

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA  
SISTEMA DE ESTUDIOS DE POSGRADO

MODELOS AGROCLIMATICOS PARA PREDICCIÓN DEL RENDIMIENTO  
DE MAIZ ASOCIADO CON SORGO EN EL SALVADOR

TESIS SOMETIDA A LA CONSIDERACION DE LA COMISION DEL PROGRAMA CONJUNTO DE ESTUDIOS  
DE POSGRADO EN CIENCIAS AGRICOLAS Y RECURSOS NATURALES DE LA UNIVERSIDAD  
DE COSTA RICA Y EL CENTRO AGRONOMICO TROPICAL DE INVESTIGACION  
Y ENSEÑANZA PARA OPTAR EL GRADO DE

MAGISTER SCIENTIAE

POR

PATRICIA RAMIREZ OBANDO

CENTRO AGRONOMICO TROPICAL DE INVESTIGACION Y ENSEÑANZA  
PROGRAMA DE CULTIVOS ANUALES  
TURRIALBA, COSTA RICA

1986

## DEDICATORIA

Con todo mi amor a:

MARCOS, MARCO E, MANRIQUE y DANIEL  
sin cuya comprensión e incondicional  
apoyo, no podría haber concluido  
este trabajo.

A mis padres y hermanos  
que siempre me colman de  
estímulo y afecto.

## AGRADECIMIENTO

Expreso mi mayor agradecimiento a las siguientes personas:

A José Arze Borda Director final de esta tesis, por su paciencia, su dedicación y su inapreciable colaboración como guía.

A Richard Hawkins, quien fuera mi profesor consejero durante la primera parte del programa de maestría por su dirección y decidido apoyo.

A Julio Henao, por haberme dado la orientación preliminar y haber puesto a mi disposición los archivos de datos .

A los miembros del Comité Asesor por sus sugerencias.

A Gustavo López por su ayuda en el manejo de los archivos de extrapolación para realizar los modelos.

A Silvia Ramírez por desarrollar los programas para el cálculo de fechas - de inicio de la estación lluviosa.

A Javier Icaza por su ayuda en elaboración del Programa de cálculo de las series de Fourier y las Cadenas de Markov.

A Ana Isabel Vargas de Erak, por su eficiencia al mecanografiar el texto.

A mis compañeros de la promoción 83-85, especialmente a Emérita Fuenmayor Fuenmayor, que me brindaron cariño y estímulo.

A todos muchas gracias.

## B I O G R A F I A

La autora nació en Escazú, Costa Rica, el 12 de setiembre de 1950.

Realizó estudios universitarios en la Universidad de Costa Rica , donde obtuvo el título de Bachiller en Física con Orientación en Meteorología en 1976.

En 1971 participó en el "IV Curso Internacional de Posgrado en Meteorología Agrícola" en el Instituto Meteorológico Israelí.

De 1972 a 1975 laboró como Encargada de la Sección de Agrometeorología del Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica y de 1976 a 1982 ocupó el cargo de Jefe del Departamento de Climatología.

En marzo de 1983 ingresó al Programa de Producción Vegetal del Sistema de Estudios de Posgrado, del Programa Conjunto Universidad de Costa Rica - Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (UCR-CATIE), en Turrialba Costa Rica, donde obtuvo el grado de Magister Scientiae en mayo de 1986.

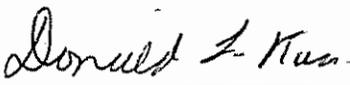
Esta tesis ha sido aceptada en su forma presente por la Comisión de Estudios de Posgrado del Programa Conjunto UCR-CATIE como requisito parcial para optar al grado de:

MAGISTER SCIENTIAE

Jurado:

  
\_\_\_\_\_  
José A. Arze B.      Profesor Consejero

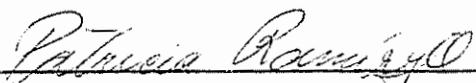
\_\_\_\_\_  
Jochen Heuveldop      Miembro del Comité

  
\_\_\_\_\_  
Donald Kass      Miembro del Comité

  
\_\_\_\_\_  
Pedro Oñoro      Miembro del Comité

  
\_\_\_\_\_  
Director del Programa de Estudios de Pos -  
grado en Ciencias Agrícolas y Recursos Na-  
turales.  
UCR - CATIE

  
\_\_\_\_\_  
Decano, Sistema de Estudios de Posgrado de  
la Universidad de Costa Rica

  
\_\_\_\_\_  
Patricia Ramírez Obando  
Candidato

# INDICE

Resumen	viii
Summary	x
Lista de cuadros	xii
Lista de figuras	xv
1. INTRODUCCION	1
2. REVISION DE LITERATURA	3
2.1 Transferencia de tecnología y datos climáticos	3
2.2 Modelos agroclimáticos	4
2.3 Análisis de la lluvia	8
2.3.1 Modelos de precipitación	8
2.3.2 Análisis de la lluvia en períodos cortos	9
2.3.3 Análisis de la lluvia diaria	9
2.3.4 Inicio de la estación lluviosa	10
3. MATERIALES Y METODOS	13
3.1 Los datos	14
3.1.1 Datos agronómicos	14
3.1.2 Datos climáticos	15
3.2 Análisis de ls datos	16
3.2.1 Modelos de rendimiento	16
3.2.2 Análisis del régimen de lluvias	17
3.2.2.1 Inicio de la estación lluviosa	18
3.2.3 Análisis de los registros pluviométricos diarios	23
3.2.3.1 Probabilidad de ocurrencia de un día lluvioso	24
3.2.3.2 La precipitación como proceso dependiente	26
3.2.3.3 Ajuste de curvas	28
3.2.3.4 Ajuste de una cadena de primer orden	30

3.3	Análisis de las cantidades de lluvia	32
3.3.1.	Ajuste de la lluvia a una distribución teórica.	32
3.3.2	LLuvia durante la floración	35
3.4	Rendimientos esperados	36
4.	MODELOS DETERMINISTICOS PARA PREDECIR EL RENDIMIENTO DE SISTEMAS MAIZ-SORGO	37
4.1	Selección de variables	37
4.1.1	Variables predictoras del rendimiento maíz sorgo	37
4.1.2	Variables predictoras del rendimiento del maíz	42
4.2	Validación de los modelos	46
5.	ANALISIS PROBABILISTICO DEL REGIMEN DE LLUVIAS EN EL SALVADOR	62
5.1	Fechas de floración del maíz y distribución de lluvia	63
5.2	Probabilidad de períodos secos	69
5.2.1	Dependencia de la lluvia diaria en El Salvador	69
5.2.2	Ocurrencia de días secos consecutivos	76
5.3	Inicio de las lluvias	81
5.3.1	Definición de "Inicio de las lluvias"	81
5.3.2	Distribución del "Inicio de las lluvias"	89
5.4	Lluvia probable durante la floración del maíz	94
6.	MODELO PROBABILISTICO	101
6.1	Probabilidad de lluvia insuficiente para el maíz	101
6.2	Rendimientos esperados	103
7.	DISCUSION GENERAL	112
7.1	Modelos de rendimiento	115
7.2	Régimen de lluvias en El Salvador	115
7.3	Rendimientos probables de los sistemas maíz sorgo	120
8.	CONCLUSIONES	122
9.	RECOMENDACIONES	125
10.	LITERATURA CITADA	126

## RESUMEN

### MODELOS AGROCLIMATICOS PARA LA PREDICCIÓN DEL RENDIMIENTO DE MAÍZ ASOCIADO CON SORGO EN EL SALVADOR.

Con el fin de obtener métodos que permitieran extrapolar la adaptación de tecnología en sistemas de cultivo, se elaboraron modelos agroclimáticos para predecir el rendimiento de sistemas maíz sorgo y maíz vigna, usando regresiones múltiples de variables edáficas y climáticas.

En la elaboración se usó la información de características de suelo, lluvia diaria y rendimientos de sistemas de maíz H9 + sorgo leche (con y sin fertilización), maíz M3B + sorgo sapo y maíz H9 + vigna CENTA VR1, obtenida en 20 parcelas experimentales sembradas en El Salvador en 1983.

Dos variables, profundidad del suelo y lluvia acumulada durante la prefloración y la floración del maíz, mostraron capacidad de predecir más del 80 por ciento de las variaciones en los rendimientos de los sistemas fertilizados, pero solo el 60 por ciento en los sistemas sin fertilización. Modelos que incluían variables de fertilidad como predictores, no mejoraron significativamente el porcentaje de variación explicada. Los modelos sin embargo, no mostraron ser aplicables en lugares donde estas variables tenían valores fuera del rango para el cual fueron desarrollados.

Para determinar el riesgo de la implantación de esos sistemas en un lugar dado, se analizaron los registros de lluvia diaria de 24 estaciones, a fin de caracterizar la estación lluviosa en El Salvador y determinar el riesgo de que la floración coincidiera con un período de lluvia insuficiente. El análisis mostró diferencias entre las zonas Occidental, Central, Oriental y Costera del país, tanto en el inicio de la estación lluviosa, que condiciona la siembra, como en el riesgo de períodos secos, que afecten el rendimiento de los cultivos.

El análisis indicó que la implantación del sistema es menos segura en la Zona Oriental donde el riesgo de lluvia insuficiente durante la floración es mayor que en las otras zonas. El análisis mostró también que, en la zona Oriental, las fechas de siembra tempranas aumentan la posibilidad de obtener lluvia adecuada durante la floración, en tanto que en las zonas Occidental y Central esa probabilidad se incrementa con fechas de siembra más tardías.

Los modelos determinísticos de regresión múltiple, se convirtieron en probabilísticos, mediante la inclusión de las probabilidades de lluvia durante la floración. Los modelos probabilísticos permitieron estimar rendimientos esperados de los sistemas tanto en diferentes lugares como en un mismo lugar en diferentes años.

Palabras clave : 1. Extrapolación de tecnología en sistemas de cultivo. 2. Lluvia en El Salvador. 3. Modelos agroclimáticos. 3. Rendimientos esperados en sistemas maíz sorgo.

## SUMMARY

### AGROCLIMATIC MODELS FOR YIELD PREDICTION OF MAIZE SORGHUM INTERCROPING SYSTEMS IN EL SALVADOR.

Soil, climate and yield data, obtained from 20 experimental plots in El Salvador in 1983, were used to develop multiple regression models, to predict yield of maize-sorghum and maize-vigna intercrop systems, with and without fertilization.

Two variables, effective depth of soil and accumulated rain during flowering stage of maize, shown to predict more than 80 per cent of the variation in yield of fertilized system, but only 60 per cent of the unfertilized systems.

Daily rain records of 20 pluviometric stations in El Salvador were analyzed to characterize the rainfall regime and determine the probabilities of dry spells or adequate rain during the flowering stage.

Analysis showed differences in the rainfall regime between the regions where the experiments were planted, that may affect the extrapolation of the technology in the intercrop systems.

Rainfall probabilities showed that extrapolation is more risky under the conditions of "Zona Oriental" where the risk of inadequate rain during flowering stage exceeds 60 percent.

In "Zona Oriental" early planting dates diminish the risk of inadequate rain during the flowering stage, but late dates are less risky in "Zona Occidental" and "Zona Central".

Rainfall probabilities were used to calibrate the models predicting yield under different levels of probability.

Predictions enable to estimate the risk of production for the systems at different places and between years in one particular place.

Key words: 1. Agroclimatic models. 2. Extrapolation of technology in maize sorghum intercrop systems. 3. Probable yield in maize- sorghum intercrop systems. 4. Rainfall regime in El Salvador.

## LISTA DE CUADROS

No. cuadro		Página
1	Valores del coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y coeficientes de variación (C.V.) de los modelos con datos de El Salvador para rendimiento combinado de los sistemas maíz-sorgo.	39
2	Contribución porcentual de cada variable a la variación total explicada por el modelo de siete variables, para predecir el rendimiento combinado de los sistemas maíz-sorgo.	39
3	Valores del coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y coeficientes de variación (C.V.) de los modelos con datos de El Salvador para el rendimiento del maíz en los sistemas maíz-sorgo y maíz-vigna.	41
4	Contribución porcentual de cada variable a la variación total explicada por el modelo de siete variables, para predecir el rendimiento del maíz en los sistemas maíz-sorgo y maíz-vigna.	42
5	Estimaciones de los parámetros de regresión de rendimiento combinado estimado con los modelos vs. rendimiento observado en Guatemala y prueba de homogeneidad de los coeficientes de regresión.	48
6	Estimaciones de los períodos de regresión rendimiento del maíz estimado con los modelos vs. rendimiento observado en Guatemala y prueba de homogeneidad de los coeficientes de regresión.	50

No. cuadro		Página
7	Coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y residuos promedio ( $\bar{e}$ ) con diferentes modelos para el pronóstico del rendimiento combinado en los sistemas maíz-sorgo.	55
8	Coeficientes de determinación ( $R^2$ ) y residuos promedios ( $\bar{e}$ ) con diferentes modelos para el pronóstico del rendimiento del maíz en los sistemas maíz-sorgo y maíz-vigna.	55
9	Coeficientes de regresión de los modelos para predicción del rendimiento combinado maíz-sorgo con residuos mínimo.	58
10	Coeficiente de regresión de los modelos para predicción del rendimiento del maíz con residuos mínimo en Guatemala.	58
11	Duración del período con probabilidad de diez días secos consecutivos: a) menor del 25 por ciento y b) menor del 10 por ciento.	79
12	Pentada en que se habían iniciado las lluvias, según cada uno de los criterios a) En el 50 por ciento de los casos b) En el 75 por ciento de los casos.	87
13.	Pentada promedio en que se inician la lluvia, desviación típica y coeficiente de variación.	88

No cuadro		Página
14	Inicio de la estación lluviosa en El Salvador según el criterio único.	38
15	Probabilidad de tener menos de determinadas cantidades de lluvia durante el período de floración del maíz en varios lugares de El Salvador para dos fechas de siembra	100
16	Probabilidad de no tener lluvia adecuada durante la floración del maíz para : a) fecha de siembra con frecuencia 50%, b) fecha de siembra con frecuencia 75%.	102
17	Rendimientos esperados con diferentes niveles de probabilidad, estimados con los modelos de dos variables en Ahuachapán.	105
18	Rendimientos esperados con diferentes niveles de probabilidad, estimados con el modelo de dos variables en La Unión.	107
19	Rendimientos esperados con diferentes niveles de probabilidad, estimados con el modelo de dos variables en Nueva Concepción.	109
20	Rendimientos esperados con diferentes niveles de probabilidad estimados con el modelo de dos variables en Zacatecoluca.	110

## LISTA DE FIGURAS

Figura No		Página
1 a-f	Rendimientos combinados del sistema maíz H9+sorgo leche(fertilizado), estimados con modelos con diferente número de variables versus los rendimientos observados en Guatemala.	47
2 a-f	Residuos rendimiento observado menos estimado como función de las estimaciones del rendimiento combinado en el sistema H9+sorgo leche (fertilizado) con modelos de : a) dos, b)tres, c)cuatro, d)cinco, e) seis, f) siete variables.	53
3	Rendimiento estimado como función del rendimiento observado en el sistema maíz H9+sorgo leche (fertilizado) con un modelo de dos variables en El Salvador.	60
4	Lluvia decádica durante el período de abril a noviembre en Ahuachapán, El Salvador.	65
5	Lluvia decádica durante el período de abril a noviembre en Nueva Concepción, El Salvador.	65
6	Lluvia decádica durante el período de abril a noviembre en La Unión , El Salvador	66
7	Lluvia decádica durante el período de abril a noviembre en Zacatecoluca, El Salvador	66
8	Variación de la probabilidad de un día lluvioso antecedido por otro lluvioso, en Zacatecoluca, El Salvador	70

Figura No.		Página
9	Variación de la probabilidad de un día lluvioso antecedido de un día seco, durante la estación lluviosa en Zacatecoluca, El Salvador.	70
10	Variación de la probabilidad de ocurrencia de un día lluvioso en Zacatecoluca, El Salvador.	75
11	Variación de la probabilidad de un día seco en Zacatecoluca, El Salvador.	75
12	Probabilidad de obtener: tres, cinco o diez días secos consecutivos durante la estación lluviosa en Ahuachapán, El Salvador.	77
13	Probabilidad de obtener: tres, cinco o diez días secos consecutivos durante la estación lluviosa en La Unión, El Salvador.	77
14	Probabilidad de obtener, tres, cinco o diez días secos consecutivos durante la estación lluviosa en Nueva Concepción, El Salvador.	78
15	Probabilidad de tener tres, cinco o diez días secos consecutivos durante la estación lluviosa en Zacatecoluca, El Salvador.	78
16	Distribución de frecuencia del "Inicio de las lluvias en Zacatecoluca, El Salvador.	79

Figura No.		Página
17	Distribución de frecuencia del "Inicio de las lluvias en Jujutla, El Salvador.	84
18	Distribución de frecuencia del "Inicio de las lluvias en Nueva Concepción, El Salvador.	35
19	Distribución del "Inicio de las lluvias en El Salvador con frecuencia 50 por ciento	91
20	Distribución de "Inicio de las lluvias en El Salvador con frecuencia 75 por ciento.	91
21	Distribución de la probabilidad de lluvia durante la floración en Ahuachapán, El Salvador para dos fechas posibles de siembra.	95
22	Distribución de la floración de lluvia durante la floración en La Unión, El Salvador para dos fechas posibles de siembra.	95
23	Distribución de la probabilidad de lluvia durante la floración, en Nueva Concepción, El Salvador para dos fechas posibles de siembra.	98
24	Distribución de la probabilidad de lluvia durante la floración en Zacatecoluca, El Salvador para dos posibles fechas de siembra.	98
25	Rendimientos esperados con diferentes niveles de probabilidad para el sistema maíz H 9 + sorgo leche con diferentes niveles de probabilidad	111

## APENDICE

### LISTA DE CUADROS

No de cuadro		Página
1	Paquete tecnológico de maíz asociado con sorgo	136
2	Paquete tecnológico de maíz asociado con vigna	136
3	Ubicación de los sitios experimentales en El Salvador.	137
4	Ubicación de los sitios experimentales en Guatemala.	137
5	Valores de las variables edafoclimáticas en los sitios experimentales en El Salvador.	138
6	Valores de las variables edafoclimáticas en los sitios experimentales en Guatemala.	139
7	Valores medios , desviación típica y rango de las variables edafoclimáticas.	140
8	Clasificación de los suelos en los sitios experimentales en El Salvador Guatemala.	140
9	Promedio anual de los principales factores climáticos en las zonas donde se ubicaron los experimentos en El Salvador , en 1983.	142
10	Ubicación y período de registro de las estaciones pluviométricas.	142
11	Rendimiento observado en las parcelas experimentales en El Salvador.	143
12	Rendimiento observado en las parcelas experimentales en Guatemala.	143
13	Capacidad de predicción de los modelos para el rendimiento combinado maíz H9+ sorgo leche.	144
14	Criterio de definición del "Inicio de las lluvias.	144

No de cuadro		Página
15	Prueba de F para los coeficientes de los armónicos de la curva de dos días lluviosos ( $p_{00}$ ) en función del día del período(t) en Zacatecoluca.	145
16	Coeficientes de las ecuaciones $p_{i,j}$ versus día del período en cuatro lugares de El Salvador.	146
17	Prueba de ajuste de la lluvia decádica a la distribución gamma incompleta mixta.	146
18	Fechas de siembra y floración del maíz en las parcelas experimentales en El salvador.	146
19	Coeficientes de regresión de los modelos de dos variables para la predicción del rendimiento combinado maíz- sorgo.	149
20	Coeficientes de regresión de los modelos de dos variables para la predicción del rendimiento del maíz en el sistema maíz sorgo.	149
21	Correspondencia del día calendario con el número del día del período (t).	150
22	Prueba de medias para las fechas de inicio de las lluvias definidas por los criterios $d_1$ y $d_2$ .	151
23	Prueba de varianzas para las fechas de "inicio de las lluvias" definidas por los criterios $d_1$ y $d_2$ .	152

## APENDICE

### LISTA DE FIGURAS

Figura No.		Página
1	Ubicación de las estaciones pluviométricas y las áreas experimentales en El Salvador	153
2	Valores medios mensuales de las principales variables climatológicas en las áreas experimentales.	154
3	Ajuste entre el rendimiento observado y el estimado con el modelo de Hawkins 1984.	155
4	Distribución de frecuencia acumulada del "Inicio de las lluvias" con el criterio único en tres lugares en El Salvador.	155
5	Probabilidad de tener tres, cinco o diez días secos consecutivos en El Jobo, El Salvador	156
6	Probabilidad de tener tres, cinco o diez días secos consecutivos en Metapan, El Salvador	157
7	Probabilidad de tener tres, cinco o diez días secos consecutivos en Santa Ana, El Salvador	158
8	Distribución de la probabilidad de lluvia durante la floración en Santa Ana, El Salvador	158

Figura No.

Página

9

Distribución de la probabilidad de lluvia  
durante la floración en El Jobo, El Salvador

158