producción de **Doorenboos y Kassam (1979)**, el cual relaciona al rendimiento del cultivo: actual y máximo, con las evapotranspiraciones: actual y potencial, y con un coeficiente de respuesta al rendimiento (K_y) que depende de la etapa de desarrollo del cultivo.

$$\left(1 - \frac{Y_a}{Y_m}\right) = K_y * \left(1 - \frac{ET_a}{ET_m}\right) \quad (a.1)$$

donde:

Y_a , es el rendimiento actual del cultivo.

Y_m , es el rendimiento máximo del cultivo.

K_y , es un factor de respuesta al rendimiento

ET_a , es la evapotranspiración actual del cultivo.

ET_m , es la evapotranspiración máxima.

El valor de K_y para los diferentes cultivos, está basado en la evaluación de los resultados de un gran número de investigaciones que cubrían el amplio rango de las etapas de crecimiento.

Para la definición de la evapotranspiración máxima o potencial, se utiliza el modelo de **Blaney y Criddle** modificado por la **FAO**; para el cual se considera que es correcto su empleo cuando existe escasa información climatológica; y aquí este fue el caso.

La evapotranspiración actual es calculada por medio del modelo de balance de agua en el suelo propuesto por **Benfratello** en 1980 (cita de los autores), que se basa en el modelo de **Thorntwaite** y **Mather** de 1955 (cita de los autores). El algoritmo del balance hidrológico proporciona la estimación del contenido de agua en el suelo (SW_i) para la fase seca (cuando la evapotranspiración máxima es más grande que la lluvia efectiva $ET_{mi} > ERF_i$) con la ecuación a.2,

$$\frac{SW_i}{U} = \exp\left[\frac{(ERF_i - ET_{mi})}{U} + \ln\left(\frac{SW_{i-1}}{U}\right)\right] \quad (a.2)$$

y durante la fase de recarga (período húmedo, cuando $ET_{mi} \leq ERF_i$), la ecuación simple:

$$SW_i = SW_{i-1} + (ERF_i - ET_{mi}), \dots \text{con} \dots 0 \leq SW_i \leq U \quad (a.3)$$

donde U , es la lámina de agua aprovechable de acuerdo a la capacidad del suelo (mm). Durante el periodo seco, ET_a fue estimada como:

$$ETa_i = (SW_{i-1} - SW_i) + ERF_i \quad (a.4)$$

mientras que $ET_{ai} = ET_{mi}$ durante los periodos húmedos.

El cálculo de la evapotranspiración actual o real, se realiza con el modelo de Thornthwaite y Mather (1955, cita del autor), ecs. a.2, a.3 y a.4, el cual, a diferencia de algunos otros, incluye a la variable precipitación, lo que puede considerarse como una ventaja de simplicidad, en el proceso de cálculo posterior.

Para hacer intervenir al elemento beneficio económico, se utiliza el modelo financiero de la ec. a.5, para cada unidad suelo – cultivo, en el que las principales variables son el agua y los costos de producción. Dicho modelo es adecuado porque separa claramente el punto en el que finalizan las pérdidas y el inicio del beneficio neto.

La ecuación usada para cada unidad suelo-cultivo es:

$$NB = P_s Y_a - \left[C_0 + (C_1 Y_a) + \left(C_2 \frac{V}{EFI} \right) + \left(C_3 \frac{V}{EFI} \right) + (C_4 N) \right] \quad (a.5)$$

donde:

NB , es el beneficio neto por unidad de área (liras/ha).

P_s , precio de venta del producto (liras/ton).

Y_a Rendimiento actual del cultivo por unidad de área (ton/ha).

C_1 , costos de producción variando con el rendimiento del cultivo (liras/ton).

C_2 , costos del agua de riego (liras/m³).

C_3 , costos de distribución del agua de riego (liras/m³).

C_4 , costos fijos de cada riego (liras/(número ha)).

N , número de riegos (número).

V , volumen neto disponible para riego por unidad de área (m³/ha).

EFI , eficiencia de riego total.

Finalmente se define una función objetivo a ser maximizada (ec. a.6), a la cual se le imponen siete restricciones (ecs. a.7a, a.7b, a.7c, a.7d, a.7e, a.7f, y a.7g), siendo todas ellas utilizadas para aplicar la programación lineal y así obtener la ganancia máxima del sistema con una distribución óptima de superficies cultivadas de cada especie.

El procedimiento se aplicó en Citta di Castello, Perugia, Italia, sitio para el que se obtuvo la distribución óptima de superficies que debieron sembrarse año tras año en una misma parcela de 100 Ha, de los cultivos: Maíz de riego, Trigo de temporal y Girasol de temporal; así como el respectivo beneficio neto total alcanzado con dicha distribución de superficie sembrada anualmente de cada cultivo.

En el diseño de sistemas con riego en déficit, estos son los dos resultados que por un lado optimizan el aprovechamiento del limitado recurso agua que existe en las regiones áridas y semiáridas, donde son frecuentes las sequías, y por otro lado, maximizan el beneficio neto económico que puede obtenerse bajo las restricciones impuestas en cada uno de ellos.

$$Z = (NB_w * Area_w) + (NB_s * Area_s) + (NB_m * Area_m) \quad (a.6)$$

donde NB_w , beneficio unitario por hectárea para trigo; NB_s , beneficio unitario por hectárea para girasol; y donde NB_m , beneficio unitario por hectárea para maíz. Las ganancias pueden ser calculadas por a.5. La programación dinámica involucra una función objetivo la cual maximiza Z , sujeta a las siguientes restricciones:

$$Area_w + Area_s + Area_m = 100ha \quad (a.7a)$$

$$(V_s * Area_s) + (V_m * Area_m) = NIV \quad (a.7b)$$

$$0 \leq Area_w \leq 50ha \quad (a.7c)$$

$$0 \leq Area_s \leq 100ha \quad (a.7d)$$

$$0 \leq Area_m \leq 100ha \quad (a.7e)$$

$$S_{min} = 0.5U \quad (a.7f)$$

$$NIV \geq 0 \quad (a.7g)$$

donde *NIV*, es el volumen disponible neto para el área total de 100 ha. La restricción a.7b establece que solamente el maíz y el girasol pueden ser regados (como sucede en la realidad) y la restricción a.7c impone una condición agronómica válida, la cual establece que en una rotación de cultivos correcta, el trigo no puede ser establecido en dos ciclos consecutivos (porque tal práctica podría traer una drástica reducción de la producción), estableciendo la condición que la máxima área cubierta por estos cultivos es menor o igual al 50 % del área total. Tal restricción no debería existir para los otra dos cultivos bajo estudio (las restricciones a.7d y a.7e) porque esta traería disminución considerable en la producción, si la posibilidad de ataque a las plagas es excluida, La restricción a.7f establece que, teóricamente, un riego debe ser aplicado (si el agua está disponible) cuando la disminución en el contenido de agua del suelo alcance el 50 % de *U*, para ambos cultivos.

El mejor y más completo ejemplo de los métodos del tipo b, es el propuesto por English M. (1990), donde se considera la integración analítica de los procesos y variables que están presentes en los sistemas agrícolas con déficit de riego. Explica que bajo algunas circunstancias, los ingresos máximos obtenidos en un campo irrigado, pueden ser obtenidos con el riego en déficit. Tal aseveración está basada por la teoría económica y por investigaciones anteriores (English y Nuss, 1982; Hargreaves y Samani, 1984; James y Lee, 1971, citas del autor). Sin embargo desde el punto de vista de la ingeniería, tratar al riego en déficit resulta dificultoso. Dependiendo del plan, del diseño, o del manejo del sistema agrícola con déficit de riego, el analista debe basarse en las funciones de producción de los cultivos, las cuales relacionan el uso del agua con el rendimiento del cultivo. Pero la incertidumbre asociada con dichas funciones de producción, hace virtualmente imposible la predicción exacta del rendimiento; por lo tanto, es imposible el conocimiento preciso del nivel de agua usado para maximizar las ganancias (English, 1981).

Para definir el modelo de integración, se estudia por un lado a la Función de producción del cultivo generalizada, en la que se identifican dos zonas bajo la curva de dicha función (Figura 7.1): la zona I que puede caracterizarse como la zona con bajo riego y la zona II como la zona con sobre riego; y por otra parte a las funciones ingresos y costos. Estas dos funciones al conjuntarse, definen el límite entre las ganancias y las pérdidas.

En la conjunción de las funciones anteriores, se analiza el costo de oportunidad del agua, el cual provoca cambios significativos en la localización del límite entre pérdidas y ganancias, si varía de un precio a otro más alto.

Con las consideraciones anteriores, se propone entonces una formulación matemática general para analizar los sistemas agrícolas con déficit de riego.

Asumiendo por el momento, que se tratará únicamente a un solo cultivo, y que cantidades fijas de tierra y agua están asignadas para la producción del cultivo, se tendrá:

- A , Area total del cultivo que será regada (ha) (b.1)
- W_T , Agua total disponible para abastecer (m^3) (b.2)
- w , Agua aplicada por unidad de superficie (m^3/ha) (b.3)
- $y(w)$, Rendimiento por unidad de superficie, expresado como una función de w (kg/ha) (b.4)
- $c(w)$, Costos de producción por unidad de superficie, expresado como una función de w (\$/ha) (b.5)
- P_c , precio del cultivo (\$/kg) (b.6)
- $i_f(w)$, ingresos netos por unidad de superficie bajo riego (\$/ha) (b.7)
- $I_f(w)$, ingreso neto de la parcela de toda la superficie irrigada (\$) (b.8)
- $I_f(w)$, puede ser expresada como una función del ingreso neto por unidad de superficie y el área irrigada.

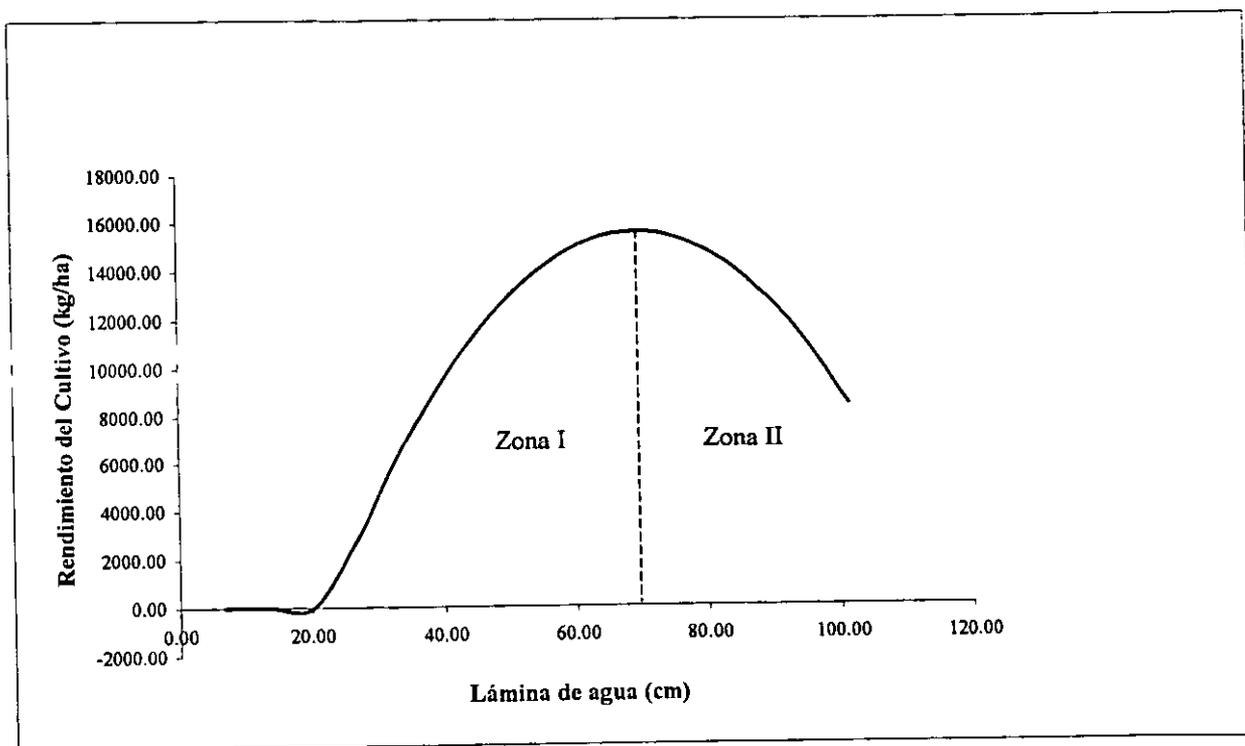


Figura 7.1.- Forma general de la Función de producción de un cultivo.

$$I_f(w) = A * i_f(w) \tag{b.9}$$

El ingreso neto por hectárea es una función del agua aplicada:

$$i_f(w) = p_c * y(w) - c(w) \tag{b.10}$$

El área Irrigada (A) puede ser expresada como una función del uso de agua. Si el agua de abastecimiento es limitada, el agricultor puede poner la suficiente tierra bajo riego, para utilizar únicamente el agua disponible, en el abastecimiento. El área irrigada puede ser entonces:

$$A = \frac{W_T}{w} \tag{b.11}$$

De otra manera, si la tierra es un recurso limitado, es razonable esperar que se ponga a producir toda la tierra disponible de la parcela. El área irrigada entonces se hace independiente de w .

El nivel de uso de agua que maximiza al rendimiento (W_m), puede ser determinado derivando la función del rendimiento:

$$\frac{\partial y(w)}{\partial w} = 0 \quad (\text{b.12})$$

El valor de w que satisface a la ecuación b.12, es W_m .

Para determinar el nivel de uso de agua que maximiza al ingreso neto cuando la superficie de tierra es limitada, puede tomarse a la derivada parcial de la ecuación b.9 con respecto a w .

$$\frac{\partial f(w)}{\partial w} = A * \frac{\partial i_1(w)}{\partial w} + i_1(w) * \frac{\partial A}{\partial w} \quad (\text{b.13})$$

Cuando la tierra es limitada, A debe considerarse constante. Igualando la derivada a cero y eliminando A , el nivel óptimo de uso de agua (W) debe ser definido por la ecuación:

$$\frac{\partial i_1(w)}{\partial w} = 0 \quad (\text{b.14})$$

la cual es la derivada de la ec. b.10, se hace igual a cero.

Cuando el agua esta limitada, A es una función de w , como fue notado, y óptimo uso de agua (W_w) puede ser determinado de la ec. b.13. Las derivadas de las ecs. b.13 y b.14 pueden ser escritas como:

$$\frac{\partial i_1(w)}{\partial w} = P_c * \frac{\partial y(w)}{\partial w} - \frac{\partial c(w)}{\partial w} \quad (\text{b.15})$$

$$\frac{\partial A}{\partial w} = - \frac{W_T}{w^2} \quad (\text{b.16})$$

Las ecuaciones para el óptimo uso de agua son entonces

$$P_c * \frac{\partial y(w)}{\partial w} = \frac{\partial c(w)}{\partial w} \quad (\text{b.17})$$

Cuando la tierra está limitada, y

$$w * \left[P_c * \frac{\partial y(w)}{\partial w} - \frac{\partial c(w)}{\partial w} \right] = P_c * y(w) - c(w) \quad (\text{b.18})$$

Cuando el agua es limitada. Resolviendo la ec. b.17 y b.18, se obtienen los valores de aplicación de agua, W , y W_w , para el óptimo rendimiento.

La ecuación b.17 es la expresión de un axioma de economía: el cual establece que el óptimo ocurre en el punto donde el costo marginal de producción es igual al valor del producto marginal. El lado izquierdo de la ec. b.17, es una expresión para el valor del producto marginal, donde el lado derecho es el costo marginal. Esto se repite en cualquier momento, en el que el óptimo uso de agua ocurra en el punto

donde las pendientes de las dos curvas de la figura 7.2, son iguales (W) cuando la superficie de tierra es el factor limitante.

La relación económica expresada en la ec. b.18, es diferente. Las implicaciones son visualizadas más claramente, si se recalca que la ec. b.18 es un resultado de la ec. b.13 evaluada en el óptimo (por ejemplo, cuando la derivada se hace igual a cero). El resultado de la ecuación es:

$$-A * \frac{\partial i_1(w)}{\partial w} = i_1 * \frac{\partial A}{\partial w} \quad (\text{b.19})$$

Suponiendo que el uso de agua es reducido en una pequeña cantidad, en todos los campos de la parcela, y el agua ahorrada de esta manera es usada para regar un incremento adicional de tierra. La expresión en el lado izquierdo de la ec. b.19, representará entonces la reducción acumulada en ingreso de todas las tierras originalmente regadas, mientras el lado derecho es el ingreso derivado de regar el incremento adicional de tierra. Cuando estas cantidades se balancean, el óptimo nivel de uso de agua a sido encontrado.

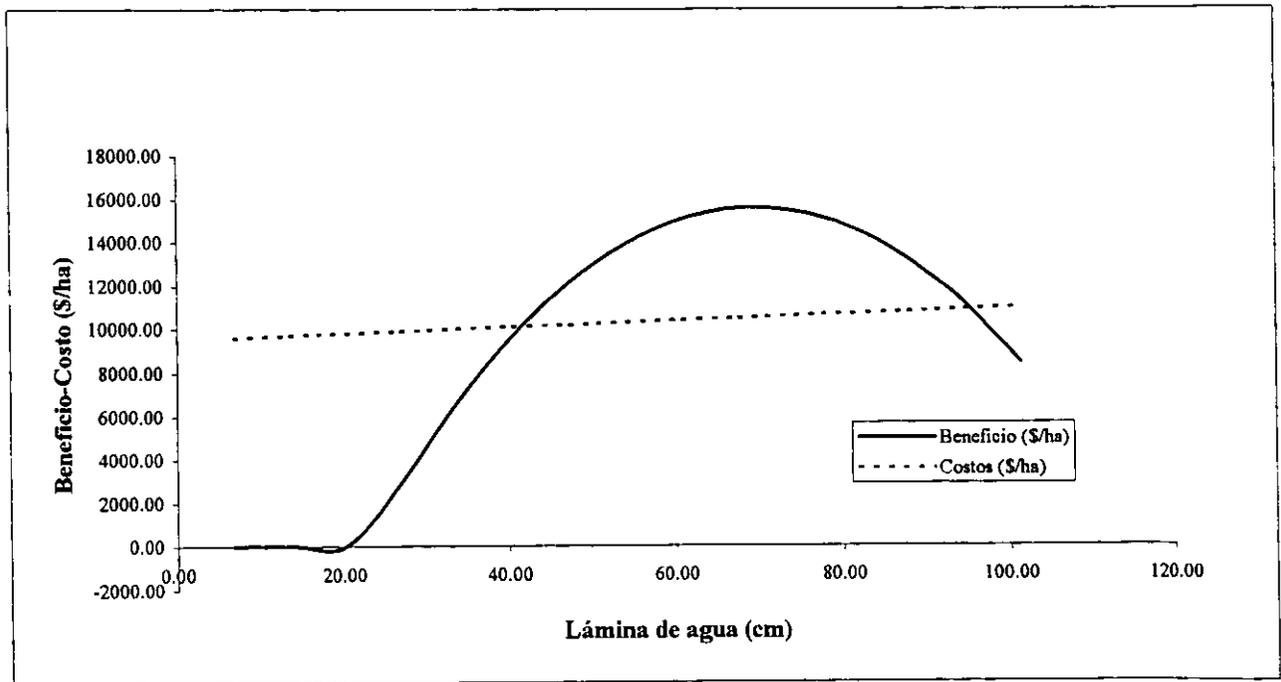


Figura 7.2.- Función de Beneficios y Función de Costos.

Las ecuaciones anteriormente mencionadas pueden ser utilizadas para determinar W_m (Ec.b.12), W_i , y W_w (Ecs. b.17 y b.18). Los dos niveles de uso de agua equivalentes (W_{ei} y W_{ew}) quedan como variables a determinarse. Por sustitución de W_m en la ec. b.10, el ingreso neto bajo riego total es determinado.

$$i_1(W_m) = P_c * y(W_m) - c(W_w) \quad (\text{b.20})$$

Este ingreso neto puede ser sustituido en el lado izquierdo de la ec. b.10

$$i_1(W_m) = P_c * y(w) - c(w) \quad (\text{b.21})$$

Las raíces de esta ecuación son el nivel de uso de agua que produce un ingreso por unidad de superficie equivalente al riego total; que es W_{ei} .

Similamente, el ingreso equivalente en el nivel de riego cuando el agua es limitada, puede ser derivado de la ecs. b.9 y b.11, lo que resulta en:

$$I_f(W_m) = \frac{W_T}{W_m} * i_i(W_m) \quad (b.22)$$

$$I_f(W_m) = \frac{W_T}{w} * i_i(w) \quad (b.23)$$

La Ec. b.23 puede ser entonces resuelta para W_{ow} .

Ecuaciones específicas para determinar el óptimo

Las ecuaciones b.12, b.13, b.17, b.18, b.21 y b.23 son expresiones completamente generales. Pueden ser usadas para derivar fórmulas explícitas para el uso óptimo del agua de riego. Para esto, es necesario primero desarrollar modelos específicos de rendimiento y costos ($y(w)$ y $c(w)$), con la sustitución de tales modelos en las ecuaciones generales, y resolviendo para distintos valores de suministro de agua (w).

A manera de ejemplo, supóngase que la función del rendimiento está representada por un polinomio cuadrático:

$$y(w) = a_1 + b_1 * w + c_1 * w^2 \quad (b.24)$$

La forma funcional es consistente con la naturaleza fundamental de la función de aplicación de agua dentro de la Zona I (figura 7.2). La función puede ser aproximadamente lineal a los niveles bajos de uso de agua, y entonces la curva sobre una tasa acelerada como sistema ineficiente se incrementa con incrementos en el uso de agua.

El costo funcional que se propone para el sistema, esta representado por una expresión lineal.

$$c(w) = a_2 + b_2 * w \quad (b.25)$$

donde los coeficientes a_2 y b_2 , son los costos fijos y los costos variables de producción, respectivamente.

La variación de niveles en los usos de agua de interés en el análisis (W_i , W_w , W_m , W_{ei} , W_{em}) puede ser derivada por sustitución de las ecuaciones b.24 y b.25 en las ecuaciones generales derivadas en primer lugar. Los cinco niveles de uso de agua pueden entonces ser calculados como:

$$W_m = -\frac{b_1}{2 * c_1} \quad (b.26)$$

$$W_{ei} = \frac{b_2 - P_c * b_1 + Z_1}{2 * P_c * c_1} \quad (b.27)$$

$$W_{ow} = \frac{-Z_2 + [Z_2^2 - 4 * P_c * c_1 * (P_c * a_1 - a_2)]^{1/2}}{2 * P_c * c_1} \quad (b.28)$$

$$W_i = \frac{b_2 - P_c * b_1}{2 * P_c * c_1} \quad (b.29)$$

$$W_w = \left(\frac{P_c * a_1 - a_2}{P_c * c_1} \right)^{1/2} \quad (\text{b.30})$$

donde

$$Z_1 = \left[(P_c * b_1 - b_2)^2 - 4 * P_c * c_1 * \left(\frac{P_c * b_1^2}{4 * c_1} - \frac{b_1 * b_2}{2 * c_1} \right) \right]^{1/2} \quad (\text{b.31})$$

y

$$Z_2 = \frac{P_c * b_1^2 - 4 * a_2 * c_1 + 4 * P_c * a_1 * c_1}{2 * b_1} \quad (\text{b.32})$$

La metodología se aplicó al caso del Lago Columbia en el que se obtuvieron buenos resultados.

Se concluyó que la conjunción analítica para tratar con el déficit de riego, lleva a la determinación de los cinco niveles de uso de agua: (1) El nivel al cual el rendimiento es maximizado (W_w); (2 y 3) El nivel de déficit al cual el ingreso neto fue igual al ingreso por riego total, con cualquiera de las limitaciones: en la tierra o en el agua (W_{el} o W_{ew}); (4) el déficit al cual los retornos para la tierra son maximizados (W_w); y (5) el déficit para el cual los retornos para el agua son maximizados (W_w). Para determinar estos cinco niveles de riego, el análisis puede ganar una útil perspectiva en los riesgos y retornos asociado con el déficit de riego.

Por otro lado se derivaron analíticamente las ecuaciones generales para el cálculo de los niveles óptimos (Ecs. b.12, b.17, b.18, b.21 y b.23). Tales ecuaciones pueden ser combinadas con las funciones de rendimiento y costos para derivar los cinco niveles relevantes del uso de agua. Como un ejemplo ilustrativo, las funciones de rendimiento y costo fueron derivadas basándose en una Función de producción cuadrática y una lineal para la función de costos. Las ecuaciones resultantes para W_m , W_l , W_w , W_{el} y W_{ew} (ecs. b.26-b.32) proporcionan un algoritmo simple para el análisis del óptimo uso del agua de riego. Las entradas requeridas son los coeficientes en la ec. b.24 y b.25 y el precio del cultivo.

Mientras que los niveles óptimos de riego no sean estimados, estos no pueden ser conocidos precisamente. Sin embargo, dentro del rango entre W_m y cualquiera de los niveles W_{el} o W_{ew} , el déficit de riego es más provechoso que el riego total. La extensión del rango anterior puede ser considerada como un indicador del rango de seguridad del déficit de riego. Conociendo la extensión del rango, un agricultor puede decidir si toma en cuenta la recomendación de aplicar el óptimo uso de agua, la confianza que él tiene en la recomendación y el riesgo atribuible.

Ventajas y desventajas de utilizar cada método

a).- Modelos que utilizan Técnicas de Programación Lineal

Ventajas

- Se obtiene el nivel óptimo de la superficie de cada cultivo, analizando en conjunto, el total de los cultivos que integran la plantilla de la zona de riego.
- Incluye las restricciones de las que está dependiendo el beneficio económico.
- Se obtiene directamente el diseño del sistema agrícola.

Desventajas

- No está definido como tal, el concepto "Producción con Riego en Déficit".
- Todas las funciones que intervienen en el análisis de optimización, deben necesariamente ser linealizadas, hecho con el cual, se pierde precisión y exactitud en algunos casos, disminuyéndose así la calidad de los resultados obtenidos.
- Cuando no existe suficiente información de un cierto cultivo, para que éste sea incluido en el análisis de optimización, se hace necesaria su exclusión del análisis, provocándose con esto, la existencia de grandes diferencias con respecto a su inclusión.

- Mientras mayor sea el número de cultivos que componen la plantilla de la zona de riego, mayor será el número de variables que integraran a la función objetivo por maximizar, por lo que el análisis matemático se complica.
- Se requiere una mayor inversión de tiempo, en los procesos de cálculo por computadora, lo cual confina la posibilidad de realizar cambios posteriores al diseño, cuando se está aproximando la fecha de siembra del primer cultivo en el ciclo agrícola para el que se hizo dicho diseño.

b.- Modelos que utilizan Técnicas Analíticas

Ventajas

- Si está definido como tal, el concepto "Producción con Riego en Déficit".
- Se definen cinco niveles de suministro de agua y su relación con el beneficio económico, pudiéndose seleccionar aquel que a juicio del agricultor sea más conveniente a sus intereses, ya sean económicos, agronómicos (de conservación del suelo y del agua) o la combinación de ambos.
- En el caso de que no exista suficiente información para integrar la función de uso de agua $y(w)$ o la función de costos $c(w)$, es posible excluir a éste del análisis, y aplicar el método al resto de los cultivos de la zona de riego, ya que la optimización se realiza de manera independiente para cada cultivo, lo que no altera la calidad de los resultados obtenidos en cualquier condición.
- La Función de producción $y(w)$ y la función de costos $c(w)$, pueden ajustarse a diferentes modelos matemáticos, p.e. polinómicos, logarítmicos, potenciales, etc, lo cual ayuda a adaptar el método a condiciones particulares.
- Requiere la inversión de poco tiempo en los procesos de cálculo por computadora, lo cual favorece la realización de cambios, en la fecha próxima al establecimiento de cada cultivo.

Desventajas

- No hace el análisis conjunto de todos los cultivos, por lo que el diseño final del sistema queda sujeto al criterio del ingeniero proyectista.

Selección del método utilizado en esta Investigación Doctoral

Comparando las ventajas que ofrece cada uno de los métodos, es claro notar que la opción que ofrece **mayores y mejores ventajas**, son los modelos del tipo b, mientras que son los modelos del tipo a, los que presentan **mayores y más drásticas desventajas** para diseño de los sistemas agrícolas con riego en déficit. Por lo que en esta investigación se consideró conveniente utilizar el método del tipo b.

7.3.- Análisis económico de la producción

Una vez seleccionado el método de optimación en el capítulo anterior, éste se aplicó al Módulo de Riego IV "Tlahualilo" del Distrito de Riego 017 "Región Lagunera", utilizando la información estadística del ciclo agrícola Primavera-Verano de 1997 reportada en el cuadro 7.1.

Cuadro 7.1.- Información estadística del ciclo agrícola Primavera-Verano de 1997, del Distrito de Riego 017 "Región Lagunera".

Cultivo	Rendimiento Medio kg/ha	Costo de Producción \$/ha	Precio de venta \$/kg	ingreso neto (i), \$/ha
Algodón	4,000	10119.91	5.00	9880
Melón	17,000	10119.91	0.60	80
Sandía	18,000	9852.93	0.55	47
Maíz de Grano	3,800	4340.92	0.86	-1073
Maíz Forrajero	40,000	4145.1	0.15	1855
Sorgo Industrial	4,700	4300.67	1.20	1339
Sorgo de Grano	4,000	4791.46	0.70	-1991
Sorgo Forrajero	60,000	4801.43	0.18	5999
Frijol	1,500	4168.57	3.50	1081
Nogal	1,100	6799.81	13.00	7500

7.3.1.- Función de beneficios

Como ya se explicó, la Función de Beneficios considera la relación de la Función de producción de cada cultivo, con el precio del mismo. Para obtener tal Función de Beneficios y posteriormente aplicar el procedimiento de English M. (1990), fue necesario en primer lugar, transformar el modelo de Mitscherlich Modificado (Romero, 2000) que se había utilizado hasta el capítulo 6 llamado Función de producción (ecuaciones del apartado 6.6, al modelo polinómico de segundo grado que propone English M. para la Función de producción (ecuación b.24); definiéndose así los parámetros del cuadro 7.2, en el que adicionalmente se especifica el coeficiente de correlación entre ambas modelos de Funciones de Producción (Mitscherlich Modificado, 2000, y English M., 1990).

Cuadro 7.2.- Parámetros para la Función de producción, según el modelo de English M. (1990).

Cultivo	c_1	b_1	a_1	r^2
Algodón	-0.64	162.87	-5,670.40	0.9951
Melón	-11.74	1,629.50	-30,606.00	0.9952
Sandía	-16.43	2,281.30	-42,848.00	0.9952
Maíz de Grano	-4.20	527.71	-8,292.10	0.9955
Maíz Forrajero	-14.37	1,799.30	4,355.60	0.9976
Sorgo Industrial	-1.41	192.57	508.15	0.9976
Sorgo de Grano	-2.51	372.59	-6,580.20	0.9957
Sorgo Forrajero	-18.62	2,272.70	7,985.30	0.9976
Frijol	-1.71	200.88	-2,813.70	0.9957
Nogal	-0.33	56.62	92.69	0.9967

Una vez realizada la transformación de modelos, se generó el modelo de la Función de Beneficios, utilizando para esto, el precio de venta del cultivo (P_c , cuadro 7.1), obteniéndose así los parámetros del cuadro 7.3.

Cuadro 7.3.- Parámetros para construir la Función de Beneficios ($P_c \cdot y(w)$), según el modelo de English M. (1990).

Cultivo	C_1	B_1	A_1
Algodón	-3.2048	814.33	-28,352
Melón	-7.0424	977.92	-18,364
Sandía	-9.0377	1,254.70	-23,567
Maíz de Grano	-3.6151	453.85	-7,131.2
Maíz Forrajero	-2.1558	269.89	653.34
Sorgo Industrial	-1.6933	231.08	609.79
Sorgo de Grano	-1.7604	260.81	-4,606.1
Sorgo Forrajero	-3.3510	499.09	1,437.4
Frijol	-5.9765	703.08	-9,847.9
Nogal	-3.9893	697.68	2,359.3

7.3.2.- Función de costos

La otra función requerida para aplicar el procedimiento de optimación, es la de Costos de Producción ($c(w)$), ésta se obtuvo mediante los registros estadísticos de producción (cuadro 7.1), en los cuales el dato del costo de producción de cada cultivo, se integró en algunos casos con un mínimo de cuatro conceptos básicos y en otros con un máximo de siete conceptos, entre los que estaba incluido el concepto denominado **Costo del Riego**. Para definir la función de costos según el Modelo de English, se consideró al costo total en pesos por hectárea (\$/ha), y al costo que representó el riego de cada cultivo, también expresado como pesos por hectárea (\$/ha), así como la lámina de agua utilizada durante todo el ciclo agrícola. Debido a que el Distrito de Riego no registró el valor de la lámina media abastecida a cada cultivo, se utilizó el valor reportado como rendimiento medio por hectárea (cuadro 7.1), el cual se

introdujo a la función de producción según la ecuación b.24, con los parámetros del cuadro 7.3, y de esta manera se estimó el valor de la lámina de agua que en términos teóricos fue suministrada al cultivo. La información utilizada, y los parámetros de la función de costos (ecuación b.25) se muestran en el siguiente cuadro:

Cuadro 7.4.- Parámetros de la Función de Costos $c(w)$, según el modelo de English M. (1990).

Cultivo	Costo del Riego, \$/ha	Lámina aplicada, cm	a_2	b_2
Algodón	1300	94.58	8819.91	13.74
Melón	600	41.80	9519.91	14.35
Sandía	600	36.02	9252.93	16.66
Maíz de Grano	470	30.16	3870.92	15.58
Maíz Forrajero	450	24.67	3695.1	18.24
Sorgo Industrial	470	27.18	3830.67	17.29
Sorgo de Grano	470	38.29	4321.46	12.27
Sorgo Forrajero	445	30.51	4356.43	14.58
Frijol	470	28.27	3698.57	16.63
Nogal	560	20.13	6239.81	27.81

8.- ANALISIS DE OPTIMACION

En este capítulo se aplica el Método Analítico desarrollado por English M. (1990), con el cual se definen cinco niveles óptimos de aplicación de láminas de agua al cultivo, bajo diferentes condiciones y/o restricciones, así como el ingreso neto asociado a cada nivel de suministro.

8.1.- Objetivo

I.- Aplicar el Método Analítico desarrollado por English M. (1990), para optimizar el riego.

8.2.- Estrategia de solución

Con base en las ecuaciones b.26 a la b.30, se definieron los cinco niveles de suministro de agua W_m , W_{el} , W_{ew} , W_l y W_w que optimizan el riego, así como el ingreso neto $i(w)$ que se hubiera obtenido de haberse aplicado cada uno de los cinco niveles. Los cálculos para los cultivos del Módulo VI "Tlahualilo", se presentan en el anexo **Niveles Óptimos de Suministro**, y el resumen de éste, en el cuadro 8.1.

Cuadro 8.1.- Niveles óptimos de suministro de agua W .

Cultivo	W_m , cm	W_{el} , cm	W_{ew} , cm	W_l , cm	W_w , cm
Algodón	127.24	122.95	91.29	125.10	107.78
Melón	69.42	67.38	57.04	68.40	62.92
Sandía	69.42	67.57	52.31	68.50	60.26
Maíz de Grano	62.73	58.46	48.49	60.61	55.17
Maíz Forrajero	62.60	54.14	22.54	58.37	37.56
Sorgo Industrial	68.23	58.02	27.88	63.13	43.61
Sorgo de Grano	74.08	67.11	68.46	70.59	71.21
Sorgo Forrajero	61.04	56.69	14.27	58.87	29.51
Frijol	58.82	56.04	38.54	57.43	47.61
Nogal	85.79	79.31	13.68	82.55	34.26

Por otro lado, el resumen del ingreso neto $i(w)$ para cada nivel de suministro, se presenta en el cuadro 8.2.

Cuadro 8.2.- Ingreso neto $i(w)$ obtenido con cada nivel de suministro (W).

Cultivo	$i(W_m)$, \$/ha	$i(W_e)$, \$/ha	$i(W_{ew})$, \$/ha	$i(W_l)$, \$/ha	$i(W_w)$, \$/ha
Algodón	12,890	12,890	9,248	12,905	11,945
Melón	5,055	5,055	4,154	5,063	4,852
Sandía	9,574	9,574	7,215	9,581	8,969
Maíz de Grano	2,264	2,264	1,749	2,280	2,173
Maíz Forrajero	4,264	4,264	1,536	4,303	3370
Sorgo Industrial	3,484	3,484	1,424	3,528	2,883
Sorgo de Grano	-177	-177	-164	-156	-156
Sorgo Forrajero	8,676	8,676	2,029	8,692	5,806
Frijol	6,153	6,153	4,031	6,164	5,588
Nogal	24,152	24,152	3,852	24,197	14,194

Las condiciones reales obtenidas en el ciclo agrícola que se evalúa, se representan en el anexo 4, cuyo resumen está en el cuadro 8.3.

Cuadro 8.3.- Suministro de agua (W) e ingreso neto ($i(w)$) en el ciclo agrícola de Primavera - Verano de 1997.

Cultivo	W , cm	$i(W)$, \$/ha	% de Sup.	W_{pon} , cm	$i(W)_{pon}$, \$/ha
Algodón	94.58	9880	0.258	24.40	2549
Melón	41.80	80	0.218	9.11	17
Sandía	36.02	47	0.114	4.11	5
Maíz de Grano	30.16	-1073	0.051	1.54	-55
Maíz Forrajero	24.67	1855	0.159	3.92	295
Sorgo Industrial	27.18	1339	0.011	0.30	15
Sorgo de Grano	38.29	-1991	0.138	5.28	-275
Sorgo Forrajero	30.51	5999	0.013	0.40	78
Frijol	28.27	1081	0.036	1.02	39
Nogal	20.13	7500	0.003	0.06	23
Suma				50.14	2,691

Aplicando el factor de ponderación de la columna "% de superficie" del cuadro 8.3 a los cuadros 8.1 y 8.2, se obtuvieron los cuadros 8.4 y 8.5 respectivamente.

Cuadro 8.4.- Ponderación de los niveles óptimos de suministro de agua W , para el módulo VI "Tlahualilo" del Distrito de Riego 017.

Cultivo	W_m , cm	W_e , cm	W_{ew} , cm	W_l , cm	W_w , cm
Algodón	32.83	31.72	23.55	32.28	27.81
Melón	15.13	14.69	12.43	14.91	13.72
Sandía	7.91	7.70	5.96	7.81	6.87
Maíz de Grano	3.20	2.98	2.47	3.09	2.81
Maíz Forrajero	9.95	8.61	3.58	9.28	5.97
Sorgo Industrial	0.75	0.64	0.31	0.69	0.48
Sorgo de Grano	10.22	9.26	9.45	9.74	9.83
Sorgo Forrajero	0.79	0.74	0.19	0.77	0.38
Frijol	2.12	2.02	1.39	2.07	1.71
Nogal	0.26	0.24	0.04	0.25	0.10
Total	83.17	78.59	59.38	80.88	69.69

Cuadro 8.5.- Ponderación del ingreso neto $i(w)$ obtenido con cada nivel de suministro (W), para el módulo VI "Tlahualilo" del Distrito de Riego 017.

Cultivo	$i(W_m)$, \$/ha	$i(W_{el})$, \$/ha	$i(W_{ew})$, \$/ha	$i(W)$, \$/ha	$i(W_w)$, \$/ha
Algodón	3326	3326	2386	3329	3082
Melón	1102	1102	906	1104	1058
Sandía	1091	1091	823	1092	1022
Maíz de Grano	115	115	89	116	111
Maíz Forrajero	678	678	244	684	536
Sorgo Industrial	38	38	16	39	32
Sorgo de Grano	-24	-24	-23	-22	-22
Sorgo Forrajero	113	113	26	113	75
Frijol	222	222	145	222	201
Nogal	72	72	12	73	43
Total	6,733	6,733	4,624	6,751	6,138

9.- DISEÑO O REVISION DEL SISTEMA AGRICOLA

En este capítulo se define la política de suministro o nivel óptimo de lámina de agua, con la cual se debe realizar el diseño o la revisión del sistema de producción agrícola y se estima en términos aproximados cual es el ingreso económico (beneficio económico) obtenido con la aplicación de dicha política de suministro.

También se explica el análisis y la interpretación que debe darse a los resultados obtenidos en los capítulos 7 y 8, esto con la finalidad de proponer el diseño del sistema agrícola por establecerse, o bien la revisión de dicho sistema, una vez que haya concluido un determinado ciclo agrícola.

9.1.- Objetivo

I.- Definir la política de suministro de agua que represente el mayor ingreso neto.

9.2.- Diseño

Se consideró en esta investigación que el **Diseño del Sistema Agrícola, consiste en hacer la Planeación de la Producción para el ciclo agrícola próximo venidero**, utilizando la información de ciclos agrícolas anteriores y definiendo estrategias para el ciclo agrícola que se planea; lo cual en términos generales implica:

- El conocimiento de la lámina promedio disponible de agua para todo el ciclo agrícola.
- Tomar la decisión de disminuir o mantener la superficie a regar, esto para alcanzar un ingreso neto igual o mayor al obtenido con el nivel de suministro de agua W_{ew} .
- Hacer la selección de los cultivos que deben producirse en ese ciclo en particular.
- Calcular cual es el ingreso neto esperado de la producción, de acuerdo con un precio de venta del producto y con los costos de producción.

Aunque no fue objeto de esta investigación, también es posible definir al **Diseño del Sistema Agrícola como la Planeación y Establecimiento de un Nuevo Distrito de Riego**, para el que indispensablemente, debe aplicarse un Modelo Numérico igual o muy semejante al que aquí se desarrolló, es decir, que incluya todos los elementos especificados en la figura 1 de este documento.

9.3.- Revisión

Se consideró en esta investigación que la **Revisión del Sistema Agrícola, consiste en comparar los resultados de producción y el ingreso neto económico que se obtuvieron en un ciclo agrícola que concluyó, con los resultados teóricos obtenidos de aplicar el Modelo Numérico aquí desarrollado.** Siendo el objetivo final de la revisión, la propuesta de estrategias para el diseño del ciclo agrícola venidero.

9.4.- Ejemplos de aplicación

Es necesario aclarar que en este caso en particular, los resultados que ofrece el Modelo Numérico, únicamente pueden ser comparados con la situación de revisión, ya que en el Distrito de Riego 017, nunca se han aplicado técnicas de este tipo para diseñar o planear el sistema agrícola, por lo tanto, bajo ciertas consideraciones y utilizando la información del ciclo agrícola de Primavera-Verano de 1997, se diseñará el ciclo agrícola de Primavera-Verano de 1998.

Se presentan a continuación dos ejemplos, uno de **Diseño** y otro de **Revisión**, con el objetivo de mostrar el procedimiento a seguir y la información con la que se debe contar en cada caso.

9.4.1.- Diseño

La plantilla de cultivos para el ciclo agrícola de Primavera-Verano de 1998, en el Módulo de Riego VI Tlahualilo del Distrito de Riego 017 "Región Lagunera de México", se integrará por los 11 cultivos listados en la primera columna del cuadro 7.1. De acuerdo con sus épocas de siembra y cosecha, la duración de sus ciclos fenológicos, la región geográfica en la que se producen y el tipo de suelos en los que se cultivan, se definió que la lámina de agua ponderada de acuerdo con la superficie que se regará de cada uno de ellos es de 85 cm (cuadro 5.3); sin embargo, del análisis hidrológico que se realizó, fue definido que únicamente estaba disponible una lámina de 63.75 cm (cuadro 5.3), la cual corresponde al 75 % de la requerida (apartado 5.2).

Considerando tal situación hídrica, diseñar o planear el sistema para el ciclo agrícola de Primavera-Verano de 1998.

Solución

Utilizando la información del cuadro 7.1 con la consideración de que el precio de venta que en él se especifica, será el del ciclo Primavera-Verano de 1998, se generan los cuadros 7.2, 7.3, 7.4, 8.1, 8.2, 8.4 y 8.5.

De acuerdo con el cuadro 8.4, la lámina ponderada a la que más se aproxima el valor de la lámina de agua disponible para todo el ciclo (66.75 cm), es la calculada para en nivel de suministro W_w , la cual es de 69.69 cm, y cuyo ingreso neto ponderado para todo el Módulo de Riego que se analiza, se estima en 6,138 pesos/hectárea (\$/ha).

Con lo cual se concluye que las políticas de riego con las que se podría obtener un ingreso neto igual o superior a los 6,138 \$/ha son:

Política 1: Establecer y regar las 3,152 ha del Módulo VI "Tlahualilo" (cuadro 8.3), de acuerdo con las láminas especificadas en la columna W_w del cuadro 8.1, con lo cual se obtendrá un ingreso neto de 6,138 \$/ha, según el análisis de ponderación resumido en el cuadro 8.5 de este documento.

Política 2: No sembrar Sorgo de Grano, Maíz de Grano, ni Sorgo Industrial, ya que sus ingresos netos de -156 \$/ha (pérdida), 2,173 \$/ha y 2,883 \$/ha respectivamente (cuadro 8.2), son los más bajos de la plantilla de cultivos. La superficie total de los tres cultivos es de 629 ha, misma que de acuerdo con las características agronómicas de los suelos en los que

están establecidos, podrían ser remplazados con los cultivos de Algodón, Sandía o Sorgo Forrajero, ya que los ingresos netos de estos cultivos son 11,945 \$/ha, 8,969 \$/ha y de 5,580 \$/ha respectivamente (cuadro 8.2); esta acción incrementaría en forma significativa el ingreso neto ponderado de todo el Módulo de Riego. Es importante aclarar que por tratarse de un cultivo del tipo C (según la clasificación realizada y propuesta en el capítulo 6), no se recomienda la siembra del Nogal, aunque el ingreso neto de éste sea de 14,194 \$/ha, ya que sus beneficios se obtendrían en el mediano plazo (4 a 5 años).

9.4.2.- Revisión

La plantilla de cultivos para el ciclo agrícola de Primavera-Verano de 1997, en el Módulo de Riego VI "Tlahualilo" del Distrito de Riego 017 "Región Lagunera de México", se integró por los 11 cultivos listados en la primera columna del cuadro 7.1. De acuerdo con sus épocas de siembra y cosecha, la duración de sus ciclos fenológicos, la región geográfica en la que se produjeron y el tipo de suelos en los que se cultivaron, se definió que la lámina de agua ponderada de acuerdo con la superficie que se riega de cada uno de ellos era de 85 cm (cuadro 5.3); sin embargo, de un análisis realizado al concluir dicho ciclo agrícola, se obtuvo que la lámina ponderada que se abasteció al total de la superficie del Módulo fue de 50.14 cm (cuadro 5.3) y que el ingreso neto real ponderado según las estadísticas de producción, fue de 2,691 pesos/hectárea (\$/ha, cuadro 8.3).

Considerando la situación hídrica y el beneficio económico obtenido, revisar el sistema, relacionando los resultados reales con los resultados teóricos que ofrece el Modelo Numérico aquí desarrollado, para emitir la opinión técnica que justifique la obtención de dichos resultados.

Solución

Siguiendo el mismo procedimiento descrito en el apartado de diseño, con la información del cuadro 7.1, se generaron los cuadros 7.2, 7.3, 7.4, 8.1, 8.2, 8.3, 8.4 y 8.5.

De acuerdo con el cuadro 8.4, la lámina ponderada a la que más se aproxima el valor de la lámina de agua abastecida en todo el ciclo (50.14 cm), es la calculada para en nivel de suministro W_{ew} , la cual es de 59.38 cm, y cuyo ingreso neto ponderado para todo el Módulo de Riego que se analiza, se estima en 4,624 pesos/hectárea (\$/ha).

No obstante que la lámina real abastecida de agua (50.14 cm, cuadro 8.3), difiere en aproximadamente el 15 % de la lámina W_{ew} (59.38 cm, cuadro 8.4), el ingreso económico ponderado real (2,691 \$/ha, cuadro 8.3) difiere en 42 % (1,933 \$/ha) del ingreso neto teórico que se alcanza con el nivel W_{ew} (4,624 \$/ha, cuadro 8.5), lo cual podría parecer ilógico, sin embargo, para interpretar adecuadamente tal comportamiento, se construyó el cuadro 9.1, el cual varía con respecto al cuadro 8.3, en las columnas 3 y 6, ya que para el llenado de estas, se utilizaron los modelos de beneficio y costos según English, con los parámetros de los cuadros 7.3 y 7.4.

Cuadro 9.1.- Suministro de agua (W) real e ingreso neto ($i(w)$) teórico en el ciclo agrícola de Primavera - Verano 1997.

Cultivo	W , cm	$i(W)$, \$/ha	% de Sup.	W_{pon} , cm	$i(W)_{pon}$, \$/ha
Algodón	94.58	9880	0.258	24.40	2549
Melón	41.80	89	0.218	9.11	19
Sandía	36.02	48	0.114	4.11	6
Maíz de Grano	30.16	-1072	0.051	1.54	-55
Maíz Forrajero	24.67	1854	0.159	3.92	295
Sorgo Industrial	27.18	1339	0.011	0.30	15
Sorgo de Grano	38.29	-1992	0.138	5.28	-275
Sorgo Forrajero	30.51	8744	0.013	0.40	114
Frijol	28.27	1083	0.036	1.02	39
Nogal	20.13	7987	0.003	0.06	24
		Suma		50.14	2,730

La revisión del sistema finaliza con la elaboración del cuadro 9.1, con el cual es posible demostrar que en este caso, los valores registrados como resultados reales, difieren en menos del 1% con respecto a los resultados teóricos que ofrece el Modelo Numérico desarrollado en esta Investigación Doctoral.

La representación gráfica del nivel de suministro real (llamado nivel actual) de este caso en particular, se incluyó en las gráficas del anexo **Condiciones de Producción Primavera-Verano de 1997**, lo cual permite tener una mejor sensibilidad en la comparación de los resultados.

10.- METODO DE DISEÑO O REVISION

En este capítulo se describe la metodología general para diseñar o revisar un sistema de producción agrícola, que produzca en condiciones de abastecimiento de agua óptimo, o bajo condiciones de déficit hídrico. La metodología está sustentada en los procedimientos y métodos desarrollados y aplicados en los nueve capítulos anteriores, por lo que aquí únicamente se hace referencia a los capítulos y apartados específicos considerados dentro del Modelo Numérico **ADEHISIA**

10.1.- Aplicación del modelo numérico ADEHISIA para el diseño de un sistema agrícola

- a) Conocer la ubicación geográfica del área de estudio (sistema de producción agrícola) en latitud, longitud y altitud.
- b) Caracterizar el área de estudio utilizando como ejemplo la descripción del apartado 2.3 de esta investigación.
- c) Identificar el tipo de fuente de abastecimiento de agua (superficial, subterránea o atmosférica).
- d) En el caso de que la fuente sea del tipo superficial, conocer las características geomorfológicas y la ubicación geográfica de las cuencas de aportación de escurrimiento hacia la fuente de abastecimiento (presa, bordo, jagüey, lago o laguna).
- e) En el caso de que exista, recopilar la información hidrométrica de los volúmenes de ingreso a las fuentes de abastecimiento, en el caso de que tal información no exista, debe aplicarse un modelo Lluvia - Escurrimiento para conocer el volumen de ingreso por cuenca propia hacia la fuente de abastecimiento, para lo cual se sugiere utilizar los resultados obtenidos por la Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos de la Comisión del Agua, en el estudio "Integración de la lluvia normal anual de la República Mexicana (Período 1931 - 1990)", para la estimación de la precipitación, y los procedimientos del Servicio de Conservación de Suelos del Bureau Reclamation de Estados Unidos de América.
- f) Se requieren registros en el nivel mensual, y es recomendable que la longitud de los registros sea mayor a 20 datos, ya que de estos dependerá la calidad de la información de la que se sustentará **ADEHISIA**.

- g) En el caso de que en los registros falten datos, estos deberán generarse con procedimientos determinísticos de tal manera que se cuente con un período de registro de 20 a más años.
- h) Realizar un análisis hidrológico con los procedimientos descritos en el apartado 3.2, para proponer los volúmenes de agua que ingresarán a la fuente de abastecimiento durante el ciclo agrícola para el que se diseña el sistema y así estimar la disponibilidad de agua para dicho sistema.
- i) Realizar un análisis de la precipitación con los procedimientos descritos en el apartado 3.3, para hacer el pronóstico de la precipitación que se tendrá en el sitio donde se ubica el sistema agrícola, durante el ciclo agrícola para el que se diseña dicho sistema.
- j) Se realiza un análisis de sequías hidrológicas (volúmenes de escurrimiento) y otro de sequías meteorológicas (precipitación) con los procedimientos descritos en los apartados 3.4 y 3.5 respectivamente, para estimar el período de retorno en meses, de las sequías con duración de n meses consecutivos. Se sugiere que por lo menos se analice una secuencia de seis meses consecutivos de sequías ($n = 6$), ya que este período es la duración promedio de la mayoría de los ciclos fenológicos de los cultivos.
- k) Conocer la información estadística de los resultados de producción obtenidos en ciclos agrícolas anteriores (cultivos, rendimientos, costos de producción, beneficios, precios de venta), las características agrológicas (suelos) de las áreas en las que fueron producidos y las características hidráulicas de la infraestructura utilizada para el suministro del agua desde la fuente de abastecimiento, hasta la parcela.
- l) Con los procedimientos del apartado 4.4 al apartado 4.7, calcular la evapotranspiración que manifestará cada cultivo ya sea con suministro adecuado de agua o con déficit hídrico, mediante la simulación del crecimiento del cultivo. Obtener resultados similares a los del apartado 4.8.
- m) Comparar el volumen Disponible con el volumen de Evapotranspiración como se explica en el capítulo cinco.
- n) Definir el modelo matemático de Función de Producción del cultivo, aplicando el procedimiento de los apartados 6.7 y 6.8.
- o) Obtener de la información estadística de los resultados obtenidos en el sistema agrícola, en un ciclo agrícola anterior, y construir un cuadro semejante al 7.1 del apartado 7.3.
- p) Obtener el modelo matemático de la Función de Producción ($y(w)$) de English M. (1990), mediante la transformación del modelo matemático de la Función de Producción obtenida de aplicar los procedimientos de los apartados 6.7 y 6.8, en un modelo polinómico de segundo grado (ecuación b.24), obteniéndose así parámetros semejantes a los del cuadro 7.2.
- q) La Función de Beneficios se obtiene multiplicando la Función de Producción ($y(w)$) de English M (1990) por el precio del cultivo reportado en el cuadro 7.1, definiéndose así, parámetros semejantes a los del cuadro 7.3.
- r) Definir la Función de Costos de acuerdo al modelo de English M. (1990), con parámetros semejantes a los del cuadro 7.4 y la ecuación b.25.
- s) Aplicar el procedimiento de optimización de English M. (1990) descrito en el apartado 7.2, el cual se resume con la definición de las ecuaciones b.24 y b.25, así como el cálculo de las ecuaciones b.31 y b.32, para definir los cinco niveles de suministro de agua (W 's) que teóricamente optimizan la producción (ecuaciones de la b.26 a la b.30).
- t) Construir cuadros semejantes a los del capítulo ocho.
- u) Definir la política a seguir para realizar el diseño del sistema agrícola, mediante el análisis numérico de los resultados de los cuadros del capítulo ocho, con el que será posible justificar la continuación o

el separo de la producción de un cierto cultivo y la superficie más conveniente por establecerse de cada uno de ellos, de acuerdo con la disponibilidad real de agua en la fuente de abastecimiento, para finalmente obtener los mayores ingresos económicos netos (ver capítulo nueve).

10.2.- Aplicación del modelo numérico ADEHISIA para la revisión de un sistema agrícola

En este caso únicamente se evalúan los resultados obtenidos en un ciclo agrícola que pasó, contra los valores que se hubiesen obtenido de haber aplicado la política de producción teóricamente óptima, por lo tanto, la metodología que debe seguirse en este caso, se inicia en el inciso k y finaliza con el inciso u de la metodología del diseño.

11.- CONCLUSIONES

Se exponen a continuación las conclusiones a las que se llegó con el desarrollo de esta investigación doctoral, sustentadas en los resultados obtenidos en los diez capítulos básicos que la constituyen.

- Existe una gran variedad de modelos de Funciones de producción en las que la variable independiente es la lámina de agua suministrada. Ella es comúnmente considerada en un sistema cartesiano en el eje de las abscisas, y como variable dependiente el rendimiento del cultivo, representado en el eje de ordenadas. La mayoría de estos modelos de Funciones de producción, fueron obtenidos de análisis realizados para cultivos específicos, por lo tanto, hasta antes de concluida esta investigación doctoral, existía una gran cantidad de cultivos para los cuales no había un modelo matemático que representara su Función de producción.
- Los experimentos realizados por Downey A. LI. (1972) demuestran que la producción o rendimiento de un grano se inicia después de que el cultivo ya consumió una cierta cantidad de agua, por lo menos hasta después de la etapa fenológica del crecimiento y desarrollo vegetativo, lo cual se contrapone con las propuestas de autores como Hanks J. R. (1973), Doorenbos J. y Pruitt O. W. (1976), Mitscherlich (1978), Rao H. N. *et al* (1988) y Sánchez B. (1975). Dado que el trabajo de Downey (1972) se basa en resultados experimentales, ésta tiene mayores ventajas para ser utilizada en investigaciones relacionadas con las Funciones de producción de los cultivos, por lo tanto, fue adecuado su empleo en esta investigación doctoral.
- Con excepción del modelo de Mitscherlich (1978) y los resultados experimentales de Downey A. LI. (1972), el resto de los modelos de las Funciones de producción no consideran un decremento en el rendimiento cuando se suministra al cultivo una lámina de agua superior a la que requiere. De esta manera, con la integración del modelo de Mitscherlich modificado (Romero y Gracia, 2000) y el trabajo de Downey (1972), se representa con aceptable grado de aproximación, el proceso productivo de los cultivos en sus tres condiciones, a saber: a) cuando se abastece al cultivo menos agua de la que este demanda durante su ciclo fenológico, b).- cuando se abastece al cultivo el 100 % de la demanda de agua durante el ciclo vegetativo y c) cuando se abastece al cultivo una lámina de agua superior a la que este requiere durante su ciclo vegetativo.

Bajo las condiciones antes descritas, se desarrollaron en esta investigación doctoral, dos modelos de Funciones de producción, de los cuales es posible concluir:

- En los dos modelos matemáticos de las Funciones de producción que se proponen en esta investigación, queda cubierto el amplio rango de cultivos explotables con fines de producción agrícola.
- En estos modelos se considera el decremento de la producción cuando se abastece al cultivo una lámina de agua superior a la que requiere, como sucede en realidad.
- La obtención de los parámetros que intervienen en los modelos matemáticos de las Funciones de producción desarrolladas en esta investigación, es fácil y rápida, sin que se requiera realizar trabajos de experimentación de campo.
- Los modelos numéricos para analizar el riego en déficit, fueron clasificados en esta investigación, en dos principales grupos, a saber:
 - a).- Métodos que utilizan las **técnicas de programación lineal**.
 - b).- Métodos que utilizan las **técnicas analíticas**.

Al respecto de lo cual, se concluye:

- Para las condiciones del acervo informático que existe de los sistemas agrícolas de la República Mexicana, es conveniente utilizar los métodos del tipo **b**, ya que para aplicar los del tipo **a**, se requiere la información estadística del total de la plantilla de cultivos del sistema que se analiza, y en la mayoría de los sistemas agrícolas de México, únicamente se registra la información de los cultivos principales y no la de aquellos secundarios o de menor importancia, lo cual impide su inclusión en el método, ocasionándose con esto un deterioro de la calidad de los resultados, ya que este método se basa en el análisis del conjunto de los cultivos. En cambio, con los métodos del tipo **b**, se hace el análisis particular de cada cultivo y posteriormente se realiza una integración de ellos, lo cual resulta más benéfico para las condiciones de existencia de información.
- En la mayoría de los Modelos numéricos desarrollados hasta antes de concluida esta investigación, no se consideró la estimación de la **Disponibilidad** de agua para el sistema, el cual es un dato básico para definir las políticas de planeación del sistema, por lo tanto, el desarrollo y la propuesta que se hace en esta investigación para la inclusión de la estimación de la **Disponibilidad**, es de las primeras en su género.

De haber aplicado el Modelo numérico en la Región Lagunera de México, se concluye:

- Una vez aplicado el procedimiento en el Distrito de Riego 017 "Región Lagunera", el cual se ubica en la porción árida de México y dentro de las latitudes de los desiertos del Mundo, en donde el problema de la sequías es latente, el Modelo numérico **ADEHISIA** puede aplicarse a cualquier área de la República Mexicana y del resto del Mundo, en donde existan sistemas de producción ya sea de Riego o de Temporal, garantizándose que con su correcta aplicación se obtendrán resultados reales como fue el caso de esta investigación doctoral.
- La necesidad de realizar un análisis de sequías para estimar el período de retorno de una secuencia de n meses consecutivos de sequía, se hizo evidente desde el momento en el que se oriento la selección de una área de estudio que estuviera ubicada en las regiones con menor precipitación normal (50 % de probabilidad de ocurrencia), por lo tanto, como dicho análisis está incluido en el Modelo numérico **ADEHISIA**, éste representa mayores ventajas que el resto de los modelos existentes, ya que esta característica constituye el sustento adecuado para la toma de decisiones y/o definición de políticas de planeación.

Algunas conclusiones generales son:

- Los procedimientos de modelación estocástica son adecuados para el pronóstico de los volúmenes de escurrimiento hacia las fuentes de abastecimiento, así como para el pronóstico de la precipitación, ya que con ellos es posible estimar la disponibilidad de agua para el ciclo agrícola que se diseñará el sistema.
- Es indispensable realizar el análisis de la secuencia de sequías en el nivel mensual, porque en el caso de las zonas áridas siempre es requerido el análisis de disponibilidad de agua en períodos futuros al del ciclo agrícola para el que se diseña el sistema.
- Para el acervo de información que existe en México, en relación con el registro de variables climáticas utilizadas para el cálculo de la evapotranspiración de los cultivos, conviene utilizar el método de la temperatura, ya que en la mayoría de las estaciones climatológicas de México, únicamente se registran variables que no implican el uso de aparatos de alta tecnología que están ligados con altos costos de adquisición.
- La simulación del crecimiento de los cultivos, es el único medio para conocer el detalle del comportamiento de los cultivos, durante las etapas de su ciclo fenológico.
- La comparación numérica de los valores de la disponibilidad y la evapotranspiración, permite estimar la política del déficit hídrico con el cual tendrá que diseñarse el sistema agrícola.

Del análisis de optimización se concluye:

- El procedimiento analítico propuesto por English M. (1990) fue adaptado al Modelo Numérico de esta investigación doctoral, para optimizar el ingreso económico y la lámina de agua suministrada a los diferentes cultivos de los sistemas de producción agrícola, ya que con él se define claramente el concepto de **producción con déficit hídrico**, el cual es conocido en el ámbito de la Ingeniería de Riego como **producción con riego en déficit**.
- Los resultados obtenidos indican que con la estimación los cinco niveles de suministro de agua (W_m , W_{el} , W_{ew} , W_i y W_w) y con los respectivos ingresos netos que corresponden a cada uno de ellos ($i(W_m)$, $i(W_{el})$, $i(W_{ew})$, $i(W_i)$ e $i(W_w)$), es posible tomar decisiones relacionadas con la política de riego que se aplicará en un ciclo agrícola próximo venidero (**Diseño**), considerando la disponibilidad de agua que exista en la fuente (presa, lago, laguna, pozo, etc.) para suministrar al sistema agrícola.
- Los resultados teóricos obtenidos con la aplicación del Modelo Numérico de esta Investigación, en la **Revisión** de la producción del Módulo de Riego VI de Tlahualilo, difieren de los resultados reales del ciclo agrícola de Primavera-Verano de 1997 en menos del 1%, por lo tanto, dicho Modelo Numérico puede ser utilizado con alta certeza y confiabilidad, para hacer la planeación de la producción (**Diseño**), y para mejorar aquellas políticas que hubiesen sido las causantes de una baja producción o un bajo ingreso económico (**Revisión**).
- Los resultados de la aplicación del Modelo Numérico, en el caso particular del Módulo VI de Tlahualilo, indican que el nivel límite de suministro de agua para obtener un ingreso neto mínimo que aún convenga al productor es el $W_{ew} = 59.38$ cm (cuadro 8.4), al cual correspondería un ingreso neto $i(W_{ew}) = 4,624$ \$/ha (cuadro 8.5), sin embargo, el nivel de suministro de agua real durante el ciclo agrícola de Primavera-Verano de 1997, fue de $W = 50.14$ cm y el ingreso neto de 2,691 \$/ha (ambos valores presentados en el cuadro 8.3), lo que indica (cuadro 8.2) que no es redituable la producción de los cultivos: Sorgo de Grano, Maíz de Grano, y Sorgo Industrial, en dicho módulo de riego; por lo que debe considerarse la posibilidad de hacer un cambio en la plantilla de cultivos.
- El éxito o fracaso de los resultados que se obtienen con la aplicación del Modelo Numérico **ADEHISIA** desarrollado y propuesto en esta Investigación doctoral, depende en gran medida de la calidad de la información que se ingrese en cada una de las etapas que lo constituyen; por ejemplo,

si se comete un error en el **análisis hidrológico**, la **disponibilidad** de agua que se compare con la **evapotranspiración** de los cultivos, llevará a la definición de **Funciones de producción** subestimadas o sobrestimadas, lo que ocasionará que la definición de la **función de beneficios** que se defina, tendrá el mismo comportamiento que dicha **Función de producción**.

- Para las condiciones de los Distritos y Unidades de Riego de la República Mexicana, es indispensable el conocimiento de la información básica que maneja este Modelo Numérico, ya que se intentó en la medida de lo posible, no incluir variables cuya estimación y cálculo, requiriesen registros de campo de difícil obtención.

Finalmente se concluye que:

- Los objetivos propuestos para esta investigación doctoral fueron obtenidos satisfactoriamente, por lo tanto se considera que el Modelo numérico **ADEHISIA** aquí desarrollado, puede ser utilizado como una herramienta básica en el diseño o la revisión de los sistemas agrícolas.

12.- REFERENCIAS

- a) Aguilar Ch. A., **Política de asignación de dotaciones bajo condiciones de déficit hídrico**, Universidad Nacional Autónoma de México, División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, Sección de Hidráulica, Tesis de Maestría, 1993, Campus Morelos, México.
- b) Aguilera Contreras Mauricio y Martínez Elizondo Rene, **Relaciones Agua – Suelo – Planta – Atmósfera**, Departamento de Irrigación, Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México, 1990.
- c) Bauder, R. J. Hanks, R. J. and James D. W., *Crop Production Function Determinations as Influenced by Irrigation and Nitrogen Fertilizations Using a Continuous Variable Design, Soil Sci. Soc. Amer. Proc., Vol. 39, 1975.*
- d) Begg E. J. y Turner C. N., **Crop water deficits**, Advances in Agronomy, Vol. 28, 1976.
- e) Campos Aranda D. Fco., **Los procesos del ciclo hidrológico**, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México, 1980.
- f) Comisión Nacional del Agua – Colegio de Postgraduados, **Requerimientos de Agua para Riego**, Traducción y adaptación al sistema métrico decimal del capítulo 2, parte 623, requerimientos de agua para riego, del Manual Nacional de Ingeniería, Servicio de Conservación de Suelos, Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, México, 1995.
- g) Clapp, R. B. and Hornberger, G. M., **Empirical equations for some soil hydraulic properties**, Water Resources Research, American Geophysical Union, USA, August, 1978.
- h) Comisión Nacional del Agua, **Programa hidráulico de gran visión 2001-2020 de la Región VII Cuencas Centrales del Norte**, Informe Final, Subdirección General de Programación, Gerencia de Programación Hidráulica, México, 2000.
- i) Dierckx J., Gilley R. Feyen J. y Belmans Ch., **Simulation of the Soil-Water Dynamics and corn yield under deficit irrigation**, Irrigation Science, (1988) 9: 105-125.
- j) Doorenbos J., Kassam H. A., Bentvelsen C. y Uittenbogaard G., **Yield response to water**, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), Estudio FAO Riego y Drenaje, No. 33, Roma, 1979.
- k) Doorenbos J., Kassam H. A., Bentvelsen C. y Uittenbogaard G., **Efectos del agua sobre el rendimiento de los cultivos**, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), Estudio FAO Riego y Drenaje, No. 33, Roma, 1980.
- l) Doorenbos J. y Pruitt O. W., **Las necesidades de agua de los cultivos**, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), Estudio FAO Riego y Drenaje, No. 24, Roma, 1976.
- m) Downey Lloyd. A., *Water-Yield relations for nonforage crops, Journal of the Irrigation and Drainage Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol. 98, No. IR1, 1972.*

- n) Echávez Aldape Gabriel, **Introducción a los Modelos Hidráulicos de Fondo Fijo y a la Ingeniería Experimental**, Primera Edición, Universidad Nacional Autónoma de México, 1996.
- o) English J. M., **The uncertainty of crop models in irrigation optimization**, Transactions of de ASAE, 1981.
- p) English J. M. y Nuss S. G., **Designing for deficit Irrigation**, Journal of the Irrigation and Drainage Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol. 108, No. IR2, 1982.
- q) Distrito de riego 017 "Región Lagunera", **Resumen del estudio agrológico de la Región Lagunera (Coahuila y Durango)**, México, 1974.
- r) English M., **Deficit Irrigation. I: Analytical Framework**, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Vol. 116, No. 3, 1990, ASCE.
- s) English M., **Deficit Irrigation. II: Observations in Columbia Basin**, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Vol. 116, No. 3, 1990, ASCE.
- t) Fernández, B., **Risk estimation of monthly rainfall in semiarid regions**, XXVIIth IAHR Congress, Uruguay, 482-487, (1996).
- u) Fernández, B. y Salas J. D., **Return period and risk of hydrological events**, XVI Congreso Latinoamericano de Hidráulica, (1994) Vol. 3:221-232. Santiago, Chile.
- v) Fernández, B. y Salas J. D., **Return period and risk of hydrological events: Mathematical Formulation**. Send for publication to Journal of Hydrologic Engineering, ASCE, 1997a.
- w) Fernández, B. y Salas J. D., **Return period and risk of hydrological events: Aplicaciones**. Send for publication to Journal of Hydrologic Engineering, ASCE, 1997b.
- x) Fernández, B. y Vergara, A., **Período de retorno y riesgo de sequías hidrológicas mensuales**, XVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, pág. 339 a 348, Oaxaca, México, 1998.
- y) Gracia S. J., **La simulación de los cultivos**, Apuntes del curso de Ingeniería de Riego, capítulo 6, apartado 6.3, UNAM, DEPFI, Hidráulica, semestre 98-I, 1997.
- z) Grimes W. D., Yamada H. y Dicckens L. W., **Functions for Cotton (Gossypium birsutum L.) Production from Irrigation and Nitrogen Fertilization, Variables: I. Yield and Evapotranspiración**, Agronomy Journal, Vol. 61, 1969.
- aa) Hanks J. R., **Model for predicting plant yield as influenced by water use**, Agronomy Journal, Vol. 66, 1974.
- bb) Hargreaves H. G., Samani A. Z., **Economic considerations of deficits irrigation**, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Vol. 110, No. 4, 1984, ASCE.
- cc) Hugh B. J. W. y Skogerboe V. G. (1980), **Crop production functions and the allocation and use of irrigation water**, Agricultural Water Management, 3 (1980), 53-64.
- dd) Jeffrey S. Kern, **Evaluation of Soil Water Retention Models Based on Basic Soil Physical Properties**, Soil Science Society American Journal, pages 1134-1140, 1995.
- ee) Joseph E. N., **Simulación del comportamiento de cultivos y su aplicación para la determinación de las políticas de riego**, Universidad Nacional Autónoma de México, División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, Sección de Hidráulica, Tesis de Doctorado, 1984, México D.F.
- ff) Lloyd, E. H., **Return period in the presence of persistence**, Journal of Hydrology, (1970) 10-3:291-298.
- gg) Mannocchi F. y Mercarelli P., **Optimization analysis of deficit irrigation systems**, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Vol. 120, No. 3, 1994, ASCE.
- hh) Mitscherlich, **Water Production Functions for Irrigated Agriculture**, Center for agricultural and rural developement, The IOWA State University Press, pages 36 to 39, 1978.
- ii) Orive Alva A., **La irrigación en México**, Primera Edición, Editorial Grijalbo, S. A., México, D.F., 1970.
- jj) Palacios Vélez Enrique y Exebio García Adolfo, **Introducción a la teoría de la operación de Distritos y Sistemas de Riego**, Centro de Hidrociencias, Colegio de Postgraduados, Montecillos, México, 1989.
- kk) Rao H. N., Sarma S. B. P. y Chander S., **Irrigation Scheduling under a limited water supply**, Agricultural Water Management, 15 (1988), 165-175.
- ll) Rao H. N., Sarma S. B. P. y Chander S., **A simple dated water-production function for use in irrigated agriculture**, Agricultural Water Management, 13 (1988), 25-32.
- mm) Rasmussen V. P. and Hanks R. J., **Spring Whet Yield Model for Limited Moisture Conditions**, Agronomy Journal, Vol. 70, November – December, 1978.

Anexo 1.- Características agrológicas del Distrito de Riego 017 “Región Lagunera”

A1.- Marco de Referencia

A1.1.- Localización

El área conocida como Comarca Lagunera es una zona bastante extensa que comprende terrenos de los Estados de Coahuila y Durango, los cuales están geográficamente limitados por los meridianos: 102°51', 103°40' y por los paralelos 25°25' y 25°30', con una superficie aproximada de 500,000 ha, de las cuales en 1974 se estimó que eran 275,000 ha abiertas al cultivo.

A1.2.- Recursos hidráulicos

Los recursos hidráulicos con que cuenta la Comarca Lagunera son: Las aguas de los Ríos Nazas y Aguanaval, las del subsuelo y en proporción mínima las de los arroyos que se originan dentro de la cuenca hidrográfica en la que se ubica esta área.

Las corrientes mencionadas son de carácter torrencial, siendo en mayor grado el río Aguanaval; pues es ocasiones sus crecientes son relativamente grandes (aproximadamente 1,000 m³/s) y duran unas cuantas horas.

Este carácter torrencial se ha anulado en el río Nazas, por la construcción de la Presa "Lázaro Cárdenas", en donde antes de dicha construcción se aforaron hasta 4,000 m³/s (Canastilla del Coyote).

A1.3.- Clima

El clima en el que se ubica la Comarca según Thornthwaite (referencia i) en un período de 10 años de datos de precipitación mensual es EB'(1p a') "Clima muy seco, templado con invierno y primavera secos y sin estación invernal bien definida".

A1.4.- Origen de los suelos

Según Allera H. (1970, referencia i), en épocas remotas la Comarca Lagunera estaba cubierta por mares que en el transcurso del tiempo se desecaron, iniciándose el relleno de esas boquedades en la última etapa del período terciario (plioceno) y prolongándose aproximadamente por un millón de años.

Terminado el relleno, los acarrees sucesivos de los ríos nivelaron las acumulaciones sedimentarias dando origen a la totalidad de los suelos regionales, dado el carácter divergente de los cauces de los ríos en épocas pasadas.

De acuerdo con el carácter calcáreo dominante de los materiales (8 % en promedio de calcáreo (CaCO₃) es de suponerse que las formaciones que les dan origen en las cuencas de dichos ríos sean principalmente de rocas calizas, de estos suelos están exentas pequeñas fajas de suelo paralelas a las serranías que rodean la Comarca, ya que estos son suelos de color más claro (lo cual puede apreciarse In-Situ), de un contenido calcáreo (CaCO₃) bastante más alto (20 a 30 %). Las rocas que dan origen a estos suelos son: Dolomitas, Calizas y Conglomerado Calcáreo, etc.

A1.5.- Suelos de la Comarca en Relación con los Grandes Grupos de Suelos del Mundo

Los suelos de la Comarca en relación con los grandes grupos de suelos del mundo (Glinka) están comprendidos dentro de los Sierozem. Los suelos de este grupo son de color café grisáceo, de bajo contenido de materia orgánica (2 %) con horizontes de acumulación de yeso y cal, cerca de la superficie (cuando hay por lo menos una incipiente intemperización), y su tendencia a acumular sales de sodio.

Los suelos Sierozem se subdividieron en suelos color café claro, suelos grises de desierto y suelos aluviales recientes; dentro de los suelos de color café claro que se han desarrollado en el clima descrito en el apartado A1.3, que se caracteriza por tener condiciones de humedad deficientes, se encuentran las series de suelos: Coyote, Zaragoza, San Ignacio, Noé, Gómez Palacio, Bermejillo y Maravasco.

Dentro de los suelos grises de desierto están comprendidas las series Tlahualilo y Santiago, y por último en los suelos aluviales recientes están comprendidas las series San Pedro y Concordia, por lo que en la Comarca Lagunera hay once series de suelos, las cuales derivan su nombre de las localidades donde fueron encontradas por primera vez.

Las características de las principales series de suelo se resumen en el cuadro A1.1.

Cuadro A1.1.- Principales series de suelo y sus características.

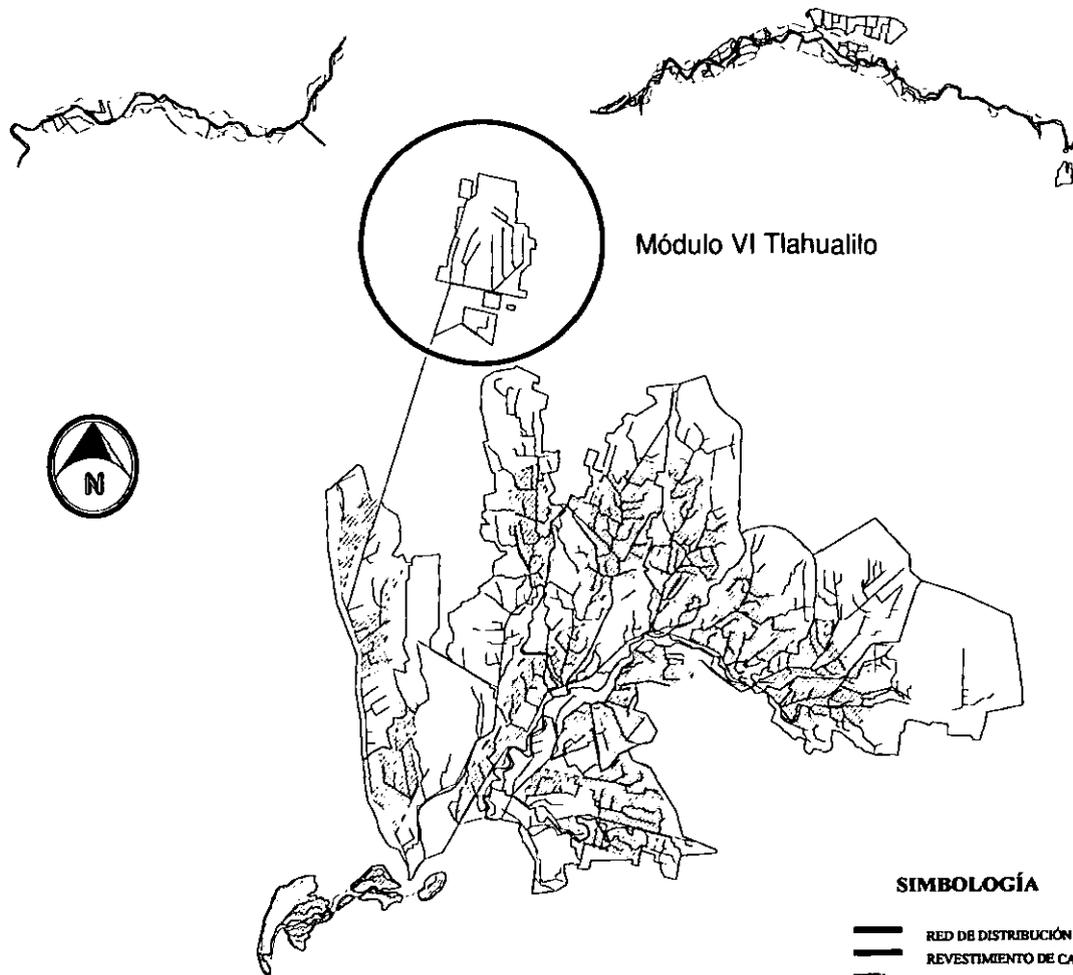
Serie	Símbolo	Superficie, ha
Coyote	Cy	98,218.21
San Ignacio	Si	56,293.69
San Pedro	Sp	65,088.28
Concordia	Cn	10,582.79
Santiago	St	7,630.72
Zaragoza	Z	68,267.96
Noe	N	16,970.00
Gómez Palacio	Gp	9,268.40
Bermejillo	B	3,914.00
Maravasco	M	3,914.00
Tlahualilo	Tl	21,433

A1.6.- Distrito de Riego 017 "Región Lagunera"

El Distrito de Riego está integrado por 17 áreas (plano A.1) identificadas según la clasificación del propio Distrito como:

- Unidad Zona I.- Integrada por las secciones de la No. 1 a la No. 5
- Unidad Zona II.- Integrada por las secciones de la No. 6 a la No. 14
- Módulo III "San Jacinto"
- Módulo IV "El Vergel"
- Módulo V "Brittingham"
- Módulo VI "Tlahualilo"
- Módulo VII "San Miguel"
- Módulo VIII "El Consuelo"
- Módulo IX "Buen Abrigo"
- Módulo X "Masitas"
- Módulo XI "Jiménez"
- Módulo XII "Porvenir"
- Módulo XIII "La Marinera"
- Módulo XIV "Santa Teresa"
- Módulo XV "La Rosita"
- Módulo XVI "El Ancora"
- Módulo XVII "J. Zamarripa Cobos"

Plano A.1.- Distrito de Riego 017 "Región Lagunera".



SIMBOLOGÍA

-  RED DE DISTRIBUCIÓN
-  REVESTIMIENTO DE CANALES
-  NIVELACIÓN DE TIERRAS



**COAHUILA Y
DURANGO**

**DISTRITO DE RIEGO 017
"REGIÓN LAGUNERA"**

CARACTERÍSTICAS GENERALES

Superficie regable (ha)	149,670
Volumen anual utilizado (Millones de m ³)	
Lázaro Cárdenas	1,355.2
Francisco Zarco	1,151.9
Derivados de corrientes	160.0
Pozos profundos	650.0
Capacidad de los canales principales (m ³ /s)	
Santa Rosa-Tlahualilo	20
Principal Sacramento	70
Longitud de canales (km)	
Total	2,432.3
Revestida	227.0
Longitud de drenes (km)	33.90
Número total de estructuras (puzas)	11,830

En esta investigación se consideró el análisis del Módulo VI "Tlahualilo" (marcado en círculo en el plano A1.1), el cual fue seleccionado al azar, para mostrar el procedimiento que debe seguirse para aplicar el Modelo Numérico de esta Investigación Doctoral, por lo que en lo sucesivo, se utilizarán y presentarán únicamente las características y los parámetros del área territorial en donde se establece dicho Módulo.

A1.7.- Suelos de la serie Tlahualilo (TI)

Están clasificados entre los de color gris, se ubican al norte del poblado de Tlahualilo de Zaragoza y al sureste y dentro del poblado Zaragoza hay un núcleo de ésta serie y algunas áreas respectivamente.

Los suelos de esta serie se diferencian del resto, por sus características edafológicas y por su composición química. En vista de que los perfiles de estos suelos no presentan una estratificación bien definida, que tienen una carencia de depósitos de gravas o materiales más gruesos y un perfil constituido por una arcilla bastante pesada con agrietamientos profundos, y que tienen hasta más de 10 cm de espesor, se cree que dichos suelos son de origen eólico, ya que esta zona está rodeada de serranías donde las corrientes de viento cargadas de polvo chocan, provocando que las partículas de suelo se depositen en las partes bajas.

Debido a que esta serie se encuentra ubicada en forma adyacente con la serie Zaragoza, los suelos de la serie Tlahualilo contienen una proporción 3:1 de Carbonato de Calcio (CaCO_3) respecto a la serie Zaragoza. Por otro lado, mientras que la serie Zaragoza tiene materiales ligeros en los estratos inferiores, la Tlahualilo tiene en su totalidad materiales pesados (arcillas de alta densidad); en consecuencia, estos materiales se estructuran en columnas, con excepción de las capas superficiales cultivadas, las cuales tienen estructuras de labrado o bien terrosa de pequeños granos. La consistencia de estas capas generalmente es mediana pero en las capas inferiores es muy dura, los espacios vacíos tienen un porcentaje alto, son porosas y poco permeables. Las condiciones de fertilidad son medias en los 30 cm de la superficie con las características del cuadro A1.2.

Cuadro A1.2.- Características de la capa superficial (30 cm).

Propiedad	Concentración o nivel	Nivel o clasificación
Nitrógeno total como N	0.070 %	Medio
Fósforo disponible	105 kg/ha	Bueno
Potasio sustituible	637 kg/ha	Bueno
Calcio sustituible	7,442 kg/ha	Exageradamente Rico
Magnesio sustituible	78 kg/ha	Bueno
Manganeso sustituible	10 kg/ha	Pobre
Materia Orgánica	0.98 %	Pobre
PH	7.87	Semi-Alcalino
Calcáreo (CaCO_3)	14.24	Alto
Densidad Aparente	1.42 kg/cm^3	Alto

Los principales tipos de suelos y la superficie de ellos, se presentan en el cuadro A1.3.

Cuadro A1.3.- Tipos de suelo de la Serie Tlahualilo.

Tipo de suelo	Superficie, ha
Arcilla de Tlahualilo	18,523.00
Migajón arcilloso -Tlahualilo	1,620.00
Arcilla limosa - Tlahualilo	1,290.00

El perfil típico de los suelos de la serie Tlahualilo se representa en la Figura A1.2, en la cual es posible observar la predominancia de la textura arcillosa en los horizontes A y B y en el cuadro A1.4 el resumen de las características principales.

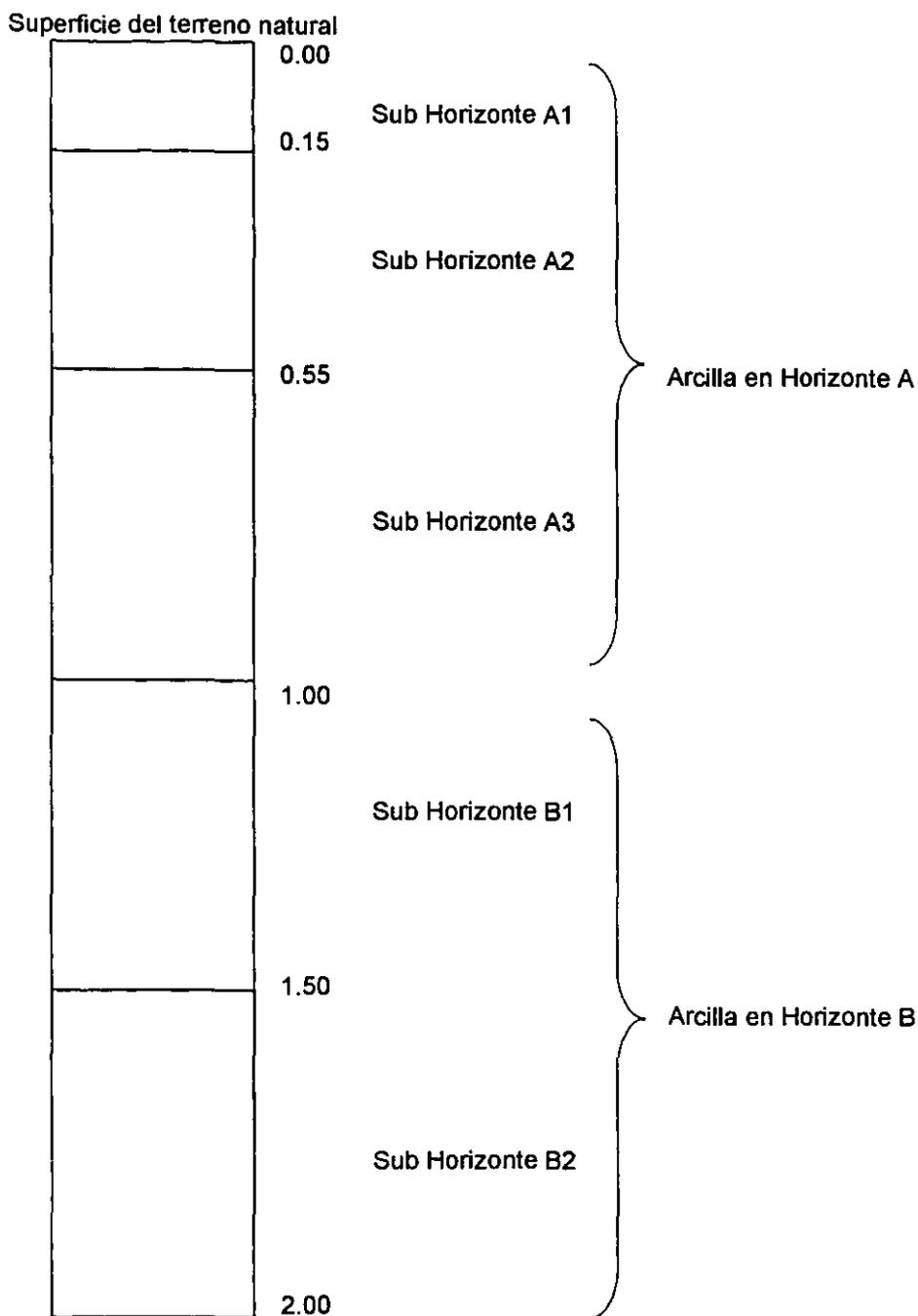


Figura A1.2.- Perfil típico de los suelos de la serie Tlahualilo.

A1.8.- Adaptabilidad a los cultivos regionales

Considerando las características físicas de estos suelos, agrónomicamente es posible cultivar gramíneas como trigo, cebada, avena, etc., y otros cultivos como el algodón, que requieren la adición de materia orgánica (estiercol) y de arena a una profundidad de 40 cm, así como de sub soleos y demás prácticas que tiendan a facilitar la penetración de las raíces y favorecer la permeabilidad de los suelos.

Cuadro A1.4.- Características de los Horizontes en la Serie Tlahualilo.

Horizontes	A1	A2	A3	B1	B2
Profundidad, m	0.00 a 0.15	0.16 a 0.55	0.56 a 1.00	1.01 a 1.50	1.51 a 2.00
Textura	Arcilla	Arcilla limosa	Arcilla limosa	Arcilla	Arcilla
Estructura	Columna Grande	Columna Grande	Columna Grande	Columna Grande	Columna Grande
Color en Seco	Blanquizco	Blanco – Verdoso	Blanco – Verdoso	Blanquizco - Verdoso	Blanquizco – Verdoso
Color en Húmedo					
Consistencia	Mediana	Muy Dura	Muy Dura	Muy Dura	Muy Dura
Porosidad	Poroso	Medianamente Poroso	Poco Poroso	Poco Poroso	Poco Poroso
Permeabilidad	Permeable	Poco Permeable	Poco Permeable	Poco Permeable	Poco Permeable
Drenaje	Bueno	Malo	Malo	Malo	Malo
Reacción con HCl dil.	Fuerte	Fuerte	Fuerte	Fuerte	Fuerte

Observaciones: Hay raíces medianas y finas en los horizontes A1, A2 y A3, disminuyendo la cantidad a medida que se profundiza, en el horizonte B no hay raíces. Desde el Horizonte A1 hasta el B1 se aprecian grietas verticales que varían de 1 a 2 cm. En el Horizonte B1, se notan pequeñas motitas aisladas de CaCO₃.

Anexo 2.- Información relacionada con el cálculo de la evapotranspiración

Tabla A2.1.- Valores del factor de ajuste a , para usarse en la ecuación 4.4.1.

Humedad Relativa <i>min-med (%)</i>	Relación entre actual y potencial brillo solar (n/N)									
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
10	-0.15	-0.16	-0.17	-0.18	-0.19	-0.20	-0.21	-0.22	-0.23	-0.24
12	-0.15	-0.16	-0.17	-0.18	-0.19	-0.20	-0.21	-0.22	-0.23	-0.24
14	-0.14	-0.15	-0.16	-0.17	-0.18	-0.19	-0.20	-0.21	-0.22	-0.23
16	-0.14	-0.15	-0.16	-0.17	-0.18	-0.19	-0.20	-0.21	-0.22	-0.23
18	-0.14	-0.15	-0.16	-0.17	-0.18	-0.19	-0.20	-0.21	-0.22	-0.23
20	-0.14	-0.15	-0.16	-0.17	-0.18	-0.19	-0.20	-0.21	-0.22	-0.23
22	-0.14	-0.15	-0.16	-0.17	-0.18	-0.19	-0.20	-0.21	-0.22	-0.23
24	-0.14	-0.15	-0.16	-0.17	-0.18	-0.19	-0.20	-0.21	-0.22	-0.23
26	-0.14	-0.15	-0.16	-0.17	-0.18	-0.19	-0.20	-0.21	-0.22	-0.23
28	-0.14	-0.15	-0.16	-0.17	-0.18	-0.19	-0.20	-0.21	-0.22	-0.23
30	-0.14	-0.15	-0.16	-0.17	-0.18	-0.19	-0.20	-0.21	-0.22	-0.23
32	-0.14	-0.15	-0.16	-0.17	-0.18	-0.19	-0.20	-0.21	-0.22	-0.23
34	-0.14	-0.15	-0.16	-0.17	-0.18	-0.19	-0.20	-0.21	-0.22	-0.23
36	-0.14	-0.15	-0.16	-0.17	-0.18	-0.19	-0.20	-0.21	-0.22	-0.23
38	-0.13	-0.14	-0.15	-0.16	-0.17	-0.18	-0.19	-0.20	-0.21	-0.22
40	-0.13	-0.14	-0.15	-0.16	-0.17	-0.18	-0.19	-0.20	-0.21	-0.22
42	-0.13	-0.14	-0.15	-0.16	-0.17	-0.18	-0.19	-0.20	-0.21	-0.22
44	-0.13	-0.14	-0.15	-0.16	-0.17	-0.18	-0.19	-0.20	-0.21	-0.22
46	-0.13	-0.14	-0.15	-0.16	-0.17	-0.18	-0.19	-0.20	-0.21	-0.22
48	-0.13	-0.14	-0.15	-0.16	-0.17	-0.18	-0.19	-0.20	-0.21	-0.22
50	-0.13	-0.14	-0.15	-0.16	-0.17	-0.18	-0.19	-0.20	-0.21	-0.22
52	-0.13	-0.14	-0.15	-0.16	-0.17	-0.18	-0.19	-0.20	-0.21	-0.22
54	-0.13	-0.14	-0.15	-0.16	-0.17	-0.18	-0.19	-0.20	-0.21	-0.22
56	-0.13	-0.14	-0.15	-0.16	-0.17	-0.18	-0.19	-0.20	-0.21	-0.22
58	-0.13	-0.14	-0.15	-0.16	-0.17	-0.18	-0.19	-0.20	-0.21	-0.22
60	-0.13	-0.14	-0.15	-0.16	-0.17	-0.18	-0.19	-0.20	-0.21	-0.22
62	-0.12	-0.13	-0.14	-0.15	-0.16	-0.17	-0.18	-0.19	-0.20	-0.21
64	-0.12	-0.13	-0.14	-0.15	-0.16	-0.17	-0.18	-0.19	-0.20	-0.21
66	-0.12	-0.13	-0.14	-0.15	-0.16	-0.17	-0.18	-0.19	-0.20	-0.21
68	-0.12	-0.13	-0.14	-0.15	-0.16	-0.17	-0.18	-0.19	-0.20	-0.21
70	-0.12	-0.13	-0.14	-0.15	-0.16	-0.17	-0.18	-0.19	-0.20	-0.21
72	-0.12	-0.13	-0.14	-0.15	-0.16	-0.17	-0.18	-0.19	-0.20	-0.21
74	-0.12	-0.13	-0.14	-0.15	-0.16	-0.17	-0.18	-0.19	-0.20	-0.21
76	-0.12	-0.13	-0.14	-0.15	-0.16	-0.17	-0.18	-0.19	-0.20	-0.21
78	-0.12	-0.13	-0.14	-0.15	-0.16	-0.17	-0.18	-0.19	-0.20	-0.21
80	-0.12	-0.13	-0.14	-0.15	-0.16	-0.17	-0.18	-0.19	-0.20	-0.21
82	-0.12	-0.13	-0.14	-0.15	-0.16	-0.17	-0.18	-0.19	-0.20	-0.21
84	-0.11	-0.12	-0.13	-0.14	-0.15	-0.16	-0.17	-0.18	-0.19	-0.20
86	-0.11	-0.12	-0.13	-0.14	-0.15	-0.16	-0.17	-0.18	-0.19	-0.20
88	-0.11	-0.12	-0.13	-0.14	-0.15	-0.16	-0.17	-0.18	-0.19	-0.20
90	-0.11	-0.12	-0.13	-0.14	-0.15	-0.16	-0.17	-0.18	-0.19	-0.20

$$a_f = 0.1(0.0043 HR_{mn} - n/N - 1.41)$$

Tabla A2.2.- Valores del factor de ajuste b_n para usarse en la ecuación 4.4.2.

Humedad Relativa <i>min-med (%)</i>	Relación entre actual y potencial brillo solar (n/N)									
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
10	0.88	0.98	1.08	1.18	1.28	1.39	1.49	1.59	1.69	1.79
12	0.87	0.97	1.07	1.17	1.27	1.37	1.47	1.57	1.67	1.77
14	0.86	0.96	1.06	1.16	1.26	1.35	1.45	1.55	1.65	1.75
16	0.85	0.95	1.05	1.14	1.24	1.34	1.44	1.53	1.63	1.73
18	0.84	0.94	1.03	1.13	1.23	1.32	1.42	1.52	1.61	1.71
20	0.83	0.93	1.02	1.12	1.21	1.31	1.40	1.50	1.59	1.69
22	0.82	0.92	1.01	1.11	1.20	1.29	1.39	1.48	1.57	1.67
24	0.81	0.91	1.00	1.09	1.18	1.28	1.37	1.46	1.56	1.65
26	0.80	0.90	0.99	1.08	1.17	1.26	1.35	1.44	1.54	1.63
28	0.80	0.89	0.98	1.07	1.16	1.25	1.34	1.43	1.52	1.61
30	0.79	0.88	0.96	1.05	1.14	1.23	1.32	1.41	1.50	1.59
32	0.78	0.86	0.95	1.04	1.13	1.22	1.30	1.39	1.48	1.57
34	0.77	0.85	0.94	1.03	1.11	1.20	1.29	1.37	1.46	1.55
36	0.76	0.84	0.93	1.01	1.10	1.18	1.27	1.36	1.44	1.53
38	0.75	0.83	0.92	1.00	1.09	1.17	1.25	1.34	1.42	1.51
40	0.74	0.82	0.91	0.99	1.07	1.15	1.24	1.32	1.40	1.49
42	0.73	0.81	0.89	0.98	1.06	1.14	1.22	1.30	1.38	1.47
44	0.72	0.80	0.88	0.96	1.04	1.12	1.20	1.28	1.37	1.45
46	0.71	0.79	0.87	0.95	1.03	1.11	1.19	1.27	1.35	1.43
48	0.70	0.78	0.86	0.94	1.01	1.09	1.17	1.25	1.33	1.41
50	0.69	0.77	0.85	0.92	1.00	1.08	1.15	1.23	1.31	1.39
52	0.68	0.76	0.83	0.91	0.99	1.06	1.14	1.21	1.29	1.36
54	0.67	0.75	0.82	0.90	0.97	1.05	1.12	1.20	1.27	1.34
56	0.66	0.74	0.81	0.88	0.96	1.03	1.10	1.18	1.25	1.32
58	0.65	0.73	0.80	0.87	0.94	1.02	1.09	1.16	1.23	1.30
60	0.65	0.72	0.79	0.86	0.93	1.00	1.07	1.14	1.21	1.28
62	0.64	0.71	0.78	0.85	0.91	0.98	1.05	1.12	1.19	1.26
64	0.63	0.69	0.76	0.83	0.90	0.97	1.04	1.11	1.18	1.24
66	0.62	0.68	0.75	0.82	0.89	0.95	1.02	1.09	1.16	1.22
68	0.61	0.67	0.74	0.81	0.87	0.94	1.00	1.07	1.14	1.20
70	0.60	0.66	0.73	0.79	0.86	0.92	0.99	1.05	1.12	1.18
72	0.59	0.65	0.72	0.78	0.84	0.91	0.97	1.04	1.10	1.16
74	0.58	0.64	0.70	0.77	0.83	0.89	0.95	1.02	1.08	1.14
76	0.57	0.63	0.69	0.75	0.82	0.88	0.94	1.00	1.06	1.12
78	0.56	0.62	0.68	0.74	0.80	0.86	0.92	0.98	1.04	1.10
80	0.55	0.61	0.67	0.73	0.79	0.85	0.91	0.96	1.02	1.08
82	0.54	0.60	0.66	0.72	0.77	0.83	0.89	0.95	1.00	1.06
84	0.53	0.59	0.65	0.70	0.76	0.82	0.87	0.93	0.99	1.04
86	0.52	0.58	0.63	0.69	0.74	0.80	0.86	0.91	0.97	1.02
88	0.51	0.57	0.62	0.68	0.73	0.78	0.84	0.89	0.95	1.00
90	0.50	0.56	0.61	0.66	0.72	0.77	0.82	0.88	0.93	0.98

$$b_n = 0.82 - 0.0041RH_{min} + 1.07 n/N - 0.006 RH_{min} n/N$$

Tabla A2.3.- Valores del factor de ajuste b_u para usarse en la ecuación 4.4.2.

Humedad Relativa min-med (%)	Velocidad diurna media del viento a 2 metros sobre el suelo km/d														
	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	600	700	800	900	1000
10	0.03	0.07	0.10	0.14	0.17	0.21	0.24	0.28	0.31	0.35	0.42	0.49	0.56	0.63	0.69
12	0.03	0.07	0.10	0.14	0.17	0.20	0.24	0.27	0.31	0.34	0.41	0.48	0.54	0.61	0.68
14	0.03	0.07	0.10	0.13	0.17	0.20	0.23	0.27	0.30	0.33	0.40	0.47	0.53	0.60	0.67
16	0.03	0.07	0.10	0.13	0.16	0.20	0.23	0.26	0.29	0.33	0.39	0.46	0.52	0.59	0.65
18	0.03	0.06	0.10	0.13	0.16	0.19	0.22	0.26	0.29	0.32	0.38	0.45	0.51	0.58	0.64
20	0.03	0.06	0.09	0.13	0.16	0.19	0.22	0.25	0.28	0.31	0.38	0.44	0.50	0.56	0.63
22	0.03	0.06	0.09	0.12	0.15	0.18	0.21	0.24	0.28	0.31	0.37	0.43	0.49	0.55	0.61
24	0.03	0.06	0.09	0.12	0.15	0.18	0.21	0.24	0.27	0.30	0.36	0.42	0.48	0.54	0.60
26	0.03	0.06	0.09	0.12	0.15	0.18	0.20	0.23	0.26	0.29	0.35	0.41	0.47	0.53	0.58
28	0.03	0.06	0.09	0.11	0.14	0.17	0.20	0.23	0.26	0.28	0.34	0.40	0.46	0.51	0.57
30	0.03	0.06	0.08	0.11	0.14	0.17	0.19	0.22	0.25	0.28	0.33	0.39	0.44	0.50	0.56
32	0.03	0.05	0.08	0.11	0.14	0.16	0.19	0.22	0.24	0.27	0.33	0.38	0.43	0.49	0.54
34	0.03	0.05	0.08	0.11	0.13	0.16	0.18	0.21	0.24	0.26	0.32	0.37	0.42	0.48	0.53
36	0.03	0.05	0.08	0.10	0.13	0.15	0.18	0.21	0.23	0.26	0.31	0.36	0.41	0.46	0.51
38	0.02	0.05	0.07	0.10	0.12	0.15	0.17	0.20	0.22	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50
40	0.02	0.05	0.07	0.10	0.12	0.15	0.17	0.19	0.22	0.24	0.29	0.34	0.39	0.44	0.49
42	0.02	0.05	0.07	0.09	0.12	0.14	0.17	0.19	0.21	0.24	0.28	0.33	0.38	0.42	0.47
44	0.02	0.05	0.07	0.09	0.11	0.14	0.16	0.18	0.21	0.23	0.27	0.32	0.37	0.41	0.46
46	0.02	0.04	0.07	0.09	0.11	0.13	0.16	0.18	0.20	0.22	0.27	0.31	0.36	0.40	0.44
48	0.02	0.04	0.06	0.09	0.11	0.13	0.15	0.17	0.19	0.22	0.26	0.30	0.34	0.39	0.43
50	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10	0.12	0.15	0.17	0.19	0.21	0.25	0.29	0.33	0.37	0.42
52	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10	0.12	0.14	0.16	0.18	0.20	0.24	0.28	0.32	0.36	0.40
54	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10	0.12	0.14	0.16	0.17	0.19	0.23	0.27	0.31	0.35	0.39
56	0.02	0.04	0.06	0.07	0.09	0.11	0.13	0.15	0.17	0.19	0.22	0.26	0.30	0.34	0.37
58	0.02	0.04	0.05	0.07	0.09	0.11	0.13	0.14	0.16	0.18	0.22	0.25	0.29	0.32	0.36
60	0.02	0.03	0.05	0.07	0.09	0.10	0.12	0.14	0.16	0.17	0.21	0.24	0.28	0.31	0.35
62	0.02	0.03	0.05	0.07	0.08	0.10	0.12	0.13	0.15	0.17	0.20	0.23	0.27	0.30	0.33
64	0.02	0.03	0.05	0.06	0.08	0.10	0.11	0.13	0.14	0.16	0.19	0.22	0.26	0.29	0.32
66	0.02	0.03	0.05	0.06	0.08	0.09	0.11	0.12	0.14	0.15	0.18	0.21	0.24	0.27	0.31
68	0.01	0.03	0.04	0.06	0.07	0.09	0.10	0.12	0.13	0.15	0.17	0.20	0.23	0.26	0.29
70	0.01	0.03	0.04	0.06	0.07	0.08	0.10	0.11	0.12	0.14	0.17	0.19	0.22	0.25	0.28
72	0.01	0.03	0.04	0.05	0.07	0.08	0.09	0.11	0.12	0.13	0.16	0.18	0.21	0.24	0.26
74	0.01	0.02	0.04	0.05	0.06	0.07	0.09	0.10	0.11	0.12	0.15	0.17	0.20	0.22	0.25
76	0.01	0.02	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.11	0.12	0.14	0.16	0.19	0.21	0.24
78	0.01	0.02	0.03	0.04	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10	0.11	0.13	0.16	0.18	0.20	0.22
80	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10	0.12	0.15	0.17	0.19	0.21
82	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10	0.12	0.14	0.15	0.17	0.19
84	0.01	0.02	0.03	0.04	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.11	0.13	0.14	0.16	0.18
86	0.01	0.02	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.07	0.08	0.10	0.12	0.13	0.15	0.17
88	0.01	0.02	0.02	0.03	0.04	0.05	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.11	0.12	0.14	0.15
90	0.01	0.01	0.02	0.03	0.03	0.04	0.05	0.06	0.06	0.07	0.08	0.10	0.11	0.12	0.14

$$b_u = (1.23U_d - 0.0112RH_{min} U_d) / 1609$$

Tabla A2.4.- Porcentaje diario de horas sol (p).

Latitud Norte	Mes del año											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
64	0.11	0.18	0.25	0.33	0.40	0.46	0.44	0.37	0.29	0.22	0.14	0.09
62	0.13	0.19	0.26	0.32	0.39	0.44	0.42	0.36	0.29	0.22	0.15	0.11
60	0.14	0.19	0.26	0.32	0.38	0.42	0.40	0.35	0.29	0.22	0.17	0.13
58	0.16	0.20	0.26	0.32	0.37	0.41	0.39	0.34	0.29	0.23	0.18	0.14
56	0.17	0.21	0.26	0.31	0.36	0.39	0.38	0.34	0.29	0.23	0.18	0.15
54	0.18	0.21	0.26	0.31	0.36	0.38	0.37	0.33	0.29	0.23	0.19	0.16
52	0.18	0.22	0.26	0.31	0.35	0.37	0.37	0.33	0.28	0.24	0.20	0.17
50	0.19	0.22	0.26	0.31	0.34	0.37	0.36	0.33	0.28	0.24	0.20	0.18
48	0.20	0.22	0.26	0.30	0.34	0.36	0.35	0.32	0.28	0.24	0.21	0.19
46	0.20	0.23	0.26	0.30	0.33	0.35	0.35	0.32	0.28	0.24	0.21	0.19
44	0.21	0.23	0.26	0.30	0.33	0.35	0.34	0.32	0.28	0.25	0.22	0.20
42	0.21	0.23	0.27	0.30	0.33	0.34	0.34	0.31	0.28	0.25	0.22	0.20
40	0.22	0.24	0.27	0.30	0.32	0.34	0.33	0.31	0.28	0.25	0.22	0.21
38	0.22	0.24	0.27	0.29	0.32	0.33	0.33	0.31	0.28	0.25	0.23	0.21
36	0.22	0.24	0.27	0.29	0.32	0.33	0.32	0.30	0.28	0.25	0.23	0.22
34	0.23	0.24	0.27	0.29	0.31	0.32	0.32	0.30	0.28	0.25	0.23	0.22
32	0.23	0.24	0.27	0.29	0.31	0.32	0.32	0.30	0.28	0.26	0.24	0.23
30	0.23	0.25	0.27	0.29	0.31	0.32	0.31	0.30	0.28	0.26	0.24	0.23
28	0.24	0.25	0.27	0.29	0.30	0.31	0.31	0.30	0.28	0.26	0.24	0.23
26	0.24	0.25	0.27	0.29	0.30	0.31	0.31	0.29	0.28	0.26	0.25	0.24
24	0.24	0.25	0.27	0.29	0.30	0.31	0.30	0.29	0.28	0.26	0.25	0.24
22	0.25	0.25	0.27	0.28	0.30	0.30	0.30	0.29	0.28	0.26	0.25	0.24
20	0.25	0.26	0.27	0.28	0.29	0.30	0.30	0.29	0.28	0.26	0.25	0.25
18	0.25	0.26	0.27	0.28	0.29	0.30	0.30	0.29	0.28	0.26	0.25	0.25
16	0.25	0.26	0.27	0.28	0.29	0.30	0.29	0.29	0.28	0.27	0.26	0.25
14	0.26	0.26	0.27	0.28	0.29	0.29	0.29	0.28	0.28	0.27	0.26	0.25
12	0.26	0.26	0.27	0.28	0.29	0.29	0.29	0.28	0.28	0.27	0.26	0.26
10	0.26	0.26	0.27	0.28	0.28	0.29	0.29	0.28	0.28	0.27	0.26	0.26
8	0.26	0.27	0.27	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.27	0.27	0.27	0.26
6	0.27	0.27	0.27	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.27	0.27	0.27	0.27
4	0.27	0.27	0.27	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.27	0.27	0.27	0.27
2	0.27	0.27	0.27	0.27	0.28	0.28	0.28	0.28	0.27	0.27	0.27	0.27
0	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27
Latitud Sur	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun
	Mes del año											

Tabla A2.5.- Día del año calendario.

Día del Mes	Mes del año											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1	1	32	60	91	121	152	182	213	244	274	305	335
2	2	33	61	92	122	153	183	214	245	275	306	336
3	3	34	62	93	123	154	184	215	246	276	307	337
4	4	35	63	94	124	155	185	216	247	277	308	338
5	5	36	64	95	125	156	186	217	248	278	309	339
6	6	37	65	96	126	157	187	218	249	279	310	340
7	7	38	66	97	127	158	188	219	250	280	311	341
8	8	39	67	98	128	159	189	220	251	281	312	342
9	9	40	68	99	129	160	190	221	252	282	313	343
10	10	41	69	100	130	161	191	222	253	283	314	344
11	11	42	70	101	131	162	192	223	254	284	315	345
12	12	43	71	102	132	163	193	224	255	285	316	346
13	13	44	72	103	133	164	194	225	256	286	317	347
14	14	45	73	104	134	165	195	226	257	287	318	348
15	15	46	74	105	135	166	196	227	258	288	319	349
16	16	47	75	106	136	167	197	228	259	289	320	350
17	17	48	76	107	137	168	198	229	260	290	321	351
18	18	49	77	108	138	169	199	230	261	291	322	352
19	19	50	78	109	139	170	200	231	262	292	323	353
20	20	51	79	110	140	171	201	232	263	293	324	354
21	21	52	80	111	141	172	202	233	264	294	325	355
22	22	53	81	112	142	173	203	234	265	295	326	356
23	23	54	82	113	143	174	204	235	266	296	327	357
24	24	55	83	114	144	175	205	236	267	297	328	358
25	25	56	84	115	145	176	206	237	268	298	329	359
26	26	57	85	116	146	177	207	238	269	299	330	360
27	27	58	86	117	147	178	208	239	270	300	331	361
28	28	59	87	118	148	179	209	240	271	301	332	362
29	29		88	119	149	180	210	241	272	302	333	363
30	30		89	120	150	181	211	242	273	303	334	364
31	31		90		151		212	243		304		365

Cuadro A2.1.- Parámetros de coeficientes basales de cultivos agrícolas y hortícolas anuales para ajuste de la evapotranspiración del pasto como cultivo de referencia (adaptado de Doorenbos y Prutt 1977).

Clima	Humedad Relativa (%)	Condición de Viento	Recorrido del viento (km/d)
Arido (A)	< 20	Moderado (M)	< 400
Húmedo (H)	> 70	Fuerte (F)	> 400

Cultivo	Clima A o H	Coeficientes para vientos M o F				Fracción del ciclo			Duración (días) de la siembra a maduración
		M		F		Fs1	Fs2	Fs3	
		Kcp	Kcm	Kcp	Kcm				
Alcachofas	H	0.95	0.90	0.95	0.90	0.10	0.20	0.90	310-360
	A	1.00	0.95	1.05	1.00				
Cebada	H	1.05	0.25	1.10	0.25	0.13	0.33	0.75	120-150
	A	1.15	0.20	1.20	0.20				
Ejote	H	0.95	0.85	0.95	0.85	0.22	0.56	0.89	70-90
	A	1.00	0.90	1.05	0.90				
Frijol	H	1.05	0.30	1.10	0.30	0.25	0.42	0.80	90-110
	A	1.15	0.25	1.20	0.25				
Betabel	H	1.00	0.90	1.00	0.90	0.25	0.60	0.88	70-90
	A	1.05	0.95	1.10	1.00				
Zanahoria	H	1.00	0.70	1.05	0.75	0.20	0.50	0.80	100-150
	A	1.15	0.50	1.20	0.50				
Ricino	H	1.05	0.50	1.10	0.50	0.14	0.36	0.72	160-180
	A	1.15	0.50	1.20	0.50				
Apio	H	1.00	0.90	1.05	0.95	0.15	0.40	0.89	120-210
	A	1.10	1.00	1.15	1.05				
Maíz Dulce	H	1.05	0.95	1.10	1.00	0.22	0.56	0.89	80-110
	A	1.15	1.05	1.20	1.10				
Maíz Grano	H	1.05	0.55	1.10	0.55	0.15	0.43	0.75	105-180
	A	1.15	0.60	1.20	0.60				
Algodón	H	1.05	0.65	1.15	0.65	0.15	0.43	0.75	180-195
	A	1.20	0.65	1.25	0.70				
Crucíferas: Col de Bruselas, Col Berza, Col Brocoli y Coliflor.	H	0.95	0.80	1.00	0.85	Primavera			80-190
						0.18	0.63	0.89	
	A	1.05	0.90	1.10	0.95	Otoño			
Pepino fresco	H	0.90	0.70	0.90	0.70	0.19	0.47	0.85	100-130
	A	0.95	0.75	1.00	0.80				
Pepino maduro	H	0.90	0.85	0.90	0.85	0.19	0.47	0.85	90-120
	A	0.95	0.95	1.00	1.00				
Berenjenas	H	0.95	0.80	1.00	0.85	0.22	0.54	0.84	130-140
	A	1.05	0.85	1.10	0.90				
Lino	H	1.00	0.25	1.05	0.25	0.15	0.36	0.75	150-220
	A	1.10	0.20	1.15	0.20				
Granos pequeños	H	1.05	0.30	1.10	0.30	0.15	0.35	0.75	150-165
	A	1.15	0.25	1.20	0.25				
Lenteja	H	1.05	0.30	1.10	0.30	0.15	0.35	0.75	150-170
	A	1.15	0.25	1.20	0.25				
Lechuga	H	0.95	0.90	0.95	0.90	0.26	0.63	0.90	70-140
	A	1.00	0.90	1.05	1.00				

Cultivo	Clima A o H	Coeficientes para vientos M o F				Fracción del ciclo			Duración (días) de la siembra a maduración
		M		F		Fs1	Fs2	Fs3	
		Kcp	Kcm	Kcp	Kcm				
Melón	H	1.10	0.65	1.10	0.65	0.20	0.50	0.85	120-160
	A	1.15	0.75	1.20	0.75				
Mijo	H	1.00	0.30	1.05	0.30	0.15	0.36	0.75	105-140
	A	1.10	0.25	1.15	0.25				
Avena	H	1.05	0.25	1.10	0.25	0.13	0.33	0.75	120-150
	A	1.15	0.20	1.20	0.20				
Cebolla seca	H	0.95	0.75	0.95	0.75	0.10	0.28	0.75	150-210
	A	1.05	0.80	1.10	0.85				
Cebolla verde	H	0.95	0.95	0.95	0.95	0.28	0.74	0.90	70-100
	A	1.00	1.00	1.05	0.85				
Cacahuete	H	0.95	0.55	1.00	0.55	0.20	0.46	0.80	120-140
	A	1.05	0.60	1.10	0.60				
Chicharo	H	1.05	0.95	1.10	1.00	0.20	0.47	0.85	90-110
	A	1.15	1.05	1.20	1.10				
Pimiento fresco	H	0.95	0.80	1.00	0.85	0.20	0.50	0.85	120-210
	A	1.05	0.85	1.10	0.90				
Papa	H	1.05	0.70	1.10	0.70	0.20	0.45	0.80	100-150
	A	1.15	0.75	1.20	0.75				
Rábano	H	0.80	0.75	0.80	0.75	0.20	0.50	0.87	30-45
	A	0.85	0.80	0.90	0.85				
Cártamo	H	1.05	0.25	1.10	0.25	0.17	0.45	0.80	120-190
	A	1.15	0.20	1.20	0.20				
Sorgo	H	1.00	0.50	1.05	0.50	0.16	0.42	0.75	110-140
	A	1.10	0.55	1.15	0.55				
Soya	H	1.00	0.45	1.05	0.45	0.15	0.37	0.81	60-150
	A	1.10	0.45	1.15	0.45				
Espinaca	H	0.95	0.90	0.95	0.90	0.20	0.50	0.90	60-100
	A	1.00	0.95	1.05	1.00				
Calabaza de Invierno	H	0.90	0.70	0.90	0.70	0.20	0.50	0.80	90-125
	A	0.95	0.75	1.00	0.80				
Calabacita	H	0.90	0.70	0.90	0.70	0.52	0.60	0.85	90-125
	A	0.95	0.75	1.00	0.80				
Fresas	H	0.70	0.70	0.70	0.70	0.10	0.40	1.00	150-180
	A	0.80	0.80	0.85	0.85				
Remolacha	H	1.05	0.40	1.10	0.40	0.17	0.46	0.80	160-230
	A	1.15	1.00	1.20	1.00				
Girasol	H	1.05	0.90	1.10	0.40	0.17	0.45	0.80	100-130
	A	1.15	0.35	1.20	0.35				
Jitomate	H	1.05	0.85	1.10	0.85	0.20	0.50	0.80	120-180
	A	1.20	0.90	1.25	0.90				
Trigo de Invierno	H	1.05	0.25	1.10	0.25	0.13	0.33	0.75	120-150
	A	1.15	0.20	1.20	0.20				
Trigo de Primavera	H	1.05	0.55	1.10	0.55	0.13	0.53	0.75	100-140
	A	1.15	0.50	1.20	0.50				

Cuadro A2.4.- Coeficientes basales de cultivos en pleno desarrollo, caducifolios, utilizando el pasto como cultivo de referencia (de Howell, et al. 1986).

Cultivo, Clima y Viento	Suelo cubierto de hierba 1/									Suelo limpio, cultivado o libre de hierba 2/								
	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov
Invierno frío con heladas. Cubrimiento del Suelo iniciando en abril																		
Manzana y Cereza																		
H, M	--	0.50	0.75	1.00	1.10	1.10	1.10	0.85	--	--	0.45	0.55	0.75	0.85	0.85	0.80	0.60	--
H, F	--	0.50	0.75	1.10	1.20	1.20	1.15	0.90	--	--	0.45	0.55	0.80	0.90	0.90	0.90	0.65	--
A, M	--	0.45	0.85	1.15	1.25	1.25	1.20	0.95	--	--	0.40	0.60	0.85	1.00	1.00	0.95	0.75	--
A, F	--	0.45	0.85	1.20	1.35	1.35	1.35	1.00	--	--	0.40	0.65	0.90	1.05	1.05	1.00	0.55	--
Melocotón, Albaricoque, Pera y Ciruela																		
H, M	--	0.50	0.70	0.90	1.00	1.00	0.95	0.75	--	--	0.45	0.50	0.65	0.75	0.75	0.70	0.55	--
H, F	--	0.50	0.70	1.00	1.05	1.10	1.00	0.80	--	--	0.45	0.55	0.70	0.80	0.80	0.75	0.60	--
A, M	--	0.45	0.80	1.05	1.15	1.15	1.10	0.85	--	--	0.40	0.55	0.75	0.90	0.90	0.70	0.65	--
A, F	--	0.45	0.80	1.10	1.20	1.20	1.15	0.90	--	--	0.40	0.60	0.80	0.95	0.95	0.90	0.65	--
Invierno frío con heladas ligeras. Cultivos sin Dormancia y Suelo Cubierto de Pasto																		
Manzana, Cereza y Nuez 3/																		
H, M	0.80	0.90	1.00	1.10	1.10	1.10	1.05	0.85	0.80	0.60	0.70	0.80	0.75	0.85	0.80	0.80	0.75	0.65
H, F	0.80	0.95	1.10	1.15	1.20	1.20	1.15	0.90	0.80	0.60	0.75	0.85	0.90	0.90	0.85	0.80	0.80	0.70
A, M	0.85	1.00	1.15	1.25	1.25	1.25	1.20	0.95	0.85	0.50	0.75	0.95	1.00	1.00	0.95	0.90	0.85	0.70
A, F	0.85	1.05	1.20	1.35	1.35	1.35	1.26	1.00	0.85	0.50	0.80	1.00	1.05	1.05	1.00	0.95	0.90	0.75
Melocotón, Albaricoque, Pera y Almendra																		
H, M	0.80	0.85	0.90	1.00	1.00	1.00	0.95	0.80	0.80	0.55	0.70	0.75	0.80	0.80	0.70	0.70	0.65	0.55
H, F	0.80	0.90	0.85	1.00	1.00	1.00	1.00	0.85	0.80	0.55	0.70	0.75	0.80	0.80	0.80	0.75	0.70	0.60
A, M	0.85	0.95	1.05	1.15	1.15	1.15	1.10	0.90	0.85	0.50	0.70	0.85	0.90	0.90	0.90	0.80	0.75	0.65
A, F	0.85	1.00	1.10	1.20	1.20	1.20	1.15	0.95	0.85	0.50	0.75	0.90	0.95	0.95	0.95	0.85	0.80	0.70

1/ Para frutales jóvenes con cubrimiento de árboles de 20 y 50 %, reducir valores de Kcb a media estación de un 10 a 15 % y de un 5 a 10 % respectivamente

2/ Para frutales jóvenes con cubrimiento de árboles de 20 y 50 %, reducir valores de Kcb a media estación de un 25 a 35 % y de un 10 a 15 % respectivamente

3/ Para nuez, de marzo a mayo, disminuir los valores de un 10 a un 20 %, ya que en este período se presenta un crecimiento lento.

Cuadro A2.5.- Valores de Kc para la caña de azúcar.

Edad del cultivo, meses		Fase de Crecimiento	HR mín > 70 % Vientos		HR mín < 20 % Vientos	
12	24		M	F	M	F
0-1	0-2.5	De siembra a 0.25 de cubierta completa	0.55	0.60	0.40	0.45
1-2	2.5-3.5	De 0.25 a 0.5 de la cubierta completa	0.80	0.85	0.75	0.80
2-2.5	3.5-4.5	De 0.5 a 0.75 de la cubierta completa	1.00	1.10	1.10	1.20
4-10	6-17	Utilización máxima	1.05	1.15	1.25	1.30
10-11	17-22	Senescencia precoz	0.80	0.85	0.95	1.05
11-12	22-24	maduración	0.60	0.65	0.70	0.75

Cuadro A2.6.- Coeficientes basales para la uva bajo diferentes condiciones (adaptado de Doorenbos y Pruitt, 1977).

Condición, Clima y Viento	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Uvas maduras en zonas con heladas letales, primeras hojas a principio de mayo, cosecha a mediados de septiembre, cubierta sombreada de 40 a 50 % a mediados del período vegetativo y superficie de suelo limpia.												
H con M	--	--	--	--	0.50	0.60	0.70	0.70	0.60	0.50	--	--
H con F	--	--	--	--	0.50	0.60	0.75	0.75	0.65	0.55	--	--
A con M	--	--	--	--	0.45	0.65	0.80	0.85	0.75	0.60	--	--
A con F	--	--	--	--	0.50	0.70	0.85	0.90	0.85	0.65	--	--
Uvas maduras en zonas con heladas ligeras, primeras hojas a principio de abril, cosecha de fines de agosto a principio de septiembre, cubierta sombreada de 30 a 35 % a mediados del período vegetativo y superficie de suelo limpia.												
H con M	--	--	--	0.50	0.55	0.60	0.60	0.60	0.55	0.40	0.35	--
H con F	--	--	--	0.50	0.55	0.65	0.65	0.65	0.60	0.45	0.35	--
A con M	--	--	--	0.45	0.60	0.70	0.70	0.70	0.65	0.55	0.30	--
A con F	--	--	--	0.45	0.65	0.75	0.75	0.75	0.70	0.55	0.30	--
Uvas maduras en zonas secas y calientes, primeras hojas a principio de febrero o marzo, cosecha en la segunda quincena de julio, cubierta sombreada de 30 a 35 % a mediados del período vegetativo y superficie de suelo limpia.												
A con M secos	--	--	0.25	0.45	0.60	0.70	0.70	0.65	0.55	0.45	0.35	--
A con F secos	--	--	0.25	0.45	0.65	0.75	0.75	0.65	0.55	0.45	0.35	--

Cuadro A2.7.- Coeficientes de cultivo para arroz, usando pasto como cultivo de referencia (adaptado de Doorenbos y Pruitt 1977).

Geografía, Clima y Vientos	Siembra	Cosecha	1 ^{er} mes	2 ^{do} mes	Período Medio	3 ^a y 4 ^a ult. sem.
Estados del Sur, verano húmedo						
M	Mayo	Sep-Oct	1.10	1.10	1.10	0.95
F			1.15	1.15	1.15	1.00
California, verano seco						
M	Abr a May	Sep a Oct	1.10	1.10	1.25	1.00
F			1.15	1.15	1.30	1.05

Cuadro A2.8.- Coeficientes mensuales de los cultivos para algunos perennes (Valores adaptados de James et al 1982).

Cultivo	Ene-Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov-Dic
Lúpulo	0.50	0.50	0.85	0.95	1.50	0.25	0.25	0.25
Menta	0.50	0.50	0.60	1.10	1.20	1.20	1.10	0.50
Frambuesa	0.40	1.05	1.20	1.20	1.15	0.85	0.50	0.40
Fresa	0.40	0.40	0.50	0.30	0.40	0.40	0.40	0.40

Cuadro A2.9.- Clases texturales de suelo, con sus valores medios y la desviación estándar de carbono orgánico (Co) y densidad aparente (Da), medidos y estimados a -33 KPa de presión de agua.

Clase Textural	Carbono Orgánico (Co), g C/ Kg		Densidad Aparente (Da), g/cm ³		Tamaño de muestra
	Media	Desv. Est.	Media	Desv. Est.	
Arcilla	0.064	0.067	1.32	0.17	2,529
Arcilla Franca	0.070	0.088	1.41	0.19	2,213
Cuarzo Arenoso	0.037	0.060	1.49	0.24	117
Cuarzo Franco Arenoso	0.071	0.107	1.41	0.25	770
Arena Fina	0.035	0.068	1.53	0.15	166
Arena Fina Franca	0.072	0.099	1.45	0.23	2,112
Franco	0.095	0.114	1.40	0.22	3,431
Franco Cuarzo Arenoso	0.059	0.083	1.41	0.26	305
Franco Arenoso	0.041	0.050	1.53	0.14	282
Franco Arenoso	0.058	0.095	1.53	0.20	369
Franco Arenoso Muy Fina	0.027	0.031	1.42	0.13	17
Arena	0.038	0.045	1.57	0.15	183
Arena Arcillosa	0.028	0.027	1.53	0.17	130
Arena Franco Arcillosa	0.039	0.055	1.52	0.18	1,417
Limo	0.080	0.095	1.36	0.17	213
Limo Arcilloso	0.078	0.085	1.38	0.16	1,664
Limo Franco Arcilloso	0.079	0.089	1.40	0.15	2,460
Limo Franco	0.093	0.107	1.37	0.20	4,033
Arena Franca	0.072	0.106	1.48	0.24	875
Arena Muy Fina	0.034	0.052	1.35	0.13	13
Arena Franca Muy Fina	0.059	0.066	1.43	0.16	573
Total					23,874

CALCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACION ACTUAL DEL CULTIVO

CULTIVO:	FRIJOL	SUELO	Arcilla Limosa
F. de S.	15/04/97	TETA s	0.492
D. a la Mrz.	90	TETA r	0.2829
F. de C.	14/07/97	ENE	2.613
Coefficientes de Cultivo		ALFA	-167.274
Kcp	1.2	EME	0.2346
Kcm	0.25	CC (%)	41.2916
Fs1	0.25	PMP (%)	29.5923
Fs2	0.42	PR 1 (cm)	48.21
Fs3	0.8	PR 2 (cm)	56.3298
		PR 3 (cm)	62.3517
		PR 4 (cm)	56.83
		L.A.D.Z.R. 1 (cm)	5.64015
		L.A.D.Z.R. 2 (cm)	6.59018
		L.A.D.Z.R. 3 (cm)	7.2947
		L.A.D.Z.R. 4 (cm)	6.64918
		18 C.H.I.S.A.R. 1 (%)	29.5923
		C.H.I.S.A.R. 2 (%)	29.5923
		C.H.I.S.A.R. 3 (%)	29.5923
		C.H.I.S.A.R. 4 (%)	29.5923
		L.A.A.CC. 1 (cm)	5.64015
		L.A.A.CC. 2 (cm)	6.59018
		L.A.A.CC. 3 (cm)	7.2947
		L.A.A.CC. 4 (cm)	6.64918
		L.A.N.D.C.C. (cm)	34.99
		F.S.S.C. (%)	85.068
		P.D.H.A.R. (dias)	10
		F.C. cm a J/kg	0.09491
		F.C. BARS A ATM	0.98
		F.C. ATM cm	1033

CICLO FENOLOGICO

ETAPA	INICIO	TERMINO
INICIAL	1	22.5
DES. FOLL.	23.5	37.8
EST. MED.	38.8	72
MAD.	73	90

NOMENCLATURA

F. de S. = Fecha de Siembra del Cultivo (Día/Mes/Año); D. a la Mrz. = Dias a la Madurez o Cosecha (Dias); F. de C. = Fecha de Cosecha (C/A); C/A = Cálculo Automático, **Coefficientes de Cultivo:** Kcp, Kcm, Fs1, Fs2 y Fs3 (O/T); O/T = Obtención de Tablas; **CC** = Capacidad de campo; **PMP** = Punto de Marchitamiento permanente; **PR** = Profundidad radicular o de riego; **LADZR** = Lámina de agua disponible en la zona radicular; **CHISAR** = Contenido de humedad inicial en el suelo antes del riego; **LAACC** = Lámina de agua aplicada para alcanzar la CC; **LANDCC** = Lámina de agua neta disponible para todo el ciclo del cultivo; **FSSC** = Factor de sensibilidad a la sequía del cultivo; **PDHAR** = Política con déficit de humedad aplicada en los riegos.

POLITICA DE DEFICIT POR ETAPA

	ETPA	ETPE	DISPONIBLE	PRCEP	PRCPDLD
INICIAL	5.64	5.64	4.23	48.21	36.16
DES. FOLL.	25.41	19.77	14.83	168.99	126.74
EST. MED.	39.999	14.589	10.94	124.70	93.53
MAD.	46.648	6.649	4.99	56.83	42.63
		46.648	34.99		
DEFICIT cm	11.662				

BARS ATM cm J/Kg

TOL. SEC.	-3	-1.0000	-1033	-98.04203
TETA SSC	35.126			
POLITICA1	-15.3	-14.9940	-15488.802	-1470.0422
POLITICA2				
POLITICA3				
POLITICA4				
TETA POL1	29.5927			
TETA POL2	29.5927			
TETA POL3	29.5927			
TETA POL4	29.5927			
LAMDP1 cm	0.00015			
LAMDP2 cm	0.00018			
LAMDP3 cm	0.0002			
LAMDP4 cm	0.00018			

MES	ET POT. cm/día	dias	FECHA A FIN MES	ET POT. cm/mes
ABR	0.78246	30	31/03/97	23.474
MAY	0.92566	31	1/05/97	28.695
JUN	0.81611	30	31/05/97	24.483
JUL	0.7823	31	1/07/97	24.251
AGO	0.77648	31	1/08/97	24.071
SEP	0.7561	30	31/08/97	22.683
OCT	0.73558	31	1/10/97	22.803
NOV	0.59746	30	31/10/97	17.924
DIC	0.49954	31	1/12/97	15.486
ENE	0.47262	31	1/01/98	14.651
FEB	0.54083	28	29/01/98	15.143
MAR	0.65265	31	1/03/98	20.232
ABR	0.78246	30	31/03/98	23.474

	DIA	Kb	Ks	ETp SEM 1	ETp SEM 2	ETpA cm	ETr SEM 1	ETr SEM 2	ETA cm	INF. cm	L.A.A.	L.A.A.LL. (cm)	C.H. DISM.	C.H.	H (cm)	H (J/kg)
0				cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	5.640			41.29	-343.99	-32.65
1	15-Abr-97	0.25	1.00	0.231	0.000	0.231	0.231	0.000	0.231	0.000	5.409	0.000	0.48	40.81	-368.87	-35.01
2	16-Abr-97	0.25	1.00	0.231	0.000	0.463	0.231	0.000	0.463	0.000	5.177	0.000	0.48	40.33	-396.06	-37.59
3	17-Abr-97	0.25	1.00	0.231	0.000	0.694	0.231	0.000	0.694	0.000	4.946	0.000	0.48	39.85	-425.92	-40.42
4	18-Abr-97	0.25	1.00	0.231	0.000	0.926	0.231	0.000	0.925	0.000	4.715	0.000	0.48	39.37	-458.91	-43.56
5	19-Abr-97	0.25	1.00	0.231	0.000	1.157	0.231	0.000	1.157	0.000	4.483	0.000	0.48	38.89	-495.59	-47.04
6	20-Abr-97	0.25	1.00	0.231	0.000	1.388	0.231	0.000	1.388	0.000	4.252	0.000	0.48	38.41	-536.63	-50.93
7	21-Abr-97	0.25	1.00	0.231	0.000	1.620	0.231	0.000	1.619	0.000	4.021	0.000	0.48	37.93	-582.84	-55.32
8	22-Abr-97	0.25	1.00	0.231	0.000	1.851	0.231	0.000	1.851	0.000	3.789	0.000	0.48	37.45	-635.26	-60.29
9	23-Abr-97	0.25	1.00	0.231	0.000	2.083	0.231	0.000	2.082	0.000	3.558	0.000	0.48	36.97	-695.18	-65.98
10	24-Abr-97	0.25	1.00	0.231	0.000	2.314	0.231	0.000	2.313	0.000	3.327	0.000	0.48	36.49	-764.25	-72.53
11	25-Abr-97	0.25	1.00	0.231	0.000	2.546	0.231	0.000	2.545	0.000	3.095	0.000	0.48	36.01	-844.58	-80.16
12	26-Abr-97	0.25	1.00	0.231	0.000	2.777	0.231	0.000	2.776	0.000	2.864	0.000	0.48	35.53	-938.97	-89.12
13	27-Abr-97	0.25	1.00	0.231	0.000	3.008	0.231	0.000	3.007	0.000	2.633	0.000	0.48	35.05	-1051.14	-99.76
14	28-Abr-97	0.25	1.00	0.231	0.000	3.239	0.231	0.000	3.238	0.000	2.402	0.000	0.48	34.58	-1185.86	-112.55
15	29-Abr-97	0.25	0.98	0.228	0.000	3.467	0.228	0.000	3.466	0.000	2.174	0.000	0.47	34.10	-1347.87	-127.93
16	30-Abr-97	0.25	0.97	0.225	0.000	3.692	0.225	0.000	3.690	0.000	1.950	0.000	0.47	33.64	-1545.38	-146.67
17	1-May-97	0.25	0.96	0.222	0.000	3.913	0.221	0.000	3.912	0.000	1.728	0.000	0.46	33.18	-1789.95	-169.88
18	2-May-97	0.25	0.94	0.193	0.000	4.106	0.193	0.000	4.104	0.000	1.536	0.000	0.40	32.78	-2057.70	-195.30
19	3-May-97	0.25	0.93	0.190	0.000	4.296	0.190	0.000	4.295	0.000	1.345	0.000	0.39	32.38	-2391.67	-226.99
20	4-May-97	0.25	0.92	0.188	0.000	4.485	0.188	0.000	4.483	0.000	1.157	0.000	0.39	31.99	-2816.51	-267.32
21	5-May-97	0.25	0.91	0.186	0.000	4.670	0.186	0.000	4.669	0.000	0.971	0.000	0.39	31.61	-3369.80	-319.83
22	6-May-97	0.25	0.90	0.184	0.000	4.854	0.184	0.000	4.852	0.000	0.788	0.000	0.38	31.23	-4111.36	-390.21
23	7-May-97	0.28	0.89	0.204	0.000	5.058	0.204	0.000	5.056	0.000	0.584	0.000	0.60	30.63	-5958.19	-565.49
24	8-May-97	0.34	0.87	0.244	0.000	5.302	0.240	0.000	5.296	0.000	0.344	0.000	0.43	30.20	-8270.17	-784.92
25	9-May-97	0.41	0.86	0.284	0.000	5.586	0.283	0.000	5.579	0.000	0.061	0.000	0.50	29.70	-13601.38	-1290.91
26	10-May-97	0.47	0.85	0.322	0.000	5.909	0.322	0.000	5.901	0.000	6.590	0.000	0.50	41.29	-343.99	-32.65
27	11-May-97	0.53	1.00	0.432	0.000	6.341	0.432	0.000	6.333	0.000	6.158	0.000	0.77	40.52	-384.83	-36.52
28	12-May-97	0.59	1.00	0.483	0.000	6.824	0.483	0.000	6.816	0.000	5.675	0.000	0.86	39.67	-438.19	-41.59
29	13-May-97	0.65	1.00	0.533	0.000	7.357	0.533	0.000	7.350	0.000	5.142	0.000	0.95	38.72	-509.71	-48.38
30	14-May-97	0.72	1.00	0.584	0.000	7.941	0.584	0.000	7.934	0.000	4.558	0.000	1.04	37.68	-609.15	-57.81
31	15-May-97	0.78	1.00	0.635	0.000	8.576	0.635	0.000	8.568	0.000	3.923	0.000	1.13	36.56	-754.43	-71.60
32	16-May-97	0.84	1.00	0.685	0.000	9.261	0.685	0.000	9.254	0.000	3.238	0.000	1.22	35.34	-981.76	-93.18
33	17-May-97	0.90	1.00	0.736	0.000	9.997	0.736	0.000	9.990	0.000	2.502	0.000	1.31	34.03	-1374.62	-130.46
34	18-May-97	0.96	0.97	0.762	0.000	10.760	0.762	0.000	10.752	0.000	1.739	0.000	1.35	32.68	-2133.01	-202.44
35	19-May-97	1.03	0.93	0.779	0.000	11.539	0.779	0.000	11.531	0.000	0.960	0.000	1.38	31.30	-3955.90	-375.45
36	20-May-97	1.09	0.89	0.791	0.000	12.330	0.791	0.000	12.323	0.000	0.169	0.000	1.40	29.89	-11046.95	-1048.47
37	21-May-97	1.15	0.85	0.799	0.000	13.129	0.799	0.000	13.122	0.000	6.590	0.000	1.40	41.29	-343.99	-32.65
38	22-May-97	1.20	1.00	0.979	0.000	14.108	0.979	0.000	14.101	0.000	5.611	0.000	2.70	38.59	-520.78	-49.43
39	23-May-97	1.20	1.00	0.979	0.000	15.088	0.979	0.000	15.080	0.000	4.632	0.000	1.57	37.02	-688.86	-65.38
40	24-May-97	1.20	1.00	0.979	0.000	16.067	0.979	0.000	16.060	0.000	3.652	0.000	1.57	35.45	-957.13	-90.84
41	25-May-97	1.20	1.00	0.979	0.000	17.046	0.979	0.000	17.039	0.000	2.673	0.000	1.57	33.88	-1437.31	-136.42
42	26-May-97	1.20	0.96	0.945	0.000	17.991	0.945	0.000	17.983	0.000	1.728	0.000	1.51	32.36	-2409.69	-228.70
43	27-May-97	1.20	0.92	0.902	0.000	18.893	0.902	0.000	18.886	0.000	0.826	0.000	1.45	30.92	-4931.22	-468.02
44	28-May-97	1.20	0.88	0.862	0.000	19.755	0.862	0.000	19.748	0.000	7.295	0.000	1.45	41.29	-343.99	-32.65

45	29-May-97	1.20	1.00	0.979	0.000	20.735	0.979	0.000	20.727	0.000	6.315	0.000	1.57	39.72	-434.59	-41.25
46	30-May-97	1.20	1.00	0.979	0.000	21.714	0.979	0.000	21.706	0.000	5.336	0.000	1.57	38.15	-561.16	-53.26
47	31-May-97	1.20	1.00	0.979	0.000	22.693	0.979	0.000	22.686	0.000	4.357	0.000	1.57	36.58	-751.00	-71.28
48	1-Jun-97	1.20	1.00	0.939	0.000	23.632	0.939	0.000	23.625	0.000	3.418	0.000	1.51	35.07	-1045.95	-99.27
49	2-Jun-97	1.20	1.00	0.937	0.000	24.569	0.937	0.000	24.562	0.000	2.481	0.000	1.50	33.57	-1577.21	-149.69
50	3-Jun-97	1.20	0.96	0.897	0.000	25.467	0.897	0.000	25.459	0.000	1.583	0.000	1.44	32.13	-2652.20	-251.72
51	4-Jun-97	1.20	0.91	0.859	0.000	26.325	0.859	0.000	26.318	0.000	0.725	0.000	1.38	30.75	-5472.59	-519.40
52	5-Jun-97	1.20	0.88	0.822	0.000	27.147	0.822	0.000	27.140	0.000	7.295	0.000	1.38	41.29	-343.99	-32.65
53	6-Jun-97	1.20	1.00	0.939	0.000	28.086	0.939	0.000	28.079	0.000	6.356	0.000	1.51	39.79	-430.25	-40.84
54	7-Jun-97	1.20	1.00	0.939	0.000	29.025	0.939	0.000	29.017	0.000	5.417	0.000	1.51	38.28	-548.77	-52.08
55	8-Jun-97	1.20	1.00	0.939	0.000	29.964	0.939	0.000	29.956	0.000	4.478	0.000	1.51	36.78	-722.45	-68.57
56	9-Jun-97	1.20	1.00	0.939	0.000	30.902	0.939	0.000	30.895	0.000	3.540	0.000	1.51	35.27	-998.24	-94.74
57	10-Jun-97	1.20	1.00	0.939	0.000	31.841	0.939	0.000	31.834	0.000	2.601	0.000	1.51	33.76	-1487.25	-141.15
58	11-Jun-97	1.20	0.96	0.902	0.000	32.743	0.902	0.000	32.736	0.000	1.699	0.000	1.45	32.32	-2456.47	-233.14
59	12-Jun-97	1.20	0.92	0.864	0.000	33.607	0.864	0.000	33.600	0.000	0.835	0.000	1.39	30.93	-4887.74	-463.90
60	13-Jun-97	1.20	0.88	0.827	0.000	34.434	0.827	0.000	34.426	0.000	7.295	0.000	1.39	41.29	-343.99	-32.65
61	14-Jun-97	1.20	1.00	0.939	0.000	35.373	0.939	0.000	35.365	0.000	6.356	0.000	1.51	39.79	-430.25	-40.84
62	15-Jun-97	1.20	1.00	0.939	0.000	36.311	0.939	0.000	36.304	0.000	5.417	0.000	1.51	38.28	-548.77	-52.08
63	16-Jun-97	1.20	1.00	0.939	0.000	37.250	0.939	0.000	37.243	0.000	4.478	0.000	1.51	36.78	-722.45	-68.57
64	17-Jun-97	1.20	1.00	0.939	0.000	38.189	0.939	0.000	38.181	0.000	3.540	0.000	1.51	35.27	-998.24	-94.74
65	18-Jun-97	1.20	1.00	0.939	0.000	39.128	0.939	0.000	39.120	0.000	2.601	0.000	1.51	33.76	-1487.25	-141.15
66	19-Jun-97	1.20	0.96	0.902	0.000	40.030	0.902	0.000	40.022	0.000	1.699	0.000	1.45	32.32	-2456.47	-233.14
67	20-Jun-97	1.20	0.92	0.864	0.000	40.894	0.864	0.000	40.886	0.000	0.835	0.000	1.39	30.93	-4887.74	-463.90
68	21-Jun-97	1.20	0.88	0.827	0.000	41.720	0.827	0.000	41.713	0.000	7.295	0.000	1.39	41.29	-343.99	-32.65
69	22-Jun-97	1.20	1.00	0.939	0.000	42.659	0.939	0.000	42.651	0.000	6.356	0.000	1.51	39.79	-430.25	-40.84
70	23-Jun-97	1.20	1.00	0.939	0.000	43.598	0.939	0.000	43.590	0.000	5.417	0.000	1.51	38.28	-548.77	-52.08
71	24-Jun-97	1.20	1.00	0.939	0.000	44.537	0.939	0.000	44.529	0.000	4.478	0.000	1.51	36.78	-722.45	-68.57
72	25-Jun-97	1.20	1.00	0.939	0.000	45.475	0.939	0.000	45.468	0.000	3.540	0.000	1.51	35.27	-998.24	-94.74
73	26-Jun-97	1.15	1.00	0.897	0.000	46.373	0.897	0.000	46.365	0.000	2.642	0.000	1.03	34.24	-1296.82	-123.08
74	27-Jun-97	1.09	0.97	0.835	0.000	47.207	0.835	0.000	47.200	0.000	1.808	0.000	1.47	32.77	-2061.47	-195.65
75	28-Jun-97	1.04	0.93	0.760	0.000	47.968	0.760	0.000	47.960	0.000	1.047	0.000	1.34	31.44	-3676.52	-348.94
76	29-Jun-97	0.99	0.89	0.692	0.000	48.660	0.692	0.000	48.652	0.000	0.355	0.000	1.22	30.22	-8175.76	-775.96
77	30-Jun-97	0.94	0.86	0.630	0.000	49.290	0.630	0.000	49.282	0.000	6.649	0.000	1.22	41.29	-343.99	-32.65
78	1-Jul-97	0.88	1.00	0.691	0.000	49.981	0.691	0.000	49.973	0.000	5.958	0.000	1.22	40.08	-411.63	-39.07
79	2-Jul-97	0.83	1.00	0.645	0.000	50.626	0.645	0.000	50.618	0.000	5.313	0.000	1.13	38.94	-491.67	-46.66
80	3-Jul-97	0.78	1.00	0.604	0.000	51.230	0.604	0.000	51.222	0.000	4.709	0.000	1.06	37.88	-588.41	-55.85
81	4-Jul-97	0.73	1.00	0.563	0.000	51.793	0.563	0.000	51.785	0.000	4.146	0.000	0.99	36.89	-706.68	-67.07
82	5-Jul-97	0.67	1.00	0.522	0.000	52.315	0.522	0.000	52.307	0.000	3.624	0.000	0.92	35.97	-852.54	-80.91
83	6-Jul-97	0.62	1.00	0.481	0.000	52.796	0.481	0.000	52.788	0.000	3.143	0.000	0.85	35.12	-1033.61	-98.10
84	7-Jul-97	0.57	1.00	0.440	0.000	53.236	0.440	0.000	53.228	0.000	2.703	0.000	0.77	34.35	-1259.24	-119.51
85	8-Jul-97	0.51	0.98	0.390	0.000	53.626	0.390	0.000	53.618	0.000	2.313	0.000	0.69	33.66	-1533.36	-145.53
86	9-Jul-97	0.46	0.96	0.343	0.000	53.969	0.343	0.000	53.961	0.000	1.970	0.000	0.60	33.06	-1863.33	-176.85
87	10-Jul-97	0.41	0.94	0.298	0.000	54.268	0.298	0.000	54.260	0.000	1.672	0.000	0.52	32.53	-2254.31	-213.96
88	11-Jul-97	0.36	0.93	0.256	0.000	54.523	0.044	0.000	54.303	0.000	1.628	0.000	0.08	32.46	-2322.66	-220.44
89	12-Jul-97	0.30	0.92	0.217	0.000	54.740	0.217	0.000	54.521	0.000	1.411	0.000	0.38	32.08	-2717.44	-257.91
90	13-Jul-97	0.25	0.91	0.177	0.000	54.918	0.177	0.000	54.698	0.000	1.234	0.000	0.31	31.76	-3126.83	-296.77
91	14-Jul-97	0.25	0.90	0.176	0.000	55.093	0.176	0.000	54.873	0.000	1.058	0.000	-103.66	31.76	-3126.83	-296.77

92	15-Jul-97	0.25	0.90	0.176	0.000	55.269	0.176	0.000	55.049	0.000	0.883	0.000	-86.11	31.76	-3126.83	-296.77
93	16-Jul-97	0.25	0.90	0.176	0.000	55.444	0.176	0.000	55.224	0.000	0.707	0.000	-68.55	31.76	-3126.83	-296.77
94	17-Jul-97	0.25	0.90	0.176	0.000	55.620	0.176	0.000	55.400	0.000	0.532	0.000	-51.00	31.76	-3126.83	-296.77
95	18-Jul-97	0.25	0.90	0.176	0.000	55.795	0.176	0.000	55.575	0.000	0.356	0.000	-33.45	31.76	-3126.83	-296.77
96	19-Jul-97	0.25	0.90	0.176	0.000	55.971	0.176	0.000	55.751	0.000	0.181	0.000	-15.90	31.76	-3126.83	-296.77
97	20-Jul-97	0.25	0.90	0.176	0.000	56.147	0.176	0.000	55.926	0.000	0.005	0.000	1.65	31.76	-3126.83	-296.77
98	21-Jul-97	0.25	0.90	0.176	0.000	56.322	0.176	0.000	56.102	0.000	-0.170	0.000	19.20	41.29	-343.99	-32.65
99	22-Jul-97	0.25	1.00	0.194	0.000	56.516	0.194	0.000	56.296	0.000	0.000	0.000	19.20	41.29	-343.99	-32.65
100	23-Jul-97	0.25	1.00	0.194	0.000	56.710	0.194	0.000	56.490	0.000	0.000	0.000	19.20	41.29	-343.99	-32.65
101	24-Jul-97	0.25	1.00	0.194	0.000	56.904	0.194	0.000	56.684	0.000	0.000	0.000	19.20	41.29	-343.99	-32.65
102	25-Jul-97	0.25	1.00	0.194	0.000	57.099	0.194	0.000	56.878	0.000	0.000	0.000	19.20	41.29	-343.99	-32.65
103	26-Jul-97	0.25	1.00	0.194	0.000	57.293	0.194	0.000	57.072	0.000	0.000	0.000	19.20	41.29	-343.99	-32.65
104	27-Jul-97	0.25	1.00	0.194	0.000	57.487	0.194	0.000	57.267	0.000	0.000	0.000	19.20	41.29	-343.99	-32.65
105	28-Jul-97	0.25	1.00	0.194	0.000	57.681	0.194	0.000	57.461	0.000	0.000	0.000	19.20	41.29	-343.99	-32.65
106	29-Jul-97	0.25	1.00	0.194	0.000	57.875	0.194	0.000	57.655	0.000	0.000	0.000	19.20	41.29	-343.99	-32.65
107	30-Jul-97	0.25	1.00	0.194	0.000	58.069	0.194	0.000	57.849	0.000	0.000	0.000	19.20	41.29	-343.99	-32.65
108	31-Jul-97	0.25	1.00	0.194	0.000	58.263	0.194	0.000	58.043	0.000	0.000	0.000	19.20	41.29	-343.99	-32.65
109	1-Ago-97	0.25	1.00	0.194	0.000	58.457	0.194	0.000	58.237	0.000	0.000	0.000	19.20	41.29	-343.99	-32.65
110	2-Ago-97	0.25	1.00	0.189	0.000	58.646	0.189	0.000	58.426	0.000	0.000	0.000	19.20	41.29	-343.99	-32.65
111	3-Ago-97	0.25	1.00	0.189	0.000	58.835	0.189	0.000	58.615	0.000	0.000	0.000	19.20	41.29	-343.99	-32.65
112	4-Ago-97	0.25	1.00	0.189	0.000	59.024	0.189	0.000	58.804	0.000	0.000	0.000	19.20	41.29	-343.99	-32.65
113	5-Ago-97	0.25	1.00	0.189	0.000	59.213	0.189	0.000	58.993	0.000	0.000	0.000	19.20	41.29	-343.99	-32.65
114	6-Ago-97	0.25	1.00	0.189	0.000	59.402	0.189	0.000	59.182	0.000	0.000	0.000	19.20	41.29	-343.99	-32.65
115	7-Ago-97	0.25	1.00	0.189	0.000	59.592	0.189	0.000	59.371	0.000	0.000	0.000	19.20	41.29	-343.99	-32.65
116	8-Ago-97	0.25	1.00	0.189	0.000	59.781	0.189	0.000	59.560	0.000	0.000	0.000	19.20	41.29	-343.99	-32.65
117	9-Ago-97	0.25	1.00	0.189	0.000	59.970	0.189	0.000	59.749	0.000	0.000	0.000	19.20	41.29	-343.99	-32.65
118	10-Ago-97	0.25	1.00	0.189	0.000	60.159	0.189	0.000	59.938	0.000	0.000	0.000	19.20	41.29	-343.99	-32.65
119	11-Ago-97	0.25	1.00	0.189	0.000	60.348	0.189	0.000	60.127	0.000	0.000	0.000	19.20	41.29	-343.99	-32.65
120	12-Ago-97	0.25	1.00	0.189	0.000	60.537	0.189	0.000	60.316	0.000	0.000	0.000	19.20	41.29	-343.99	-32.65
121	13-Ago-97	0.25	1.00	0.189	0.000	60.726	0.189	0.000	60.505	0.000	0.000	0.000	19.20	41.29	-343.99	-32.65
122	14-Ago-97	0.25	1.00	0.189	0.000	60.915	0.189	0.000	60.694	0.000	0.000	0.000	19.20	41.29	-343.99	-32.65
123	15-Ago-97	0.25	1.00	0.189	0.000	61.104	0.189	0.000	60.883	0.000	0.000	0.000	19.20	41.29	-343.99	-32.65
124	16-Ago-97	0.25	1.00	0.189	0.000	61.293	0.189	0.000	61.072	0.000	0.000	0.000	19.20	41.29	-343.99	-32.65
125	17-Ago-97	0.25	1.00	0.189	0.000	61.482	0.189	0.000	61.261	0.000	0.000	0.000	19.20	41.29	-343.99	-32.65
126	18-Ago-97	0.25	1.00	0.189	0.000	61.671	0.189	0.000	61.450	0.000	0.000	0.000	19.20	41.29	-343.99	-32.65
127	19-Ago-97	0.25	1.00	0.189	0.000	61.860	0.189	0.000	61.639	0.000	0.000	0.000	19.20	41.29	-343.99	-32.65
128	20-Ago-97	0.25	1.00	0.189	0.000	62.049	0.189	0.000	61.829	0.000	0.000	0.000	19.20	41.29	-343.99	-32.65
129	21-Ago-97	0.25	1.00	0.189	0.000	62.238	0.189	0.000	62.018	0.000	0.000	0.000	19.20	41.29	-343.99	-32.65
130	22-Ago-97	0.25	1.00	0.189	0.000	62.427	0.189	0.000	62.207	0.000	0.000	0.000	19.20	41.29	-343.99	-32.65
131	23-Ago-97	0.25	1.00	0.189	0.000	62.616	0.189	0.000	62.396	0.000	0.000	0.000	19.20	41.29	-343.99	-32.65
132	24-Ago-97	0.25	1.00	0.189	0.000	62.805	0.189	0.000	62.585	0.000	0.000	0.000	19.20	41.29	-343.99	-32.65
133	25-Ago-97	0.25	1.00	0.189	0.000	62.994	0.189	0.000	62.774	0.000	0.000	0.000	19.20	41.29	-343.99	-32.65
134	26-Ago-97	0.25	1.00	0.189	0.000	63.183	0.189	0.000	62.963	0.000	0.000	0.000	19.20	41.29	-343.99	-32.65
135	27-Ago-97	0.25	1.00	0.189	0.000	63.372	0.189	0.000	63.152	0.000	0.000	0.000	19.20	41.29	-343.99	-32.65
136	28-Ago-97	0.25	1.00	0.189	0.000	63.561	0.189	0.000	63.341	0.000	0.000	0.000	19.20	41.29	-343.99	-32.65
137	29-Ago-97	0.25	1.00	0.189	0.000	63.750	0.189	0.000	63.530	0.000	0.000	0.000	19.20	41.29	-343.99	-32.65
138	30-Ago-97	0.25	1.00	0.189	0.000	63.939	0.189	0.000	63.719	0.000	0.000	0.000	19.20	41.29	-343.99	-32.65

139	31-Ago-97	0.25	1.00	0.189	0.000	64.128	0.189	0.000	63.908	0.000	0.000	0.000	19.20	41.29	-343.99	-32.65
140	1-Sep-97	0.25	1.00	0.000	0.184	64.312	0.000	0.184	64.092	0.000	0.000	0.000	19.20	41.29	-343.99	-32.65
141	2-Sep-97	0.25	1.00	0.000	0.184	64.496	0.000	0.184	64.275	0.000	0.000	0.000	19.20	41.29	-343.99	-32.65
142	3-Sep-97	0.25	1.00	0.000	0.184	64.680	0.000	0.184	64.459	0.000	0.000	0.000	19.20	41.29	-343.99	-32.65
143	4-Sep-97	0.25	1.00	0.000	0.184	64.864	0.000	0.184	64.643	0.000	0.000	0.000	19.20	41.29	-343.99	-32.65
144	5-Sep-97	0.25	1.00	0.000	0.184	65.048	0.000	0.184	64.827	0.000	0.000	0.000	19.20	41.29	-343.99	-32.65
145	6-Sep-97	0.25	1.00	0.000	0.184	65.231	0.000	0.184	65.011	0.000	0.000	0.000	19.20	41.29	-343.99	-32.65
146	7-Sep-97	0.25	1.00	0.000	0.184	65.415	0.000	0.184	65.195	0.000	0.000	0.000	19.20	41.29	-343.99	-32.65
147	8-Sep-97	0.25	1.00	0.000	0.184	65.599	0.000	0.184	65.379	0.000	0.000	0.000	19.20	41.29	-343.99	-32.65
148	9-Sep-97	0.25	1.00	0.000	0.184	65.783	0.000	0.184	65.563	0.000	0.000	0.000	19.20	41.29	-343.99	-32.65
149	10-Sep-97	0.25	1.00	0.000	0.184	65.967	0.000	0.184	65.747	0.000	0.000	0.000	19.20	41.29	-343.99	-32.65
150	11-Sep-97	0.25	1.00	0.000	0.184	66.151	0.000	0.184	65.931	0.000	0.000	0.000	19.20	41.29	-343.99	-32.65
151	12-Sep-97	0.25	1.00	0.000	0.184	66.335	0.000	0.184	66.114	0.000	0.000	0.000	19.20	41.29	-343.99	-32.65
152	13-Sep-97	0.25	1.00	0.000	0.184	66.519	0.000	0.184	66.298	0.000	0.000	0.000	19.20	41.29	-343.99	-32.65
153	14-Sep-97	0.25	1.00	0.000	0.184	66.703	0.000	0.184	66.482	0.000	0.000	0.000	19.20	41.29	-343.99	-32.65
154	15-Sep-97	0.25	1.00	0.000	0.184	66.887	0.000	0.184	66.666	0.000	0.000	0.000	19.20	41.29	-343.99	-32.65
155	16-Sep-97	0.25	1.00	0.000	0.184	67.070	0.000	0.184	66.850	0.000	0.000	0.000	19.20	41.29	-343.99	-32.65
156	17-Sep-97	0.25	1.00	0.000	0.184	67.254	0.000	0.184	67.034	0.000	0.000	0.000	19.20	41.29	-343.99	-32.65
157	18-Sep-97	0.25	1.00	0.000	0.184	67.438	0.000	0.184	67.218	0.000	0.000	0.000	19.20	41.29	-343.99	-32.65
158	19-Sep-97	0.25	1.00	0.000	0.184	67.622	0.000	0.184	67.402	0.000	0.000	0.000	19.20	41.29	-343.99	-32.65
159	20-Sep-97	0.25	1.00	0.000	0.184	67.806	0.000	0.184	67.586	0.000	0.000	0.000	19.20	41.29	-343.99	-32.65
160	21-Sep-97	0.25	1.00	0.000	0.184	67.990	0.000	0.184	67.769	0.000	0.000	0.000	19.20	41.29	-343.99	-32.65
161	22-Sep-97	0.25	1.00	0.000	0.184	68.174	0.000	0.184	67.953	0.000	0.000	0.000	19.20	41.29	-343.99	-32.65
162	23-Sep-97	0.25	1.00	0.000	0.184	68.358	0.000	0.184	68.137	0.000	0.000	0.000	19.20	41.29	-343.99	-32.65
163	24-Sep-97	0.25	1.00	0.000	0.184	68.542	0.000	0.184	68.321	0.000	0.000	0.000	19.20	41.29	-343.99	-32.65
164	25-Sep-97	0.25	1.00	0.000	0.184	68.725	0.000	0.184	68.505	0.000	0.000	0.000	19.20	41.29	-343.99	-32.65
165	26-Sep-97	0.25	1.00	0.000	0.184	68.909	0.000	0.184	68.689	0.000	0.000	0.000	19.20	41.29	-343.99	-32.65
166	27-Sep-97	0.25	1.00	0.000	0.184	69.093	0.000	0.184	68.873	0.000	0.000	0.000	19.20	41.29	-343.99	-32.65
167	28-Sep-97	0.25	1.00	0.000	0.184	69.277	0.000	0.184	69.057	0.000	0.000	0.000	19.20	41.29	-343.99	-32.65
168	29-Sep-97	0.25	1.00	0.000	0.184	69.461	0.000	0.184	69.241	0.000	0.000	0.000	19.20	41.29	-343.99	-32.65
169	30-Sep-97	0.25	1.00	0.000	0.184	69.645	0.000	0.184	69.424	0.000	0.000	0.000	19.20	41.29	-343.99	-32.65
170	1-Oct-97	0.25	1.00	0.000	0.184	69.829	0.000	0.184	69.608	0.000	0.000	0.000	19.20	41.29	-343.99	-32.65
171	2-Oct-97	0.25	1.00	0.000	0.149	69.978	0.000	0.149	69.758	0.000	0.000	0.000	19.20	41.29	-343.99	-32.65
172	3-Oct-97	0.25	1.00	0.000	0.149	70.128	0.000	0.149	69.907	0.000	0.000	0.000	19.20	41.29	-343.99	-32.65
173	4-Oct-97	0.25	1.00	0.000	0.149	70.277	0.000	0.149	70.056	0.000	0.000	0.000	19.20	41.29	-343.99	-32.65
174	5-Oct-97	0.25	1.00	0.000	0.149	70.426	0.000	0.149	70.206	0.000	0.000	0.000	19.20	41.29	-343.99	-32.65
175	6-Oct-97	0.25	1.00	0.000	0.149	70.576	0.000	0.149	70.355	0.000	0.000	0.000	19.20	41.29	-343.99	-32.65
176	7-Oct-97	0.25	1.00	0.000	0.149	70.725	0.000	0.149	70.504	0.000	0.000	0.000	19.20	41.29	-343.99	-32.65
177	8-Oct-97	0.25	1.00	0.000	0.149	70.874	0.000	0.149	70.654	0.000	0.000	0.000	19.20	41.29	-343.99	-32.65
178	9-Oct-97	0.25	1.00	0.000	0.149	71.024	0.000	0.149	70.803	0.000	0.000	0.000	19.20	41.29	-343.99	-32.65
179	10-Oct-97	0.25	1.00	0.000	0.149	71.173	0.000	0.149	70.953	0.000	0.000	0.000	19.20	41.29	-343.99	-32.65
180	11-Oct-97	0.25	1.00	0.000	0.149	71.322	0.000	0.149	71.102	0.000	0.000	0.000	19.20	41.29	-343.99	-32.65
181	12-Oct-97	0.25	1.00	0.000	0.149	71.472	0.000	0.149	71.251	0.000	0.000	0.000	19.20	41.29	-343.99	-32.65
182	13-Oct-97	0.25	1.00	0.000	0.149	71.621	0.000	0.149	71.401	0.000	0.000	0.000	19.20	41.29	-343.99	-32.65
183	14-Oct-97	0.25	1.00	0.000	0.149	71.771	0.000	0.149	71.550	0.000	0.000	0.000	19.20	41.29	-343.99	-32.65
184	15-Oct-97	0.25	1.00	0.000	0.149	71.920	0.000	0.149	71.699	0.000	0.000	0.000	19.20	41.29	-343.99	-32.65
185	16-Oct-97	0.25	1.00	0.000	0.149	72.069	0.000	0.149	71.849	0.000	0.000	0.000	19.20	41.29	-343.99	-32.65

Anexo 3.- Funciones de Producción

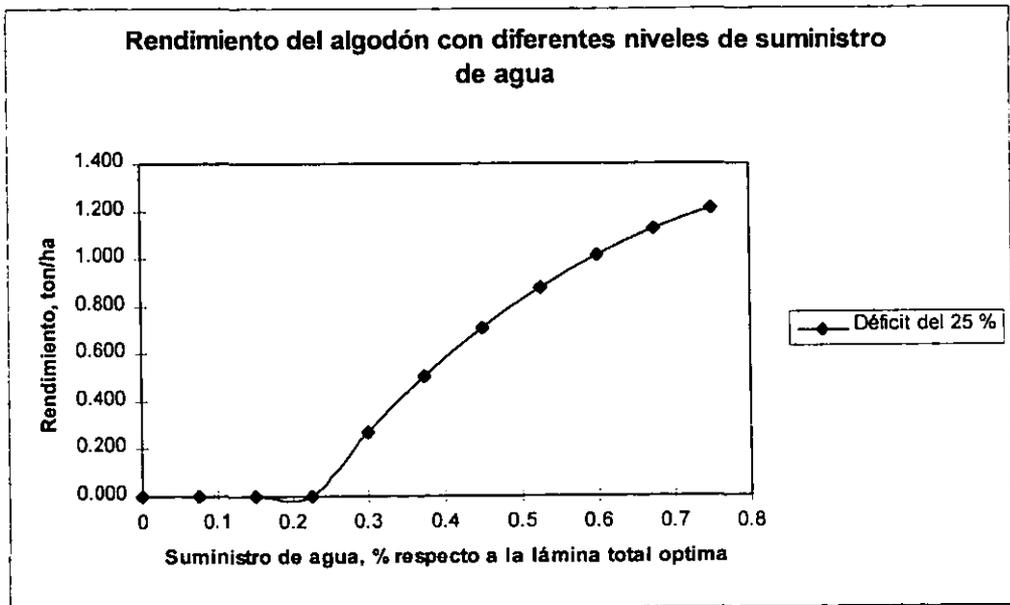


Cultivo	Algodón
Superficie cultivada, ha	813.0
Porcentaje de la superficie con respecto al total del Módulo o Unidad de Riego, %	25.8
Fecha de siembra, día/mes/año	20/03/97
Duración del ciclo vegetativo, días	180
Fecha de cosecha, día/mes/año	16/09/97
Clasificación del cultivo para realizar la simulación de su crecimiento	A

Coefficiente basal del Cultivo				
Kcp	Kcm	Fs1	Fs2	Fs3
1.25	0.70	0.15	0.43	0.75
Fin de la estación de crecimiento, con respecto a la fecha de siembra, días				
Inicial	Desarrollo del follaje	Media	Maduración	
27	78	135	180	
Duración de la estación de crecimiento, días				
Inicial	Desarrollo del follaje	Media	Maduración	
27	51	57	45	
Evapotranspiración potencial acumulada hasta el final de la estación de crecimiento, cm				
Inicial	Desarrollo del follaje	Media	Maduración	
4.892	39.491	96.279	129.893	
Rango de lámina acumulada reportado en bibliografía, cm			70 - 130	
Lámina de agua requerida en la estación de crecimiento, cm				
Inicial	Desarrollo del follaje	Media	Maduración	
4.892	34.599	56.788	33.614	
Tensión de humedad en el suelo para que de inicio la disminución del rendimiento del cultivo (TSIDRC), atm			3.0	

Lámina de agua acumulada hasta el final de la estación de crecimiento, considerando abastecimiento total de agua para alcanzar el nivel de la TSIDRC, cm					
Inicial		Desarrollo del follaje		Media	Maduración
4.861		39.311		96.099	129.714
Número de Riegos distribuidos de manera homogénea desde el inicio hasta el final de la estación de crecimiento					
Inicial		Desarrollo del follaje		Media	Maduración
1		3		5	3
Profundidad humedecida del suelo con la lámina de agua aplicada en cada riego, cm					
Inicial		Desarrollo del follaje		Media	Maduración
41.82		98.581		97.082	95.770
Factor de peso para calcular la lámina de agua promedio, que fue aplicada en el Módulo o Unidad de Riego, en el ciclo agrícola					0.258
Lámina de agua ponderada, que corresponde para la superficie sembrada del cultivo, cm					33.503
Lámina de agua disponible para todo el ciclo vegetativo, cm					97.420
Lámina de agua disponible para la estación de crecimiento, cm					
Inicial		Desarrollo del follaje		Media	Maduración
3.669		25.949		42.591	25.211
Lámina de agua ponderada que corresponde a la superficie sembrada del cultivo, considerando la disponibilidad de agua, cm					25.130
Lámina de agua acumulada disponible hasta el final de la estación de desarrollo del follaje, cm					29.620
Coefficientes de ingreso a la función de producción para suministro de agua del 100%					
C_1	C_2	X_1	X_2	X_3	
1.000	1.000	0.696	1.000	0.696	
Producción máxima con 100 % de suministro de agua, ton/ha					1.7
Coefficientes de ingreso a la función de producción para suministro de agua del 75%					

C_1	C_2	$X_1=1*LATD$	$X_1=0.9*LATD$	$X_1=0.8*LATD$
0.750	1.000	0.522	0.447	0.372
$X_1=0.7*LATD$	$X_1=0.6*LATD$	$X_1=0.5*LATD$	$X_1=0.4*LATD$	$X_1=0.3*LATD$
0.297	0.222	0.147	0.072	No aplica
$X_1=0.2*LATD$	$X_1=0.1*LATD$	$X_1=0*LATD$	X_2	X_3
No aplica	No aplica	No aplica	1.000	0.772
Rendimiento del cultivo con diferentes porcentajes de suministro de agua, referidos a la lámina disponible (LD) para el ciclo vegetativo, ton/ha				
100 % LD	90 % LD	80 % LD	70 % LD	60 % LD
1.212	1.125	1.013	0.874	0.705
50 % LD	40 % LD	30 % LD	20 % LD	10 % LD
0.504	0.266	0.000	0.000	0.000

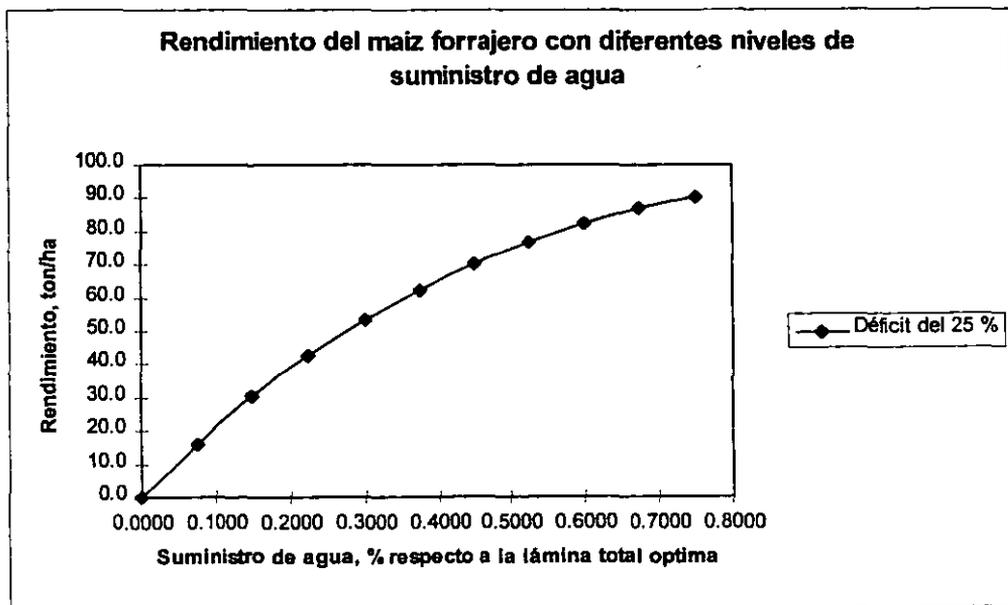


Cultivo	Maiz Forrajero
Superficie cultivada, ha	500
Porcentaje de la superficie con respecto al total del Módulo o Unidad de Riego, %	15.9
Fecha de siembra, día/mes/año	15/03/97
Duración del ciclo vegetativo, días	90
Fecha de cosecha, día/mes/año	13/06/97
Clasificación del cultivo para realizar la simulación de su crecimiento	B

Coefficiente basal del Cultivo				
Kcp	Kcm	Fs1	Fs2	Fs3
1.20	1.10	0.22	0.56	0.89
Fin de la estación de crecimiento, con respecto a la fecha de siembra, días				
Inicial	Desarrollo del follaje	Media	Maduración	
20	51	80	90	
Duración de la estación de crecimiento, días				
Inicial	Desarrollo del follaje	Media	Maduración	
20	31	29	10	
Evapotranspiración potencial acumulada hasta el final de la estación de crecimiento, cm				
Inicial	Desarrollo del follaje	Media	Maduración	
3.365	22.283	55.205	63.581	
Rango de lámina acumulada reportado en bibliografía, cm			50 - 80	
Lámina de agua requerida en la estación de crecimiento, cm				
Inicial	Desarrollo del follaje	Media	Maduración	
3.365	18.918	32.922	8.376	
Tensión de humedad en el suelo para que de inicio la disminución del rendimiento del cultivo (TSIDRC), atm			1.50	

Lámina de agua acumulada hasta el final de la estación de crecimiento, considerando abastecimiento total de agua para alcanzar el nivel de la TSIDRC, cm					
Inicial		Desarrollo del follaje		Media	Maduración
3.305		21.993		53.943	63.291
Número de Riegos distribuidos de manera homogénea desde el inicio hasta el final de la estación de crecimiento					
Inicial		Desarrollo del follaje		Media	Maduración
1		3		5	2
Profundidad humedecida del suelo con la lámina de agua aplicada en cada riego, cm					
Inicial		Desarrollo del follaje		Media	Maduración
28.760		53.902		56.280	35.798
Factor de peso para calcular la lámina de agua promedio, que fue aplicada en el Módulo o Unidad de Riego, en el ciclo agrícola					0.159
Lámina de agua ponderada, que corresponde para la superficie sembrada del cultivo, cm					10.086
Lámina de agua disponible para todo el ciclo vegetativo, cm					47.686
Lámina de agua disponible para la estación de crecimiento, cm					
Inicial		Desarrollo del follaje		Media	Maduración
2.524		14.189		24.692	6.282
Lámina de agua ponderada que corresponde a la superficie sembrada del cultivo, considerando la disponibilidad de agua, cm					7.560
Lámina de agua acumulada disponible hasta el final de la estación de desarrollo del follaje, cm					16.71
Coefficientes de ingreso a la función de producción para suministro de agua del 100%					
C_1	C_2	X_1	X_2	X_3	
1.000	1.000	1.000	1.000	0.000	
Producción máxima con 100 % de suministro de agua, ton/ha				120.0	
Coefficientes de ingreso a la función de producción para suministro de agua del 75%					

C_1	C_2	$X_1=1*LATD$	$X_1=0.9*LATD$	$X_1=0.8*LATD$
0.750	1.000	0.750	0.675	0.600
$X_1=0.7*LATD$	$X_1=0.6*LATD$	$X_1=0.5*LATD$	$X_1=0.4*LATD$	$X_1=0.3*LATD$
0.525	0.450	0.375	0.300	0.225
$X_1=0.2*LATD$	$X_1=0.1*LATD$	$X_1=0*LATD$	X_2	X_3
0.150	0.075	0.000	1.000	0.000
Rendimiento del cultivo con diferentes porcentajes de suministro de agua, referidos a la lámina disponible (LD) para el ciclo vegetativo, ton/ha				
100 % LD	90 % LD	80 % LD	70 % LD	60 % LD
90.400	86.901	82.409	76.864	70.192
50 % LD	40 % LD	30 % LD	20 % LD	10 % LD
62.303	53.089	42.420	30.141	16.073



Anexo 4.- Análisis de optimación

Cálculo de los niveles óptimos de suministro de agua

Cultivo: Algodón

	Parámetros		
Función de Producción	a₁	b₁	c₁
y (w), w en cm	-5,670.40	162.87	-0.64
Función de Costos	a₂	b₂	
c (w), w en cm	8,819.91	13.74	
Precio del cultivo, \$/kg	5		

Productos en el proceso

Pca1-a2	-37,171.91
*c1	23,790.02
*Pc	118,950.11
*4	475,800.45
Z22-	13,234.18
raiz	115.04
(-z+raiz)	91.29

Wm mm	Ww mm	Z1	Wel mm	Z2	Wew mm	Wl mm
1,272.42	1,077.79	13.74	1,229.48	699.31	912.92	1,250.95

i(w) \$/ha						
12,889.62	11,944.79		12,889.62		9,247.89	12,904.37

Cultivo: Algodón

Beneficio (Parábola)

c1 b1 a1
-3.2048 814.33 -28352

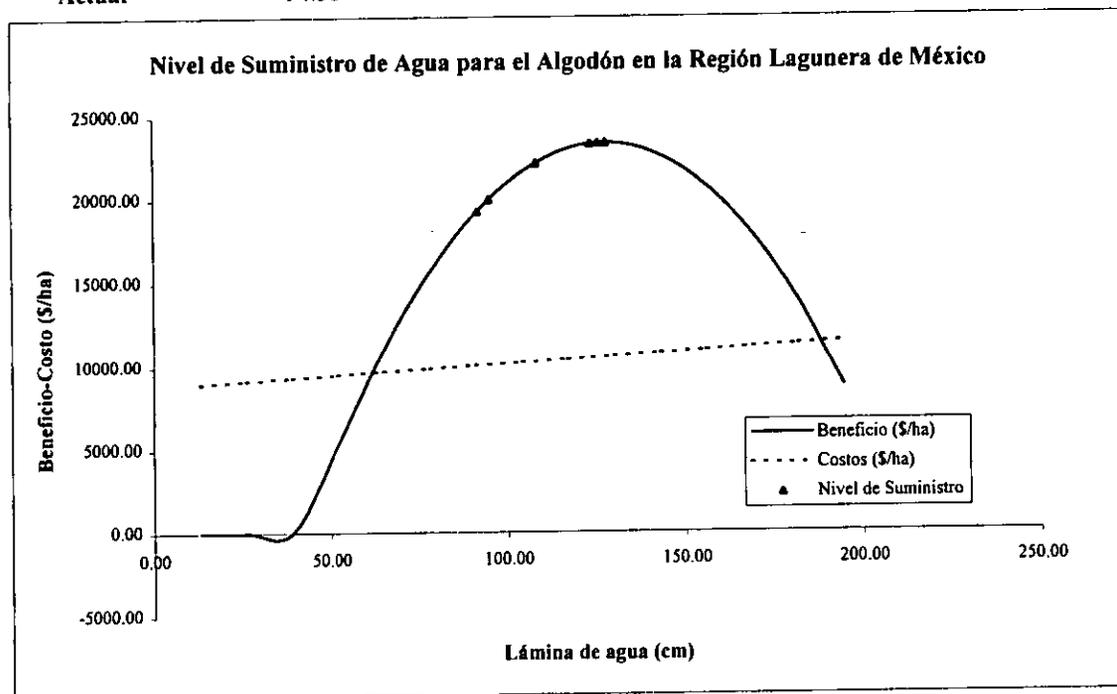
Costos (Recta)

a2 b2
8819.91 13.74

Lámina de Agua (cm) 129.71

% de Lam.	Lam. (cm)	Pc*y(w)	c(w)
0.10	12.97	0.00	8998.13
0.20	25.94	0.00	9176.35
0.30	38.91	0.00	9354.57
0.40	51.88	5271.54	9532.80
0.50	64.86	10981.44	9711.02
0.60	77.83	15612.94	9889.24
0.70	90.80	19166.04	10067.46
0.80	103.77	21640.76	10245.68
0.90	116.74	23037.07	10423.90
1.00	129.71	23355.00	10602.13
1.10	142.68	22594.52	10780.35
1.20	155.65	20755.66	10958.57
1.30	168.62	17838.39	11136.79
1.40	181.59	13842.74	11315.01
1.50	194.57	8768.68	11493.23

Nivel	Lámina (cm)	Beneficio (\$/ha)
Wm	127.24	23377.58
Wel	122.95	23323.87
Wew	91.29	19279.82
WI	125.10	23365.53
Ww	107.78	22187.84
Actual	94.58	19999.19



Cálculo de los niveles óptimos de suministro de agua

Cultivo: Maíz Forrajero

Función de Producción	Parámetros		
	a ₁	b ₁	c ₁
y (w), w en cm	4,355.60	1,799.30	-14.37
Función de Costos	a ₂	b ₂	
c (w), w en cm	3,695.10	18.24	
Precio del cultivo, \$/kg	0.15		

Productos en el proceso

Pca1-a2	-3,041.76
*c1	43,716.17
*Pc	6,557.43
*4	26,229.70
Z22-	7,457.20
raiz	86.36
(-z+raiz)	22.54

Wm mm	Ww mm	Z1	Wel mm	Z2	Wew mm	Wl mm
625.97	375.63	18.24	541.37	183.54	225.40	583.67

i(w) \$/ha						
4,263.83	3,369.35		4,263.83		1,535.34	4,302.41

Cultivo: Maíz Forrajero

Beneficio (Parábola)

c1 b1 a1
-2.1558 269.89 653.34

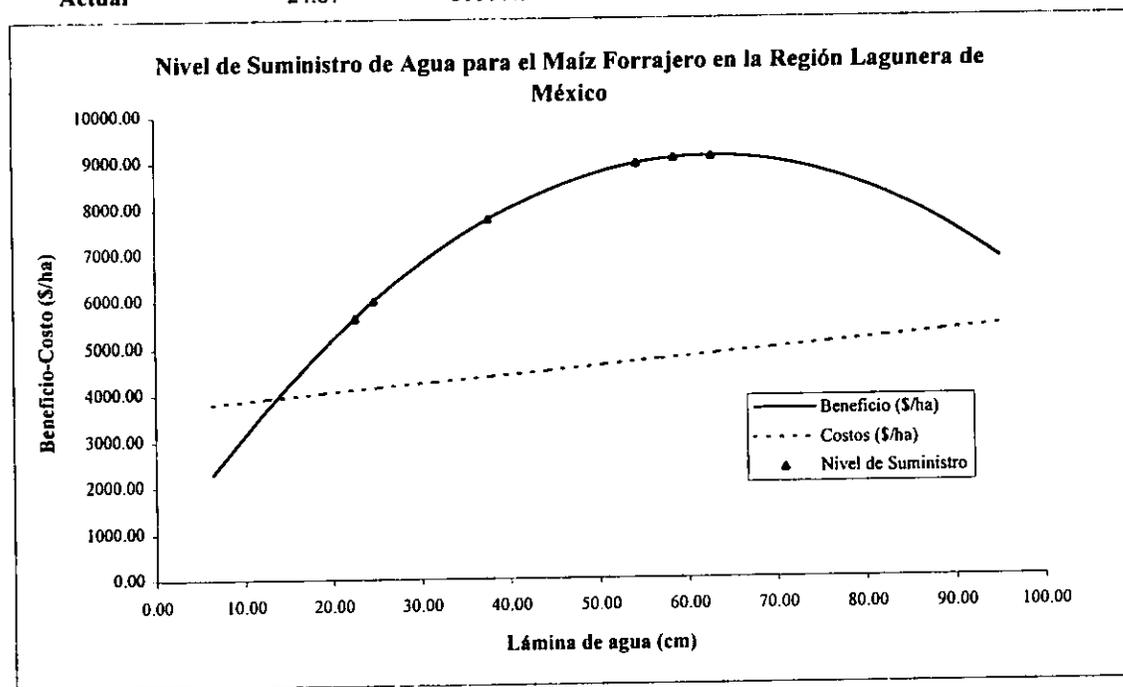
Costos (Recta)

a2 b2
3695.1 18.24

Lámina de Agua (cm) 63.29

% de Lam.	Lam. (cm)	Pc*y(w)	c(w)
0.10	6.33	2275.12	3810.54
0.20	12.66	3724.19	3925.98
0.30	18.99	5000.56	4041.42
0.40	25.32	6104.22	4156.86
0.50	31.65	7035.18	4272.30
0.60	37.97	7793.43	4387.75
0.70	44.30	8378.97	4503.19
0.80	50.63	8791.80	4618.63
0.90	56.96	9031.93	4734.07
1.00	63.29	9099.35	4849.51
1.10	69.62	8994.07	4964.95
1.20	75.95	8716.08	5080.39
1.30	82.28	8265.38	5195.83
1.40	88.61	7641.98	5311.27
1.50	94.94	6845.87	5426.71

Nivel	Lámina (cm)	Beneficio (\$/ha)
Wm	62.60	9100.39
Wel	54.14	8946.23
Wew	22.54	5641.40
WI	58.37	9061.89
Ww	37.56	7749.11
Actual	24.67	5999.49



El agua según las vivencias de un Mexicano

Se expone una breve semblanza de las experiencias que el autor ha tenido con el maravilloso mundo del agua, y aunque por algunos momentos los relatos parecieran no tener nada que ver con el agua, se invita al lector al análisis de las frases para encontrar su verdadero significado.

Destrucción y muerte

Nací y viví hasta los catorce años de edad en la ciudad de Misantla en el Estado de Veracruz, allá, por la orilla de la ciudad, se aloja el cauce del río Misantla, éste nace en la sierra de Chiconquiaco y Naolinco ubicadas al sur de la ciudad. Geomorfológicamente es posible resumir las características hidrográficas de la cuenca de aportación de escurrimiento hacia el cauce principal de este río, diciendo que la cota más alta de la cuenca se ubica en los 1,800 m.s.n.m., que la cota media en la ciudad de Misantla es de 400 m.s.n.m. y que la longitud del cauce principal (río Misantla) desde el punto más alto, hasta la ciudad de Misantla es de aproximadamente 150 km. Sobre el cauce del río no existe ninguna obra de control de avenidas, por lo que el tiempo pico de estas es corto.

En aquellos años, uno de mis pasatiempos favoritos era la pesca con arpón y varilla, esto prefería hacerlo durante la época de lluvias (junio – octubre) porque la corriente arrastra los peces desde las partes altas hacia las partes bajas de la cuenca.

Empíricamente la gente del pueblo sabe que el "Golpe" (nombre local que se le da a una avenida) baja de la sierra cuando el cielo en esa área de influencia está "encapotado" (nubes grises) y cuando se observan manadas de pájaros llamados "Boberos" que vuelan en círculos hacia las partes bajas de la cuenca.

Yo había escuchado hablar del "Golpe" en comentarios como estos:

- En la escuela: Héctor Fisher no asistió hoy porque pasó el Golpe y no pudo atravesar el río.
- En el periódico "La Voz del Pueblo": El Golpe se llevó a dos personas de la ranchería "Los Idolos" y tuvieron que ir a recogerlos a Nautla.
- En la Iglesia: Hay dios mío, por favor protégenos del Golpe.

Eran vacaciones de verano, mis hermanos y yo habíamos ido como de costumbre al río y estábamos pescando, de pronto, inmerso en el agua pude escuchar un sonido casi inaudible semejante al de un trueno, salí a la superficie para inspeccionar si tal sonido venía del exterior, pero afuera no se escuchaba nada, miré hacia el sur y a mucha distancia observé a los Bomberos volando en círculo, que el cielo en la sierra era gris y que había un sol esplendoroso en el área en la que nosotros estábamos pescando, me sumergí nuevamente para continuar mi actividad, y de una forma casi regular, escuchaba nuevamente cada 10 o 15 segundos ese sonido raro, esto fue durante un lapso de 1 a 2 minutos, salí nuevamente a la superficie y como otra vez en la superficie no escuchaba nada, salí del río y con temor pero sin decir la causa, sugerí a mis hermanos y amigos regresar a casa, en ese momento ellos quizás ya estaban cansados porque habíamos estado pescando por un espacio de dos horas y aceptaron mi propuesta, todos subimos a la margen izquierda del río dispuestos a regresar a casa, para esto, ya habían pasado de 5 a 7 minutos desde que habíamos decidido marcharnos y habían transcurrido otros 2 minutos sobre la margen del río, durante los que observamos lo que habíamos pescado, de forma instantánea el nivel del río que en promedio era de 1 metro en toda la sección transversal, comenzó a incrementarse rápidamente hasta alcanzar una altura de tres a cuatro metros en un tiempo de 2 minutos, la corriente arrastraba troncos y piedras, el agua era de color café rojizo (matiz que da el suelo arcilloso de la región) y los Bomberos estaban a escasos dos o tres kilómetros aguas arriba del sitio en el que nos encontrábamos.

Sin pensarlo dos veces emprendimos la retirada corriendo, y escuchábamos ese mismo trueno que se escuchaba por abajo del agua, pero ahora en la superficie. Al fin supimos lo que era, y quién era el Golpe. Si no estuviera relatando esto, quizás otros lo definirían como "Destrucción y muerte".....

Producto de la casualidad

Pablo, un amigo de la niñez cursaba el tercer año de Preparatoria y yo cursaba el tercer año de Secundaria, un día me dijo ¡Nico que te parece si presentamos examen para entrar a Chapingo, dicen que a los alumnos que son seleccionados les dan una beca para estudiar toda su carrera, yo presento examen para entrar al propedéutico y tu presentas el examen para entrar a la preparatoria, la convocatoria para el ingreso saldrá el próximo mes, y hay que ir a recogerla a Xalapa, ¿le entras o no?!

Acepté la propuesta y le pedí a mi padre que me ayudara a resolver la Guía de Estudios para presentar el examen de admisión, es importante comentar que de acuerdo con las opiniones que circulan en el pueblo, mi padre es un excelente profesor de Preparatoria y de Secundaria, por lo que tiene un prestigio casi inigualable (por lo menos en mi pueblo) en la enseñanza de matemáticas y español, él aceptó mi petición y juntos iniciamos aquella aventura.

Se llegó el día y la hora del examen, y ahí estaba Nicolás, como bala de cañón para presentar el examen de admisión, inicié el examen y de 50 aspirantes que éramos en ese grupo, no miento al decir que fui el penúltimo en entregar el examen. Fuera del salón aguardaba mi padre con esa cara de seriedad que lo caracteriza, y con tono alentador me pidió que me olvidara de lo sucedido en el examen.

Pasaron cuatro angustiosos meses y aunque aún no eran publicados los resultados del examen, muchos compañeros del grupo y algunos maestros supieron que yo me iría a estudiar a Chapingo al término de la Secundaria. La decepción llegó aquel día de mayo en el que no encontré mi nombre en el periódico donde fue publicada la relación de alumnos aceptados.

Creo que la noticia le cayó a mi padre como balde de agua fría, porque inmediatamente instruyó a mi madre para que me inscribiera en una de las preparatorias del pueblo, en una orientación vocacional que no me agradaba del todo; yo por supuesto, no tenía opción de oponerme a tal decisión.

Un mes después de que fueron publicados los resultados en el periódico, me llegó un telegrama de Chapingo diciéndome que tenía la oportunidad de ingresar, porque hubo un cierto número de alumnos que habían sido seleccionados en la primera ronda, que no se presentaron a la entrevista para ingreso a la universidad, esto quería decir, que yo era "candidato" porque estuve en el límite inferior de la lista de seleccionados, me presenté a la entrevista y fui admitido. Así comenzó mi vida independiente a los catorce años de edad en Texcoco Edo. de México.

Los tres años de preparatoria transcurrieron sin más cosas importantes que lo siguiente:

- Reprobé química el primer semestre, debido a esto, mi padre me aplicó la ley del hielo por el lapso de los dos meses que duran las vacaciones de verano, bajo esta condición, tenía que aprobar el examen extraordinario o a título, porque si no lo pasaba, me expulsaban de la escuela. Pase el examen y santo remedio "jamás he vuelto a vivir una experiencia tan desagradable".

Era el momento de decidir la carrera que tomaría, supe que me encontraba en el dilema más grande de mi vida: ¿Que rayos estoy haciendo aquí?, ¡a mí me gusta la física y las matemáticas, creo que podría ser un Ingeniero Civil, y aquí en Chapingo no hay esa carrera, solo hay carreras relacionadas con los cultivos, y a mí únicamente me gustan en el plato!. El problema era que para obligar a los alumnos que hicieron la preparatoria en Chapingo, a concluir su carrera, la escuela por su carácter Universitario, no oficializa los estudios de la preparatoria ante otras Universidades, por lo tanto, si me salía de Chapingo, perdía los tres años de la preparatoria.

Conseguí un programa de estudios de Ingeniería Civil de la UNAM, y lo comparé con los Programas de todas las carreras que Chapingo ofrecía, supe que la carrera de Irrigación tenía el 75 % de las asignaturas que consideraba el programa de estudios de Ingeniería Civil de la UNAM, esto para mí significó que Irrigación es una "Ingeniería Civil aplicada a la agricultura", por lo tanto, me inscribí, estudié ahí por un período de cuatro años y concluí la carrera en mayo de 1990, a los 21 años de edad.

La palabra Irrigación significa "Riego", y para el caso de los cultivos, el elemento regado es el agua, por lo tanto, como es de esperarse, la mayoría de los estudiantes egresados de este departamento, salen

convertidos en unos verdaderos "leones" en las áreas del conocimiento relacionadas con el agua, de esta manera se inició mi andar en la hidráulica, es decir, como un **"producto de la casualidad"**.....

Mentira piadosa

Conseguí empleo en agosto de 1990, me enviaron al Distrito de Riego 024 "Ciénega de Chapala" en Sahuayo, Michoacán, viví en un poblado llamado Jiquilpan, localizado a 5 km de Sahuayo, para que se imaginen lo bonito que está este lugar, basta con decirles que en este pueblo, la familia de nuestro gran político mexicano Cuauthémoc Cárdenas Solórzano tiene la mayor parte de sus propiedades.

Un día me dijo mi jefe, ¡Nicolás vete con la brigada topográfica y levanta el perfil de la sección transversal de un dren, busca al Comisario Ejidal para que te indique el sitio que les interesa y analiza la posibilidad hidráulica de abastecer agua a las tierras de ese ejido, en cuanto tengas el resultado dímelo, lo discutimos y damos la respuesta!.

Me fui al lugar, busque al comisario, levantamos la sección transversal e hice el análisis hidráulico para el abastecimiento, el resultado fue "Negativo", es decir, no había posibilidad de abastecer de agua desde el dren. Nunca noté que siempre al pendiente del resultado, estuvo uno de los integrantes de la brigada topográfica que había yo llevado para realizar el trabajo de campo, éste supo el momento en el que terminé el análisis hidráulico y mi conclusión, y como por arte de magia dos horas después, tenía yo al comisario ejidal frente a mí.

Como él supuestamente no conocía el resultado, me hizo esa visita para saber de los avances, se veía enojado y con un tono amenazador y acariciando el revolver que portaba en su costado derecho me dijo ¿entonces qué ingeniero?, ¿se va a poder o no?, y por si esto fuera poco, afuera de la oficina estaba su comitiva integrada por 10 o 15 gentes.

Mi respuesta fue "señor hace media hora exactamente, vinieron los del ejido contigo al suyo a reclamarnos que desde hace varios días, no les hemos abastecido el volumen de agua acordado en el contrato celebrado con ellos desde hace 5 años, ellos utilizan el agua del dren en cuestión, por lo tanto, por derecho le corresponde a ellos aprovechar el agua del canal, esto disminuirá los niveles del agua, así es que no será posible que ustedes aprovechen el agua por gravedad, porque sus tierras están por arriba del nivel de agua que se tendrá en el dren", creo que el señor no esperaba esta respuesta, ni tampoco el espiá se la imaginó, sin decir agua va, salió de mi oficina recordándome a la autora de mis días, lo cual fue lo último que me importó, ya que salí del problema por aquella **mentira piadosa**.....

La oración nunca está por demás

En diciembre de 1990 solicité una Jefatura de Departamento que me fue negada. Al respecto aún sigo pensando que uno de los argumentos que se me dieron fue estúpido "mi juventud", y el otro posiblemente razonable "mi falta de experiencia", por esto, decidí renunciar a la Comisión Nacional del Agua (CNA), no sin antes asegurar mi ingreso como trabajador al Centro de Hidrociencias del Colegio de Postgraduados (CP) de Chapingo.

Uno o dos años antes de mi ingreso al CP, había regresado de realizar el Doctorado en Francia, un señor llamado Luís Rendón Pimentel, se decía que él había desarrollado un modelo numérico para el diseño y análisis del Riego en Melgas (RIMEL), tuve la gran fortuna de que se me designara como su ayudante de investigación, en pocas palabras su "achichinle". El Dr. Luís realizaba trabajos de campo en el Distrito de Riego 085 "La Begoña" en Celaya, Guanajuato, con otras dependencias como el INIFAP, CNA, Asociaciones de Productores, etc.

Como el ayudante que lo apoyaba en estos trabajos renunció justo antes de mi ingreso, el Dr. Luís me asignó el encargo, el cual consistía en realizar las siguientes actividades de campo:

- Caracterización hidrodinámica de los suelos de la zona de estudio
- Trabajos topográficos para la nivelación de tierras

- Trazo de canales y melgas
- Control del riego a nivel parcelario (aforo de caudales)

y trabajos de gabinete, tales como:

- Análisis de la información de suelos levantada en campo
- Cálculo de cortes y rellenos para la nivelación
- Diseño de canales y melgas
- Modelación numérica del riego

Yo estaba feliz por el encargo que tenía, ya que de acuerdo con mi criterio, en este trabajo se conjuntaban todas mis habilidades conocidas de la ingeniería de riego, por lo que inicié mi trabajo con mucho empeño.

Habían transcurrido cuatro meses de arduo trabajo y el avance que tenía era el diseño del sistema, es decir, el cálculo de las dimensiones de las melgas, los canales, el caudal de riego, el cálculo de los cortes y rellenos, todo esto con base en la información de campo que previamente había obtenido; hasta que un día sucedió la tragedia para mí, se presentó ante el Dr. Luís para solicitar trabajo, mi amigo y compañero de grupo Javier Ramírez Luna, quién gozaba de una amplia reputación entre nosotros, por conocer tópicos relacionados con la utilización de la técnica del Elemento Finito para resolver problemas de ingeniería; el Dr. Luís lo aceptó, e inmediatamente me instruyó para que Javier se encargara de las actividades de gabinete, y yo de las de campo.

Imagínense ustedes la gran decepción de mi vida, ¡yo Nicolás Romero "achichinle" de un "achichinle"!., no lo podía creer, sin embargo, era mi cruel realidad.

Gracias a que Javier es una persona sensata, comprendió que el avance del trabajo se encontraba en la etapa previa al trazo y diseño de campo, por lo que no objetó la propuesta de diseño que había yo hecho, con base en la información de campo que yo mismo había obtenido.

De esta manera, se llegó el día de la nivelación de tierras, del trazo y diseño de canales y melgas, de la siembra y del riego, por lo que Javier y yo tuvimos que irnos a Celaya por un periodo de siete días, y como tenía que ser, yo me hice cargo de los trabajos de campo.

Por las condiciones morfológicas del terreno en el que se hizo el diseño del sistema, habíamos construido melgas de 18 m de ancho y longitudes que fluctuaban desde los 275 m hasta los 150 m, por lo tanto, los caudales para regar cada una de ellas lógicamente tenían que ser diferentes.

Preparamos el terreno para la siembra del trigo, y antes del riego, tuvimos que colocar las compuertas (conocidas en esa zona como tornas) al final de cada ancho de melga, es decir, a cada 18 m estaba colocada una de éstas. La colocación consistía en un anclado simple en la plantilla y en las paredes del canal y el procedimiento era quitar una a una hasta completar el riego de cada melga.

El canal fue diseñado con un tirante normal de 50 cm, por lo tanto, este sería el tirante que actuaría como presión hidrostática en la compuerta.

Habíamos acordado iniciar el riego a las 5 de la mañana, esto para regar las seis melgas que nos correspondían en un tiempo estimado de 8 horas, y así regresaríamos lo antes posible a Texcoco.

Como fue previsto, a las 5:00 a.m. iniciamos labores, íbamos a regar la primera melga, y la estrategia era la siguiente: un señor abriría la compuerta o toma desde el canal principal, y Javier y yo íbamos a controlar el canal parcelario en los primeros 18 m del ancho de la melga, poner en operación en el menor tiempo posible de 15 a 20 sifones de 1.5 pulgadas y controlar el avance o frente del agua. Una vez que pusimos a funcionar todos los sifones, Javier se fue al final de la melga (a 275 m distante del punto en donde yo estaba) porque de acuerdo con nuestro diseño, teníamos que cerrar las melgas con un bordo para que el agua no continuara su recorrido.

De esta manera pasaron 15 minutos, de pronto, noté que el caudal de los sifones había disminuido casi a la mitad respecto al de inicio, lo cual me pareció raro, verifiqué el nivel en el canal y noté que éste había disminuido también, por lo que inmediatamente busque la causa. Sucedió que el agua estaba pasando hacia el segundo tramo del canal de riego (tramo para regar la segunda melga), debido a que la compuerta estaba inclinándose en el sentido de la corriente porque no la habíamos anclado bien a la plantilla ni a las paredes, así que ni ¡tarde ni perezoso! me coloqué tras la compuerta para actuar como un contrafuerte, le grité a Javier para que viniera a cerrar la toma desde el canal principal pero fueron inútiles mis gritos porque él no me escuchaba por la distancia a la que se encontraba, así es que actué como contrafuerte por un espacio de 5 minutos, como las paredes del canal se iban erosionando poco a poco porque el tirante del canal aumentaba debido a que los sifones habían dejado de operar, llegó el colapso de la compuerta por una de las paredes del canal, el flujo arrastró la compuerta hacia el lado de falla, y únicamente quedó mi espalda como compuerta. Con tan solo 70 cm de tirante actuando sobre mí, sentí que el mundo se me venía encima, soporte la presión del agua por casi 1 minuto, y como era de esperarse "La compuerta humana" colapsó; la corriente me arrastró hasta el sitio de la segunda compuerta, me incorporé y corrí a cerrar la toma del canal principal. Todo esto transcurrió en los primeros 20 minutos de iniciada nuestra labor, seguía sin salir el sol, y yo estaba como un verdadero marrano "Sucio y Revocado" (aclaración).

Reparamos el error, y cerca de las 8:00 a.m. llegó el Dr. Luís a supervisar el trabajo, le dimos detalles de lo sucedido, pero cuando le dijimos que la longitud de las melgas fluctuaban desde 275 m hasta 150 m, casi nos fulmina con la mirada y movió la cabeza con desaprobación, preguntó ¿porque no pusieron un canal de riego a la mitad de la longitud?, nuestra respuesta fue ¡porque variando el gasto desde 120 l/s hasta 60 l/s, su modelo (noten que en este momento le estábamos otorgando la posible falla a su modelo numérico) nos arrojó como resultado un tiempo de riego de 1 hora con 40 minutos para la melga mas larga, y un tiempo de riego de 50 minutos para la melga de menor longitud!, a lo que el replicó, ¡pues vamos a ver si es cierto!; esto significaba que si habíamos hecho bien la nivelación de tierras y la caracterización de las propiedades del suelo, el tiempo de riego real tendría que ser el estimado con el modelo (con lo cual revertía la culpa que le habíamos otorgado, asignándosela a la posible falla de nuestro trabajo de campo), de esta manera, dio inició el momento de la oración para Javier y para mí.

Para la melga testigo, habíamos estimado un tiempo de riego de 1 hora con 20 minutos, con un caudal de 100 l/s, comenzó el riego y también el momento de angustia para Javier y para mí. Esos minutos han sido los más largos de mi vida, sin embargo, a medida que el tiempo transcurría el semblante del Dr. Luís iba cambiando, aquella cara de enojo, se iba transformando en una de alegría, porque el frente del agua en todo el ancho de la melga corría en la misma longitud de avance, esto significaba que la nivelación del terreno había sido la adecuada, sin embargo, nuestro momento de gloria llegó cuando habían transcurrido 1 hora con 30 minutos y el frente de avance del agua estaba tocando el bordo al final de la melga.

El Dr. Luís dijo ¡en el riego por gravedad, 10 minutos no son nada!. Con estas palabras, entendí que nos felicitaba por el trabajo realizado, y lo que aprendí de esta experiencia fue que la confianza en nuestro trabajo siempre debe acompañar al dicho, y que la **oración nunca está por demás....**

Agrónomo civilizado

Llegó el año de 1992 y con éste, la fecha límite para permanecer como auxiliar de investigación en el CP, esto porque en esa institución existe una norma que establece que después de haber trabajado por un período de 2 años, el personal profesionalista está obligado a realizar estudios superiores (Maestría o Doctorado según fuera el caso).

Regresó a mi mente la idea de la "Ingeniería Civil", y consideré que en esta ocasión no había excusa para dejar pasar la oportunidad de cumplirme un capricho, así es que solicité al Dr. Luís que me permitiera considerar al CP como una segunda opción, ya que yo estaba interesado en un grado de Maestría en Ingeniería y ahí sólo otorgaban el Grado de Maestro en Ciencias. Le expliqué que para ingresar a la Sección de Hidráulica de la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería (DEPFI) de la UNAM, tenía que aprobar el examen de admisión (obviamente sobre tópicos de hidráulica), cedió a mi petición y me deseó suerte.

Coincidentemente el día que había sido programado el examen de admisión en la DEPFI, yo tenía una Comisión a San Luis Potosí por parte del CP, por lo que fui a solicitarle al jefe de la Sección de Hidráulica que era el Dr. Carlos Agustín Escalante Sandoval, que se me aplicara el examen un día antes de la fecha programada, él me dijo que era una situación difícil porque no conocía nada de mí y bajo esa condición, no podía saber si yo iba a pasarle el examen a otro aspirante. Después de tanto ruego, por fin aceptó, y me dio el examen para resolverlo en su presencia.

El examen consistía en resolver 6 problemas, uno de orificios, uno de compuertas, uno de vertedores, uno en el que había que calcular la potencia de una bomba, otro en el que había que calcular el caudal y diámetro de la tubería para una zona de riego y finalmente un problema de perfiles hidráulicos en canales. Recuerdo que lo inicié a las 4 de la tarde, eran las 8 de la noche y apenas había finalizado el problema número 5, le pregunté al Dr. Carlos sobre el valor de cada problema y me respondió que el ejercicio 6 valía 3 puntos y que los 7 puntos restantes, serían distribuidos entre los problemas del 1 al 5, me preguntó ¿por qué te estas tardando tanto?, me dijo que el examen lo diseñó para ser resuelto en 2 horas con 30 minutos, recuerdo que le contesté ¡Discúlpeme Doctor, lo que pasa que mi hidráulica es lenta pero segura!, sonrió y me dijo que me daría otra media hora más. Resolví parte del problema 6, esto porque según yo el tiempo no fue suficiente para terminar; por este motivo, le puse una nota que decía "Se como resolver la parte que falta del problema, ya no tuve tiempo de terminarlo, en un minuto usted me recogerá el examen". Entregué el examen y me fui a preparar el equipaje para el viaje del día siguiente.

Pasó un mes para que fueran publicados los resultados del examen, cuando inicié la revisión de la lista, me quede helado al encontrar en forma consecutiva tres veces la frase "no aprobado", no dude y fui directo a mi nombre, suspiré aliviado cuando leí "aprobado". Me puse feliz e inmediatamente fui a revisar las asignaturas que se impartirían en ese semestre y los horarios.

Estando revisando los horarios, junto a mí estaba un joven rubio, alto al que a leguas se le notaba que era extranjero, él también revisaba el mismo horario que yo, la diferencia era que el comparaba una lista que traía con nombres de profesores, con la lista de las vitrinas, intercambiamos un par de palabras, su español era deficiente pero entendible, me dijo que su nombre era Edwar McCann Smith y que venía desde Inglaterra, lo primero que pensé fue ¿este tipo a de ser un "Plebeyo" (pobre diablo) de allá! y me pregunté ¿porqué se habrá venido a estudiar a México, teniendo mejores opciones en otros países? (nótese que con estos pensamientos, estaba yo demeritando la calidad de la educación de mi país, y por lo tanto el que se menospreciaba era yo mismo). No pude contener mi curiosidad sobre el acto de comparar las listas, le pregunté, y me mostró la que él había escrito, en ésta estaban los nombres del Dr. Enzo Levi Lates, del Dr. Gabriel Echávez Aldape, del Dr. Carlos Cruickshank Villanueva, del Dr. Ramón Domínguez Mora, del M.I. José Antonio Maza Álvarez y del M.I. Gilberto Sotelo Avila, me dijo que esos nombres los había leído en los Journals y Revistas Internacionales y que sabía que esos señores eran los "leones" de la hidráulica en México.

Obviamente en ese momento cambió mi actitud y le dije ¡por supuesto, todos ellos son Mexicanos! y agregué ¡son mis paisanos, yo también soy de aquí de México!. Pienso que hubiera sido imposible engañarlo diciéndole que yo era de algún país Nórdico, y que el inglés que yo hablaba era Bostoniano, esto porque mis características fenotípicas me hubieran delatado inmediatamente y porque si me hablaba en inglés, me hubiera visto la cara de ¿what?.

Platicamos y coincidimos en cursar tres asignaturas juntos, a saber: Modelos Hidráulicos con el Doctor Gabriel, Hidráulica Fluvial con el Maestro Maza A. y Obras Hidráulicas con el Maestro Sotelo, hicimos equipo en la asignatura del Maestro Sotelo, así es que él aprovechaba mi español para el reporte de los trabajos, y yo aprovechaba su inglés para la lectura de artículos y libros en ese idioma.

En una ocasión, estábamos haciendo una tarea, tomé el libro Small Dams (Presas Pequeñas) y muy gallo comencé supuestamente a leer la traducción en español que correspondía a un texto de inglés, el frunció el ceño y me dijo enojado ¡ahí no dice eso!, me quitó el libro y la traducción la hizo él, así me di cuenta que mi fuerte no era el idioma inglés.

Después de convivir algún tiempo con Edwar, me di cuenta que era un estudiante brillante, que era un Ingeniero Marítimo, que había venido a buscar al Dr. Enzo Levi y al Dr. Echávez, que sí había comparado nuestra institución con otras universidades de Europa, de Estados Unidos y de Canadá, y que se había decidido por México porque encontró que la ingeniería hidráulica de México era reconocida internacionalmente, que todas las personalidades descritas, estaban en una misma institución, lo cual era benéfico para él, y finalmente por el idioma, después de escuchar esto, me sentí el más orgulloso de los mexicanos y desde entonces realmente me considero un “Agrónomo Civilizado”.....

¿México o Colombia-España?

Cuando cursé la asignatura Obras Hidráulicas de Riego con el Dr. Jesús Gracia Sánchez, y con el Dr. Ernesto Vázquez, tenía un compañero del Estado de Guerrero (Pascual), otro de Michoacán (Miguel Angel), dos del D.F. (Fermín y Rafael) y uno de Colombia que había estudiado la licenciatura en España. (Carlos)

Estaba finalizando el curso, y como éste era teórico práctico, había que hacer algunas prácticas de laboratorio. Para ahorrar tiempo decidimos hacer las prácticas en equipo, así es que un día nos reunimos e iniciamos el cometido.

Había que hacer una práctica de compuerta en un canal de lucita (plástico transparente), el objetivo era medir los tirantes de aguas arriba, los tirantes de aguas abajo y las aberturas de compuerta y después había que definir las curvas tirantes-abertura-caudal.

Se asignaron funciones específicas a cada uno de nosotros siendo lo más relevante para esta historia que a Carlos el Colombiano se le había encargado el control de una compuerta de regulación del caudal de entrada en la parte de aguas arriba de la compuerta por calibrar, y que yo fui el encargado de realizar la lectura del tirante aguas arriba de la compuerta por calibrar, así es que lo tenía a la vista y él también a mí. Todos estábamos haciendo nuestras respectivas lecturas, y pude percatarme que Carlos colocaba tabiques estibados (uno sobre otro) dentro del canal y llevaba ya una altura aproximada de 50 cm, y el resto de nosotros haciendo lecturas en esos mismos instantes, le grité ¡Carlos, no pongas esos tabiques porque así se alteran los tirantes y el caudal mientras que dura el transitorio!, y él me contestó ¡estás loco, eso no pasa, además tu no sabes nada de esto porque eres un Farmer (agricultor, campesino, granjero, etc, etc, en inglés)!. Habermelo dicho eso, fue el peor error de su vida, inmediatamente repliqué ¡con quién cursaste hidráulica baboso!, ¡me imagino que con algún familiar tuyo!, él insistía ¡mira, no vale la pena discutir contigo sobre estos tópicos porque como ya te dije, eres un insignificante Farmer!, se inició una batalla campal de palabras en la que nos hicimos muchas ofensas, hasta que Pascual, el de Guerrero dijo, ¡miren cabrones, o se callan o me los voy a madrear a los dos para dejarlos tranquilos!, instantáneamente al escuchar estas palabras nos callamos. Lo malo del asunto fue que Carlos al término de la práctica fue a rajar leña (chismear) al Dr. Jesús Gracia. Al final de cuentas, él fue el único que sacó diez en la práctica, pero supimos porque fue así, sucede que ni tarde ni perezoso consiguió con los técnicos del laboratorio la curva de calibración de la compuerta, y por supuesto, sus resultados fueron los únicos buenos en esa ocasión. Como buen hidráulico que me imagino que es usted, juzgue quien tenía la razón en esta discusión **¿México o Colombia-España?.....**

Golpe de suerte

En 1993 terminé los créditos de la Maestría e ingresé a una empresa Consultora en Ingeniería llamada Servicios Profesionales de Planeación Ingeniería y Administración (SERPPIA). El propietario y director Ing. Héctor Alberto Merino y Guevara, había pedido al Dr. Jesús Gracia Sánchez que le recomendara a algún Ingeniero que conociera sobre hidráulica, me presenté como candidato y fui contratado.

El primer trabajo que se me asignó fue diseñar una válvula de 1 metro de diámetro, para adaptarla a la tubería de salida de un tanque de tormenta que colecta las aguas residuales y la precipitación en el área de influencia de un centro comercial.

El problema era que la tubería de salida descarga hacia el cauce del río San Javier, y que en una ocasión el nivel del agua rebasó el lecho superior de la tubería, el agua ingresó al tanque por contraflujo y como el nivel inferior de la tubería de entrada tenía únicamente 50 cm con respecto al de salida, el agua llenó la red de drenaje y el centro comercial se inundó.

Esta fue una tarea difícil de resolver, porque el diámetro máximo de las válvulas que se fabrican son de 8 pulgadas (20.32 cm). Para resolver el problema propuse utilizar varias válvulas distribuidas y soldadas en una placa metálica de diámetro igual a un metro, realice el análisis de funcionamiento hidráulico y el análisis hidrológico en el río, y me encomendé a San Gilberto Sotelo y a San Carlos Escalante.

Pasó la época de lluvias y no se había reportado ningún evento anormal, esto significó que las válvulas habían funcionado bien, a pesar de esto, el propietario del centro comercial pidió la evaluación del funcionamiento de la red de drenaje y solicitó que preferentemente se hiciera con revisión directa.

Aunque yo estaba seguro del diseño que había realizado y del funcionamiento hidráulico que propuse, comencé a inquietarme una duda al respecto del ¿porqué el propietario pedía una revisión?, quizás había algo oculto que quería evidenciar frente a frente. Con esta idea me preparé para cualquier ofensiva y llevé conmigo la información del proyecto.

Quedé sorprendido cuando verifique que los niveles de agua en el tanque y en el río que había yo previsto en el análisis hidráulico e hidrológico respectivamente, se alcanzaron, esto significó que el diseño propuesto había sido adecuado. Me imaginé ¿qué hubiera sucedido si lo que diseñé no hubiera funcionado como lo preví?, ¿hubiera inventado alguna excusa para justificarme?, ¿hubiera reconocido mi error?, o quizás ¿hubiera pedido la oportunidad de revisar el sistema?. Estas preguntas aún están sin respuesta, pero lo que jamás olvidaré es que a partir de aquel **golpe de suerte**, nunca he perdido ni perderé la confianza en las cosas que hago.....

Hasta el final de mis días

Por supuesto que en la vida de todo(a) hidráulico(a), deben existir momentos sentimentales, los míos llegaron en diciembre de 1992, eran vacaciones navideñas y me encontraba en la casa de mis padres en Misantla, una prima mía que había sido mi compañera de grupo en la secundaria, envió una invitación para su boda, la cual se realizaría por esas fechas.

A la boda asistimos mis papas, dos hermanos y yo. Estando allí observe a una chica delgada, de pelo rizado, morena y para mi gusto guapa, ella era Cira, quién también había sido mi compañera en la secundaria, intuí que siendo la mejor amiga de mi prima, lógicamente tenía que ser invitada a la boda.

Nos saludamos, bailamos y platicamos. Supe que había terminado la carrera de Ingeniero Químico y que estaba realizando su tesis profesional en el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ), ubicado en Salazar Edo. de México, pero que ella vivía en el D.F.

Me interesé en ella porque cubría gran parte de los requisitos de mi chica ideal, a saber: delgada (soy gordo), de pelo rizado (tengo el pelo lacio), reservada (soy muy hablador), bonita (dios no fue dadivoso conmigo), profesionista (esto permite una comunicación plena en cualquier tópico) y aún soltera (nunca me gustaron los libros rayados); así es que le propuse reunirnos nuevamente, y ella aceptó.

Nuestra primera cita fue el día 22 de enero de 1993 en el D.F., después de esa primera reunión hubo muchas más y llegamos finalmente a ser pareja. Poco a poco me fui dando cuenta de lo importante que ella era para mí, así es que en agosto de 1994 asistí con mis padres a la casa de Cira para pedir su mano, y planeamos casarnos el diciembre de 1994.

Estarán pensando ¡y esto que ¿i#\$\$"& tiene que ver con la hidráulica!, la respuesta es la siguiente:

A pesar de saber que durante esas fechas el clima de Misantla es frío y húmedo, decidimos realizar la ceremonia religiosa el día jueves 28 de diciembre de 1994. La condición climática que impera durante

esos días, provoca que poca gente asista a festejos como éste, porque que la mayor parte del día llueve; en tal condición, es difícil trasladarse caminando de la iglesia hasta el salón de las fiestas.

En la desesperación, un día antes de la boda hice un pacto con Tláloc que más o menos iba así:

Mira compañero, sin tener porqué, estoy resolviendo parte de los problemas que tu ocasionas, así es que estas en deuda conmigo, que te parece si como una forma de pago a la ayuda que te brindo, tu dejas de soltar agua por lo menos mañana en todo el día, esto porque me voy a casar y quiero caminar de la iglesia al salón del festejo; si hacemos trato, te prometo que nunca dejaré de ayudarte.

Vasta y sobra con decirles que el amanecer y todo el día 28 de diciembre de 1994 hubo un sol esplendoroso, que no llovió y que fue posible caminar de la iglesia al salón.

Entendí entonces que el pacto entre Tláloc y yo se había firmado. Hasta ahora he cumplido, y creo que cumpliré **hasta el final de mis días.....**

Grande entre los Grandes

En octubre de 1994 ingresé a la Comisión Nacional del Agua (CNA) porque había adquirido un compromiso de trabajo con la institución para condonar una beca que se me otorgó durante los estudios de maestría. Fui asignado a la Gerencia del Lago de Texcoco, ahí supe que la persona a cargo era un ingeniero llamado Gerardo Cruickshank García, el mismo que había yo visto en fotografía en el pasillo de los famosos y distinguidos ingenieros de México, en el Colegio de Ingenieros Civiles de México; lo primero que dije fue ¡gracias dios mío, acabas de poner a esta oveja con el pastor y con el rebaño indicado!.

No perdí oportunidad para hacerme notar ante tal personalidad, así es que para una encomienda que se me asignó, puse el mejor esfuerzo y me preparé para la respectiva presentación, se llegó el día de ésta y recuerdo que de manera premeditada había decidido vestirme apropiadamente con Traje y Corbata, se llegó el momento de mi presentación, obviamente había yo cuidado hasta el último detalle para sustentarla y aclarar cualquier duda al respecto, así es que sabía de los procedimientos y ecuaciones utilizadas como herramientas de solución, terminé mi exposición y noté seriedad en el rostro del ingeniero Gerardo, una seriedad que quizás expresaba ¡este insolente quiere venir a enseñar el padre nuestro al señor cura!, entonces me dijo ¡los colores que utilizaste para ese plano están muy feos, cámbialos porque este material será parte de una presentación que voy a hacer mañana ante la señora Secretaria!, ¡quita todas las ecuaciones!, ¡resume las 30 páginas que expusiste a solo 3 o 4! , y ¡váyanse todos a preparar las instalaciones del Centro del Lago!; después de escuchar esto pensé: ¡creo que si le gusto mi presentación!, ¡me va a costar un \$%#"& y la mitad del otro hacer nuevamente el plano para mañana!, ¡como \$%#"!&/ voy a resumir 30 hojas en 3 o 4! y finalmente pensé ¿que no ve este señor que vengo vestido de Traje como para ir a coordinar las labores en el local en donde se dará la presentación?; levante mis cosas muy enojado, me despedí y subí a la camioneta vieja con la que trabajaba.

En el camino medité las cosas y pense ¡como %\$#"&/ no voy a poder hacer un #=?i(&% plano!, ¡en cuanto a la presentación lo más difícil fue ponerle, a \$%&"#/" que tengo que poder quitarle!, y con respecto a la ropa dije ¡la tierra se cae con agua y jabón!.

Al día siguiente el Ingeniero Gerardo dio su presentación ante la Secretaria de Medio Ambiente Recursos Naturales y Pesca, la Maestra Julia Carabias Lillo, entonces realmente comprendí porque una persona como él se considera **Grande entre los Grandes**.

Un complemento de los éxitos de la vida profesional

En el Lago de Texcoco tenía el encargo de realizar actividades relacionadas con la Ingeniería de Riego, así es que en cuanto llegué me di a la tarea de inspeccionar mis dominios, la Ing. Luz Elena, mi jefa y amiga me dijo, ¡estos señores forman nuestra brigada topográfica!, esto fue lo que vi: a un señor con dificultades para respirar por su gruesa complexión física llamado Enrique al que apodan "El Barretas", a

un señor con aspecto de vaquero llamado Cesáreo, a un señor de nombre Pedro que no me observaba directamente por un problema en sus ojos, a un señor llamado Diego (+) quién aparentemente se recuperaba de una farra del día anterior y finalmente a un señor juguetón y bromista llamado Abraham, al cual apodan "El Negro".

La verdadera personalidad y habilidades de esta gente, es la siguiente: Barretas fue un líder sindical de primera categoría en el Lago de Texcoco, Cesáreo además de haber sido líder sindical, tiene un conjunto musical "Norteño" que se emplea en Texcoco y sus alrededores, Pedro quién también fue líder, pertenece a una de las familias que formaron un pueblo cercano a Texcoco llamado Tequexquinahuatl, el difunto Diego gozaba de inmunidad para trabajar porque aparentemente tenía un documento médico que lo acreditaba como persona no apta para realizar ciertas actividades, pero es importante mencionar que desde mi particular punto de vista, Diego gozaba de buena salud porque sin falta, todos los días a la hora del desayuno se recetaba de 2 a 3 litros de pulque, y finalmente, el Negro, es ni más ni menos que el primo hermano de la famosa Loba de Chimalhuacán.

Con este maravilloso equipo de trabajo desarrollé mis actividades en el Lago de Texcoco, y de las cosas curiosas que valen la pena mencionar son:

- Barretas, aunque con escasos estudios de primaria llegó a ser el jefe de la brigada, porque además de aprender a nivelar y a trazar poligonales, aprendió a realizar aforos con micromolímete.
- Diego cargaba los instrumentos de trabajo, actividad que jamás había querido realizar.
- Pedro, Cesáreo y el Negro aprendieron a leer las instrucciones por señas, para realizar los trabajos topográficos, además de que aprendieron a acondicionar los sitios para realizar aforos.

Y lo bueno de esto fue que:

- Yo me convertí en un elemento secundario en el desarrollo del trabajo, porque únicamente revisaba resultados, interpretaba, corregía y reportaba.
- En el tiempo que trabajé con ellos, mi sistema nervioso estuvo relajado.
- Aprendí a convivir con personal de campo.
- A cambio de mis enseñanzas, ellos lavaban cada fin de semana la camioneta vieja con la que trabajábamos.

Claro, debo comentar que también hubo cosas no muy gratas, por ejemplo, por haber trabajado con aguas negras, me atacó un hongo en las manos, el cual tiene un período de retorno (Tr) anual (hidrológicamente hablando), que se manifiesta durante la época de lluvias.

En términos generales, considero que fue grata la estancia que hice en el Lago de Texcoco y que personas tan valiosas como con las que trabajé, son necesarias en la vida de todo profesionista, ya que son **un complemento de los éxitos de la vida profesional.....**

Una de esas personas

Recuerdo que el día 22 de octubre de 1995 como de costumbre llamé a la oficina de mi papá en Misantla, Veracruz para saber como estaban de salud, noté respuestas cortas, frías y quizás hasta de molestia. Conociendo a mi padre, imaginé que posiblemente estaba pasando por un mal momento, así es que me despedí de él y colgué. Eran aproximadamente las 11 de la mañana del día 23, me encontraba laborando en el Centro del Lago de Texcoco, y en el sistema de comunicación de Radio Transmisión escuche la interferencia de frases como: ¡la maquinaria está en camino a Misantla!, ¡se necesitan de 15 a 20 retroexcavadoras, ¡que crucen el río después de las 8 de la noche!. Esto me alarmó porque tanto mis padres como la mayoría de mis familiares viven en Misantla, Veracruz, y que yo sepa no existe alguna otra ciudad con este nombre, así es que a la hora de la comida llegué a casa y lo primero que hice fue comunicarme con ellos, me pareció extraño que no hubiera comunicación, me alarmé aun más, regresé al trabajo y en la noche intenté comunicarme nuevamente, esta vez lo conseguí y hablé con mi madre, le comenté lo que había escuchado y ella me platicó lo sucedido.

Me dijo que el día 20 de octubre con el pase del Golpe (avenida) había fallado el bordo de "La Purísima", que se ubica aguas arriba del pueblo. Dicho bordo se construyó en la década de los 50's para desviar el río Misantla, y su falla provocó la inundación del área de influencia de su antiguo cauce.

Fue así que me enteré que la casa de mis padres está ubicada en el área de influencia del antiguo cauce del río, por lo tanto como se podrán imaginar, mi casa fue una de las afectadas.

Comprendí por que mi padre me había contestado de esa forma, solicité un permiso en mi trabajo y me fui a Misantla, el panorama que me encontré era desolador: lodo, destrucción de construcciones, basura, olores fétidos, un sistema de alerta permanente, damnificados por doquier, y lo más preocupante, tristeza y miedo en los rostros de toda la gente.

Consideré que la mejor forma de ayudar, era regresando a Texcoco y así lo hice. Sin embargo, buscando otras formas de ayuda decidí realizar el análisis hidrológico del evento que provocó la falla, resulta que el caudal de colapso fue $6,860 \text{ m}^3/\text{s}$ y que a este correspondía un período de retorno (Tr) de 250 años, según la técnica de "Estaciones Año". De acuerdo con las normas vigentes de la CNA, para el bordo de protección correspondía un diseño con un período de retorno de 500 años y así lo hice, resultándome un caudal de diseño de $7,123 \text{ m}^3/\text{s}$.

Con este valor en mente realicé la revisión del diseño que había hecho por su parte la CNA a través de sus oficinas en Xalapa, Veracruz, encontrándome la grata sorpresa de que también habían considerado un caudal semejante al que yo estimé, para el diseño de la nueva obra, me imaginé que en esas oficinas había verdaderos ingenieros y me sentí tranquilo con dos resultados parecidos. Adicionalmente el ingeniero Juan Ansberto Cruz Gerón, colega de la Universidad Autónoma Chapingo y de la DEPF, UNAM, analizó el caso y lo presentó como un trabajo final en una de las asignaturas de la Maestría.

La experiencia que adquirí de esta situación, fue que "a pesar de no ser afectados por una tragedia, existen personas con gran profesionalismo que sin pedir otra cosa que no sea el bienestar social, dan lo mejor de sí, en el desempeño de su trabajo", y desde mi particular punto de vista, siempre he intentado ser una de esas personas.....

¡Ya basta de tanta basura en el poder!

El 1 de diciembre de 1994 el Dr. Ernesto Zedillo Ponce de León asumió el cargo de Presidente de los Estados Unidos Mexicanos, en ese mismo año, el Sr. Ramón Aguirre Velázquez, quién en tiempos del Presidente Miguel de la Madrid, fungió como Regente Capitalino de la Ciudad de México (puesto al que hoy es denominado Jefe de Gobierno del Distrito Federal) fue designado Gobernador de Guanajuato, posición que no disfrutó por mucho tiempo porque se descubrió que había existido un fraude electoral, él fue removido y en su lugar asumió el Gobierno de ese Estado, nuestro hoy Presidente de la República Lic. Vicente Fox Quezada.

Para no hacer la historia larga, un día me llamó mi Jefe el Ing. Fernando Mercado García y me dijo ¡Nico, prepara el equipo de aforo, el topográfico y el de muestreo de suelos porque el próximo sábado vamos a ir a Querétaro a realizar un trabajo que me asignó el Ing. Cruickshank, avísale a Fernando porque al parecer a parte de trabajos relacionados con la irrigación e hidráulica, también tenemos que analizar tópicos relacionados con la Producción Animal (Zootecnia)!. Preparé todo lo que pidió y se llegó el día de la visita.

Acordamos reunirnos con los propietarios del rancho, en la caseta de cobro de Tepetzotlán (salida de la Cd. de México hacia Querétaro) para viajar juntos. En el camino me enteré que la visita era a un rancho llamado San Ignacio, propiedad del hijo del Sr. Ramón Aguirre Velázquez, Rodrigo Aguirre, y que la visita tenía por objetivo hacer un Diagnóstico de la Infraestructura de Riego y del Sistema de Producción Animal "Ganado de Lidia",.

En ese momento me sentí afortunado por haber sido considerado para realizar un trabajo para tan destacada personalidad de la vida política de México. Con gran emoción llegamos al rancho San Ignacio ubicado en el municipio de Amealco, Qro., en los límites con Guanajuato y Michoacán.

Resulta que al llegar allá, de un vehículo suburban bajó un señor de piel clara, alto y gordo, ese era el señor Ramón Aguirre, hacia quién inmediatamente corrió un perro blanco, grande y gordo (imagínense ustedes lo que pensé), la cosa fue que el señor nos explicó que le había solicitado al Ing. Cruickshank que los ingenieros que trabajaban en el Lago de Texcoco fueran a realizar algunos trabajos al rancho de su hijo, porque en una ocasión que el iba a la "Feria del Caballo", observó que los terrenos del Lago de Texcoco estaban cubiertos de pasto, situación que para las características del suelo que ahí existen, resulta ser una verdadera proeza.

Después de analizar el caso, propusimos una estrategia de solución y convenimos en volver otro día a realizar el trabajo de campo. Tomamos un aperitivo en su casa y nos invitó a San Juan del Río, por que según él, había sido invitado por un Diputado amigo suyo. Cuando llegamos a esa casa, vimos una de esas escenas que solo pasan en las películas, el mentado Diputado ordenó quitarse a todos los que ocupaban una mesa para que de acuerdo con él, tomara asiento "El Jefe".

En el punto alcoholizado, el Diputado contó la historia de cómo había llegado a ser Presidente Municipal de San Juan del Río, para él esto era un chiste, para todos nosotros a continuación sabrán porqué es humillante.

Resulta que este señor había sido algo así como un mensajero personal del Sr Presidente de la República Miguel de la Madrid, tenía tanto carisma, que la señora esposa del Presidente pidió que se le ayudara, y la forma de ayudarlo fue con la presidencia municipal de San Juan del Río, Qro. porque de ahí es él, para llegar a la presidencia consiguió un certificado de primaria falso, otorgado por un maestro, en honor del cual puso nombre a una escuela allá en San Juan del Río, al conocer esto realmente me decepcione de los procederes mexicanos para elegir a nuestros representantes.

Entre otros eventos curiosos sucedidos en esa reunión, fue que asistió el Torero "Manolo Mejía" y el señor propietario de la ganadería "Gárfias" (que por cierto es una de las principales de México). El señor Ramón presumió nuestra presencia, diciendo que nos encargaríamos de hacer producir más su rancho, hecho que fue contrariado por el señor Gárfias quién le dijo ¡Claro Don Ramón, usted puede hacer eso y más por tantos conocidos que hizo cuando fue Regente, y sobre todo gratis!, al escuchar esto, me avergoncé de la posibilidad que ellos pensarán que nosotros éramos unos lambiscones.

Al concluir el trabajo sucedió lo que dijo el señor Gárfias, nuestra participación fue gratis, nunca le volvimos a ver el polvo al señor Ramón Aguirre y como dice la canción ¡ni por la silla volvió!. Lo que aprendí de esta experiencia fue que en México seguirán existiendo tipos como estos, hasta que nosotros lo permitamos. **¡Ya basta de tanta basura en el poder!....**

Estás camino a la gloria

Desde que finalicé los créditos de la Maestría inicié mi tesis de grado, para esto busque al Dr. Luis Rendón (mi ex jefe) quién para esas fechas laboraba como Coordinador de Riego y Drenaje en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), me dijo que lo disculpara pero que no podía dirigirme la tesis porque las actividades administrativas ocupaban la mayor parte de su tiempo laboral, sin embargo, que me iba a recomendar con un Doctor que recientemente había regresado de hacer sus estudios en Francia. Tal persona era el Dr. Carlos Fuentes Ruiz, y de él se rumoraba que era una eminencia para los análisis matemáticos.

Desde que el Dr. Luis me quitó el encargo de probar aquel modelo (RIMEL) que él desarrolló, y se lo dio a mi amigo Javier, yo me propuse desarrollar uno propio, así que para esto requería de un excelente análisis matemático. En estas condiciones el Dr. Carlos Fuentes era el personaje idóneo para dirigirme la tesis.

Como una asignatura de la maestría cursé Métodos Numéricos con el Dr. Oscar Arturo Fuentes Mariles. Este señor se caracteriza por mostrar amabilidad y optimismo ante lo prospero y lo adverso, por ejemplo, cuando hacia una reprobada masiva de alumnos, sus palabras en lugar de ser de reclamo, eran de

aliento y para ofrecer ayuda, y lo mismo sucedía cuando felicitaba a alguien por algo que hubiera hecho bien, este fue mi caso.....

Se llegó el día de la tercera evaluación parcial del curso, en el que los temas principales eran "el método del Elemento Finito, el método de Diferencias Finitas y el método de las Características", en ésta, como en el resto de las asignaturas, era necesario obtener un promedio mínimo de 80 con los tres exámenes parciales, y excuso decirles que en el primer parcial obtuve 60, en el segundo 70, y como se podrán dar cuenta, el tercer parcial ya era una misión imposible para mí.

Ese fue uno de los exámenes en los que a parte de estudiar no queda más remedio que encomendarse al creador y aguantar como lo hacen los machos Mexicanos cuando algo no resulta bien. A la salida del examen, veía caras sonrientes y yo preocupado pregunté a mis compañeros sobre los resultados que ellos obtuvieron, me llené de terror cuando supe que yo era el único con resultados diferentes. Regresé a casa como perro apaleado, imaginándome mi futuro.

Quince días después de este examen, me llegó el rumor que se andaba preguntando ¿quién era Nicolás Romero?, ¡en la madre!, dije yo, ya me andan buscando los del CONACYT para que les pague. No fue así, resulta que yo fui el único que obtuvo un diez seco (como dicen en el bajo mundo del estudiantado) en el tercer parcial de Métodos Numéricos (y por mi madre que no copié), en ese momento me sentí todo un Navier Stok.

La misión imposible no fue imposible, obtuve 80 como promedio final, sin embargo, esto no fue lo único bueno de la historia, otra cosa que sucedió fue que de manera coincidente iba caminando en la misma dirección que el Dr. Oscar, lo saludé y me preguntó ¿porqué te esperaste hasta el examen más difícil para acreditar la asignatura?, recuerdo que le contesté ¡es que yo trabajo al límite Doctor!, sonrió, y nos despedimos. Este fue un indicativo de que él supo de mi existencia, y en mi mente solo tenía la idea de que por nada del mundo elegiría un director de tesis como el Dr. Oscar, esto porque según yo era tan difícil su lenguaje matemático, que el hecho de no comprenderlo me llevaría al fracaso.

Así inicié mi tesis con el Dr. Carlos Fuentes, le propuse modelar el movimiento del agua en suelo, resolviendo la ecuación de Richard (1931), utilizando un esquema explícito (solución directa) en diferencias finitas, él me dijo que porqué no lo hacía con un método implícito ya que en trabajos similares, él estaba utilizando el esquema implícito, le explique que de acuerdo con lo que aprendí en la signatura de Métodos Numéricos que impartió el Dr. Oscar Fuentes, la ecuación de Richard por ser de una forma semejante a la ecuación de "Calor" tendría que resolverse con diferencias finita, y que de acuerdo con la teoría, un esquema explícito es tan bueno o mejor que un implícito, siempre y cuando se defina apropiadamente el rango de valores para los parámetros de la ecuación.

Desde el inicio entendí que el Dr. Carlos Fuentes aceptaba que se utilizara el método explícito, así es que manos a la obra, di solución al problema. Me reportaba con él por lo menos una vez cada mes para enterarlo de los avances y se llegó el gran día, terminé la primera versión de la tesis, cuando fui a entregársela, el destino me dio un golpe bajo.

El Dr. Carlos me dijo que no podía dirigirme esa tesis porque según él, no había hecho caso a la sugerencia que hizo para utilizar un esquema implícito, además me dijo que desde su punto de vista el método que utilice no era el adecuado. No lo podía creer, me encontraba en una situación semejante a la de David ante Goliat. Recuerdo que con actitud retadora me preguntó ¿y ahora que vas a hacer?, y yo aunque por dentro muy enojado, serenamente le dije ¡pues voy a proponerle el trabajo a alguien de la UNAM!, y el contestó ¡a de veras, no me acordaba que tu tienes muchos amigos en la UNAM!, yo contesté ¡bueno, no tengo muchos, pero sí tengo el honor de conocer a investigadores prestigiados como lo es usted!, agregué, ¡a pesar de esto, lo invito a que participe como Secretario en mi Jurado!, y él contestó ¡claro, acepto!.

¡En la %&\$#!&/° !, estaba yo en grandes problemas. Bien dice el dicho ¡cae más pronto un hablador que un cojo!, no tenía opción, para sacarme la espina recurrí al que yo considero la medicina de los matemáticos mexicanos, al Dr. Oscar Arturo Fuentes Mariles para que me dirigiera la tesis.

El Dr. Oscar con esa serenidad, amabilidad y personalidad que lo caracteriza me dijo, ¡caray, no puede ser!, ¡permíteme revisar el trabajo!, ¡búscame en una semana y te daré mi opinión!. Juro que al recurrir a él me imaginé el peor de los martirios, sin embargo, es el precio que tenía que pagar para comprobar si había yo hecho o no un buen trabajo.

A la semana siguiente me entrevisté con el Dr. Oscar y me dijo ¡acepto dirigirte la tesis, si aceptas hacerle modificaciones para llevarla a mi estilo de investigaciones como estas!, obviamente no había lugar a discusión para aceptar o no la propuesta, de inmediato acepté e iniciamos juntos la modificación al trabajo.

Finalicé las modificaciones un mes después de iniciado el proceso, y se llegó el día del examen. Como había quedado convenido con el Dr. Carlos Fuentes, el figuró como Secretario del Jurado, y llegó como yo una media hora antes al examen, recuerdo que me dijo, ¡mira Nicolás, revisé el documento y me pareció bien!, ¡no te preocupes en el caso de que no puedas contestar algo, voy a tratar de ayudarte interviniendo para encauzarte hacia la respuesta!. Este comentario me tranquilizó, pero lo que sin duda me dejó estupefacto fue cuando llegó el Dr. Oscar, los presenté y el Dr. Carlos preguntó ¿usted es la persona que ganó el premio Nacional de Hidráulica Enzo Levi, el año pasado?, y el Dr. Oscar contestó ¡me hicieron el favor de otorgármelo!, el Dr. Carlos dijo ¡leí al respecto de su trabajo, y creo que este reconocimiento, muy merecido lo tenía usted!. Lo único que yo pense en ese instante fue "Nicolás, trabajando con personalidades como la del Dr. Oscar, **estás camino a la gloria**".....

Mi vida es el agua

Como parte de mi jurado en el examen de Maestría estuvo el Dr. Jesús Gracia Sánchez, él fue la persona que según yo, estuvo más interesada en el tema porque me hizo muchas preguntas durante el examen. Para diferenciarlo de los demás, Cira mi esposa se refiere al "Doctor de Tirantes y Pipa".

En enero de 1997, inicié el Doctorado en Ingeniería Hidráulica en la UNAM, al comentar con mi esposa que la persona que me dirigiría la investigación era el Dr. Jesús Gracia Sánchez, aquel que identificaba como el de "Tirantes y Pipa" me dijo: "hay gordo, ese señor fue el único que te puso en aprietos en tu examen de la maestría, haber si no pasa lo mismo durante el Doctorado". Al escuchar los comentarios de Cira, sentí nuevamente esa grata sensación de reto que siempre me ha impuesto la vida.

Fui aceptado en el programa Doctoral, para esto, presenté mi proyecto de investigación y el comité me recomendó cursar tres asignaturas, a saber: Hidrología Estocástica, Aprovechamientos Hidráulicos e Ingeniería Financiera, y de ser posible una más, Técnicas Estadísticas en Hidrología. Quedó establecido que para acreditar mis cursos debería obtener como mínimo 80 de calificación en cada asignatura.

Lo que realmente me "molestó" (esto es una broma) fue que al Maestro Gilberto Sotelo Avila, quien también presentó una propuesta para ingresar al programa Doctoral, no lo pusieron a cursar ninguna asignatura.

Como presidente de mi jurado doctoral fue designado el Doctor Carlos Cruickshank, un señor con el que no había cursado ninguna asignatura, pero del que sabía que era un pantera para la modelación del flujo subterráneo.

El Doctor Gracia me recomendó atender todas las sugerencias que hiciera el Dr. Cruickshank porque según él, el Dr. Cruickshank siempre hace una aportación importante en cada tesis que preside, esto trae consigo un enorme peligro, él te puede cambiar la tesis si es que considera que no fue propuesta correctamente.

He trabajado con el Dr. Gracia desde enero de 1997, y desde entonces me he dado cuenta de la gran calidad que tiene como investigador, y la motivación y libertad que ofrece a sus alumnos para que ellos desarrollen el instinto de la investigación.

Yo por mi parte, estoy satisfecho por el trabajo que realizamos juntos, y en este período confirmé que definitivamente "**mi vida es el agua**".....

No estamos preparados para afrontarlas

Durante el tiempo que estuve realizando los estudios del Doctorado, a la vez trabajaba en la Gerencia Técnica de GRAVAMEX (Gerencia Regional de Aguas del Valle de México). Los últimos días de mayo de 2000 sucedió una tragedia en Chalco, Edo. de México.

En ese Municipio se localiza el cauce del río de la Compañía, por éste transitan las aguas residuales Municipales e Industriales de las poblaciones ubicadas aguas arriba de Chalco.

Desde mi punto de vista, el río de la Compañía se clasifica como una obra que en sus orígenes fue cauce natural y con el paso del tiempo se convirtió en una obra artificial, porque la plantilla de su cauce tiene una cota de nivel igual a la de las áreas de hacinamiento poblacional, y dado que el hundimiento de los suelos en dichas áreas es continuo, la plantilla del río está quedando por arriba de la plantilla del hacinamiento poblacional, por lo que los bordos del cauce del río deben ser constantemente reforzados.

Por esos días hubo una tormenta que ocasionó la falla estructural del bordo de la margen izquierda, y con la ruptura de éste una parte de Chalco se inundó.

Obviamente al lugar de los hechos se dieron cita algunas "disque" grandes personalidades de la hidráulica, quienes en grupos reducidos daban sus puntos de vista para solucionar el problema, hasta que una "mente brillante" de esas que sí tienen oportunidad de hablar y ser escuchadas dijo: ¡Para tapar el orificio tenemos que construir un muro de costales llenos de tierra!, ¡se sabe que esto da buenos resultados en los desbordamientos de ríos!, ¡aquí no debe ser la excepción!. Me horroricé al escuchar estas palabras, pero como por la posición tan baja que ocupaba como Funcionario de la CNA no tenía el derecho de opinar, no me fue posible decir nada.

En términos técnicos cualquiera que se haga llamar ingeniero civil, debe saber que el empuje hidrostático o fuerza de empuje del agua depende de carga hidrostática también denominada nivel de agua, y que 1 m³ de tierra de peso aproximado de 1,800 kg/m³, se opone con la tercera parte de su peso a un empuje horizontal, es decir, para desplazar horizontalmente 1 m³ de tierra, se requiere una fuerza de empuje aproximado de 600 kg/m²; "esto hasta un Chapinguero de Irrigación lo sabe".

En esa situación, como la carga hidráulica máxima del muro por construir era de 7 m, el empuje en el punto más bajo del río (cercano a la plantilla) era de 7 ton / m², por lo que se requerían 12 m de ancho en la base del muro, y desde mi punto de vista, de 15 a 20 m de base en el muro lo convertían en una estructura parcialmente segura.

Sucede que nuestros grandes ingenieros dieron a la base un ancho aproximado de 5 m, por lo que, en cuanto se rebasó el equilibrio de fuerzas, el muro de contención fue arrastrado ante la mirada atemorizada de todos nosotros.

Nuestra máxima autoridad gritó ¡chingada madre, que no tengo a ningún ingeniero en la institución!, después de esas palabras, aquella mente que por 5 horas había sido brillante se diluyó en la impunidad. Hasta que por fin, alguien propuso una solución, y el problema quedó parcialmente resuelto.

Dado que nuestra participación estaba relacionada con los aspectos hidrológicos, estábamos suficientemente documentados para opinar al respecto. Sucede que al estar yo platicando con un funcionario de la CNA se le acercó a éste un reportero y le preguntó ¿oye, apoco para resolver este problema van a inundar otro poblado de allá arriba?, a lo que yo apresurado comenté ¡mire señor, esas áreas que se están pensando inundar son de cultivo, no hay gente que vaya a ser afectada!, él se interesó en mis comentarios y me preguntó sobre los volúmenes de agua y otras cosas. Lo interesante de esto fue que al terminar de explicar al reportero lo que se tenía pensado hacer, me dijo el funcionario con el que estaba yo platicando ¡ten mucho cuidado al dar información, ya que el único que está autorizado para hacerlo, es nuestro director!. Me di cuenta de lo oprimidos que estábamos institucionalmente, y que hace falta una inmensa limpieza institucional para remover de puestos directivos a mucha gente que no cumplimos con nuestras funciones o que **no estamos preparados para afrontarlas**.....

Otras cosas importantes que sucedieron en el tiempo que estuve estudiando el Doctorado

De 1997 hasta la fecha, han sucedido situaciones realmente agradables y chistosas:

En mayo de 1997 cira y yo tuvimos a nuestra hermosa hija Gisela. Aunque ella nació en el estado de México, los que la conocen dicen que ella es 100 % Jarocha. Ella tiene una gran capacidad de observación, por ejemplo, muy pocas veces falla cuando predice que va a llover (aprendió de cira a diferenciar las nubes). Espero que esto le sirva para el futuro.

Unos días antes de hacer la defensa de mi tesis busqué a un nuevo sinodal que me habían designado en el semestre anterior, era el Dr. Rodolfo Silva Casarín. Como no lo conocía, pedí referencias físicas de él y esto fue textualmente lo que me dijeron: él es una persona joven, güero, y de baja estatura; con esta descripción me puse a temblar, porque en una ocasión que andaba buscando al Dr. Cruickshank me encontré a un muchacho con las mismas características, a quien de manera insolente le pregunté ¿oye muchacho, no has visto al Dr. Cruickshank?, el muchacho me observó y me contestó ¡no!, me dio la espalda y se retiró. En toda la madre, el Dr. Rodolfo era ese muchacho, ¡lo siento Doctor, la regué!

Por algún tiempo se me hizo raro que el Doctor Gabriel Echávez Aldape (personalidad a la que admiro y respeto) se interesara por tópicos de agronomía, porque en muchas ocasiones me preguntaba cosas de Chapingo. Ultimamente supe, que este prestigiado señor fue Chapinguero. Es grato saberlo, porque aunado a que él es el único mexicano que está mencionado en el libro "El agua según la ciencia" de Enzo Levi, aún conserva ese gran carisma que caracteriza a la gran mayoría de los Chapingueros.

El día que hice la defensa de mi tesis en 1998 conocí a un ingeniero viejito (de 80 a 90 años) quien también iba a defender la suya después de mí. Con la plática supe que él había trabajado con uno de mis memorables mentores (+) Dr. Fernando Martínez Sainoz, y que el gran anhelo de su vida era graduarse como Doctor en Ingeniería, yo pensé, este señor ya debería estar leyéndole cuentos a sus bisnietos en vez de estar gastando sus preciosos días aquí. Realmente admiré el ímpetu que el señor mostraba para alcanzar su meta. De anciano me gustaría continuar siendo como hasta ahora, porque me imagino (si dios me lo permite), seré como ese viejito.

Mi coco siguió siendo inglés, acredité el requisito hasta diciembre del 2000.

Cuando entregué el primer borrador de la tesis a mis sinodales, unos días después me mandó a traer el Dr. Cruickshank, quien con una voz tranquila me preguntó: ¿cómo vas en tu curso de inglés?, a lo que muy satisfecho contesté ¡muy bien señor, fíjese que ya acredité el prerequisite!, y agregué muchos detalles más. Cuando terminé, me preguntó nuevamente con voz aún calmada ¿entonces ya sabe lo que significa "actual" en inglés?, a lo que repliqué ¡por supuesto señor, en español se traduce como "real"!, entonces alzó la voz y me preguntó ¿¿¿¿ entonces porqué puso aquí actual y no real????, a lo que sumisamente contesté ¡señor, es que cuando hice esa traducción aún no había acreditado el inglés!. Sonrió y siguió con sus observaciones.

Es grato para mí decir que el Maestro Gilberto Sotelo (hoy Doctor en Ingeniería) es mi colega de generación en los estudios de doctorado, ¡como la ven chatos!

Esta historia continuará.....

Resumen

En esta investigación se desarrolló un modelo numérico integral llamado ADEHISIA, para diseñar o revisar sistemas de producción agrícolas de riego, la estructura general del modelo se basa en: la estimación de la disponibilidad de agua mediante un análisis hidrológico y un análisis de sequías, la estimación de la evapotranspiración, el cálculo de un primer nivel de déficit mediante la comparación de la disponibilidad de agua con la evapotranspiración, la definición de funciones de producción, el análisis económico de la producción, el análisis de optimización y la planeación del sistema agrícola ya sea diseño o revisión.

El análisis hidrológico se basó en técnicas estadísticas, para realizar el análisis de sequías se utilizó la técnica de Fernández y Salas (1994, 1996, 1997 y 1998), la estimación de la evapotranspiración se basó en la técnica de Blaney y Criddle, se desarrollaron y se propusieron dos nuevos modelos matemáticos para las funciones de producción de los cultivos (Romero y Gracia, 2000), los cuales se transformaron en modelos polinómicos de segundo grado para representar el beneficio económico, se definieron los modelos lineales para representar los costos de producción, y con los beneficios y costos se realizó el análisis económico de la producción y el análisis de optimización aplicando la técnica de English Marshall (1990), finalmente se definieron las políticas para realizar la planeación del sistema agrícola.

Son tres las principales aportaciones de esta tesis, a saber: el desarrollo de los modelos matemáticos para las funciones de producción de los cultivos, la definición de un procedimiento para establecer políticas de planeación, y la integración de los procesos que intervienen en la producción de un sistema agrícola; también hubo una aportación imprevista que consistió en la corrección de tres ecuaciones de la técnica de English Marshall (1990).

Se aplicó el modelo numérico ADEHISIA en la región Lagunera de México, obteniéndose en el caso de la revisión, resultados semejantes a los que sucedieron durante el ciclo agrícola de Primavera-Verano de 1997, y en el caso del diseño, que tres cultivos que se producen actualmente, deben ser eliminados de la plantilla de cultivos del Distrito de Riego.

Se concluyó que ADEHISIA es un modelo numérico que ofrece mayores ventajas que el modelo de English Marshall (1990) y que el modelo de Mannocchi y Mercarelli (1994) ya que además de incluir procesos que estos no incluyen, se adapta a las condiciones reales de información que existe en México.

Summary

In this investigation was developed an integral numerical model called ADEHISIA to designing or reviewing agricultural production systems, its general structure is based in: the available water valuation with both hydrological and drought analysis, the evapotranspiration valuation, the figure-out of a first water deficit level, comparing both available water and evapotranspiration, the definition crops function production, the economical production analysis, the optimal analysis and the agricultural system planning, design or reviewing.

The hidrological analysis was solved with statistical technics, the Fernandez and Salas' technic (1994, 1996, 1997 y 1998) was used to the drought analysis, the evapotranspiration valuation was done with Blaney and Criddle technic, two crops function production were proposed (Romero and Gracia, 2000), them were translated to second grade polinomial models to get the economical income, the lineal models were gotten to show the production costs and the optimal analysis were done using the English Marshall's technic (1990), finally the planning police were defined.

They are three the main thesis inflows, to know: the mathematical developed models to the crops function production, the procedure to get the planning polices and the integration of all the process that taking place in the agricultural system production; too one unforessen inflow was done, the correction of three ecuations of English Marshall's procedure (1990).

ADEHISIA was applied on the Mexican's Lagunera Region, gotten both, the results like the got in the Spring-Summer agricultural cicle 1997 and the police that three crops must be eliminated.

It was concluted that ADEHISIA is a numerical model that having more advantages that both English Marshall (1990) and Mannochi and Mercarelli (1994) procedures, because them don't included some process, and too that ADEHISIA is adapted to the actual conditions of Mexican's information.