



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

Impactos en el rendimiento del aguacate bajo análisis futuro del clima en Uruapan, Michoacán

TESIS

Que como requisito para obtener el grado de
Maestro en Ciencias

Presenta

Aurea De Jesús Romo

Asesor:

Dra. Ana Cecilia Conde Álvarez



México D.F. Septiembre del 2012





Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

Impactos en el rendimiento del aguacate bajo
análisis futuro del clima en Uruapan,
Michoacán

Aurea De Jesús Romo

Dedicatoria

Dios

*Gracias por darme la fuerza y voluntad para desarrollar estos estudios,
por rodearme de personas de las cuales aprendo más y me motivan a
seguir aprendiendo. Y por darme vida para lograr mi misión.*

Aurea

*Es mejor cojear por el camino que avanzar a grandes pasos fuera de él.
Pues quien cojea en el camino, aunque avance poco, se acerca a la meta,
mientras que quien va fuera de él, cuanto más corre, más se aleja.*

San Agustín

Agradecimientos

A mi familia por su cariño y aprecio

A mis maestros, comité tutorial y sinodales por su tiempo y conocimientos

A la Dra. Ana Cecilia Conde Álvarez por su incondicional apoyo académico y económico

Al Centro de Ciencias de la Atmósfera por darme la oportunidad de estudiar y ser su alumna

A la Universidad Nacional Autónoma de Mexico por ser una gran institución

Al CONACYT por la beca otorgada por mis estudios de maestría

A Luis Moreles por su valiosa amistad, motivación e importante apoyo en este trabajo

Resumen

Este trabajo presenta un estudio del impacto en el rendimiento del cultivo del aguacate en Uruapan, Michoacán, integrando factores económicos y fenómenos climáticos mediante la utilización de un modelo analítico trascendental, enmarcado dentro de los denominados modelos conceptuales simples. Con esto fue posible avanzar en la comprensión de la interacción entre el clima y la economía y su afectación en el cultivo del aguacate. Se ajustó una fenología del aguacate, la cual permitió analizar la sensibilidad del rendimiento ante cambios graduales en la duración de la temporada de crecimiento y la precipitación durante la temporada primavera-verano. Se estudió el rendimiento bajo un análisis futuro del clima y se determinó un conjunto realista de variables climáticas que maximizan el rendimiento del cultivo. Utilizando escenarios regionales para México se realizó una proyección del rendimiento al año 2050, a partir de las salidas de los modelos de circulación general ECHAM5 y HADGEM1 para los escenarios de emisiones A1B, A2 y B1, lo cual dio como resultado un descenso en el rendimiento respecto a un escenario base construido utilizando diferentes panoramas económicos.

Palabras clave: modelo analítico trascendental; aguacate; Uruapan; rendimiento; escenarios de emisiones.

Contenido

1. Introducción	1
2. Diseño de metodologías y selección de modelos	5
2.1. Selección de modelos	5
2.2. Validación del modelo: pruebas de diagnóstico	7
2.3. La especificación del modelo empírico	10
2.3.1. Formas funcionales flexibles	11
2.3.2. Función de producción Cobb-Douglas	12
3. Materiales y métodos	15
3.1. Región de estudio	15
3.2. Uruapan y el cultivo del aguacate	17
3.3. Fenología del cultivo	19
3.4. Bases de datos	22
3.5. Variables meteorológicas a considerar	25
3.6. Especificación e interpretación del modelo	30
3.7. Estimación del modelo	32
3.8. Evaluación del pronóstico	37
4. Aplicación del modelo considerando escenarios	41
4.1. Escenarios de cambio climático	41
4.2. Aplicación del modelo considerando panoramas económicos	46
4.2.1. Impacto potencial en la producción	46
4.2.2. Predicciones bajo tres panoramas económicos	47
5. Conclusiones	53
Apéndice	

A. Pruebas de diagnóstico para el modelo de regresión	57
A.1. Diagnóstico de prueba para distribuciones estadísticas	57
A.1.1. Supuesto $E(u_i) = 0$	57
A.1.2. Heteroscedasticidad. $Var(u_i) = \sigma^2$	58
A.1.3. No autocorrelación. $Cov(u_i, u_j) = 0$	59
A.1.4. La variable X_i es no aleatoria. $Cov(u_i, x_i) = 0$	60
A.1.5. Los errores se distribuyen normalmente. $u_i \sim N(0, \sigma^2)$	60
A.1.6. Multicolinealidad	61
A.1.7. Error de especificación	62
 Bibliografía	 63

Capítulo 1

Introducción

El clima es uno de los factores más importantes y de gran impacto en el desarrollo de las sociedades humanas. Éste afecta en gran medida las actividades comerciales, sociales y de casi cualquier ámbito en la humanidad. Por ello es de gran importancia describir y pronosticar las características asociadas al clima en todas sus manifestaciones. Recientemente la evidencia a favor de un calentamiento generalizado del sistema climático se ha ido incrementando, como lo muestra el cuarto reporte de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC-AR4; IPCC-WGI, 2007). El conocer la evolución futura del sistema climático nos permitirá establecer medidas de adaptación frente a futuros cambios en éste. La observación y monitoreo de la atmósfera, un entendimiento mejorado de las variaciones climáticas naturales, la oportuna detección de los cambios en los extremos del clima y el uso de esta información en aplicaciones socioeconómicas, representan algunas acciones estratégicas para enfrentar los cambios esperados del clima.

Los países afectados más adversamente por los cambios en el clima serán aquellos que se localizan en regiones tropicales y subtropicales, donde se ubica la mayor parte de los países en desarrollo, y por lo tanto, con mayores índices de pobreza y hambre (IPCC-AR4; IPCC-WGI, 2007). Una de las actividades que se vería más afectada por estos cambios, especialmente por los aumentos de temperatura media global, es la agricultura. El informe del IPCC-WGI (2007 en Gay et al. 2006) indica que:

- Se proyecta un ligero incremento en la productividad de los cultivos en las latitudes medias y altas, con incrementos promedios regionales de temperatura entre 1°C y 3°C, dependiendo del tipo de cultivo.
- A menores latitudes, especialmente en regiones tropicales y con sequía estacional, se proyecta una reducción en la productividad de los cultivos, incluso para incrementos pequeños en la temperatura media global (de 1°C a 2°C), lo cual aumentará el riesgo de hambruna.
- Globalmente, a partir de incrementos en las temperaturas medias regionales de entre 1°C y 3°C, se proyecta un aumento en el potencial para la producción agrícola, pero

éste se reduce para incrementos mayores en las temperaturas.

En general, el principal impacto del cambio del clima sobre los ecosistemas se manifestará, previsiblemente, en la rapidez y magnitud con que cambien los valores medios y extremos del clima. Los efectos secundarios del cambio del clima consistirían por ejemplo: en incendios, plagas o enfermedades que favorecerían a algunas especies más que a otras, alterando, por consiguiente, la composición de los ecosistemas.

El cambio actual del clima se está produciendo en un período de creciente demanda de alimentos, semillas, fibra y combustible, lo cual podría dañar irreversiblemente la base de recursos naturales de la que depende la agricultura. La relación entre el cambio del clima y la agricultura es bidireccional: la agricultura afecta al clima de varias formas importantes y el cambio del clima afecta, en general, negativamente a la agricultura (IAASTD, 2008).

McCarthy et al. (2001) menciona que los principales factores conductores de respuestas agrícolas al cambio climático son los efectos biofísicos y los factores socioeconómicos. La producción de cultivos es afectada biofísicamente por las variables meteorológicas cambiantes, incluyendo las temperaturas en aumento, los regímenes cambiantes de la precipitación y los niveles crecientes de dióxido de carbono atmosférico. Los efectos biofísicos del cambio climático sobre la producción agrícola dependen de la región y del sistema agrícola, y los efectos varían a lo largo del tiempo. Los factores socioeconómicos influyen sobre las respuestas a los cambios en la productividad de los cultivos, con cambios de precio y cambios en la ventaja comparativa. La respuesta final depende de las estrategias de adaptación agrícola en cada región. La combinación de efectos biofísicos y socioeconómicos puede resultar en:

- Cambios en la combinación de cultivos empleados, y por lo tanto, en el tipo de agricultura y uso de la tierra rural.
- Cambios en la producción, en los ingresos de la finca y en el empleo rural.
- Cambios en los ingresos rurales, en la contribución al Producto Interno Bruto (PIB) nacional y en las ganancias agrícolas de exportación.

Uno de los grandes retos dentro de la investigación actual es el de realizar estudios de vulnerabilidad a escala regional que permitan diseñar estrategias de adaptación de los sistemas humanos sobre los que descansa la productividad y bienestar de nuestras sociedades. En el caso de México, el quinto país más biodiverso, se espera una reducción importante en los rendimientos de sus cultivos, un decremento significativo en su disponibilidad de agua, un aumento en el número de personas expuestas a enfermedades como el paludismo y el cólera, así como un aumento en el riesgo de inundaciones, producto de lluvias torrenciales y en el aumento del nivel del mar (IPCC-WGI, 2007).

Los métodos para evaluar los impactos del clima sobre la producción de cultivos y la evaluación de estrategias de adaptación se desarrollan extensamente, y son muy utilizados

por científicos, productores comerciales y gerentes de recursos. Uno de los principales desafíos que enfrentan todas las evaluaciones agricultura-clima es el análisis de importantes factores biofísicos y socioeconómicos, porque éstos deben ser derivados de interacciones complejas entre sistemas biofísicos y socioeconómicos que son difíciles de modelar (IPCC-WGI, 2007).

Además, diferentes herramientas pueden ser utilizadas para examinar los impactos socioeconómicos del cambio climático. El Country Studies Program de los Estados Unidos documentó un conjunto de métodos y modelos para desarrollar escenarios de cambio climático y socioeconómicos que se pueden usar para evaluar los impactos potenciales sobre los recursos costeros, la agricultura, la ganadería, los recursos hídricos, la salud humana, la vegetación terrestre, la fauna y las pesquerías. Estos métodos muchas veces pueden ser muy útiles para el pronóstico económico (Benioff et al. 1996). Enfoques más complejos tales como modelos económicos de regresión, modelos microeconómicos y macroeconómicos, modelos de finca, modelos domésticos y comunitarios también pueden ser utilizados.

Cada uno de estos diferentes métodos proporciona información sobre distintos tipos de impactos. Por ejemplo, los índices agroclimáticos sencillos pueden ser utilizados para analizar los desplazamientos de grandes áreas de zonas cultivadas, mientras que los modelos de crecimiento de cultivos basados en el proceso deben ser utilizados para analizar los cambios en los rendimientos de los cultivos. Los efectos sobre el ingreso, el sustento y el empleo pueden ser evaluados utilizando formas económicas y sociales (Ziervogel et al. 2006). Además, se pueden emprender estudios utilizando un enfoque regional o un enfoque específico para un sitio.

Los modelos para la evaluación de los impactos potenciales de cambio del clima desarrollados con las técnicas econométricas y estadísticas constituyen herramientas útiles para integrar factores climáticos y socioeconómicos en la evaluación cuantitativa de los impactos potenciales del cambio del clima en sectores y actividades de interés (Gay et al. 2006). Hussain y Mudasser (2007) evaluaron los impactos de cambio del clima para los rendimientos del trigo en Pakistán: Mediante un modelo trascendental determinaron las tendencias de aumento de temperatura y precipitación, reduciendo la longitud del periodo vegetativo y aumentando el rendimiento. Kaufmann (1997) propuso una metodología para la estimación de un modelo híbrido de rendimiento de maíz en los Estados Unidos que integra los determinantes sociales y climáticos que corresponden a las etapas fenológicas del cultivo.

En ese sentido, el objetivo general de este trabajo se enfoca en estudios de impacto en el sector agrícola y económico asociados al cambio climático. En particular se desarrollará un modelo basado en el modelo analítico trascendental de Hussain y Mudasser (2007), para el rendimiento del aguacate en Uruapan, Michoacán, producto del cambio en las etapas fenológicas (fechas de floración y maduración del fruto) para árboles frutales, con el fin de realizar estudios de impacto de cambios del clima. También se determinarán cambios en las variables climáticas a través de la utilización de escenarios regionales de cambio climático para México (Conde et al. 2011) utilizando las salidas de los modelos de circulación general

ECHAM5 y HADGEM1 para la temperatura y precipitación mensuales para el horizonte 2050, y para los escenarios de emisiones A1B, A2 y B1, los cuales consideran una gama de posibles condiciones de desarrollo social y económico global para los próximos años. De la misma manera se determinarán cambios en las variables económicas mediante la creación de panoramas económicos, lo cual permitirá realizar comparaciones entre los distintos escenarios de cambio climático para cada panorama. Finalmente, a partir del modelo propuesto y de la generación de escenarios climáticos y económicos se realizarán proyecciones del rendimiento del aguacate y se intentará identificar algunos impactos potenciales del clima.

El modelo desarrollado en este trabajo se enmarca dentro de los denominados modelos conceptuales, los cuales no pretenden dar una descripción detallada de un fenómeno particular, tal como la hacen los modelos de pronóstico o de circulación general. En vez de eso, el objetivo principal de estos modelos es aprender acerca de algunos de los procesos involucrados en la descripción del fenómeno a estudiar desde una perspectiva fundamental.

La tesis se estructura de la siguiente manera: En el segundo capítulo se presentará una introducción a las técnicas y fundamentos estadísticos utilizados para estimar un modelo climático-económico para el cultivo del aguacate. En el tercer capítulo se abordará la región de estudio y se profundizará en los elementos agroclimáticos y productivos que afectan el rendimiento del aguacate. Se discutirá el modelo analítico propuesto para estudiar el rendimiento del cultivo, y se estimará e interpretará para asegurar que pueda ser usado para proyectar un panorama basado en suposiciones establecidas por escenarios de cambio climático del IPCC-WGI (2007). En el cuarto capítulo se integrarán escenarios de cambio climático y se analizará el impacto de las variaciones climáticas en el rendimiento del aguacate mediante la creación de tres panoramas económicos. Finalmente en el quinto capítulo se presentarán las conclusiones del trabajo y se ofrecerán posibilidades de trabajo futuro a desarrollar en esta línea de investigación.

Capítulo 2

Diseño de metodologías y selección de modelos

En este capítulo se aborda la importancia de construir un modelo que permita simular el rendimiento del cultivo basándose en los modelos de simulación de cultivos e integrando modelos económicos en un modelo econométrico o empírico (que contenga cultivo y economía) que permita evaluar los impactos del clima (Hussain y Mudasser, 2007). Mediante los métodos estadísticos se especifica, estima y valida el modelo (Brooks, 2008), para finalmente poder aplicarlo en la evaluación del impacto del clima en el cultivo.

2.1. Selección de modelos

Dos clases de modelos son identificados para examinar la respuesta de cultivos agrícolas.

1. Modelos de simulación de cultivos: tienen varias aplicaciones actuales y potenciales en respuesta a temas relacionados con investigación, manejo de cultivos y planificación. Estos modelos pueden ayudar a la comprensión de las interacciones genético-fisiológico-ambientales, con una integración interdisciplinaria. Permiten definir estrategias de producción en la etapa de planificación de un cultivo futuro o bien ayudar a tomar decisiones tácticas durante el ciclo del cultivo, tales como prácticas culturales, fertilización, irrigación y uso de pesticidas (Hussain y Mudasser, 2007).

Como herramienta de planificación permiten cuantificar a través de la proyección el impacto de los procesos de erosión, contaminación por agroquímicos, distintas estrategias ante el cambio climático y el pronóstico de rendimiento a nivel regional.

Modificando la escala de espacio y tiempo los modelos nos permiten abordar fenómenos climáticos como el ENSO (El Niño Oscilación del Sur), analizando en forma interactiva el impacto de la variabilidad climática y las decisiones de manejo sobre la productividad de los cultivos, resultado difícil de obtener a partir de análisis estadísticos clásicos o experimentos agronómicos tradicionales.

Muy recientemente, algunos estudios han utilizado resultados de modelos de simulación climática para los modelos económicos para la evaluación integrada de los ecosistemas. Los modelos de simulación de cultivos y modelos integrados de biofísica-económica requieren la medición registrada por el crecimiento del cultivo y los rendimientos para la calibración y validación, así como información sobre el clima, los suelos y manejo de los cultivos locales. Estos datos no están fácilmente disponibles en muchos países en desarrollo (Hussain y Mudasser, 2007).

2. El segundo tipo de modelo es el modelo econométrico o empírico; el objetivo de un modelo econométrico es explicar la variación que presenta una variable, llamada dependiente, por medio de la variación de otras variables que se llaman independientes. Esto implica que el poder explicativo de una variable depende de lo mucho o poco que varíe y de la relación que tenga su patrón de variación con el de la variable dependiente. Específicamente, se sintetiza de manera breve algunos de los aspectos teóricos y prácticos asociados con el modelo de regresión lineal simple. El modelo de regresión lineal simple es muy popular en el trabajo estadístico aplicado debido a que permite capturar la dependencia lineal que existe entre variables de diversa naturaleza: climáticas, biológicas, financieras, económicas, etc. Dicho modelo, como cualquier otro modelo estadístico, puede ser especificado como un conjunto de supuestos acerca de la estructura probabilística de las variables de interés (Spanos, 1999).

Para modelar de manera adecuada el comportamiento de un fenómeno de carácter climático se requiere primero identificar las características probabilísticas de las series y después capturarlas mediante un modelo estadístico, económico o econométrico. “La econometría no es lo mismo que la estadística económica. Tampoco es idéntica a lo que llamamos teoría económica general, aunque una parte considerable de esta teoría tiene un carácter cuantitativo. Tampoco debería la econometría ser tomada como sinónimo de la aplicación de las matemáticas a la economía. La experiencia ha demostrado que cada uno de esos tres puntos de vista, el de la estadística, el de la teoría económica y el de las matemáticas, es una condición necesaria pero no suficiente por sí misma para el entendimiento real de las relaciones cuantitativas en la vida económica moderna. Es la unificación de las tres, la que es poderosa. Es esta unificación la que constituye la econometría” (Álvarez et al. 2003).

Álvarez et al. (2003) menciona que los modelos económicos que se emplean en econometría tienen dos características: son modelos causales y están expresados en forma matemática. El objetivo fundamental de estos modelos es representar una estructura determinada, es decir, una relación estable entre una serie de variables. Las variables se suelen clasificar en dos grandes grupos, la dependiente o endógena y las independientes o exógenas. Los modelos tratan de explicar una parte de una realidad compleja que se representa mediante variables endógenas, cuyo valor explica el propio modelo, y variables exógenas que afectan al fenómeno analizado y cuya determinación no se explica en el mo-

delo. El modelo permite analizar cómo cambian las variables endógenas cuando cambian las variables exógenas.

En econometría, al igual que en economía, el objetivo es explicar el comportamiento de una variable en función de otras. Por eso, el punto de partida de la econometría es el modelo económico. La diferencia está en que la econometría pretende cuantificar la relación entre las variables económicas.

Los principales elementos que debe tener todo buen trabajo empírico son:

- **Una buena pregunta.** Es la que hace referencia a un tema interesante y que además no tiene una respuesta obvia. Probablemente no sea una pregunta técnica, sino económica.
- **Buenos datos.** Los datos deben permitir responder a la pregunta planteada anteriormente.
- **Un modelo.** Debe permitir expresar la pregunta matemáticamente. De ser posible, es preferible contar con un modelo que tenga algún tipo de comportamiento económico. La elección del modelo es, probablemente, el principal problema al que se enfrenta el investigador aplicado. El problema de la especificación suele resolverse en la investigación aplicada empleando un modelo estadístico con base en un modelo ya desarrollado y reportado en la literatura, en las características probabilísticas de las series en cuestión. En caso de que las pruebas de diagnóstico revelen la no validez de ciertos supuestos entonces se procede a re-especificar el modelo, proponiendo nuevos supuestos que conduzca a un modelo estadístico diferente y mejor.

2.2. Validación del modelo: pruebas de diagnóstico

Durante todo el proceso se da por supuesto que el modelo es adecuado y que sirve para alcanzar los objetivos planteados. Pero, ¿Qué supone que el modelo sea adecuado? ¿Cómo se puede saber si se cumplen las hipótesis del modelo clásico?

Este aspecto es fundamental, ya que el criterio principal para juzgar la validez de un modelo es estudiar si las hipótesis que se han realizado para construirlo son ciertas. Ello requiere un análisis cuidadoso de los residuos u_i . El análisis de los residuos tiene por objeto contrastar a posteriori las hipótesis del modelo lineal. La información mostrada a continuación está tomada de Brooks (2008) .

Básicamente, habrá que comprobar lo siguiente:

- $E(u_i) = 0$
- $Var(u_i) = \sigma^2$
- $Cov(u_i, u_j) = 0$

- $Cov(u_i, x_i) = 0$
- $u_i \sim N(0, \sigma^2)$

Supuesto $E(u_i) = 0$

El primer supuesto requiere que el valor promedio de los errores sea cero. La teoría económica sugiere que, si la regresión no incluye una intercepción, y el valor medio de los errores fuera distinto de cero, varias consecuencias indeseables puedan surgir. En primer lugar R^2 podría ser negativa lo que implica que el promedio de la muestra, \bar{y} explica más de la variación en y que las variables dependientes. En segundo lugar, y más fundamentalmente, una regresión sin parámetro intercepción podría dar lugar a sesgos potencialmente graves en las estimaciones de coeficiente de la pendiente. R^2 y \bar{R}^2 por lo general carecen de sentido en este contexto. Esto surge ya que el valor promedio de la variable dependiente, \bar{y} , no será igual a la media de los valores ajustados del modelo.

Heteroscedasticidad. $Var(u_i) = \sigma^2$

Se supone hasta ahora que la varianza de los errores es constante, σ^2 , esto se conoce como la hipótesis de homoscedasticidad. Si los errores no tienen una variación constante, se dice que son heterocedásticos. El problema de heteroscedasticidad repercute directamente sobre la estimación de los parámetros de la regresión. Los estimadores seguirán siendo insesgados y consistentes pero no eficientes.

No autocorrelación. $Cov(u_i, u_j) = 0$

El problema de autocorrelación se presenta en una regresión cuando los errores de las diferentes observaciones están relacionados en el tiempo. Otra causa de la autocorrelación es la presencia de sesgo de especificación en el modelo, principalmente por omisión de variables importantes, las cuales pasan a formar parte del error de la regresión. Se argumenta, que la manipulación de información puede llegar a generar también autocorrelación. Finalmente, modelos especiales como los de rezagos distribuidos y los autoregresivos pueden originar autocorrelación.

La variable X_i es no aleatoria. $Cov(u_i, x_i) = 0$

No existe relación entre el error y la correspondiente variable x , debe tener al menos dos valores diferentes. Se supone que x y u tienen una influencia separada y aditiva sobre y .

Los errores se distribuyen normalmente. $u_i \sim N(0, \sigma^2)$

Uno de los supuestos claves en el modelo de regresión que permite desarrollar pruebas hipótesis basadas en los estadísticos F y T , es la normalidad de los errores. Si los residuos del modelo no siguen distribución normal se restringe la validez estadística de las pruebas.

Multicolinealidad

La multicolinealidad tiene que ver con la relación lineal entre algún conjunto de variables independientes en un modelo de regresión. Cualquier relación lineal entre las variables independientes puede generar problemas de multicolinealidad. Por lo general, existen dos tipos de multicolinealidad:

- **Multicolinealidad Perfecta:** Para entender el concepto de multicolinealidad perfecta es necesario expresar las variables independientes del modelo en términos de una combinación lineal cuya suma algebraica sea igual a cero.
- **Multicolinealidad Alta:** Esta se presenta cuando la colinealidad que existe entre variables independientes es muy fuerte aunque no perfecta. La multicolinealidad se presenta debido a la tendencia definida de ciertas variables a lo largo de la muestra o a través del tiempo. Tendencias o patrones de comportamiento similares de las variables independientes en un modelo de regresión sustentan la multicolinealidad. La multicolinealidad se puede presentar en datos provenientes de series de tiempo.

Error de especificación

Uno de los supuestos del modelo clásico de regresión lineal es que el modelo se encuentra bien especificado, es decir que su forma funcional y las variables que lo componen representan una formulación correcta.

Existen cuatro tipos de fuentes o razones que generan error de especificación:

- **Omisión de una variable relevante en el modelo.** Si una variable que afecta de manera importante la variable dependiente del modelo es omitida, se incurre en error de especificación. Esta situación hace que los estimadores sean sesgados.
- **Inclusión de una variable irrelevante.** En algunos casos se incorporan variables explicativas adicionales. Si estas no afectan significativamente a la variable dependiente se comete error de especificación.
- **Error de medición.** Cuando el valor de las observaciones que se tienen en una muestra no es el real o verdadero, los datos cuentan con error de medición. Si el error se presenta en la variable dependiente como en la independiente, los estimadores de mínimos cuadrados serán sesgados.

2.3. La especificación del modelo empírico

En este apartado se analizan los problemas más relevantes relacionados con la especificación del modelo empírico. En concreto, se empieza estudiando en detalle la importancia de la forma funcional y la noción de flexibilidad. Después se define el concepto de forma funcional flexible enunciando las más usadas en trabajos empíricos y se discute el problema de la elección de la forma funcional. Por último, se presentan unas formas funcionales especiales propuestas para analizar la producción de algunos sectores específicos. La información presentada en esta sección está tomada del libro de Álvarez et al. (2003).

La teoría económica proporciona descripciones de los fenómenos económicos como una relación funcional entre variables, tal como:

$$y = f(x) \quad (2.1)$$

donde y es la variable explicada, x es la variable explicativa y $f(x)$ representa la forma funcional, es decir, $f(x)$ es una descripción de la relación entre x e y . El análisis empírico de la producción necesita hacer explícita la forma de la función f . Este es un tema importante puesto que la forma funcional empleada restringe los resultados que se pueden obtener.

A continuación se definen las formas funcionales tradicionales en el análisis económico:

Función Lineal

$$y = \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 \quad (2.2)$$

Función Cobb-Douglas

$$y = A x_1^{\beta_1} x_2^{\beta_2} \quad (2.3)$$

donde A , β_1 , y β_2 , son parámetros positivos fijos.

Función Elasticidad Constante de Sustitución (CES)

$$y = \gamma (\delta x_1^{-\theta} + (1 - \delta) \delta x_1^{-\theta})^{\frac{\nu}{\theta}} \quad (2.4)$$

donde γ es un parámetro de eficiencia, δ es un parámetro de distribución, θ es un parámetro de elasticidad y ν es un parámetro de escala.

La función Cobb-Douglas surge en el año 1928 y pasan más de tres décadas hasta que aparece la forma funcional *CES* en 1961. Las limitaciones de estas formas funcionales hicieron que durante algunos años se desarrollaran otras formas funcionales que permiten reducir algunas de las restricciones impuestas por la Cobb-Douglas y la CES. Una de ellas

es la función de producción generalizada que es una transformación de la Cobb-Douglas. Para el caso de dos insumos puede escribirse de la siguiente manera:

$$ye^{\theta y} = Ax_1^{\beta_1} x_2^{\beta_2} \quad (2.5)$$

donde θ es un parámetro a estimar.

Existe otra función de producción generalizada potencial de Janvry que es también una generalización de la función de producción Cobb-Douglas.

$$y = A \prod x_i^{f_i(x)} \exp g(x) \quad (2.6)$$

Cuando $f_i(x) = \alpha_i$ y $g(x) = 0$ la función se convierte en una función de producción Cobb-Douglas.

2.3.1. Formas funcionales flexibles

Las restricciones que imponen las formas funcionales están relacionadas con el número de parámetros que tienen. Por ejemplo, la función de producción lineal tiene k parámetros en un proceso productivo con k entradas. El que las productividades marginales sean constantes en esta función de producción es una consecuencia directa del número de parámetros. Por tanto, se puede hablar de formas funcionales flexibles como aquellas especificaciones que incluyen un número de parámetros igual al número de elementos necesario para caracterizar la tecnología que se pretende modelizar.

- **La función Cobb-Douglas trascendental.** La función más frecuente en los análisis empíricos que usan funciones de producción flexibles es la función de producción Cobb-Douglas logarítmica trascendental, más conocida por translog, cuya expresión es:

$$\ln y = \beta_0 + \sum_{j=1}^j \beta_j \ln x_j + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^j \sum_{k=1}^k \beta_{jk} \ln x_j \ln x_k \quad (2.7)$$

- **La función generalizada de Leontief.** La función generalizada de Leontief es también una expansión de Taylor de segundo orden. La diferencia con la función translog es que para transformar las variables independientes se toma raíz cuadrada en lugar de logaritmos. Por tanto, la función puede escribirse como:

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^j \beta_j x_j^{1/2} + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^j \sum_{k=1}^k \beta_{jk} x_j^{1/2} x_k^{1/2} \quad (2.8)$$

- **La función cuadrática.** La función de producción cuadrática puede escribirse de la siguiente forma:

$$y = \gamma_0 + \sum_{i=1}^n \gamma_i x_i + \frac{1}{2} \left[\sum_{i=1}^j \sum_{j=1}^n \gamma_{ij} x_i x_j \right] \quad (2.9)$$

Esta función comparte con la generalizada de Leontief la ventaja sobre la translog de que los valores nulos de las variables no suponen ningún problema algebraico.

2.3.2. Función de producción Cobb-Douglas

El concepto función de producción es el concepto central en el análisis económico de los procesos de producción. El mismo representa la relación funcional entre los insumos y los niveles de producción. En términos generales se escribe la función de producción como $Q = F(K, L, T, E)$, donde Q representa los niveles de producción, K , L , T y E son los insumos necesarios (en este caso capital, trabajo, tierra y el recurso empresarial). Dentro de la teoría económica neoclásica, la función de producción más utilizada es la función de producción Cobb-Douglas (Del Valle, 2000),

$$Q = AK^\alpha L^\beta, \quad (2.10)$$

donde A es una constante de tecnología, $\alpha + \beta = 1$ y Q es el producto.

Homogeneidad de la función de producción

Una función es homogénea de grado n si, cuando multiplicamos cada una de las variables de la función, por una constante (digamos λ) el valor de la función se altera por la proporción λ^n . Con respecto a la función de producción (recordando que A es una constante de tecnología), si se multiplica por j en los insumos de la ecuación (2.10), se tiene:

$$\begin{aligned} Q &= A (jK^\alpha) (jL^\beta) \\ &= j^{\alpha+\beta} AK^\alpha L^\beta \\ &= j^{\alpha+\beta} Q \end{aligned} \quad (2.11)$$

Frecuentemente, la función de Cobb-Douglas tiene la propiedad matemática de que es homogénea de grado 1, esto es, que $\alpha + \beta = 1$ por lo que muestra Rendimientos Constantes a Escala (RCE). En este caso se suele decir que la función es linealmente homogénea y puede verse que un incremento en el uso de los insumos da lugar a un incremento proporcional de producto.

Productividades marginales

Las productividades marginales están dadas por las derivadas parciales de primer orden de la función de producción,

$$\begin{aligned}\frac{\partial Q}{\partial K} &= \alpha AK^{\alpha-1}L^{1-\alpha} = \alpha A \left(\frac{K}{L}\right)^{\alpha-1} = \alpha \frac{Q}{K} \\ \frac{\partial Q}{\partial L} &= (1-\alpha) AK^{\alpha}L^{-\alpha} = (1-\alpha) \frac{Q}{L} = \beta \frac{Q}{L}\end{aligned}\quad (2.12)$$

De esta manera, para las funciones de producción de rendimientos constantes a escala, las productividades marginales pueden ser explicadas en términos de la relación capital-trabajo $\left(\frac{K}{L}\right)$. Estas productividades marginales son funciones homogéneas de grado cero, por lo cual cambios proporcionales en K y L no afectan la relación capital-trabajo, ni la productividad marginal de la función de producción. En términos de la discusión del progreso tecnológico, esta propiedad de la función de producción se conoce como progreso tecnológico *Hicks – neutral*. Finalmente se debe mencionar que el único requisito que se le debe imponer a esta función de producción es que $\alpha > 0$, para que las productividades marginales sean positivas.

Rendimientos marginales

Analicemos ahora el comportamiento de las productividades marginales. La teoría económica nos dice que las productividades marginales deberán ser positivas y decrecientes, esto último por virtud de la *ley de rendimientos marginales decrecientes*. De esta manera observamos que las segundas derivadas de la función de producción (primera derivada de la función de productividad marginal) son:

$$\begin{aligned}\frac{\partial^2 Q}{\partial K^2} &= (\alpha^2 - \alpha) AK^{\alpha-2}L^{1-\alpha} = (\alpha^2 - \alpha) \frac{Q}{K^2} \\ \frac{\partial^2 Q}{\partial L^2} &= \alpha(1-\alpha) AK^{\alpha}L^{-\alpha} = (\alpha^2 - \alpha) \frac{Q}{L^2}\end{aligned}\quad (2.13)$$

Es fácil verificar que este resultado es independiente de los rendimientos de escala de la función de producción. No obstante, para que estas derivadas sean negativas es un requisito necesario que tanto α como β (en el caso de la Cobb-Douglas generalizada) sean menores que uno.

Basándose en ciertos estudios, Regalado (1997) menciona que un tipo esencialmente fácil de cambio tecnológico es el que simplemente multiplica la función de producción por un factor de escala creciente, con lo cual la función de producción queda como:

$$Q = A(t) f(K, L), \quad (2.14)$$

donde $A(t) = e^{\lambda t}$. En esta última expresión de tipo exponencial se supone que el cambio tecnológico crece a una tasa constante λ a través del tiempo, llamándose comúnmente a este factor Productividad Total de Factores (PTF). De esta forma se tienen las tres fuentes del crecimiento de la producción : el capital, el trabajo y el cambio tecnológico. Esto es, la función de producción Cobb-Douglas resultante es:

$$Q = Ae^{\lambda t} K^\alpha L^\beta \quad (2.15)$$

donde A es una constante. Aunque la función no Cobb-Douglas no es lineal en los parámetros en su formulación original, la función puede linealizarse tomando logaritmos. En este caso la expresión toma la siguiente forma:

$$\ln Q = \ln A + \alpha \ln K + \beta \ln L + \lambda t, \quad (2.16)$$

con lo cual son obtenidas las elasticidades de la producción con respecto a los factores de capital y trabajo, siendo éstas determinadas en los coeficientes α y β respectivamente en la ecuación, aquí las representaciones logarítmicas de Q , K y L , así como t , representan las tasas medias de crecimiento del producto y sus factores. Lo anterior puede ser representado como una ecuación en la cual la tasa de crecimiento de Q es igual a la tasa de crecimiento del factor K por su participación en la producción, más la tasa de crecimiento del factor L por su participación en la producción, más el cambio tecnológico.

Capítulo 3

Materiales y métodos

Siguiendo la metodología propuesta en el capítulo anterior, la cuestión es determinar si las variables climáticas explican la productividad del aguacate en el municipio de Uruapan, a través del análisis econométrico.

3.1. Región de estudio

La información acerca de Uruapan, Michoacán y del cultivo del aguacate en esta región fue tomada de Guillén et al. (2007). El cultivo del aguacate prospera en diversos países del mundo, ocupando México el primer lugar como productor, con el 34 % de la producción mundial. Siendo el principal exportador mundial, México tiene mayor consumo per capita anual del mundo con cerca de 11 kilogramos por persona.

La superficie aguacatera se concentra en cinco entidades federativas del país que son: Michoacán, Nayarit, Morelos, México y Puebla, todas ellas abarcan cerca del 92 % del total. En Michoacán se produce el 82 % aproximadamente, siendo el principal productor en el país, con más de 103 mil hectáreas sembradas con aguacate según los registros de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA), esto es, produce más de un millón de toneladas de producto con un valor anual de más de 11 mil millones de pesos aproximadamente, con lo que coloca a la entidad como el principal productor de este fruto a nivel mundial. En lo que a empleos se refiere, se estima que genera 47 mil jornales permanentes al año, 70 mil empleos estacionales, equivalentes a un total de 10.5 millones de jornales anuales, así como 187 mil empleos indirectos permanentes. En el estado de Michoacán el cultivo del aguacate se encuentra establecido en una franja que abarca 30 municipios de la entidad, desde Cotija al norte del estado, hasta Tacámbaro en el sureste, donde la superficie plantada con este cultivo varía desde menos de 100 hectáreas hasta más de 23 mil hectáreas (Gutiérrez-Contreras et al. 2010).

La franja aguacatera del estado de Michoacán

La franja aguacatera del estado de Michoacán se encuentra localizada en la provincia fisiográfica del Sistema Volcánico Transversal entre los paralelos $18^{\circ} 45'$ y $20^{\circ} 6'$ Latitud Norte y los meridianos $100^{\circ} 47'$ y $103^{\circ} 13'$ de Longitud Oeste. La ubicación geográfica de esta región fue determinada con base en los municipios extremos de la franja: Tangancicuaro-Apatzingán (Latitud) y Cotija-Zitácuaro (Longitud). En esta región aguacatera, sobresalen por su producción 22 municipios, que cubren una superficie de 12 290.6 kilómetros cuadrados del total, (figura 3.1) de las cuales 94 045.28 hectáreas se encuentra establecido el cultivo del aguacate.

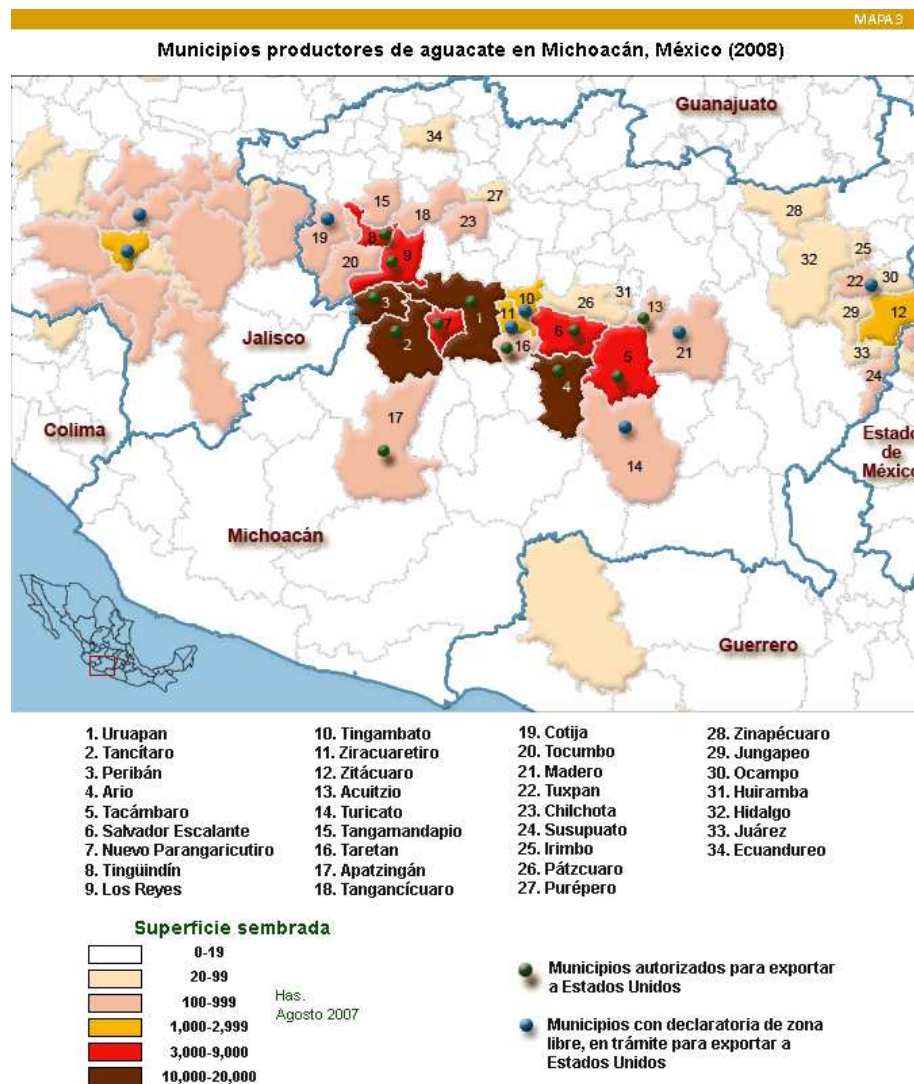


Figura 3.1: Franja aguacatera de Michoacán, México. Imagen tomada de Guillén et al. (2007).

En 22 municipios de esta franja se presentan ocho tipos de suelo: andosol, acrisol, litosol, feozem, luvisol, cambisol, vertisol y regosol. El cultivo del aguacate se encuentra establecido en su mayor parte (89.81 %) en suelos de tipo andosol. Para la descripción de factor climático se considera en forma individual los elementos del clima que son incidentes en el desarrollo del cultivo: temperatura, precipitación, humedad relativa y eventos como heladas y granizadas. De acuerdo con la clasificación de Köppen, modificada por García (1981), se presentan 14 diferentes tipos de clima. El cultivo del aguacate se encuentra establecido en diez de esos 14 climas.

El cultivo del aguacate se encuentra distribuido en zonas donde se presentan temperaturas que oscilan entre desde los 16°C hasta los 24°C. La mayor superficie (81,908.94 hectáreas) con aguacate se encuentra establecida en temperaturas medias anuales que oscilan entre los 18 y 29°C. Por el contrario, en temperaturas medias anuales mayores de 24°C solamente están establecidas 82.27 hectáreas de aguacate.

La precipitación pluvial es un factor muy importante para el desarrollo del aguacate. La mayor superficie (49 %) se ubica en áreas en donde las precipitaciones son de 1200 milímetros anuales. La humedad relativa es otro elemento del clima que es fundamental en la caracterización de un zona, incidiendo principalmente en la sanidad de un cultivo. El 83.5 % de la superficie establecida con huertos de aguacate, se localiza en zonas donde predominan humedades relativas de 90 %. Con referencia al número de heladas anuales, la mayor superficie de cultivo está establecido en zonas con hasta 10 heladas anuales, seguido con hasta 20 heladas anuales. Sin embargo existen áreas libres de heladas. Las granizadas son un factor que afecta directamente al cultivo. El daño causado es de gran importancia ya que el golpe del granizo causa heridas en el fruto y partes tiernas del árbol facilitando con ello el ataque de fitopatógenos. La mayor superficie (58541.62 ha) cultivada con aguacate es afectada por cuatro granizadas al año.

3.2. Uruapan y el cultivo del aguacate

Dentro de la franja aguacatera se eligió al municipio de Uruapan como la región de estudio. Uruapan se localiza al oeste de estado entre los paralelos 19° 17' y 19° 37' Latitud Norte y los meridianos 101° 58' y 102° 22' de Longitud Oeste. Su cabecera municipal Uruapan del Progreso, se localiza en las coordenadas 19° 25' de Latitud Norte y 102° 03' de Longitud Oeste, a una altura de 1,620 metros sobre el nivel del mar. Limita al norte con Charapan, Paracho, Nahuatzen, al este con Tingambato, Ziracuaretiro, Taretan, y al sur con Gabriel Zamora, y al oeste con Nuevo Parangaricutiro, Los Reyes y Peribán, presenta una extensión territorial de 948.05 km^2 .

La superficie establecida con aguacate en este municipio cubre un total de 11601.37 Ha, que representa el 12.34 % de la cultivada con esta especie de los 22 municipios del estado de Michoacán. El cultivo se encuentra establecido en seis tipos de clima $(A)C(W_2)(w)$, $Aw_1(w)$, $AC(m)(w)$, $C(m)(w)$, $C(w_1)(w)$, y $C(E)(w_2)(w)$. La descripción de estos seis

tipos de clima se indica en la figura 3.2, con base en el sistema climático de Köppen, modificado por García (1981).

Figura 3.2: Tipos de clima, superficie y área cubierta con el cultivo de aguacate. Cuadro tomado de Guillén et al. (2007).

TIPOS DE CLIMA, SUPERFICIE Y ÁREA CUBIERTA CON EL CULTIVO DE AGUACATE				
Tipo de clima	Descripción	Sup. Total (ha)	Sup. con aguacate (ha)	Sup. con aguacate (%)
(A)C(m)(w)	Semicálido húmedo con lluvias en verano, lluvia invernal >5%.	169,906.50	23,708.68	25.21
Aw1 (w)	Cálido subhúmedo con lluvias en verano, lluvia invernal <5%. Humedad intermedia.	217,381.65	18,800.79	19.99
(A)C(w2)(w)	Semicálido subhúmedo con lluvias en verano, lluvia invernal <5%. El más húmedo.	92,399.54	15,838.79	16.84
C(w1)(w)	Templado subhúmedo con lluvias en verano, lluvia invernal <5%. Humedad intermedia.	131,770.14	13,205.81	14.04
C(E)(w2)(w)	Semifrío subhúmedo con lluvias en verano, lluvia invernal <5%. El más húmedo.	32,747.12	8,227.92	8.75
C(m)(w)	Templado húmedo con abundantes lluvias en verano, lluvia invernal <5%.	43,813.67	6,405.46	6.81

El cultivo aguacate se presenta en alturas que van de los 1600 a los 2400 m.s.n.m., en suelos andosoles, acrisoles y luvisoles. Las temperaturas en el área oscilan entre los 16°C y los 22°C. En cuanto a la precipitación, ésta se presenta en 1000 mm y 1500 mm anuales con humedades relativas de 70 % y del 90 %. La probabilidad de ocurrencia de granizadas es entre una y cuatro; y la de heladas es entre cero y sesenta. Dentro de los 22 municipios pertenecientes a la franja aguacatera del estado de Michoacán, Uruapan es el municipio con mayor superficie sembrada de aguacate, el municipio con los tipos de clima adecuados para sembrar este fruto y de los municipios autorizados desde 1997 para exportar aguacate a Estados Unidos, siendo este el mayor consumidor de la producción Uruapense alcanzando las 200 mil toneladas de un total de 300 mil toneladas exportadas al extranjero (Bravo et al. 2009).

El conocimiento y el estudio socioeconómico previo del cultivo del aguacate y de las características del lugar de cultivo permiten seleccionar variables potencialmente relevantes en la modelación de la producción del aguacate. Cada uno de los elementos climáticos, ambientales y de manejo de cultivo que influyen en la producción se deben tomar en cuenta, pues las características como incidencia, frecuencia y tiempo fisiológico, influyen de manera sustancial en el logro o pérdida de la producción. De acuerdo a las etapas del proceso productivo del aguacate, se señalan los siguientes elementos: suelo, clima, agua, planta, plagas, enfermedades, fertilización, cosecha, almacenamiento, transporte al mercado, comercialización, retroalimentación de la venta, entre otros (Bárceñas et al. 2001). Sin embargo, este estudio se enfocará en la parte fenológica que estudia las relaciones

entre las condiciones climáticas y los fenómenos periódicos que los cultivos experimentan en su desarrollo.

3.3. Fenología del cultivo

Fenología es el término para explicar los cambios que los organismos vivos describen en función del paso del tiempo a lo largo de su ciclo de vida y son afectados directamente por el entorno meteorológico. En el caso del aguacate se tienen diferentes fenómenos periódicos que se llaman Fases Fenológicas, las cuales representan a cada uno de ellas como son: brotación vegetativa, madurez de foliolos, madurez y brotación de yemas terminales y axilares, y en respuesta a las condiciones ambientales y la fisiología interna, se produce la floración, con la consiguiente polinización, aparición del fruto, maduración y cosecha. Estos eventos para el caso de Uruapan no transcurren con regularidad por lo que pueden traslaparse, retrasarse, adelantarse o incluso no presentarse, lo que hace difícil su estudio y modelación (Tapia et al. 2008).

Los factores geográficos que van a determinar la viabilidad de la variedad de acuerdo a las necesidades que se tienen son: Latitud, Altitud, Relieve, Distribución de las tierras y aguas. Los elementos más destacados del clima que determinan las condiciones óptimas para el desarrollo del cultivo son: temperatura, horas calor, duración de la temporada de crecimiento, número e intensidad de las heladas, precipitación pluvial, humedad atmosférica, radiación solar, presión atmosférica y dirección y velocidad del viento. La temperatura es considerada como uno de los principales elementos que condicionan la adaptabilidad de la especie y variedad, por ello se reconoce un umbral mínimo y un umbral máximo para ésta, fuera de los cuales se tiene un desarrollo deficiente, mermando el crecimiento y rendimiento de los cultivos e incluso la muerte (Bárceñas et al. 2001).

La información que se necesita para cada región del país está disponible a través de las Normas Climatológicas de la Dirección General de Geografía y Meteorología de la SAGAR, las cuales nos dan una idea de las condiciones climáticas de los lugares.

Los botánicos, según el origen y características físicas, han clasificado al aguacate en tres razas: la mexicana, la guatemalteca y la antillana que a continuación se describen (Mijares y López, 1998).

Mexicana (*Persea americana var. drymifolia*)

Clima general: subtropical o templado cálido. Ciclo de estaciones: invierno benigno; sin o con raras y previsibles heladas; invierno y primavera sin lluvias; lluvias regulares en verano y otoño. Índice pluviométrico: Un índice de 800 mm , cuando hay suficiente agua de riego, o 1200 mm cuando el servicio es deficiente. Régimen higrométrico: semiseco. Drenaje del aire: bueno, pero desprovisto de corrientes violentas. Latitud: todas las que satisfagan las condiciones dentro de los 35 o 36 grados Norte o Sur. Altitud: comprendida entre los 1000 y 1800 metros sobre el nivel del mar.

Precauciones: evitar las zonas de granizo regular. La temperatura media invernal no debe de descender de los 15°C. La temperatura diaria nocturna no deberá descender de los -4°C y de manera irreversible más allá de los -6.7°C. El cultivo del aguacate mexicano no deberá establecerse en lugares carentes de agua de riego pues aunque se satisfagan los índices plviométricos es necesario regar en tiempos de sequía. Los suelos deberán tener pendientes adecuadas para el buen drenaje y no ser planas, pues el impacto de las heladas se evita con esta práctica. Las variedades que sobresalen son: Puebla, Mayapán, Zutano, Topa-topa, Balón y Criollo.

Guatemalteca (*Persea nubigena* var. *Guatemalis*)

Clima general: tropical o subtropical. Ciclo de estaciones: sin grandes variaciones de una a otra. Índice pluviométrico: de 1200 a 1800 mm como mínimo. Régimen higrométrico: húmedo. Drenaje del aire: libre y desprovisto de corrientes violentas. Latitud: todas las zonas que satisfagan las condiciones dentro de los 32 ó 34 grados Norte o Sur. Altitud: comprendida entre los 500 y 1100 metros sobre el nivel del mar. Precauciones: evitar las zonas de granizo regular y brindar protección especial cuando soplan brisas saturadas de salinidad marina. La temperatura media invernal no deberá ser menor a 15°C, la temperatura nocturna no será inferior a -1°C los daños que el frío causa a esta raza se manifiestan al descender la temperatura a -2.3°C. Para este cultivo el régimen de lluvias debe de ser continuo sin periodos de sequía o tener condiciones de riego para satisfacer las necesidades de agua. De entre este grupo destacan las variedades: Mc. Arthur, Orotova, Anaheim, Hass y Booth-8.

Antillana (*Persea americana* var. *americana*)

Clima general: tropical. Ciclo de estaciones: no presenta problemas por el tipo de clima. Índice pluviométrico: de 1800 a 2000 mm como mínimo. Régimen higrométrico: muy húmedo. Drenaje del aire: libre y con fuerte protección de los vientos violentos. Latitud: todas las que satisfagan las condiciones dentro de los 32 grados Norte o Sur. Altitud: comprendida entre los 0 y 500 metros sobre el nivel del mar. Precauciones evitar la salinidad que proviene del mar. La temperatura media no tiene problemas pero no deberá descender de 16°C, la temperatura mínima no debe ser inferior a 3°C, a temperaturas de -2.3°C empieza a sufrir daños irreversibles. La evaporación en estas zonas es exclusiva por los que la lluvia debe ser regular todos los meses del año; si esto no es posible se deberá tener disposiciones de riego. Sus variedades más importantes son Pollok, Peterson y Waldin.

La floración es la etapa más importante para dar origen al fruto. Se conoce como determinación irreversible a la floración (DIF) al momento en el que la yema del brote vegetativo cambia al estado reproductivo y su destino no puede ser modificado con tratamientos o condiciones que normalmente inhiben la floración (Salazar et al. 1984). La fecha de ocurrencia de la DIF varía con el cultivo, las condiciones de cultivo y la región. Los climas en los que se encuentran los huertos de aguacate en el estado tienen influencia sobre

las fechas de ocurrencia de las floraciones, pudiendo presentarse durante 10 meses del año y suelen ocurrir hasta cuatro flujos de floración en un mismo árbol o huerto, (figura 3.3), conocidas como floraciones **Loca**, **Aventajada**, **Normal** y **Marceña** (Salazar-García et al. 2005).

Figura 3.3: Desarrollo fenológico del aguacate.

DESARROLLO FENOLÓGICO DEL AGUACATE EN MICHOACÁN				
	Brotación vegetativa	Floración	Formación fruto	Cosecha
LOCA	Junio	Agosto - Septiembre	Septiembre - Junio	Junio - Septiembre
AVENTAJADA	Octubre	Octubre - Diciembre	Noviembre - Agosto	Octubre - Febrero
NORMAL	Enero	Diciembre - Febrero	Enero - Octubre	Octubre - Febrero
MARCEÑA	Marzo	Febrero - Marzo	Marzo - Diciembre	Junio - Septiembre

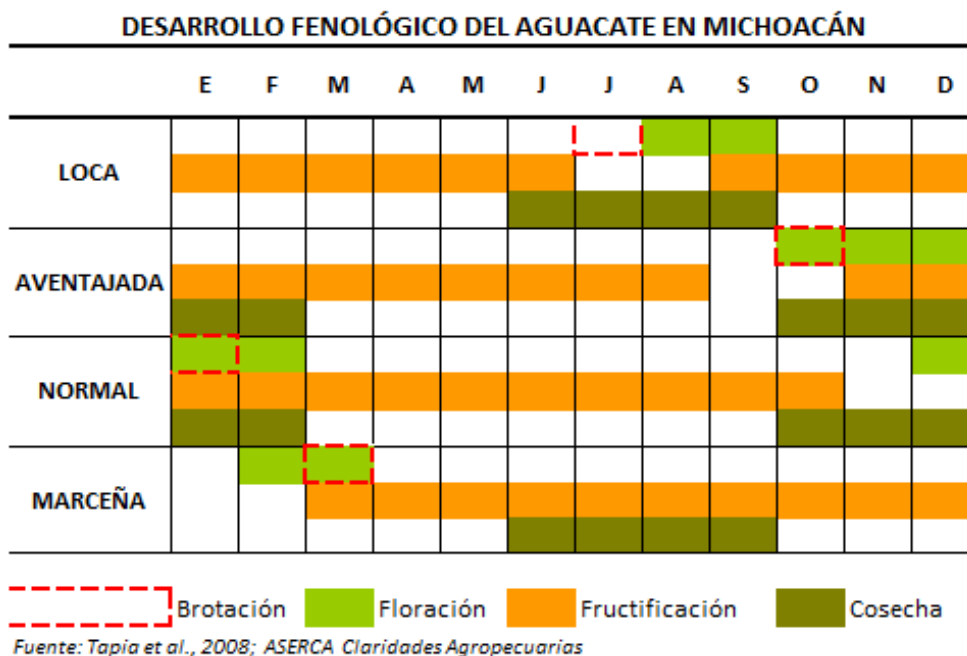
Fuente: Tapia et al., 2008

Independientemente del tipo de clima donde se encuentren los huertos, los árboles pueden producir brotes vegetativos hasta en tres periodos durante el año, llamados "flujos vegetativos". Los brotes del flujo de invierno pueden presentarse desde el fin de noviembre hasta el fin de febrero, aunque la mayor brotación ocurre en enero. Los del flujo de primavera aparecen desde el principio de marzo hasta el inicio de junio, y los del flujo de verano entre el comienzo de junio y el principio de septiembre. El flujo vegetativo de invierno es el que se presenta de manera generalizada y con mayor intensidad en todos los climas. Sin embargo, los flujos de primavera y verano también son importantes, principalmente en los climas más calientes (Cálido subhúmedo y en la parte más seca del Semicálido subhúmedo), donde casi la totalidad de los huertos requieren de riego para subsistir. Los brotes de invierno pueden rebrotar vegetativamente durante la primavera o durante el verano, o pueden no producir brotación vegetativa y concluir su ciclo con algún tipo de floración (desde loca hasta marceña). Los brotes de primavera pueden rebrotar vegetativamente durante el verano o producir cualquier flujo de floración (desde loca hasta marceña), y los de verano solamente producirán algún flujo de floración (desde loca hasta marceña), y posteriormente, junto con los de invierno y primavera producirán brotes vegetativos en el siguiente invierno (figura 3.4).

Aunque la emergencia de los brotes de los distintos flujos no ocurre al mismo tiempo, por efecto de las temperaturas prevalecientes durante el desarrollo floral, este proceso se acelera en los brotes de primavera y se incrementa aún más en los brotes de verano,

comparado con lo que sucede con los brotes de invierno. Esto provoca que los tres flujos vegetativos surgidos en diferentes épocas converjan en la floración "Normal" (diciembre-febrero), que es la más abundante del año y de la cual procede la mayor producción de fruto (Rocha et al. 2008).

Figura 3.4: Ciclo anual del desarrollo fenológico del aguacate.



3.4. Bases de datos

El proceso de recolección de la información, es considerado el cimiento sobre el que se sustenta el proceso de modelación. De esta manera, para realizar de forma correcta esta etapa es necesario tener presente ciertas consideraciones, en la búsqueda de la representatividad de la muestra y con respecto a los criterios previamente establecidos para la selección. Para tal efecto Bolaños (1999) señala que es recomendable realizar una investigación de tipo descriptivo-analítico, que permita hacer la descripción, el registro, el análisis y la interpretación de la naturaleza actual y la composición de los fenómenos que intervienen en el proceso, además de permitir la elaboración de un marco de estudio a partir del que se deduce una problemática, o bien formular un diagnóstico con el fin de conocer carencias esenciales y sugerir una acción posterior. En muchas ocasiones la calidad y cantidad de las observaciones no son lo que se desearía y por lo tanto se presentan retos adicionales para la construcción y validación de modelos. Después de revisar la base de datos existentes se determinaron cuáles son las variables disponibles que permitan apro-

ximar el modelo teórico propuesto para la producción del aguacate, buscando completar las series de datos mas largas posibles.

Se pudo obtener una serie de producción agregada consistente a nivel estado para los años 1954 a 2008, extraída de los Anuarios Estadísticos del INEGI, el Sistema de Información agrícola de Consulta (SIACON) y del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) de la SAGARPA. La serie contiene datos de Superficie cosechada (ha) y Producción (ton), de las cuales se obtiene el Rendimiento (ton/ha). La información por estado y municipio sólo está desagregada a partir de 2003. Las series son de frecuencia anual debido a la propia naturaleza de los datos, ya que éstos se refieren necesariamente a cosechas completas. La información obtenida para el estado de Michoacán fue: superficie sembrada, superficie cosechada, producción y valor de la producción.

Se distingue cultivo anual y perenne, por ciclo agrícola y modalidad de riego o temporal. La superficie sembrada de cada cultivo varía año a año determinada por condiciones climáticas pero sobre todo, por incentivos económicos que afectan a la cantidad finalmente cosechada. Por ello, para analizar el efecto de las variables meteorológicas sobre la producción, se ha tenido en cuenta el rendimiento del cultivo en lugar de la producción total. En la figura 3.5 se muestra la serie histórica del rendimiento en el cultivo.

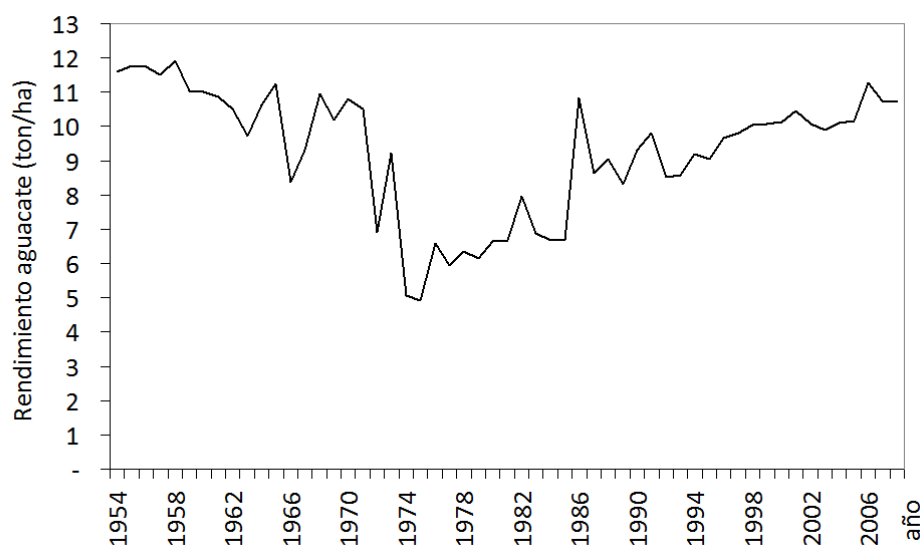


Figura 3.5: Serie del rendimiento agrario del aguacate.

Se intentó reunir más información socioeconómica para poder introducir al modelo otras variables, pero no se encontraron series largas. Sólo se pudieron obtener algunos índices relacionados con la producción pero no se incluyen dado que provienen de los datos ya considerados.

También es necesario considerar el factor trabajo, pero no existen series de jornales recibidos por los trabajadores de la actividad. La alternativa fue tomar el salario mínimo real del estado, correspondiente al área geográfica C, para lo cual se utilizaron de los Informes de la Presidencia de la República para años atrás a 1980 y de La Comisión Nacional de los Salarios Mínimos (CONASAMI). Dentro de las funciones de la CONASAMI, está el fijar los salarios mínimos. La serie de salarios mínimos se deflactó, ya que las cantidades nominales incluyen el efecto de la inflación. Es necesario transformar las series a valores reales con un año base, a esto se le denomina deflactar con respecto a un año base del Índice Nacional de Precios al Consumidor, INPC, elaborado por el Banco de México, (iniciando en el año de 1968 y reconvirtiendo con base igual a 100 en los años de 1978, 1994 y 2002). La serie se calculó a la última base de 2002 para tener una sola serie compatible obteniendo el salario real (Cárdenas et al. 2008), la gráfica se muestra en la figura 3.6.

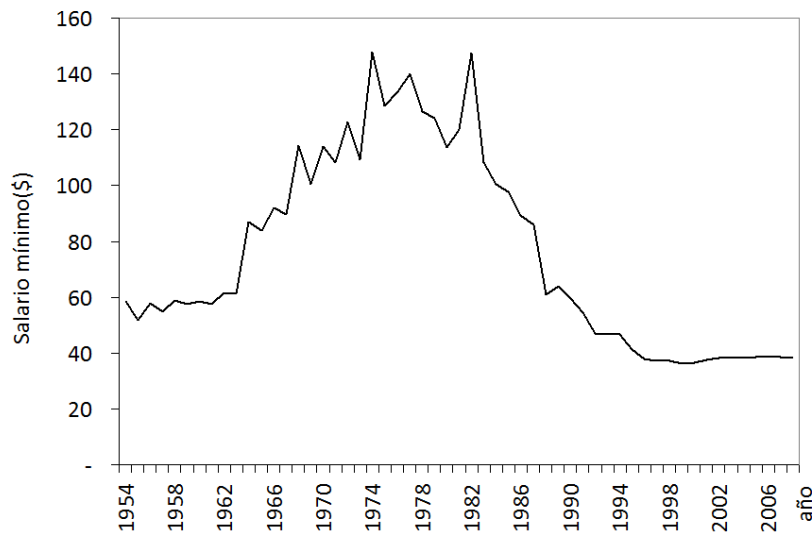


Figura 3.6: Serie del salario mínimo.

Existen otras posibles variables económicas que conforman el costo de producción, variables socioeconómicas relevantes de gran contribución al modelo las cuales conforman al costo de producción del fruto, tales como labores culturales, fertilización, control fitosanitario, maquinaria y equipo, pero no serán consideradas por falta de información para obtener series tan largas como las que se utilizan en el presente trabajo.

Fuente y tratamiento de los datos meteorológicos

Los datos meteorológicos proceden de dos fuentes principalmente: i) Las estaciones de Mexico Climatological Station Network Data (CLICOM- CONAGUA), para el municipio de Uruapan Michoacán, México. No existe estación que contenga series de tiempo largas

ya que todas tienen huecos de información para ciertos períodos. Sin embargo fueron utilizadas para conformar una sola serie. ii) Estación meteorológica Barranca de Cupatitzio en Uruapan del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agropecuarias y Pecuarias (INIFAP). Estas estaciones meteorológicas se han elegido como representativas del municipio de Uruapan, las cuales integran una sola serie, que se muestra en el cuadro 3.1:

Cuadro 3.1: Estaciones meteorológicas representativas del municipio de Uruapan.

Estación	Latitud	Longitud	Altura	Fuente	Periodo/años
<i>E</i> – 16164	19°25'0" N	–102°4'0" W	1634 msnm	CLICOM	1954 - 1962
<i>E</i> – 16165	19°23'42" N	–102°3'7" W	1611 msnm	CLICOM	1963 - 1963
<i>E</i> – 16056	19°23'37" N	–102°4'12" W	1610 msnm	CLICOM	1964 - 1978
<i>E</i> – BARR	19°25'43" N	–102°5'34" W	1720 msnm	INIFAP	1978 - 2009

Las series mencionadas conforman series anuales en el periodo 1954 a 2008 de variables meteorológicas: Temperatura mínima, Temperatura máxima y Precipitación acumulada, como lo muestra la figura 3.7.

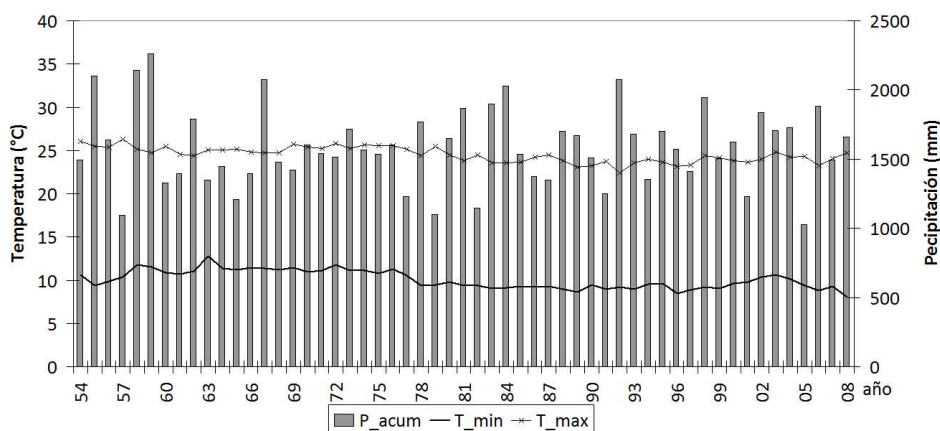


Figura 3.7: Variables climáticas: precipitación acumulada, temperatura mínima y máxima.

3.5. Variables meteorológicas a considerar

Para poder definir los requerimientos térmicos e hídricos del aguacate es necesario revisar la fenología del cultivo (Pérez et al 2007). En este caso al analizar las estaciones de floración se encontró que las estaciones o ciclos fenológicos marcan distintas floraciones durante el año en un mismo árbol. La etapa más definida y que generalmente se presenta en

todas las huertas de Michoacán, en especial en el municipio de Uruapan, aunque con cierto retraso o adelanto es la floración normal y la brotación vegetativa de invierno, respecto a todas las demás ya señaladas en la figura 3.3.

Requerimientos térmicos

Anguiano et al. (2007) realizó una búsqueda bibliográfica en diferentes publicaciones acerca de los requerimientos térmicos y encontró lo siguiente: para que se produzca el amarre del fruto en el aguacate Hass se requieren temperaturas en un rango que va de $(12 - 17)^\circ\text{C}$ a $(28 - 33)^\circ\text{C}$, temperaturas mayores a 42°C son desfavorables para el cultivo, el mayor amarre de frutos de aguacate ocurre con temperaturas entre 20°C y 25°C y que temperaturas por encima de 28°C provocan la separación de flores individuales, los umbrales térmicos del aguacate están entre los 10°C y 35°C y que en el cultivo del aguacate las temperaturas superiores a 32°C tienen efectos negativos debido a una disminución sobre la fertilización y el grado de esterilidad del polen.

La medición de eventos fenológicos puede ser mejorada si se expresan las unidades de desarrollo en términos de tiempo fisiológico en lugar de tiempo cronológico. Este planteamiento se considera adecuado para este análisis. Para completarse una etapa fenológica es necesario la acumulación del requerimiento térmico, el cual se mide utilizando el índice Grados Día (GDD por sus siglas en inglés) o las Unidades Calor (*UC*). El índice GDD se mide en comparación a una temperatura base. Debajo de una temperatura umbral mínima, determinada en forma genética para cada organismo, el desarrollo del fruto no ocurre. Sobre dicha temperatura el desarrollo se incrementa hasta llegar a ser nulo en una temperatura umbral máxima. A estos valores se les conoce como temperaturas cardinales (Tapia et al. 2006 en Coria, 2009).

El método Baskerville-Emin (BE) se utilizó para el cálculo del índice GDD (Nugent (2000 en Hussain y Mudasser, 2007)). Según este método, si el mínimo de la temperatura diaria es mayor o igual a la temperatura base (10°C para el aguacate), entonces GDD se calcula por medio de

$$GDD_1 = T_{media} - T_{base}. \quad (3.1)$$

Si, $T_{media} < T_{base}$ entonces $GDD_1 = 0$, $T_{min} < T_{base}$, entonces se utiliza GDD_2 ,

$$GDD_2 = ((W * \cos(A)) - ((T_{base} - T_{media})) * (3.14/2 - A)) / 3.14, \quad (3.2)$$

donde $T_{media} = (T_{max} + T_{min}) / 2$, $W = (T_{max} - T_{min}) / 2$, $A = \arcsin[(T_{base} - T_{media}) / W]$, T_{max} y T_{min} son las temperaturas máximas y mínimas, respectivamente, y T_{base} es la temperatura base por debajo del cual cesa el crecimiento del cultivo. La GDD total se obtiene al sumar GDD_1 y GDD_2 .

El término Unidades Calor se refiere al número de GDDs necesarios para el desarrollo de cada etapa fenológica (floración o fructificación), es decir, cada etapa fenológica requiere un cierto número de GDDs los cuales se acumulan a lo largo de cierto período de tiempo,

donde dicho período de tiempo se conoce como duración de la temporada de crecimiento (índice GSL por sus siglas en inglés). En términos matemáticos estos índices se expresan de la siguiente manera:

$$UC = \sum_{i=1}^N GDD_i, \quad (3.3)$$

$$GSL = \frac{UC}{\overline{GDD}} \text{ días}, \quad (3.4)$$

donde N es el número de días necesarios para el desarrollo de cada etapa fenológica y \overline{GDD} es la media aritmética del índice GDD durante cada etapa fenológica.

Tapia (2006 en Anguiano et al. 2007), señala que en estudios fenológicos realizados en el cultivo del aguacate en Uruapan con un tipo de clima $C(w_1)(w)$ (figura 3.2), se determinaron los requerimientos de unidades calor UC , tomando como temperatura base 10°C para la fase fenológica normal del cultivo. Este autor también determinó que en la floración normal (diciembre-enero) se requieren $270 UC$ y en la formación del fruto (enero-octubre) $1800 UC$. En relación a la acumulación de unidades calor el cultivo requiere $2200 UC$ anuales.

A partir de lo anterior se determinó el índice GSL (figura 3.8) para las etapas de floración y fructificación en el flujo Normal durante el período de datos observado, obteniendo las siguientes series: GSL_A (duración de la temporada de crecimiento en flujo anual), GSL_F (duración de la temporada de crecimiento en floración) y $GSL_{(Fr)}$ (duración de la temporada de crecimiento en fructificación).

Dadas las especificaciones anteriores, el estudio en primera instancia se hace para el flujo Normal, ya que los otros flujos convergen a este flujo.

Requerimientos hídricos.

En referencia al aspecto hídrico, Uruapan presenta abundantes precipitaciones de junio a octubre. Las propiedades físicas de los suelos volcánicos donde se cultiva el aguacate le confieren propiedades hidráulicas de 50 a 20 mmh^{-1} de conductividad hidráulica. Esta propiedad al mismo tiempo que protege al sistema radical de enfermedades de la raíz al desalojar los grandes excedentes de agua de junio a octubre, también favorece la rápida desecación del suelo y la pérdida de nutrimentos y bases fuera de la superficie radical, y posibles efectos en los acuíferos los cuales en algunas regiones aguacateras pueden llegar a 1m de profundidad (Anguiano et al. 2007).

Yamada et al. (1985 en Anguiano et al. 2007), refirieron que la transpiración y el potencial hídrico en las hojas de especies de cítricos y aguacate fueron reducidas cuando la temperatura en las raíces fue baja. El potencial hídrico en las hojas fue especialmente afectado cuando la temperatura del aire bajó a 5°C .

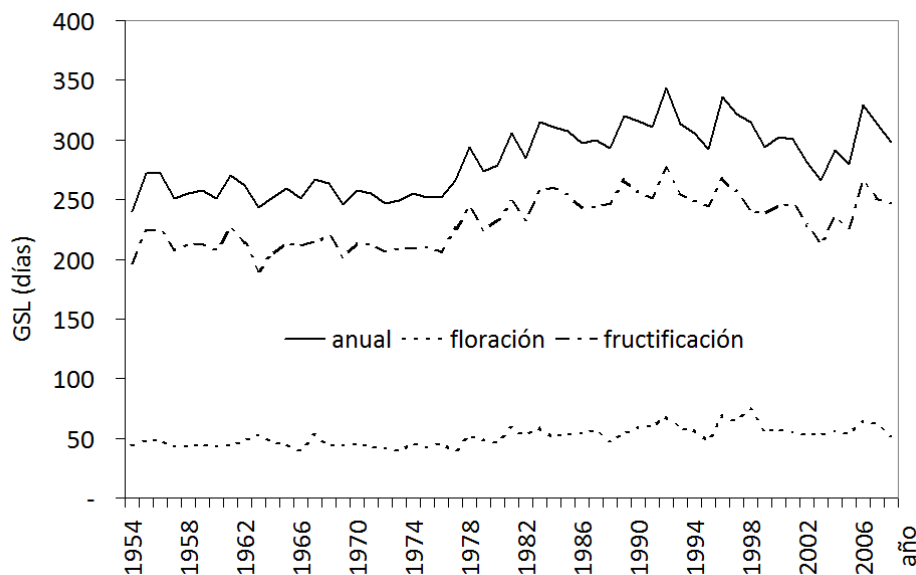


Figura 3.8: Duración de la temporada de crecimiento en la floración, fructificación y durante todo el año.

Rodríguez (1982 en Anguiano et al. 2007), indica que la humedad ambiental influye en la calidad del fruto y en la sanidad de la parte aérea del árbol. Humedades altas inducen a la proliferación de las enfermedades de las hojas, tallos y frutos. Una humedad ambiental óptima es aquella que no supera el 60 %.

Anguiano et al. (2007) señalan que durante la temporada de lluvias y de acuerdo a lo que demanda la planta de aguacate, las cantidades que se registran en toda la zona productora satisfacen al 100 % sus requerimientos, siempre y cuando el patrón de lluvias sea uniforme durante el ciclo anual. Sin embargo, la demanda evapotranspirativa durante el período de estiaje debe ser cubierta con agua de riego de acuerdo a las necesidades que se tengan en cada ambiente, pues de lo contrario repercutirán directamente sobre la producción y calidad del fruto. Sin embargo, no se tiene conocimiento desde cuándo se hacen estas prácticas ni una cifra estándar para cada municipio.

Tomando en cuenta lo anterior, se ha decidido sólo trabajar con las estaciones de precipitación más significativas. De antemano se sabe que en México la temporada de lluvia predominante es en verano, sin embargo se decidió proponer también las siguientes estaciones:

- *PR_P*: Precipitación acumulada en primavera (marzo - mayo),
- *PR_V*: Precipitación acumulada en verano (junio - agosto),
- *PR_PV*: Precipitación acumulada en primavera verano (marzo- agosto),

- *PR_O*: Precipitación acumulada en otoño (septiembre - noviembre),

Estas variables tomadas así tratan de determinar cómo se ve afectada la producción del aguacate y así mismo el rendimiento (figura 3.9).

Finalmente se realiza un gráfico (figura 3.10) que permite visualizar toda esta información adquirida del desarrollo fenológico del aguacate, los requerimientos térmicos e hídricos durante todo el año y dar una idea de qué variables agroclimáticas podrían impactar en mayor medida el rendimiento del aguacate en Uruapan, Michoacán. Esto es, se grafica la distribución mensual de la duración de la temporada de crecimiento en días y la precipitación acumulada en milímetros, al igual que el ciclo de brotación vegetativa de invierno (floración normal). En base a la fenología del aguacate y a un modelo teórico (sección 3.6) se determinó un modelo adecuado para describir el rendimiento de este cultivo.

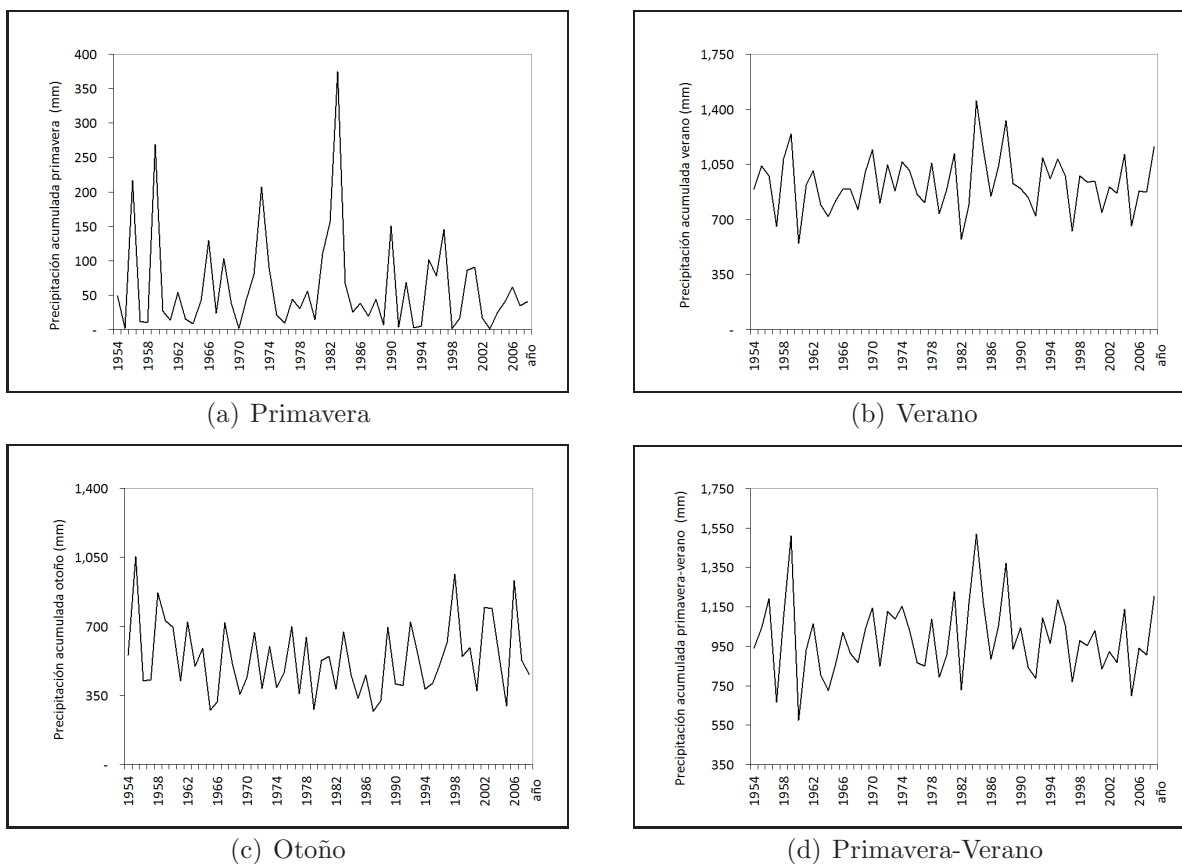


Figura 3.9: Precipitación acumulada por temporada.

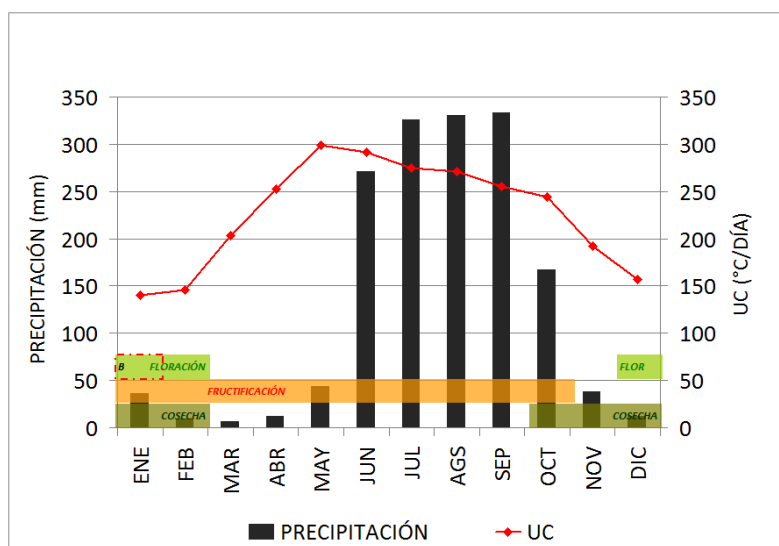


Figura 3.10: Duración de la temporada de crecimiento y precipitación durante el desarrollo fenológico anual.

3.6. Especificación e interpretación del modelo

Para estimar un modelo que describa el rendimiento del aguacate se partió de un modelo Cobb-Douglas Generalizado y una transformación de una función trascendental, como lo sugiere Debertin (1986 en Hussain y Mudasser, 2007). Este modelo tiene la siguiente forma:

$$Y = AX_1^{\beta_1} X_2^{\beta_2} \exp^{\alpha_1 X_1 + \alpha_2 X_2}, \quad (3.5)$$

donde la variable dependiente Y describe los retornos marginales a escala en función de los factores de producción X_1 y X_2 ¹, A es una constante, \exp es el término exponencial y β_1 , β_2 , α_1 y α_2 son los coeficientes de regresión a estimar. Para asegurar una pendiente negativa de la función de producción (3.5) se debe cumplir que los coeficientes β_1 , β_2 sean positivos, mientras que α_1 y α_2 deben ser negativos (Beattie y Taylor (1985 en Hussain y Mudasser, 2007)).

Para utilizar las técnicas de Regresión Lineal y estimar los parámetros de la ecuación (3.5) utilizando Mínimos Cuadrados Ordinarios es necesario linealizar dicha ecuación, lo cual se logra mediante la aplicación de la función logaritmo,

$$\ln Y = \ln A + \beta_1 \ln X_1 + \beta_2 \ln X_2 + \alpha_1 X_1 + \alpha_2 X_2. \quad (3.6)$$

Uno de los objetivos de este trabajo es construir un modelo representativo del rendimiento del cultivo del aguacate en Uruapan, Michoacán, utilizando variables climáticas y económicas relevantes, las cuales, según las secciones (3.4) y (3.5), son:

¹Típicamente estos dos factores representan variables climáticas: X_1 corresponde al índice GSL y X_2 corresponde a la precipitación acumulada.

- *GSLA*: Duración de la temporada de crecimiento (flujo normal),
- *PR_P*: Precipitación acumulada en primavera (marzo - mayo),
- *PR_V*: Precipitación acumulada en verano (junio - agosto),
- *PR_PV*: Precipitación acumulada en primavera verano (marzo - agosto),
- *PR_O*: Precipitación acumulada en otoño (septiembre - noviembre),
- *SMR*: Salario mínimo (\$).

A fin de obtener una descripción adecuada de la serie histórica del rendimiento del aguacate (figura 3.5) se proponen dos modelos empíricos, los cuales se describen a continuación:

$$(1) \quad \ln RAG_{(t)} = \beta_0 + \beta_1 \ln GSLA_{(t)} + \beta_2 \ln PR_PV_{(t)} + \beta_3 \ln PR_O_{(t-3)} + \alpha_1 GSLA_{(t)} \\ + \alpha_2 PR_P_{(t-3)} + \alpha_3 PR_O_{(t-3)} + \beta_4 SMR_{(t)} + \beta_5 IMP_{(t)} + \xi_{(t)}, \quad (3.7)$$

donde *RAG* es el rendimiento del cultivo del aguacate, *GSLA* es la duración de la temporada de crecimiento en flujo anual, *PR_PV* es la precipitación acumulada en primavera-verano, *PR_O* es la precipitación acumulada en otoño, *PR_P* es la precipitación acumulada en primavera, *SMR* es el salario mínimo y ξ es el término residual (el cual se debe comportar como ruido blanco). La variable *IMP* (variable dicotómica) fue incluida después de realizar las pruebas de diagnóstico residual para corregir un cambio estructural, por lo que ésta sólo debe aparecer en su forma lineal y no en ninguna otra forma.

Este primer modelo es dinámico, es decir, incluye rezagos en las variables explicativas. Modelos que contienen rezagos en las variables explicativas (pero no rezagos en la variable explicada) se conocen como modelos de retardos distribuidos (Brooks, 2008). En este caso la precipitación de otoño en su forma logarítmica y lineal, así como la precipitación de primavera en su forma lineal, presentan un rezago de 3 períodos. Con respecto al modelo base original (ecuación (3.5)), este modelo no conserva la relación de simetría en sus variables, es decir, las variables *PR_P*, *PR_PV* y *SMR* sólo se encuentran en su forma logarítmica o lineal, pero no en ambas. La adición de la variable dicotómica (o dummy) (*IMP*) se utilizó para corregir un problema de cambio estructural en el año 1975. Esto es, para años anteriores a 1975 tiene un valor de 0, mientras que de 1975 al último año tiene un valor de 1. La adición de este tipo de variables es un procedimiento habitual en econometría utilizado para aislar la influencia de datos anómalos y es especialmente útil para muestras pequeñas (Brooks, 2008).

$$(2) \quad \ln RAG = \beta_0 + \beta_1 \ln GSLA + \beta_2 \ln PR_PV + \beta_3 \ln PR_V + \alpha_1 GSLA \\ + \alpha_2 PR_PV + \alpha_3 PR_V + \beta_4 SMR + \beta_5 DU_{86} + \beta_6 IMP + \xi_{(t)}, \quad (3.8)$$

donde *RAG* es el rendimiento del cultivo del aguacate, *GSLA* es la duración de la temporada de crecimiento en flujo anual, *PR_PV* es la precipitación acumulada en primavera-verano, *PR_V* es la precipitación acumulada en verano, *SMR* es el salario mínimo el

cual es representado como la variable económica, DU_{86} e IMP son variables dicotómicas utilizadas para corregir cambios estructurales y ξ es el término residual (el cual se debe comportar como ruido blanco).

Este segundo modelo no es dinámico, no contiene rezagos en las variables independientes. A diferencia del modelo anterior, este modelo es bastante similar al modelo base (3.6), es decir, todas las variables climáticas presentan simetría, siendo la variable económica (SMR) la única que está sólo en forma lineal. Esto sugiere que las características de las variables económicas tienen una naturaleza distinta a las variables climáticas y deben ser tratadas de forma distinta. Un estudio acerca de este tema merece investigación posterior. El modelo contiene dos variables dicotómicas: DU_{86} para corregir un cambio estructural en el año 1986² e IMP para corregir un cambio estructural en el año 1975.

La interpretación física del primer modelo propuesto es difícil, ya que contiene rezagos en algunas variables explicativas. Por este motivo, y considerando la simetría de ambos modelos, en este trabajo se eligió el segundo modelo (ecuación (3.8)) para llevar a cabo la investigación propuesta.

Los máximos y mínimos relativos exhibidos por estos dos modelos empíricos ((3.7) y (3.8)) están especificados por la combinación de todos los parámetros en cada uno de éstos, por lo que la condición de maximización dada para el modelo base (3.6) está modificada. La condición analítica de maximización del rendimiento para los modelos empíricos se deja como una propuesta futura de investigación. No obstante, en la sección 3.8 se presenta un estudio de la maximización del rendimiento para el modelo empírico elegido en una dimensión.

3.7. Estimación del modelo

En esta sección se muestra la estimación del modelo empírico utilizado (3.8) para describir el rendimiento del aguacate³. En la figura 3.11 se muestra para cada parámetro: su valor estimado, error estándar, el valor del estadístico t (utilizado para probar la hipótesis nula de que los parámetros estimados son significativos) y su p-valor. Los p-valores asociados al estadístico t indican que al 85% de significancia todos los parámetros son significativos. Los estadísticos R^2 y R^2 ajustada miden la fracción de varianza que es explicada por las componentes (variables) sistemáticas. El valor de R^2 (0.8069) debe ser interpretado como el porcentaje del total de la variabilidad en el rendimiento de la producción explicado por los eventos del clima (lluvia y temperatura), así como por el salario mínimo. Es decir, las variables independientes logran explicar el 80.69% de la varianza del rendimiento de la producción del aguacate en Uruapan. El estadístico F es utilizado para

²A partir del año 1986 el rendimiento del aguacate en el estado comienza a crecer nuevamente, aumenta más del 40% de 1986 a 1987 (figura 3.5).

³La estimación fue realizada utilizando el software econométrico EViews 6.0.

probar la significancia de la estimación realizada (valor de los estadísticos R^2 y R^2 ajustada). La probabilidad del estadístico F indica que, en conjunto, las variables independientes son altamente significativas.

Figura 3.11: Modelo estimado para el rendimiento del aguacate en flujo normal.

Variable	Modelo estimado Aguacate Normal			
	Coefficiente	Error estándar	Estadístico t	P-valor
β_0	-35.19928	19.0023	-1.85237	0.0705
$\ln(\text{GSLA})$	8.15654	4.0000	2.03911	0.0473
$\ln(\text{PR}_{PV})$	2.00346	1.3193	1.51854	0.1359
$\ln(\text{PR}_V)$	-2.02476	1.2550	-1.61336	0.1137
GSLA	-0.02790	0.0137	-2.03132	0.0482
PR _{PV}	-0.00198	0.0013	-1.54062	0.1304
PR _V	0.00198	0.0013	1.46836	0.149
SMR	-0.00512	0.0005	-9.75603	0
DU ₈₆	0.31789	0.1126	2.82312	0.0071
IMP	-0.29873	0.0537	-5.56796	0
R^2	0.80698			
R^2 ajustada	0.76837			
Estadístico F	20.90377			
Prob(Estadístico F)	0			

El modelo final se obtiene aplicando la función exponencial a la ecuación (3.8):

$$RAG = 5.16 \times 10^{-16} \cdot GSL^{8.16} \cdot PR_{PV}^2 \cdot PR_V^{-2.02} \cdot \exp\{-0.03(GSL) - 0.002(PR_{PV}) + 0.02(PR_V)\} \exp\{-0.005(SMR) + 0.32(DU_{86}) - 0.29(IMP)\} \quad (3.9)$$

De (3.9) se observa que los factores $GSL^{8.16}$ y PR_{PV}^2 contribuyen de manera muy importante al rendimiento, ya que son valores muy grandes, sin embargo sus contrapartes simétricas $\exp^{-0.03GSL}$ y $\exp^{-0.002PR_{PV}}$ toman valores menores a uno. La variable PR_V contribuye de manera poco significativa al rendimiento, tanto en su forma lineal como en su forma logarítmica (toman valores pequeños). La variable económica SMR aparece sólo en el argumento del exponencial (antes se dijo que esta variable no es simétrica y sólo aparece en forma lineal en la ecuación (3.8)). La serie de esta variable son valores positivos, los cuales en el argumento del exponencial resultan en números pequeños. A pesar de ello, la variable SMR es una de las más significativas para describir el comportamiento del rendimiento, ya que es la variable que tiene el valor del estadístico t más grande (figura 3.11), y por tanto la más significativa estadísticamente. Además, la correlación entre el logaritmo natural del rendimiento ($\ln RAG$) y el salario mínimo (SMR) es alta (con un valor de -0.695), lo cual explica la relevancia del salario mínimo en la descripción del rendimiento, véase la figura 3.12.

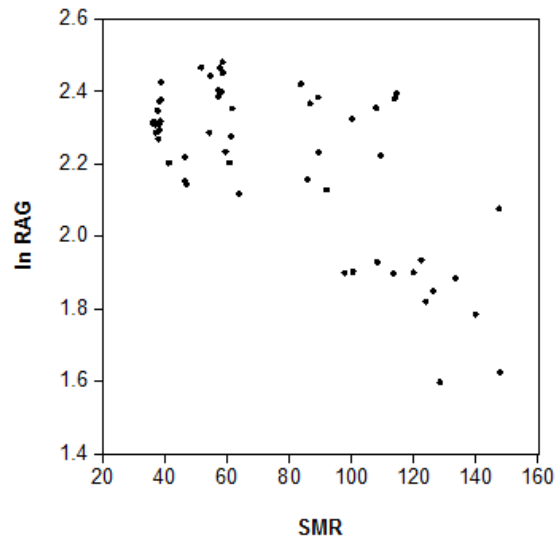


Figura 3.12: Diagrama de dispersión del rendimiento del aguacate contra el salario mínimo.

A continuación se muestran las pruebas del diagnóstico residual y de especificación del modelo: La figura 3.13 muestra la matriz de correlación, la cual puede ser útil para identificar la posible presencia de multicolinealidad. De ésta se puede ver que existe una alta correlación entre los términos logarítmico y lineal de cada una de las variables, así como entre las variables PR_{PV} y PR_P .

Figura 3.13: Matriz de correlación.

	lnGSLA	lnPR_PV	lnPR_V	GSLA	PR_PV	PR_V
lnGSLA	1	0.149007	0.102759	0.99908	0.13409	0.109444
lnPR_PV	0.149007	1	0.926168	0.142475	0.989874	0.924308
lnPR_V	0.102759	0.926168	1	0.095116	0.90825	0.989729
GSLA	0.99908	0.142475	0.095116	1	0.127557	0.101362
PR_PV	0.13409	0.989874	0.90825	0.127557	1	0.924334
PR_V	0.109444	0.924308	0.989729	0.101362	0.924334	1

Para investigar la presencia de autocorrelación en los residuales se realizan las pruebas Breusch-Godfrey y Ljung Box (figura 3.14). Se tiene que los residuales del modelo estimado no presentan problemas de autocorrelación de orden uno a cuatro. La hipótesis nula para ambas pruebas consiste en que no existe autocorrelación, y se acepta para p-valores mayores a 0.05 al 95 % de significancia.

Para verificar que los residuales sean homoscedásticos se realizan las pruebas ARCH, White y White cruzada (figura 3.15). La prueba ARCH provee evidencia de que la varianza

de los residuales no cambia con el tiempo, es decir, no hay problemas de heteroscedasticidad condicional (por lo menos hasta orden 4). No obstante, las pruebas White y White cruzada indican que los residuales no son homoscedásticos. La conclusión acerca de si hay o no heteroscedasticidad es ambigua.

Figura 3.14: Pruebas de autocorrelación

Correlación serial Breusch-Godfrey			Prueba Ljung-Box Q		
	F-Estat	P-val		Q-Estat	P-val
Estadístico			Estadístico		
T1	1.981987	0.1726	Q1	2.1267	0.145
T2	1.232718	0.3016	Q2	2.4979	0.287
T3	1.014424	0.3959	Q3	3.9062	0.272
T4	1.522192	0.2136	Q4	7.5749	0.108

(a) Breusch-Godfrey

(b) Ljung Box

Figura 3.15: Pruebas de homoscedasticidad

Prueba ARCH			Prueba White		
	F-Estat	P-val		F-Estat	P-val
Estadístico			Estadístico		
ARCH(1)	2.702247	0.1062		2.998608	0.0069
ARCH(2)	2.008182	0.1449			
ARCH(3)	1.255792	0.3001			
ARCH(4)	1.735113	0.1585			
				Prueba White Cruzado	
				2.431098	0.0147

(a) ARCH

(b) White y White cruzada

El histograma de los residuales en la regresión (figura 3.16) muestra que estos se distribuyen de manera normal. El estadístico Jarque-Bera es no significativo y la probabilidad indica que los residuales se distribuyen normalmente a un 95 % de significancia.

Para probar la linealidad del modelo estimado se realiza la prueba RESET de Ramsey (figura 3.17). Ésta muestra que la suposición de linealidad del modelo no es perfectamente correcta, pudiendo existir términos no-lineales.

Los gráficos de la prueba CUSUM y CUSUMQ (figura 3.18) no muestran evidencia de que existan problemas de cambio estructural en el modelo. La suma acumulada de los residuales de la regresión se mantiene dentro de las bandas de valores críticos al 5 % de significancia.

Finalmente, en la figura 3.19 se muestra la serie observada (línea azul) y la serie estimada (línea roja) del rendimiento del aguacate. Como se puede observar, la serie estimada es capaz de reproducir en buena medida la serie observada.

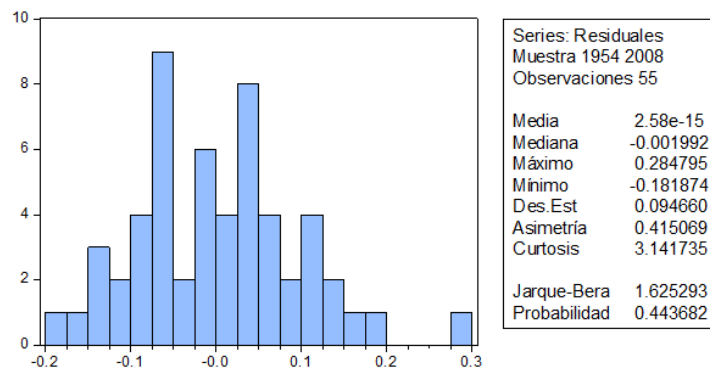
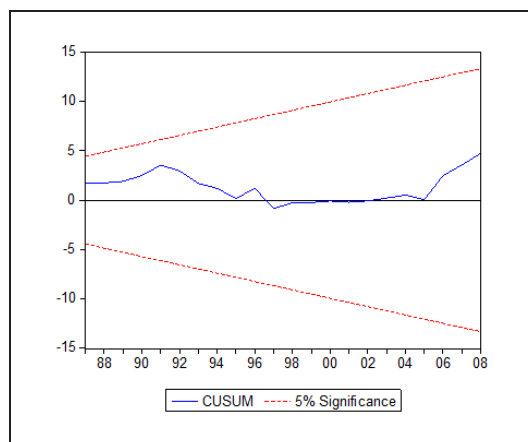


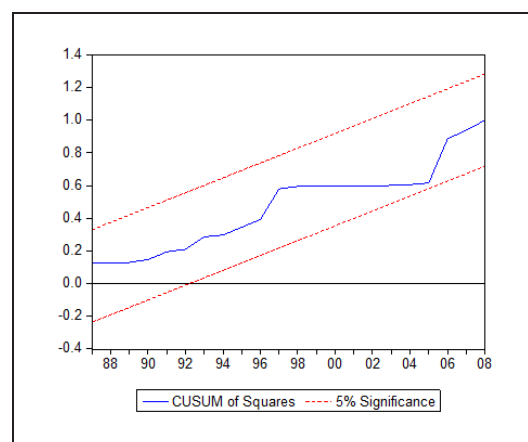
Figura 3.16: Prueba de Normalidad Jarque-Bera.

Figura 3.17: Prueba RESET.

Prueba RESET		
	F-Estat	P-val
Estadístico		
RESET(1)	3.370772	0.0731
RESET(2)	4.224096	0.0211
RESET(3)	3.743585	0.018
RESET(4)	2.832043	0.0366



(a) CUSUM



(b) CUSUMQ

Figura 3.18: Permanencia estructural

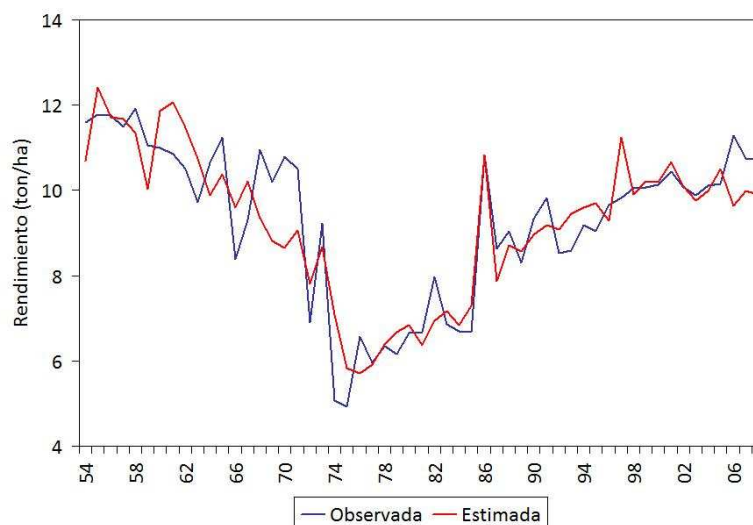


Figura 3.19: Gráfico de la serie observada y serie estimada del rendimiento del aguacate.

3.8. Evaluación del pronóstico

Existen varias medidas para evaluar la capacidad predictiva de un modelo estimado. Todas estas medidas se basan en usar una parte de la muestra disponible para la estimación del modelo y el resto para evaluación de la proyección. Esto es, todas evalúan la proyección hecha para valores observados y para las variables independientes y dependiente. Entre las medidas más utilizadas para evaluar un pronóstico están la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE) y el error absoluto medio (MAE), que se muestran en el Apéndice A. Estas medidas deben utilizarse únicamente para comparar las predicciones obtenidas por distintos modelos para la misma variable dependiente. Cuanto menor sea el valor de estas medidas, mejor será la capacidad predictiva del modelo. Tal es el caso para el coeficiente de Theil, que deberá estar entre cero y uno. Cuando dicho coeficiente alcanza un valor de cero indica una proyección perfecta, mientras que valores cercanos a uno indican una muy mala proyección (Brooks, 2008).

La manera de evaluar el pronóstico del modelo fue reestimar la ecuación usando solamente una fracción de la muestra y dejar cuatro observaciones fuera con el fin de contrastar la proyección contra los datos observados.

La figura 3.20 muestra el gráfico del pronóstico junto con los intervalos de proyección a dos veces el error estándar por arriba y por debajo de la serie. El coeficiente de Theil (0.464) muestra que la capacidad predictiva del modelo es muy buena. De acuerdo con la gráfica, la descomposición de los errores de proyección muestra que el modelo logra seguir adecuadamente la media (proporción de sesgo = 0.0005) y la varianza (proporción de varianza = 0.0081) de la variable dependiente, siendo no sistemática la mayor parte del error del pronóstico (proporción de covarianza = 0.9912). Tanto la proporción de sesgo

como la varianza se encuentran muy por debajo del 0.1, valor que marca la regla empírica como el límite a partir del cual sería necesario considerar reespecificar el modelo.

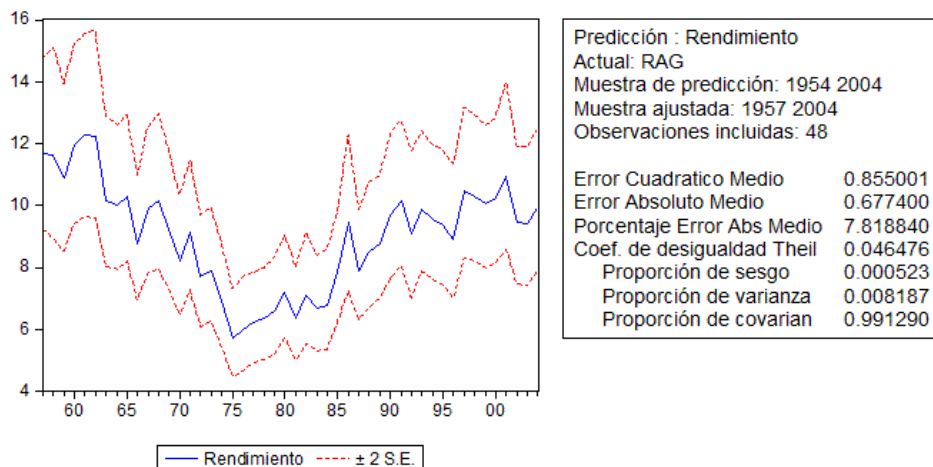


Figura 3.20: Evaluación del pronóstico.

A continuación se muestra el análisis de maximización del rendimiento del aguacate en una dimensión, esto es, se analiza el rendimiento en función de una única variable: el índice *GSL* o la precipitación de primavera-verano *PR_PV*.

Impacto de la duración de la temporada de crecimiento (*GSL*) en el rendimiento del aguacate

Con base en los resultados de la regresión, el valor óptimo del rendimiento en función del índice *GSL* se calculó manteniendo todas las demás variables constantes, es decir, dichas variables se sustituyeron por su valor promedio en el período de 54 años observados. Los valores fueron los siguientes: la precipitación de verano fue de 920 mm, la precipitación de primavera - verano de 990 mm y el salario mínimo de 60 pesos. El máximo rendimiento se produjo cuando el índice *GSL* alcanza el valor de 292 días, en un rango de 220 días a 340 días, los cuales son los valores mínimo y máximo obtenidos de la climatología en la región estudiada. Este rendimiento máximo supera el valor promedio del rendimiento (9.27 ton/ha) en un 30%. La figura 3.21 muestra el análisis.

Impacto de la lluvia en el rendimiento del aguacate

Una de las variables de lluvia, la variable precipitación de verano *PR_V* (significativa al 80%), tuvo un menor impacto que la *PR_PV* sobre el rendimiento del aguacate, por lo que contribuye al rendimiento pero no da la suficiente información de impacto para generar variación en éste. Sin embargo, la variable precipitación de primavera-verano

PR_PV sí genera un mayor impacto y es estadísticamente más significativa. Para calcular el impacto, al igual que en el caso anterior, se mantienen constantes todas las demás variables a sus valores promedio durante el período observado de 54 años. Los valores son: 282 días para la variable duración de la temporada de crecimiento *GSL*, 920 mm para la precipitación de verano y 60 pesos para el salario mínimo. La variable precipitación de primavera-verano se evalúa en un rango de 500 mm a 1590 mm, obteniéndose así un óptimo de lluvia conjunta en las estaciones de primavera y verano de 1012 mm con un rendimiento de 12.21 ton/ha. La figura 3.22 muestra estas características. Estos resultados muestran que en ambos casos los valores óptimos obtenidos del índice *GSL* y de la *PR_PV* que maximizan el rendimiento del cultivo son ligeramente mayores a los valores medios de las series históricas de *GSL* y *PR_PV* (figuras 3.21 y 3.22).

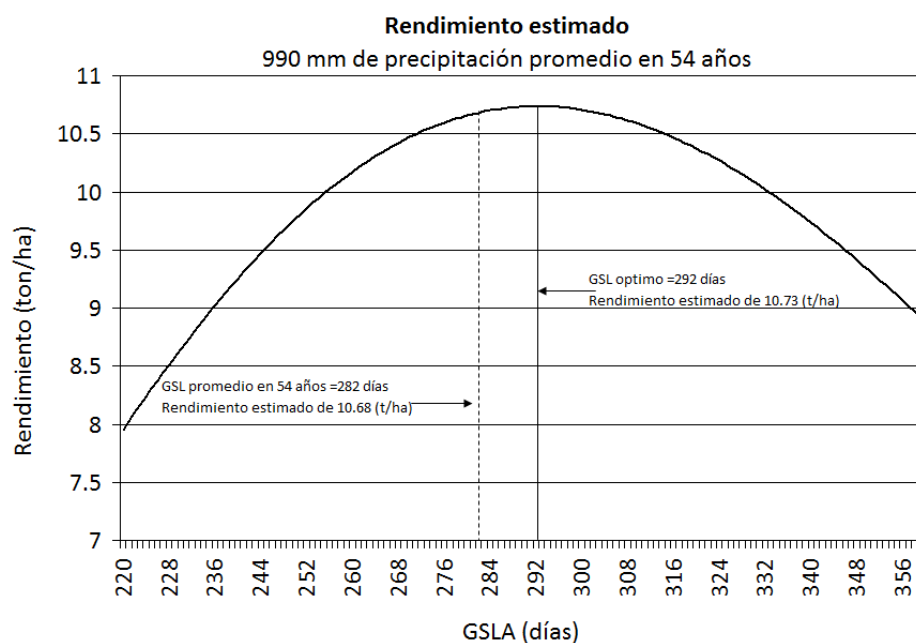


Figura 3.21: Impacto del índice *GSL* en el rendimiento estimado.

Por lo anterior, es posible afirmar que el clima de Uruapan es cercano a los valores óptimos encontrados en este ejercicio. Bajo estas condiciones, cuando el índice *GSL* tome valores menores al promedio (282 días), causado por un aumento de temperatura, aún se tendrá un margen para impactos positivos en el rendimiento, es decir, el rendimiento muy posiblemente seguirá siendo mayor a su valor promedio anual de 9.27 ton/ha.

Los resultados obtenidos de las secciones 3.6, 3.7 y 3.8 muestran que el modelo propuesto (ecuación (3.8)) describe adecuadamente el comportamiento de la serie del rendimiento del aguacate y posee características apropiadas para su utilización en ejercicios de pronóstico, por lo que se considera un modelo adecuado para el presente estudio.

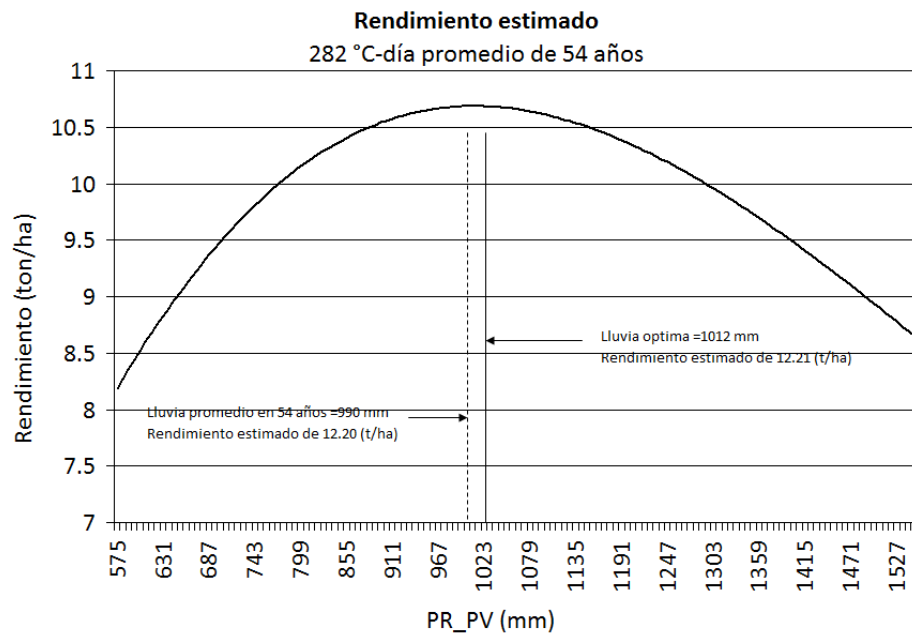


Figura 3.22: Impacto de la precipitación de primavera-verano PR_{PV} en el rendimiento estimado.

Capítulo 4

Aplicación del modelo considerando escenarios

En este capítulo se aplican escenarios de cambio climático al modelo estimado (ecuación (3.9)), presentando proyecciones del rendimiento del aguacate en la región de estudio. Se muestran las metodologías básicas para la generación de predicciones puntuales y escenarios. El análisis se realiza basándose en la Guía para la Generación de Escenarios de Cambio Climático Escala Regional (Conde et al. 2008) y en ciertos escenarios del IPCC (IPCC-AR4; IPCC-WG1, 2007) para los modelos de circulación general ECHAM5 y HADGEM1. Las variables proyectadas son la temperatura y precipitación mensuales al año 2050, considerando los escenarios de emisiones A1B, A2 y B1. También se establecen tres panoramas económicos para la variable salario mínimo basados en la evolución que dicta la economía mexicana, con los cuales se evalúa el impacto de los efectos del clima que se pudieran reflejar en el rendimiento del cultivo.

4.1. Escenarios de cambio climático

En 1990 y 1992 el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) desarrolló varios escenarios de emisiones a largo plazo dentro de Reporte Especial de Escenario de Emisiones (SRES por sus siglas en inglés) (Nakicenovic et al. 2000). En 1996 el IPCC decidió desarrollar un nuevo conjunto de escenarios.

Los escenarios son imágenes alternativas de lo que podría acontecer en el futuro y constituyen un instrumento apropiado para analizar de qué manera influirán los diferentes forzamientos en las emisiones futuras, y para evaluar el margen de incertidumbre de dicho análisis. Los escenarios son de utilidad para el análisis del cambio climático, y en particular para la creación de modelos del clima, para la evaluación de los impactos y para las iniciativas de adaptación y de mitigación. Cuatro líneas evolutivas cualitativas proporcionan cuatro conjuntos de escenarios denominados "familias": A1, A2, B1 y B2. El conjunto de escenarios se compone de seis grupos de escenarios tomados de las cuatro

familias: un grupo de cada una de las familias A1, B1 y B2, y tres grupos de la familia A1, que caracterizan el desarrollo alternativo de tecnologías de energía (Conde et al. 2008).

Conde et al. (2008) señala que la línea evolutiva y familia de escenarios A1 describe un mundo futuro con un rápido crecimiento económico, una población mundial que alcanza su valor máximo hacia mediados del siglo y disminuye posteriormente, y una rápida introducción de tecnologías nuevas y más eficientes. Sus características distintivas más importantes son la convergencia entre regiones, la creación de capacidad y el aumento de las interacciones culturales y sociales, acompañadas de una notable reducción de las diferencias regionales en cuanto a ingresos por habitante. La familia de escenarios A1 se desarrolla en tres grupos que describen alternativas del cambio tecnológico en el sistema de energía. Utilización intensiva de combustibles de origen fósil (A1FI), utilización de fuentes de energía no de origen fósil (A1T) o utilización equilibrada de todo tipo de fuentes (A1B).

La familia de líneas evolutivas y escenarios A2 describe un mundo muy heterogéneo. Sus características más distintivas son la autosuficiencia y la conservación de las identidades locales. El desarrollo económico está orientado básicamente a las regiones y el crecimiento económico por habitante, así como el cambio tecnológico están más fragmentados y son más lentos que en otras líneas evolutivas. La familia de líneas evolutivas y escenarios B1 describe un mundo convergente con una misma población mundial que alcanza un máximo hacia mediados del siglo y desciende posteriormente, como en la línea evolutiva A1. Con orientación a una economía de servicios y de información, acompañados de una utilización menos intensiva de los materiales y de la introducción de tecnologías limpias con un aprovechamiento eficaz de los recursos. Dando importancia a las soluciones de orden mundial encaminadas a la sostenibilidad económica, social y medioambiental, así como a una mayor igualdad, pero en ausencia de iniciativas adicionales en relación con el clima.

La familia de líneas evolutivas y escenarios B2 describe un mundo en el que predominan las soluciones locales a la sostenibilidad económica, social y medioambiental. Es un mundo cuya población aumenta progresivamente a un ritmo menor que en A2, con unos niveles de desarrollo económico intermedios, y con un cambio tecnológico menos rápido y más diverso que en las líneas evolutivas B1 y A1. Centrado principalmente en los niveles local y regional.

Para la construcción de escenarios de cambio climático (Conde et al. 2011) se utilizaron las herramientas propuestas en la Guía para la Generación de Escenarios de Cambio Climático Escala Regional, que está basada en las metodologías de General Guidelines on the Use of Scenario Data for Climate Impact and Adaptation Assessment Version 2 (IPCC-TGICA, 2007). Algunas de las consideraciones más relevantes de dicha metodología se refieren a los escenarios de cambio climático regionales que deben cumplir con las siguientes consideraciones:

- Consistencia a nivel regional en las proyecciones regionales.
- Plausibilidad física y realismo.

- Información apropiada para las evaluaciones de impactos.
- Representatividad del rango potencial de cambio climático regional.
- Actividad de las simulaciones.
- Validez (que reproduzcan en lo posible el clima observado).
- Representatividad de los resultados.
- Comparabilidad con los resultados anteriores.
- Ser útiles para los estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación.

Bajo las consideraciones previas y teniendo en cuenta que es fundamental que los escenarios de cambio climático deban ser un producto hecho a la medida de las necesidades de los usuarios y no un producto genérico que pretenda satisfacer a cualquier usuario, los modelos utilizados para los estudios de impactos son ECHAM5 y HADGEM1, para los escenarios A1B, A2 y B1, según la Guía para la Generación de Escenarios de Cambio Climático Escala Regional (Conde et al. 2008).

Una vez establecido los modelos a utilizar y definida la región de estudio, para la elaboración de los escenarios de cambio climático se utilizó la información de la página canadiense: <http://pacificclimate.org/tools-and-data/regional-analysis-tool>, del Pacific Impacts Consortium (PICC), la que permite obtener los escenarios para regiones específicas de México. Esta herramienta permite definir una región, generar los mapas y obtener los detalles de ella.

La figura 4.1 muestra los valores obtenidos para las variables de precipitación y las unidades calor para los modelos ECHAM5 y HADGEM1 bajo los distintos escenarios. Dichos valores se refieren a las condiciones medias durante el periodo 2035-2065. Durante este período puede haber estaciones muy secas, normales o muy lluviosas, pero la media se encuentra en el valor mostrado.

Figura 4.1: Cambios proyectados en las variables climáticas de interés para el año 2050.

FAMILIA:	ECHAM			HADLEY		
	A1B	A2	B1	A1B	A2	B1
PR PRIM*	-17	-16	-13	8	13	-3
PR VER*	2	2	1	5	0	6
PR OTO*	8	11	9	0	1	-9
PR INV*	-35	-18	-21	-18	-7	-9
UC NOR*	2.7	2.3	1.8	2.8	2.5	2.1

* Indica cambios porcentuales sobre la precipitación acumulada por estación

° Indica aumento de °C sobre la temperatura base para el cálculo del UC

Haciendo la suposición de que las variables evolucionarán linealmente desde su valor medio hasta el cambio obtenido por los escenarios de cambio climático, se obtienen gráficos

que muestran las diferencias entre los modelos y escenarios de emisiones escogidos. En la figura 4.2 se muestran las proyecciones estacionales de las unidades calor (UC) bajo los modelos ECHAM5 (figura 4.2(a)) y HADGEM1 (figura 4.2(b)) para las familias de escenarios A1B, A2 y B1. Estos gráficos reflejan la climatología mensual de las unidades calor acumuladas en la región de estudio para el período 1954-2008 (barras) y la proyección de las UC a 2050 (líneas). Como se puede observar, las UC son mayores, los aumentos mensuales son de $60^{\circ}\text{C}/\text{día}$ aproximadamente con respecto a la climatología. Este aumento es bastante homogéneo en todos los meses y se presenta de igual manera para los tres escenarios en ambos modelos. Se esperaría que los escenarios marcaran impactos con respecto a algunas predicciones por el IPCC, como un aumento mayor en los meses calidos provocando mayor severidad de las olas de calor, veranos más secos y largos, provocando mayor estrés calórico. Sin embargo esto no se observa.

Finalmente, los gráficos 4.2 muestran que la planta necesitará un periodo más corto para que ésta cumpla con la fase de floración y pase a la fase de fructificación. Se han identificado cuatro floraciones al año y quizás ésta puede ser una razón por la cual pudiera aparecer alguna otra floración al año.

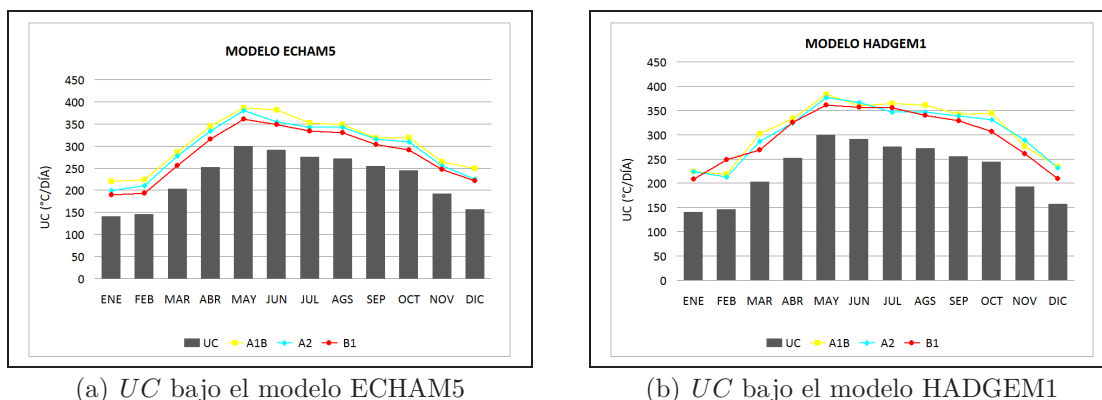
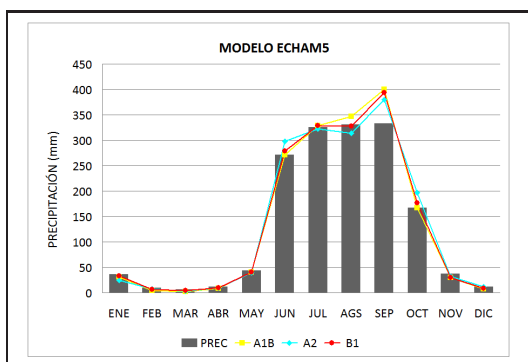


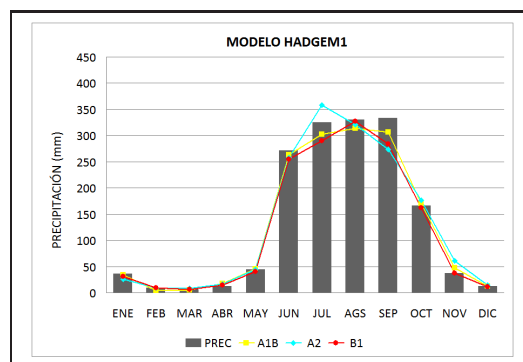
Figura 4.2: Escenarios para las UC al 2050. Modelos ECHAM5 y HADGEM1.

La figura 4.3 muestra la proyección mensual de la precipitación bajo los modelos ECHAM5 (figura 4.3(a)) y HADGEM1 (figura 4.3(b)), con los escenarios de emisión A1B, A2 y B1. Los gráficos describen, de manera similar a los anteriores, la climatología mensual de la precipitación (barras) y las proyecciones a 2050 (líneas) para la región de estudio. En ellas se observa que llueve mucho más en los meses cálidos, siendo el mes de septiembre el más lluvioso y marzo el más seco del año. En lo que respecta a los escenarios se observa que en los meses de poca actividad de precipitación ésta se mantiene similar a sus valores medios históricos, teniéndose significativamente poca variación en lo proyectado. Lo contrario sucede en los meses lluviosos ya que las proyecciones exhiben variaciones porcentuales más marcadas (aumentan y disminuyen).

En general, los tres escenarios para el modelo ECHAM5 (figura 4.3(a)) muestran proyecciones cercanas a los valores medios históricos para los meses menos lluviosos. En los meses de junio, septiembre y octubre se observa un aumento porcentual significativo en la precipitación, mientras que en los meses de julio y agosto la proyección se mantiene cercana a los valores medios. Para el modelo HADGEM1 (figura 4.3(b)) se perciben variaciones porcentuales más variadas, pero en general proyecta que lloverá menos y se tendrán meses más secos, salvo para el mes de julio en donde la proyección para el escenario A2 denota que éste será más lluvioso.



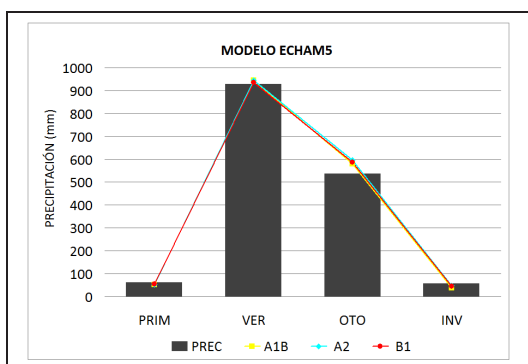
(a) Precipitación bajo el modelo ECHAM5



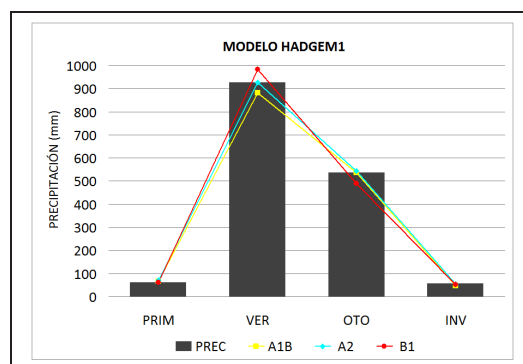
(b) Precipitación bajo el modelo HADGEM1

Figura 4.3: Escenarios para la precipitación bajo los modelos ECHAM5 y HADGEM1.

La variación estacional descrita anteriormente se puede apreciar mejor en la figura 4.4 para las cuatro distintas estaciones del año.



(a) Precipitación bajo el modelo ECHAM5



(b) Precipitación bajo el modelo HADGEM1

Figura 4.4: Escenarios para la precipitación en las estaciones del año bajo los modelos ECHAM5 y HADGEM1.

En el modelo ECHAM5 (figura 4.4(a)) todos los escenarios proyectan valores de la precipitación similares a la climatología, salvo para la temporada de otoño donde se tiene un incremento de más de 50 mm, lo que se traduce en un aumento mayor al 9%. Para

el modelo HADGEM1 (figura 4.4(b)) se tiene que las proyecciones realizadas con el escenario A2 son cercanas a la climatología, mientras que los escenarios A1B y B1 presentan variaciones para las estaciones más lluviosas (verano y otoño) respecto a la climatología, esto es, se tienen valores que están por encima y por debajo de la climatología.

En general no se prevén riesgos de sequía provocados por la falta de lluvia y tampoco parece ser que se prevea un comportamiento irregular causado por el exceso de lluvia, más bien si creciera la demanda del cultivo sería necesario acudir a las prácticas de riego para satisfacer las necesidades hídricas.

4.2. Aplicación del modelo considerando panoramas económicos

La construcción de escenarios consiste en calcular los efectos de las combinaciones particulares de las variables independientes sobre la variable dependiente. Estos escenarios son de gran utilidad cuando se busca inferir el impacto potencial más allá de sólo cambios en la media, como por variabilidad en las variables independientes o para valores poco comunes. La metodología descrita aquí fue tomada de Gay et al. (2006).

4.2.1. Impacto potencial en la producción

El análisis de escenarios se encarga precisamente de estudiar cómo afectaría a la solución óptima obtenida y a la función objetivo el cambio de uno de los parámetros, manteniendo fijos los restantes, como se definió al final del capítulo 3.

El análisis de escenarios no sólo tiene que ver con el estudio de la robustez de la solución frente a posibles errores en el cálculo de los coeficientes y recursos disponibles, sino que también puede ser de gran ayuda a la hora de valorar futuras estrategias de desarrollo y mejora de una empresa.

El modelo desarrollado anteriormente permite integrar los escenarios de cambio climático obtenidos de la salida de modelos físicos y en las estimaciones sobre variables socioeconómicas relevantes para crear proyecciones sobre el sector o actividad de interés que ayuden en la evaluación integrada de los impactos de cambio climático. La generación de dichas predicciones, que en realidad son también escenarios de la producción futura, involucra:

- Estimación de un modelo estadísticamente adecuado para la actividad o sector. Es decir, evaluación de la capacidad de proyección del modelo.
- Generación de escenarios climáticos y socioeconómicos de las variables independientes incluidas en el modelo para el período que se desea predecir. Especificar supuestos sobre la evolución de estas variables durante el período de proyección.

- Cálculo de predicciones puntuales de la variable dependiente e intervalos de proyección a un determinado nivel de confianza.
- Y finalmente interpretación socioeconómica de la proyección.

A partir de las proyecciones obtenidas y mediante el análisis de escenarios de lo que se desea modelar y de su entorno, se pueden identificar situaciones de riesgo, estimar costos potenciales para la actividad o sector y evaluar el costo-beneficio de medidas potenciales de adaptación.

4.2.2. Predicciones bajo tres panoramas económicos

Para generar predicciones de la variable dependiente (rendimiento) se toma la ecuación de regresión que se estimó (ecuación (3.9)) y se introducen los valores estimados para cada variable y año. El resultado consistirá en la proyección del valor medio de la producción anual condicional al conjunto de valores seleccionados de las variable independientes.

Se puede obtener la evolución de la media del rendimiento condicional del aguacate a través de los valores de las variables independientes para un determinado año. Tomando las predicciones de las variables independientes para cierto año en el periodo de proyección y sustituyéndolos en la ecuación de regresión estimada, se obtendrá la serie de valores para el rendimiento del aguacate bajo el escenario especificado.

Para efectos de este trabajo se utilizarán tres posibles escenarios sobre la evolución del salario mínimo real.

Se determinan cambios en el salario mínimo mediante la creación de tres panoramas puntuales clasificados como conservador, neutro y optimista, con base en la economía mexicana, lo cual permitirá realizar comparaciones entre los distintos escenarios de cambio climático para cada panorama. Tomando en cuenta la información del Banco de México y La Comisión Nacional de Salarios Mínimos se analiza la evolución histórica y el comportamiento de la economía mexicana.

Si bien el salario mínimo se encontraba en los años setenta en su mayor poder adquisitivo, en los últimos diez años su crecimiento ha sido alrededor de 1.36% con respecto al índice inflacionario. El crecimiento real del salario mínimo en los últimos años se mantuvo entre 1.5% y 2.5%, equivalente a 2 ó 2.5 pesos anuales en promedio. Sin embargo, tomando en cuenta los datos históricos del período comprendido para el estudio (1954-2008), el incremento en algunos años fue mayor, pero hacia nuestros días y para el período futuro considerado (2008-2050) se espera que la economía mexicana siga creciendo a una tasa constante de al menos un 1.55% anual. También se considera que en este período no existen fuertes crisis económicas que apunten a una debilidad en los mercados externos e inestabilidad en la economía mundial.

A continuación se muestran las proyecciones para los distintos panoramas económicos.

Panorama conservador

Usando el enfoque de calcular los efectos de las combinaciones particulares de las variables independientes sobre la variable dependiente, se integran los escenarios a 2050 generados en la sección 4.1, partiendo de un escenario base que se construye con los siguientes valores según la climatología de la región de estudio: 340 días para el índice *GSL*, 1000 mm para la precipitación de primavera-verano, 930 mm para la precipitación de verano y un valor inicial para el salario mínimo de 58 pesos que crece 2% anual a partir del año 2008 y hasta el año 2050.

La figura 4.5 describe los datos que se obtienen del rendimiento bajo los distintos escenarios de cambio climático a 2050 en el panorama conservador. El escenario base arroja un rendimiento de 11.17 ton/ha, el cual disminuye al año 2050 para todos los distintos escenarios. La desviación (diferencia) obtenida entre el escenario base y el proyectado es mayor en el escenario ECHAM-A1B, disminuyendo 3.11 ton/ha, lo que se traduce en un decremento del 28% respecto al escenario base. En el mejor de los casos está el escenario ECHAM-B1, en el cual el rendimiento disminuye 2.07 ton/ha, es decir, un decremento del 19%.

Figura 4.5: Análisis del rendimiento proyectado al año 2050 bajo el panorama conservador.

RENDIMIENTO BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO AL AÑO 2050					
PANORAMA CONSERVADOR					
ESCENARIO		BASE*	2050*	Desv*	%
ECHAM5	A1B		8.05	-3.11	-28%
	A2	11.17	8.61	-2.55	-23%
	B1		9.10	-2.07	-19%
HADGEM1	A1B		8.31	-2.86	-26%
	A2	11.17	8.37	-2.79	-25%
	B1		8.94	-2.23	-20%

* (ton/ha)

° La media del rendimiento es de 9.27 ton/ha

Desv Desviaciones del escenario base contra el proyectado al año 2050

% Desviaciones porcentuales

Estos resultados se muestran gráficamente en la figura 4.6. En esta figura las barras indica las desviaciones del rendimiento del escenario base respecto a las proyecciones en los distintos escenarios. La primera letra de cada barra indican el modelo respectivo (E para el modelo ECHAM5 y H para el modelo HADGEM1), mientras que las letras siguientes indican los escenarios respectivos. En esta figura se percibe que la familia de escenarios A1B tiende a proyectar la disminución más fuerte en el rendimiento, siendo la familia de escenarios B1 la que impacta menos negativamente al rendimiento.

Panorama moderado

De manera análoga al caso anterior se utilizan los siguientes valores climáticos para el escenario base: 340 días para el índice *GSL*, 1000 mm para la precipitación de primavera-

verano, 930 mm para la precipitación de verano y un valor inicial para el salario mínimo de 58 pesos que crece 1.5 % anual.

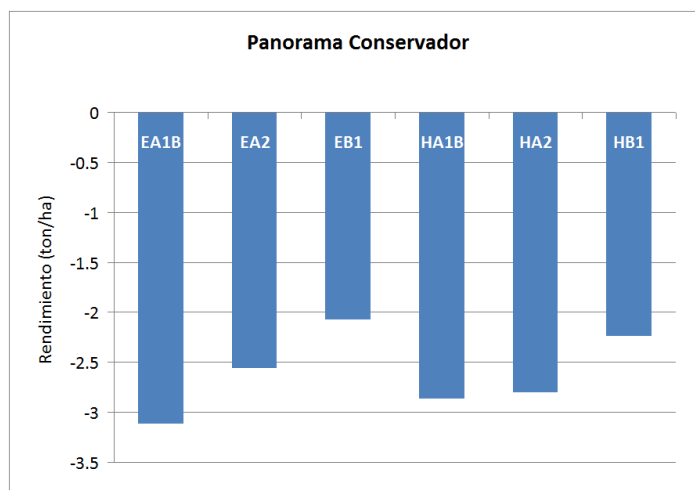


Figura 4.6: Desviación del rendimiento base respecto al proyectado a 2050. Panorama conservador.

Elaborando las proyecciones se obtienen los siguientes valores (figura 4.7). El escenario base arroja un rendimiento de 11.18 ton/ha, que disminuye al año 2050 para todos los distintos escenarios. La desviación obtenida entre el escenario base y el proyectado es mayor en el escenario ECHAM5-A1B, disminuyendo 2.59 ton/ha, lo que se traduce en un decremento del 23%. En el mejor de los casos se encuentra el escenario ECHAM5-B1, el cual exhibe una disminución de 1.48 ton/ha, es decir, un decremento de 13%.

Figura 4.7: Análisis del rendimiento proyectado al año 2050 bajo el panorama moderado.

RENDIMIENTO BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO AL AÑO 2050					
PANORAMA MODERADO					
ESCENARIO		BASE*	2050*	Desv*	%
ECHAM5	A1B	11.18	8.57	-2.59	-23%
	A2		9.17	-2.00	-18%
	B1		9.69	-1.48	-13%
HADGEM1	A1B	11.18	8.84	-2.32	-21%
	A2		8.91	-2.25	-20%
	B1		9.51	-1.66	-15%

* (ton/ha)

° La media del rendimiento es de 9.27 ton/ha

Desv: Desviaciones del escenario base contra el proyectado al año 2050

%: Desviaciones porcentuales

En la figura 4.8 se muestra gráficamente lo dicho anteriormente. En ésta se observa, al igual que el caso anterior, que la familia de escenarios A1B proyecta la disminución más fuerte en el rendimiento, mientras que la familia de escenarios B1 produce el menor decremento.

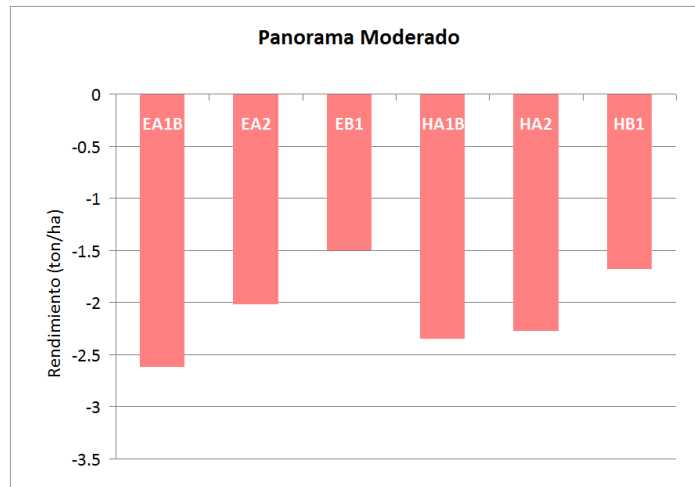


Figura 4.8: Desviación del rendimiento base respecto al proyectado a 2050. Panorama moderado.

Panorama optimista

Por último se analiza el panorama optimista. Se utilizan los siguientes valores climáticos para el escenario base: 340 días para el índice GSL , 1000 mm para la precipitación de primavera-verano, 930 mm para la precipitación de verano y un valor inicial para el salario mínimo de 60 pesos con un aumento de 1.5 % anuales.

Como se esperaba, este panorama es el menos severo en cuanto a las otras proyecciones. La figura 4.9 muestra los valores obtenidos para el rendimiento base, obteniendo un poco más de 11 ton/ha y los valores proyectados al año 2050. Dichos valores muestran que la desviación obtenida entre el escenario base y el proyectado es máxima en el escenario ECHAM5-A1B, disminuyendo 2.47 ton/ha, mientras que en el escenario HADGEM1-A1B la disminución es de 2.51 ton/ha, lo que significa un decremento del 22 % respecto al escenario base. El escenario menos severo corresponde al ECHAM5-B1, con una disminución de 1.44 ton/ha, lo que representa un decremento del 13 %.

Figura 4.9: Análisis del rendimiento proyectado al año 2050 bajo el panorama optimista.

RENDIMIENTO BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO AL AÑO 2050					
PANORAMA OPTIMISTA					
ESCENARIO		BASE*	2050*	Desv*	%
ECHAM5	A1B		8.70	-2.47	-22%
	A2	11.05	9.27	-1.90	-17%
	B1		9.72	-1.44	-13%
HADGEM1	A1B		8.66	-2.51	-22%
	A2	11.05	8.85	-2.32	-21%
	B1		9.33	-1.84	-16%

* (ton/ha)

° La media del rendimiento es de 9.27 ton/ha

Desv Desviaciones del escenario base contra el proyectado al año 2050

% Desviaciones porcentuales

En este caso se tiene que a pesar de partir de un rendimiento menor en el escenario base, éste no disminuye más de 3 ton/ha respecto al escenario base. En la figura 4.10 se muestra gráficamente lo dicho anteriormente. Al igual que en los dos casos anteriores se observa que la familia de escenarios A1B proyecta la disminución más fuerte en el rendimiento, siendo la familia de escenarios B1 la más benigna.

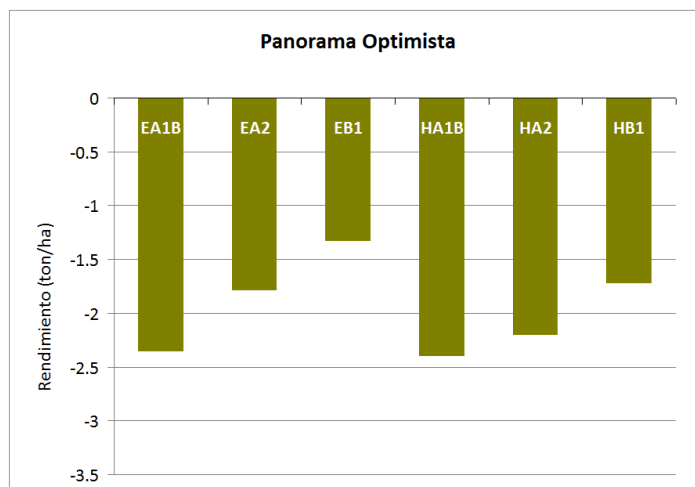


Figura 4.10: Desviación del rendimiento base respecto al proyectado a 2050. Panorama optimista.

A fin de visualizar esta información de otra manera se realizaron dos gráficos más para analizar las proyecciones del rendimiento para cada modelo de circulación general utilizado en este trabajo (figura 4.11). Comparando las figuras 4.11(a) y 4.11(b) se tiene que en ambos modelos se produce una disminución similar en el rendimiento proyectado para cada escenario. El panorama que produce el mayor descenso en el rendimiento es el conservador, mientras que el escenario con el menor descenso es el panorama optimista.

El salario mínimo, al ser muy significativo, afecta de manera muy importante al rendimiento en la producción de aguacate en Uruapan, Michoacán. Para ambos modelos, los panoramas moderado y conservador reflejan el hecho conocido de que el salario mínimo impacta negativamente al rendimiento (figura 3.12), esto es, mientras menor sea el valor del salario mínimo mayor será el rendimiento. Estos dos panoramas fueron construidos con el fin de estudiar el comportamiento del rendimiento ante cambios en la tasa de crecimiento anual, obteniéndose el siguiente resultado: para valores iniciales iguales del salario mínimo el rendimiento sufrirá un impacto menos severo para tasas de crecimiento más pequeñas. Sin embargo el panorama optimista no refleja este comportamiento, ya que al ser un panorama con un mayor valor del salario mínimo (60 pesos) y con una tasa de crecimiento anual de 1.5% (igual a la del panorama moderado), se esperaría que este panorama produjera una mayor disminución en el rendimiento que el panorama moderado, lo cual no ocurre; esto sugiere que el rendimiento es sensible al valor inicial del salario

mínimo: para tasas de crecimiento iguales del salario mínimo el rendimiento sufrirá un impacto menos severo para mayores valores iniciales del salario mínimo.

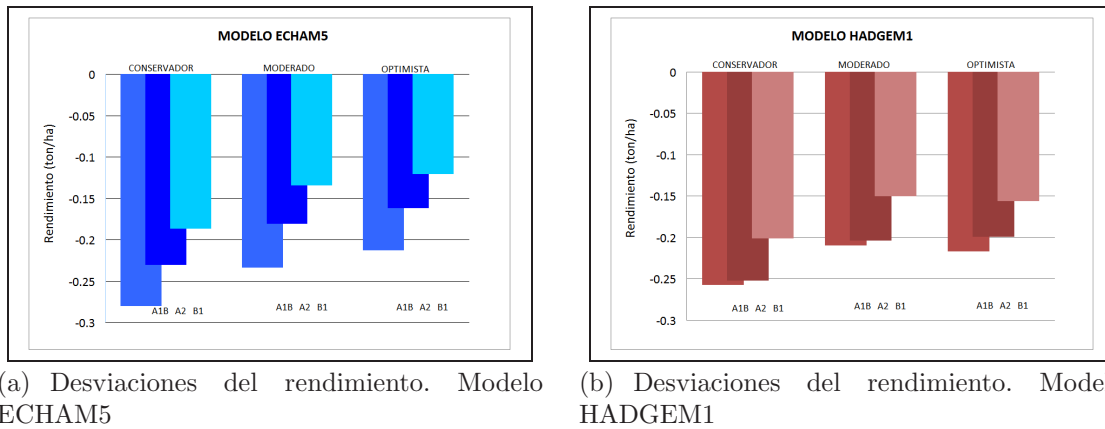


Figura 4.11: Desviación del rendimiento proyectado a 2050 respecto al rendimiento base para los modelos ECHAM5 y HADGEM1 bajo tres panoramas económicos.

La variable salario mínimo no es la única variable que impacta al rendimiento, ya que las proyecciones están influenciadas por las diferentes condiciones establecidas en los escenarios de cambio climático. Debido a ello aún es difícil establecer con seguridad el efecto de la variable económica salario mínimo en el rendimiento del aguacate, por lo que es necesario realizar más estudios. Finalmente es deseable estudiar otras posibles combinaciones de variables climáticas enmarcadas dentro de modelos de circulación general con sus respectivos escenarios de emisiones, y realizar el análisis con otro panorama económico de salario mínimo, ya que la función estimada para el rendimiento en este trabajo (ecuación 3.9) es limitada.

Capítulo 5

Conclusiones

En este trabajo de tesis se desarrolló un modelo analítico trascendental, enmarcado dentro de los denominados modelos conceptuales, para estudiar el rendimiento del aguacate en Uruapan, Michoacán, utilizando variables climáticas y económicas útiles para describir el proceso productivo. Para estimar el modelo fue necesario identificar y distinguir la fenología del aguacate en Uruapan, la cual permitió modelar un ciclo fenológico (normal) y determinar la duración de la temporada de crecimiento, así como evaluar la cantidad de lluvia en las estaciones del año.

En el modelo estimado se encontró que la variable climática más significativa fue la duración de la temporada de crecimiento, la cual aporta los requerimientos térmicos que necesita el aguacate durante su ciclo fenológico. También se mostró que varias temporadas de precipitación afectan de manera poco significativa al proceso productivo. La razón de ello es que cuando no se alcanzan al menos 1600 mm. de precipitación anual se recurre a prácticas de riego para contrarrestar este déficit.

Se analizó la sensibilidad del rendimiento del aguacate ante cambios graduales en la duración de la temporada de crecimiento y la precipitación de la temporada de primavera verano. El máximo rendimiento se obtuvo utilizando valores de la duración de la temporada de crecimiento y la precipitación que son mayores a sus respectivos valores medios. Un aumento en estas variables provoca una disminución lenta en el rendimiento, mientras que a valores menores se produce una disminución rápida en el rendimiento.

El modelo estimado se utilizó para integrar escenarios regionales de cambio climático para México obtenidos a partir de modelos de circulación general (ECHAM5 y HAD-GEM1). Estos escenarios se emplearon para generar proyecciones puntuales del rendimiento del aguacate al año 2050 mediante la creación de tres panoramas (estimaciones) de la variable económica (salario mínimo). La proyección que se obtuvo (usando valores medios de todas las variables utilizadas en el modelo) fue un descenso en el rendimiento del aguacate con respecto a su valor promedio para los distintos escenarios de cambio climático.

La estimación del modelo también mostró que el salario mínimo es la variable más significativa, un aumento de éste del 1.5% al 2% anual, combinado con los cambios en

las variables climáticas especificados por los escenarios de cambio climático, producen una disminución en el rendimiento para un mismo escenario en los diferentes panoramas económicos. Se obtuvieron algunas ideas acerca del impacto del salario mínimo en el rendimiento, pero se requiere hacer un estudio más extenso para describirlo adecuadamente.

La metodología utilizada en este trabajo demostró que los métodos econométricos son útiles para el estudio del rendimiento de un cultivo cuando se aplican adecuadamente con previo conocimiento de la fenología del cultivo.

Las limitaciones surgidas en la realización de este trabajo fueron:

- El modelo carece de variables económicas y sociales, no existe información suficiente del uso de fertilizantes, control fitosanitario, prácticas de riego, y otros costos como labores culturales, así como pago de cuotas a asociaciones, pagos de subsidios y más.
- La serie de rendimiento para este estudio fue estatal, no existe información oficial desagregada por municipio para años anteriores al 2000.

A partir de los resultados obtenidos en este trabajo se propone:

1. Integrar al modelo propuesto los demás ciclos fenológicos (Loca, Aventajada y Marceña) del cultivo del aguacate de manera individual o combinada, con el fin de determinar si este cultivo es recilente en la región de estudio. Esto es, determinar la adaptabilidad y el rendimiento del cultivo frente a cambios importantes en las variables climáticas.
2. Interpretar el modelo de orden superior propuesto en la sección 3.7 con el fin de ampliar la utilidad de los métodos econométricos en estudios de impacto en el sector agrícola ocasionados por cambios en el clima.
3. Investigar las características de las variables económicas y su representación en modelos analíticos trascendentales, particularmente la forma en que dichas variables afectan la variable modelada (en este caso el rendimiento de un cultivo).

Apéndice

Apéndice A

Pruebas de diagnóstico para el modelo de regresión

En este capítulo se presentan los supuestos bajo los cuales está construida la técnica de regresión lineal. Particularmente se aborda el diagnóstico residual y las pruebas estadísticas asociadas a éste. Esta información está tomada de los textos de Brooks (2008) y de Rosales y Bonilla (2006).

A.1. Diagnóstico de prueba para distribuciones estadísticas

Se examinan varias pruebas de diagnóstico de regresión se basan en el cálculo de un estadístico de prueba. El estadístico de prueba LM (Multiplicadores de Lagrange) sigue una distribución χ^2 con grados de libertad igual al número de restricciones colocadas en el modelo, denotado con una m .

El estadístico de prueba Wald sigue una distribución F con $(m, T - k)$ grados de libertad. Asintóticamente, estas dos pruebas son equivalentes, aunque sus resultados difieren un poco en pequeñas muestras.

$$\frac{\chi^2(m)}{m} \rightarrow F(m, T - k) \quad \text{para } T \rightarrow \infty$$

Por lo general, F se considera preferible para muestras finitas, ya que es sensible al tamaño de la muestra (uno de sus grados de libertad depende de los parámetros de tamaño de la muestra) de una manera que la χ^2 no lo es.

A.1.1. Supuesto $E(u_i) = 0$

El primer supuesto requiere que el valor promedio de los errores sea cero. La teoría económica sugiere que, si la regresión no incluye una intercepción, y el valor medio de los

errores fuera distinto de cero; en primer lugar R^2 podría ser negativa lo que implica que el promedio de la muestra \bar{y} explica más de la variación en y que las variables dependientes. En segundo lugar, y más fundamentalmente, una regresión sin parámetro intercepto podría dar lugar a sesgos potencialmente grave en las estimaciones de coeficiente de la pendiente. R^2 y \bar{R}^2 por lo general carecen de sentido en este contexto. Esto surge ya que el valor promedio de la variable dependiente \bar{y} no será igual a la media de los valores ajustados del modelo.

A.1.2. Heteroscedasticidad. $Var(u_i) = \sigma^2$

Se supone hasta ahora que la varianza (σ^2) de los errores es constante, esto se conoce como la hipótesis de homoscedasticidad. Si los errores no tienen una variación constante, se dice que son heterocedásticos.

El problema de heteroscedasticidad repercute directamente sobre la estimación de los parámetros de la regresión. Los estimadores seguirán siendo insesgados y consistentes pero no eficientes. La heteroscedasticidad causa la subestimación o sobre estimación de la varianza del modelo de regresión, por lo tanto el valor del error estándar de los parámetros, el valor de los estadísticos t y los intervalos de confianza cambian con respecto a los resultados que deberían obtenerse en ausencia de heteroscedasticidad.

A continuación se presenta un método para detectar la existencia de heteroscedasticidad:

- **Análisis de regresión:** Es la utilización de una o más regresiones auxiliares. Ayudan a evaluar la relación existente entre el cuadrado del término de error y el conjunto de regresores del modelo original. Dentro de este método se encuentran las pruebas de Park, White, Glejser, Breusch-Pagan-Godfrey, y Golfeld-Quandt. A continuación se presenta el procedimiento general para efectuar la prueba de White.

Si se tiene el siguiente modelo original:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{2i} + u_i \quad (\text{A.1})$$

Una vez estimado el modelo por el método de mínimos cuadrados ordinarios (MCO), el investigador debe calcular el cuadrado de los errores: $u_i^2 = (Y_i - \hat{Y}_i)^2$, y luego estimar por MCO el siguiente modelo:

$$u_i^2 = \alpha_0 + \alpha_1 X_{1i} + \alpha_2 X_{2i} + \alpha_3 X_{1i}^2 + \alpha_4 X_{2i}^2 + \alpha_5 X_{1i} X_{2i} + \varepsilon_i \quad (\text{A.2})$$

La prueba de hipótesis relacionada con el modelo anterior es:

$$H_0 : \alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = \alpha_5 = 0 \quad (\text{No hay heteroscedasticidad})$$

$$H_a : \alpha_1 \neq \alpha_2 \neq \alpha_3 \neq \alpha_4 \neq \alpha_5 \neq 0 \quad (\text{Si hay heteroscedasticidad})$$

El estadístico de prueba es $nR^2 \sim \chi_5^2$. En este caso el número de grados de libertad es cinco, que corresponde al número de variables explicativas en la regresión de White. Así mismo, para modelos con más variables explicativas los grados de libertad serán equivalentes al número de regresores en el modelo auxiliar. Si $nR^2 \sim \chi_5^2$, $nR^2 \sim \chi_{g.l}^2$ a un nivel de significancia α , la hipótesis nula es rechazada, por lo tanto, existe heteroscedasticidad en el modelo original.

A.1.3. No autocorrelación. $Cov(u_i, u_j) = 0$.

El problema de autocorrelación se presenta en una regresión cuando los errores de las diferentes observaciones están relacionados en el tiempo. Esto indica que el efecto de los errores en el tiempo no es instantáneo sino por el contrario es persistente en el tiempo. Otra causa de la autocorrelación es la presencia de sesgo de especificación en el modelo; principalmente por omisión de variables importantes, las cuales pasan a formar parte del error de la regresión.

Detección de la autocorrelación

Los métodos más comunes para detectar autocorrelación son:

- **El estadístico de Durbin-Watson (d):** Esta prueba solo es válida para aplicar en errores que se modelan como un proceso autoregresivo de primer orden AR(1) como el mostrado a continuación:

$$u_i = \rho u_{i-1} + \varepsilon_i$$

El estadístico d oscila entre 0 y 4. Si este se aproxima a 0, se dice que existe autocorrelación positiva (relación directa entre los errores), por el contrario si d se aproxima a 4, existe autocorrelación negativa (relación inversa entre los errores). El estadístico Durbin-Watson (d) se estima de la siguiente manera:

$$d = \frac{\sum_{i=1}^n (u_i - u_{i-1})}{\sum_{i=1}^n u_i^2} 2(1 - \hat{\rho})$$

Donde $\hat{\rho}$ es el coeficiente de autocorrelación de orden 1, el cual puede despejarse directamente d :

$$\hat{\rho} = 1 - \frac{d}{2}$$

La hipótesis planteada es:

$$H_0 : \rho_{u_i, u_{i-1}} = 0 \quad (\text{no existe autocorrelación entre los errores})$$

$$H_a : \rho_{u_i, u_{i-1}} \neq 0 \quad (\text{hay autocorrelación entre los errores})$$

El estadístico Durbin- Watson puede ser comparado con su respectivo tabulado, teniendo en cuenta el número de observaciones contenidas en la muestra y el número de regresores. Se debe tener en cuenta que d es utilizado para identificar solo autocorrelación de orden 1 y siempre y cuando el modelo tenga intercepto. Además no puede usarse en el caso de modelos autorregresivos.

- **Prueba de Breusch-Godfrey.** Esta es una prueba similar a la prueba de White. Se diferencia de esta en que la variable dependiente de la regresión auxiliar es el término de error u_i y los regresores, sus respectivos rezagos hasta el orden deseado. Adicionalmente son incluidos los regresores usados en el modelo original. La hipótesis nula corresponde a todos los coeficientes de autocorrelación de orden (los coeficientes que acompañan a los residuos rezagados en la regresión auxiliar) son iguales a cero, mientras la hipótesis alterna es que al menos uno de ellos es distinto de cero. El estadístico de prueba es $(n-s)R^2 \sim \chi_s^2$, donde s es el número de errores rezagados en la regresión auxiliar. La hipótesis nula es rechazada cuando $(n-s)R^2 \sim \chi_s^2$ a un nivel de significancia α ; en este caso se concluye que hay autocorrelación.

A.1.4. La variable X_i es no aleatoria. $Cov(u_i, x_i) = 0$

No existe relación entre el error y la correspondiente variable x , debe tener al menos dos valores diferentes. Se supone que x y u tienen una influencia separada y aditiva sobre y .

A.1.5. Los errores se distribuyen normalmente. $u_i \sim N(0, \sigma^2)$

Uno de los supuestos claves en el modelo de regresión que permite desarrollar pruebas hipótesis basadas en los estadísticos F y T, es la normalidad de los errores. Si los residuos del modelo no siguen distribución normal se restringe la validez estadística de las pruebas.

Detención de la no normalidad de los errores

Se citan de manera general dos formas de detectar si los residuos del modelo de regresión siguen o no distribución normal:

- **El Histograma de los residuos.** Consiste en la construcción de un histograma para los errores estimados del modelo y observar si su polígono suavizado de frecuencias se parece en forma aproximada una distribución normal.
- **Prueba de Normalidad Jarque Bera.** Es una prueba para muestras grandes, basada en los residuos de mínimos cuadrados ordinarios.

Requiere calcular la asimetría y curtosis de los residuos

H_0 : los errores siguen distribución normal

H_a : los errores no siguen distribución normal

El estadístico de prueba es:

$$JB = n \left[\frac{A^2}{6} + \frac{(k-3)^2}{24} \right] \sim \chi_{,2}^2 \quad (\text{A.3})$$

H_0 es rechazada si $JB > \chi_{,2}^2$ a un nivel α de significancia. A se denomina asimetría y K curtosis. Estas son medidas descriptivas de una variable aleatoria que hacen referencia al sesgo de la distribución y el apuntamiento de la distribución, respectivamente. Si una variable tiene $A = 0$ y $K = 3$, entonces ésta sigue distribución normal. La fórmula de cálculo de estas medidas es la siguiente:

$$A = \frac{E[u^3]}{(\sigma^2)^{\frac{3}{2}}} \text{ y } K = \frac{E[u^4]}{(\sigma^2)^2}$$

A.1.6. Multicolinealidad

La multicolinealidad tiene que ver con la relación lineal entre algún conjunto de variables independientes en un modelo de regresión. Cualquier relación lineal entre las variables independientes puede generar problemas de multicolinealidad.

El problema de multicolinealidad es un problema ocasionado por las observaciones en los datos recopilados de la muestra. La presencia de multicolinealidad afecta directamente la estimación de los parámetros del modelo.

Detección de Multicolinealidad

La detección de multicolinealidad en un modelo puede hacerse por medio de la visualización de contradicciones en los estadísticos que juzgan la bondad del ajuste (R^2), dependencia (F) y los estadísticos que permiten evaluar la relevancia de las variables en el modelo (t).

No obstante, se encuentran otras pruebas mucho más formales en términos estadísticos. Una de ellas es estimar coeficientes de correlación entre pares de variables independientes y formular pruebas de hipótesis sobre los coeficientes de correlación estimados para comprobar la significancia de la relación lineal en términos estadísticos. Una vez calculado el coeficiente de correlación lineal entre X_i y X_j , puede proponerse la siguiente prueba de hipótesis:

$$H_0 : \rho_{x_i, x_j} = 0 \quad (\text{No existe relación lineal entre } X_i \text{ y } X_j)$$

$$H_a : \rho_{x_i, x_j} \neq 0 \quad (\text{Si existe relación lineal entre } X_2 \text{ y } X_3)$$

El estadístico de prueba es: Si $|t| > t_{\alpha/2, n-2}$ a un nivel α de significancia determinado, se rechaza H_0 , confirmando la existencia de relación lineal entre X_i y X_j , es decir, el modelo de regresión mostrará multicolinealidad. El otro método formal consiste en la estimación de regresiones auxiliares que ayudan a evaluar la relación lineal existente entre un conjunto de variables independientes.

A.1.7. Error de especificación

Uno de los supuestos del modelo clásico de regresión lineal es que el modelo se encuentra bien especificado, es decir que su forma funcional y las variables que lo componen representan la formulación correcta. La teoría económica y algunas medidas empíricas son útiles para probar si un modelo cuenta con error de especificación.

Detención de la forma funcional inadecuada

A continuación se desarrolla el método de detección de una forma funcional inadecuada del modelo mediante la prueba RESET de Ramsey. El caso más simple de la prueba es el siguiente:

Considere el modelo $Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + u_i$, al cual se le desea probar si la forma funcional propuesta es o no inadecuada. Para realizar prueba de Ramsey se estima el modelo original y se predice la variable dependiente \hat{Y}_i . Luego se efecta una regresión auxiliar en la que al modelo original se adicionan los términos \hat{Y}_i cuadráticos o de orden superior, dependiendo de la posible relación que exista entre u_i y \hat{Y}_i . Una gráfica entre u_i y \hat{Y}_i puede ser útil para identificar los regresores a incluirse. Un ejemplo de la regresión auxiliar es:

$$Y_i = \gamma_0 + \gamma_1 X_i + \gamma_3 \hat{Y}_i^2 + \gamma_4 \hat{Y}_i^3 + \nu_i$$

Posteriormente se utiliza el siguiente estadístico de prueba:

$$F = \frac{(R_{aux}^2 - R_o^2) / j}{(1 - R_{aux}^2) / (n - g)} \sim f_{(j, n-g)}$$

donde R_{aux}^2 es el coeficiente de determinación de la regresión auxiliar, R_o^2 es el coeficiente de determinación del modelo original, j y g son el número de términos en \hat{Y}_i , parámetros incluidos en la regresión auxiliar, respectivamente. La hipótesis nula de prueba es que el modelo original está bien especificado, mientras la hipótesis alterna afirma lo contrario. Si $F > f_{(j, n-g)}$ a un nivel α de significancia, se concluye que el modelo original está inadecuadamente especificado.

Bibliografía

- [1] Álvarez, A., C. Arias, y L. Orea 2003 *Introducción al análisis empírico de la producción*. Editorial: Universidad de Oviedo, mimeo. Universidad de León.
- [2] Anguiano, J., J. Alcántar, R. Toledo, M. Tapia y A. Vidales-Fernández 2007 Caracterización edáfica y climática del área productora de aguacate de Michoacán, México. En: *Riego Y Ecofisiología (Irrigation and Ecophysiology)* Proceedings VI World Avocado Congress (Actas VI Congreso Mundial del Aguacate) 12-16 Noviembre 2007. Viña Del Mar, Chile.
- [3] Bárcenas, O., N. Martínez, P. Aguirre, Ch. Castro 2001 Fenología del aguacate (*Persea americana* Mill) cv. Hass en cuatro diferentes altitudes del municipio de Uruapan, Michoacán. En: Memorias 1er Congreso mexicano y latinoamericano del aguacate. Facultad de Agrobiología. Octubre 2001. Uruapan, Mich., México. UMSNH. 373-381.
- [4] Benioff, R., S. Guill y J. Lee, 1996 *Vulnerability and Adaptation Assessments: An International Guidebook*. U.S. Country Studies Program.
- [5] Bolaños, O. 1999 Caracterización y tipificación de organizaciones de productores y productoras. En: *Unidad de planificación estratégica*. Actas XI Congreso Nacional Agronómico y I Congreso Nacional de Extensión. Ministerio de agricultura y ganadería., 19 al 23 de julio de 1999, San José, Costa Rica. 31-39.
- [6] Bravo, M., J.L. Sánchez, J.A. Vidales, J.T. Sáens, J.G. Chávez, S. Madrigal, H.J. Muños, L.M. Tapia, G. Orozco, J.J. Alcántar, I. Vidales y E. Venegas, 2009 *Impactos ambientales y socioeconómicos del cambio de uso del suelo forestal a huertos de aguacate en Michoacán*. Publicación especial Núm. 2, SAGARPA / INIFAP, México.
- [7] Brooks, C. 2008 *Introductory Econometrics for Finance*, Second Edition. Cambridge University Press, New York.
- [8] Cárdenas, M. E., C. Peralta y M. Cárdenas, 2008 Salario mínimo en México. Obtenido 28.09.2011 de: <http://www.insyde.org.mx/expages/acervo.asp>
- [9] Conde, C., C. Gay (coordinadores), F. Estrada, A. Fernández, F. López, M. Lozano, V. Magaña, B. Martínez, O. Sánchez, J. Ramírez, J. Zavala y D. Zermeño, 2008. *Guía para la Generación de Escenarios de Cambio Climático Regional*. Primera Versión. Nov.

2008. Reporte Final del proyecto. 105. [http://www.atmosfera.unam.mx/gcclimatico/documentos/reportes_cuarta_comunicación/Escenarios/Guia_escenarios.pdf].
- [10] Conde, C., F. Estrada, B. Martínez, O. Sánchez, y C. Gay, 2011 Regional climate change scenarios for Mexico *Atmósfera* **24(1)**, 125-140.
- [11] Coria, V. 2009 *Tecnología para la producción de aguacate en México*. Segunda edición Libro Técnico Núm. 8 INIFAP Uruapan Michoacán, México.
- [12] Del Valle, J. 2000 Funciones de producción. *Departamento de Economía UPR-RP Boletín* **5(2)** 1-29.
- [13] García, E. 1981. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen, adaptado para las condiciones de la República Mexicana. 3ª Ed. Offset., Lario Ed. S.A.
- [14] Gay, C., F. Estrada, C. Conde, H. Eakin, y L. Villers, 2006 Potential Impacts of Climate Change on Agriculture: A Case of Study of Coffee Production in Veracruz, Mexico *Climatic Change* **74** 259-278.
- [15] Guillén, A. H., CH. M. Lara, C.M. Gutierrez, C. M. Ortiz y P.M. Angel, 2007 *Cartografía agroecológica del cultivo del Aguacate en Michoacán*. Morevallardo Editores de Morelia, Michoacán México.
- [16] Gutiérrez-Contreras, M., M. Lara-Chávez, H. Guillén-Andrade, A. Chávez-Bárceñas, 2010 Agroecología de la franja aguacatera en Michoacán, México. *Interciencia* **35** 647-653.
- [17] Hussain, S.S. y M. Mudasser, 2007 Prospects for wheat production under changing climate in mountain areas of Pakistan - An econometric analysis *Global Change Impact Studies Centre. Elsevier Science* **94** 494-501.
- [18] IAASTD 2008 *Synthesis Report. A Synthesis of the Global and Sub-Global IAASTD Reports*. Island Press is a trademark of The Center for Resource Economics. 95.
- [19] IPCC-TGICA, 2007 *General Guidelines on the Use of Scenario Data for Climate Impact and Adaptation Assessment*. Version 2. Prepared by T.R. Carter on behalf of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Task Group on Data and Scenario Support for Impact and Climate Assessment.
- [20] IPCC-WGI, 2007 *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996.

- [21] Kaufmann, R. y S. Snell, 1997 A biophysical model of corn yield: Integrating climatic and social determinants, *American Journal of Agricultural Economics* **79**, 178-190.
- [22] McCarthy, J.J., O.F. Canziani, N.A. Leary, D.J. Dokken, y K.S. White, 2001 *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press: Cambridge, UK.
- [23] Mijares, P. y L. López, 1998 Variedades de aguacate y su producción en México *Memoria Fundación Salvador Sánchez Colín CICTAMEX S.C. Coatepec Harinas, México.* **22** 88-99.
- [24] Nakicenovic, N., J. Alcamo, G. Davis, B. de Vries, J. Fenhann, S. Gaffin, K. Gregory, A. Grübler, T. Y. Jung, T. Kram, E. L. La Rovere, L. Michaelis, S. Mori, T. Morita, W. Pepper, H. Pitcher, L. Price, K. Riahi, A. Roehrl, H.-H. Rogner, A. Sankovski, M. Schlesinger, P. Shukla, S. Smith, R. Swart, S. van Rooijen, N. Victor y Z. Dadi, 2000 *Special Report on Emissions Scenarios: A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. Cambridge, 599.
- [25] Pérez, M., L. Avilan, E. Soto, M. Rodríguez y J. Ruiz, 2007 Comportamiento térmico e hídrico en la floración del aguacate (*Persea* spp.) grupo mexicana en la región Centro-Norte Costera de Venezuela. Proceedings VI World Avocado Congress (Actas VI Congreso Mundial del Aguacate), 12 - 16 Noviembre 2007, Viña del Mar - Chile.
- [26] Regalado, J. 1997 Cambio Tecnológico y medias de eficiencia de la unidad de producción en la industria manufacturera en México. *Tesis División de Estudios Superiores UANL*.
- [27] Rocha, J.L., S. Salazar, A. Bárcenas y I. González, 2008 La determinación irreversible hacia la floración y sus implicaciones para el manejo de los huertos de aguacate Hass en Michoacán. *Boletín El Aguacatero* **11(55)** 1, 3-6.
- [28] Rosales, R. y J. Bonilla 2006 *Introducción a la econometría*. Serie Apuntes de clase Cede. Ediciones Uniandes. Bogotá, D. C., Colombia.
- [29] Salazar-García, S., L.E. Cossio-Vargas, I.J.L. González-Durán y C.J. Lovatt, 2005 Uso de biorreguladores vegetales para la caída de fruto de Junio y aumentar el tamaño del fruto de aguacate Hass. *Boletín El Aguacatero* **8(44)** 1, 4-5.
- [30] Salazar, G. S., M. W. Borys y R.S.A. Enríquez 1984 Tolerancia de aguacates *Persea* americana Mill. y *Persea* Schiedeana Ness. A condiciones de salinidad progresiva. III Caracterización de plantas sobresalientes. *Revista Chapingo* **45-46** 16-19.
- [31] Spanos, A. 1999 *Probability Theory and Statistical Inference: Econometric Modeling with Observational Data*, Cambridge University Press, United Kingdom.

- [32] Tapia, V., Larios, G. A. y Anguiano, C. J. 2008. Ambiente y fenología del aguacate. *Tecnología para la producción de aguacate en México*. Folleto Técnico. 2ª. Edición. INIFAP. Uruapan, Mich. 54-92.
- [33] Ziervogel G., A. Nyong, B. Osman, C. Conde y T. Downing. 2006 Climate Variability and Change Implications for Household Food Security. *AIACC Working Paper 2034* disponible en <http://www.aiaccproject.org>
- [34] APROAM. *El Aguacatero, boletín informativo*. Accesado el 12.05.2010 en <http://www.aproam.com/boletines/aguacatero.html>
- [35] INEGI, *Anuarios estadísticos por entidad federativa de los años 1950 a 2009*. Accesado 25.06.2010 en http://www.inegi.org.mx/prod_serv/contenidos/.../pais/
- [36] PACIFIC CLIMATE IMPACTS CONSORTIUM. *Regional Analysis Tool*. Accesado 24.05.2011 en <http://pacificclimate.org/tools-and-data/regional-analysis-tool>
- [37] SAT. *Cuadro Histórico de salarios mínimos en México*. Accesado 28.09.2011 en www.sat.gob.mx/.../salarios_minimos/45_7369.html