



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA
CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA

ANÁLISIS DE TENDENCIAS DE TEMPERATURA
EN EL ESTADO DE VERACRUZ

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS (FÍSICA ATMOSFÉRICA)

PRESENTA

GUILLERMO GARCÍA GRIJALVA

DIRECTORA DE TESIS

DRA. ANA CECILIA CONDE ÁLVAREZ



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.

Contenido

Resumen	3
Introducción	4
<i>Algunos antecedentes de análisis de tendencias</i>	7
Capítulo 1: Descripción de la zona de estudio y bases de datos	9
1.1 Sistemas de circulación atmosférica en Veracruz	10
1.2 Temperatura y precipitación	12
1.3 Revisión de datos	13
1.3.1 Reanálisis	16
1.3.2 Descripción de la base CRU TS 3.0.....	17
1.3.3 Selección de estaciones climatológicas	17
1.3.4 Separación por zonas	21
Capítulo 2: Modelo clásico de regresión lineal, supuestos detrás del método de mínimos cuadrados	22
2.1 Modelo clásico de regresión lineal	23
2.1.1 Propiedades de los estimadores de Mínimos Cuadrados Ordinarios	26
2.2 Posibles errores al violarse algún supuesto	28
Capítulo 3: Métodos	31
3.1 Método de validación de la base CRU TS 3.0	31
3.2 Metodología para el análisis de tendencias	32
Capítulo 4: Resultados	39
4.1 Validación de la base CRU TS 3.0	39
4.2 Análisis de tendencias	48
4.2.1 Mapas de tendencia de temperatura mínima	48
4.2.2 Mapas de tendencia de temperatura máxima.....	58
Capítulo 5: Conclusiones	75
Recomendaciones	78
Anexo	80
Descripción de pruebas de especificación	80
Referencias	85

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por la beca otorgada bajo el registro de becario 222147.

A la Dra. Ana Cecilia Conde Álvarez por sus consejos, su dirección, por su amistad y brindarme lo mejor como tutora, por apoyarme en todo momento cuando lo necesite.

Al Dr. Tejeda por su confianza, amistad y por todo el apoyo que me ha dado durante la licenciatura y maestría.

Al Mtro. Francisco Estrada Porrúa por sus asesorías en econometría, ya que fue, el punto de partida en la metodología del análisis de tendencias.

A mis hijas, esposa y madre por todo su amor y cariño por todo el tiempo que se ha quedado atrás, que es pero compensar. Mientras tanto quiero darles tantas cosas, quiero darles tanto amor tanta atención, y enseñarles cada día su importancia y su valor y quiero cuidarles el corazón.

Dedicatoria

Dedicó esta tesis en memoria de mi hermano, fuente de inspiración en mi desarrollo profesional.

Resumen

Se propone una metodología para el análisis de tendencias de temperaturas máxima y mínima. Se llevó a cabo el estudio de caso en el estado de Veracruz, para el periodo de 1901-2006 a partir de datos de reanálisis de las Series de Tiempo de la Unidad de Investigación del Clima versión 3.0 (CRU TS 3.0, por sus siglas en inglés). Primeramente se validó la base CRU TS 3.0, haciendo uso de los datos de las estaciones climatológicas convencionales del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), de las que se realizó una depuración, aplicando algunos criterios como el coeficiente de correlación de Pearson, la raíz del error cuadrático medio y el sesgo entre los datos observados y el reanálisis. La validación resultó satisfactoria en el 75% de las estaciones analizadas. Para el estudio de tendencias se empleó un modelo de regresión lineal, el cual fue modificado debido a la aplicación de los supuestos del Teorema de Gauss-Markov; dicho modelo modificado es capaz de reproducir tendencias determinísticas, cambios en la estructura de la serie de datos y procesos autorregresivos. Haciendo uso del modelo generado se detectó que la temperatura máxima está aumentando en las zonas centro y sur del estado de Veracruz, mientras que la temperatura mínima ha disminuido en dichas zonas; en contraste, en algunas zonas de la región norte ha aumentado la temperatura mínima. También se detectaron años con cambios estructurales en las series de datos, que se agruparon por zonas en años específicos. Este análisis no es capaz de detectar si existe cambio climático pero funciona para la detección de tendencias y de cambios estructurales.

Introducción

El Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés, www.ipcc.ch) define al cambio climático como la “variación estadística en el estado medio del clima o en su variabilidad, que persiste durante un período prolongado (normalmente decenios o incluso más). El cambio climático se puede deber a procesos naturales internos, o bien a cambios persistentes antropogénicos en la composición de la atmósfera o en el uso de las tierras. Se debe tener en cuenta que la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMCC), en su Artículo 1, define ‘cambio climático’ como: ‘un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables’. La CMCC distingue entre ‘cambio climático’ atribuido a actividades humanas que alteran la composición atmosférica y ‘variabilidad climática’ atribuida a causas naturales”, esta definición se encuentra en el glosario del IPCC (2001).

Así también el IPCC define la variabilidad climática como el conjunto de variaciones en el estado medio y otros datos estadísticos (como las desviaciones típicas, la ocurrencia de fenómenos extremos, etc.) del clima en todas las escalas temporales y espaciales, más allá de fenómenos meteorológicos determinados. La variabilidad se puede deber a procesos internos naturales dentro del sistema climático (variabilidad interna), o a variaciones en los forzamientos externos antropogénicos (variabilidad externa), (IPCC, 2001).

Las conclusiones del Cuarto Reporte del Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC) incluyeron los argumentos más contundentes en cuanto a que el proceso de calentamiento global es inequívoco, y que en mayor medida este calentamiento es atribuible a las actividades humanas, principalmente a la quema de combustibles fósiles y a procesos de cambio de uso de suelo. Esos dos procesos han provocado que las concentraciones de dióxido de carbono aumentaran en un 35% desde la época pre-industrial (1790) al año 2005, y, para el mismo periodo, las concentraciones del metano aumentaron en un 148% y del óxido nitroso en un 18%.

También se ha observado el aumento del nivel del mar de entre 6 a 10 cm de 1961 al 2003, y el decremento de la cubierta global de nieve y hielo, al grado que para el Ártico se reportó una pérdida de alrededor de 3.5 millones de kilómetros cuadrados en su superficie (IPCC, WGI, 2007), aunque posteriormente a la entrega del Cuarto Reporte

se hizo pública la evidencia de que esta disminución fue de alrededor de 4.28 millones de km² para septiembre del 2007.

El aumento de temperatura media global en los últimos 100 años reportado por el IPCC fue de 0.74°C. A nivel regional, los aumentos pueden rebasar con mucho ese valor. Por ejemplo, existen regiones cercanas al polo norte cuyos aumentos de temperatura rebasan ya los 3.5°C de 1970 al 2000. Para el caso de México, se han observado aumentos entre 1°C y 2°C para ese mismo periodo en el norte de nuestro país (IPCC, WGII, 2007). Diversos estudios han mostrado que esos cambios regionales han tenido efectos en las características biofísicas (físicos, recursos hídricos y biológicos), particularmente en donde se han observado mayores aumentos de temperatura (Rosenzweig et al, 2007).

Sin embargo, es claro que no en todas las regiones se ha presentado un calentamiento de la misma magnitud, existiendo inclusive la posibilidad de que los cambios observados no sean significativos, o que inclusive existan decrementos.

Además, el IPCC reporta que durante los años de 1970 al 2000 hubo años mucho más calientes que otros, y aún años en los que las temperaturas máximas (extremas) pusieron en peligro la salud, la agricultura, y en general, el bienestar humano. Esas temperaturas extremas anómalas, forman parte de fenómenos que se denominan eventos extremos. Así, han aumentado en la mayoría de las regiones terrestres (con un 90% de confianza) los días y las noches muy cálidos, así como los llamados golpes de calor.

Lo descrito anteriormente resalta la importancia de realizar estudios detallados de los cambios observados en las diferentes regiones en México, poniendo énfasis en las temperaturas extremas (máxima y mínima).

Este trabajo busca entonces contribuir a ampliar y profundizar dichos estudios, planteando una forma rigurosa para la detección de los cambios observados en la temperatura, estableciendo claramente el método para determinar la significancia.

Así, el tema principal de esta tesis es mostrar una metodología para usarse en el estudio de tendencias de temperatura y analizar cómo se ha modificado la temperatura en el estado de Veracruz y en qué lugares. Se hará uso de las series de temperaturas máxima y mínima media mensual de las estaciones climatológicas de Veracruz, utilizando la metodología de mínimos cuadrados ordinarios para su análisis, con lo que se evaluará en qué medida se han calentado o enfriado determinadas zonas en el estado.

Al detectar modificaciones en las series de temperaturas se abre la pregunta de por qué se han dado esos *cambios*. Es claro que primero hay que establecer si esos cambios son significativos y en dónde, para entonces investigar las causas que pueden explicar esos *cambios*. En este trabajo no se avanza en la respuesta a esa pregunta, ni tampoco se afirma que son consistentes con el calentamiento global. Sin embargo, el presente trabajo sienta las bases para iniciar estudios en ese sentido.

Estableciendo la significancia de los cambios detectados, estos pueden tener diferentes causas, desde los cambios en el entorno de las estaciones meteorológicas (deforestación, por ejemplo), hasta cambios de mayor escala. Resultará entonces relevante iniciar estudios futuros con los cambios detectados en la mayor parte de las subregiones del estado. Por ejemplo, en este estudio se obtuvo que la temperatura máxima está aumentando, particularmente en las zonas centro y sur del estado de Veracruz, durante verano, primavera e invierno. Este cambio se desconoce, sí se encuentra asociado a causas locales o fenómenos de mayor escala, lo que sería fundamental averiguar para poder establecer proyecciones e impactos futuros.

Torres, *et al.*, 2010 y Vázquez, *et al.*, 2008 analizaron para el estado de Veracruz cómo se ha modificado la temperatura en los últimos años con índices que muestran tendencias de aumento en los días calurosos con un rango de 1 a 7 días por década. Ellos utilizaron el método de mínimos cuadrados ordinarios, pero no se analizaron de manera rigurosa los supuestos estadísticos que lo sustentan, así que el estado de Veracruz no cuenta con un estudio en tendencias sobre las series de temperatura que considere el Teorema de Gauss-Markov sobre un modelo de mínimos cuadrados ordinarios, ya que es necesario conocer la forma de los residuales para especificar si un modelo se encuentra planteado correctamente y realizar inferencias estadísticas a partir del modelo generado.

Para lo anterior, en el primer capítulo se presenta la zona de estudio y la propuesta de utilizar datos de reanálisis en lugar de las observaciones, dada la carencia de una base homogénea y de calidad de datos climatológicos en el estado de Veracruz. Se realiza una comparación entre la base de datos de las estaciones climatológicas del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y la base de Series de Tiempo de la Unidad de Investigación del Clima versión 3.0 (CRU TS 3.0, por sus siglas en inglés). Para la validación de la base de datos se utilizó el método de Dequé (2003) basado en criterios estadísticos (correlación, error cuadrático medio, sesgo, entre otros). Se justifica la elección de la base CRU TS 3.0, utilizada como una base homogénea y extensa para el estado de Veracruz.

En el segundo capítulo se describe el modelo clásico de regresión lineal y los supuestos de Gauss-Markov, que consisten en pruebas estadísticas que engloban los principales problemas encontrados al analizar un modelo de regresión que contenga dependencia con el tiempo.

En el tercer capítulo se muestra la metodología estadística utilizada para la validación de la base CRU TS 3.0 y el análisis de tendencias en las series de datos. Se utilizó el modelo clásico de regresión lineal con los supuestos estadísticos que lo sustentan. A cada serie de temperatura se le aplicó un modelo simple que incluye un término de tendencia. Para validar el modelo fueron aplicadas pruebas sobre los residuales: normalidad, autocorrelación y heterocedasticidad (varianza desigual), así como otras pruebas de estabilidad sobre la forma funcional y cambio estructural en el modelo. Además se incluye un ejemplo de la aplicación del método mediante el software econométrico Eviews.

En el capítulo 4 se presentan los resultados de forma estacional (primavera, verano, otoño e invierno) para la temperatura máxima y mínima mensual en el estado de Veracruz, en este apartado se muestran las zonas con tendencias y cambios estructurales significativos y cuantificando como ha aumentado o disminuido la temperatura en el periodo del 1901 al 2006.

Algunos antecedentes de análisis de tendencias

Michaels et al., 1998, a partir de datos de escala global de temperatura diaria y mensual, analizaron la tendencia de la varianza en el tiempo. Utilizaron las series de temperatura para dos bases de datos del IPCC con una malla global de resolución de 5° en latitud por 5° en longitud. Observaron que la tendencia de la varianza de la temperatura global ha disminuido significativamente en los últimos 50 y 100 años. De manera conjunta analizaron los registros diarios de temperatura máxima y mínima de Estados Unidos, China y la extinta Unión Soviética, para el invierno (enero) y verano (julio), y encontraron que la varianza tiende a disminuir. En resumen, las observaciones de temperatura hacia finales del siglo XX se muestran más uniformes, sus resultados mencionan que la varianza en la temperatura global ha disminuido.

McElwain y Sweeney, 2003 realizaron análisis de tendencias de precipitación, temperatura máxima y mínima de forma estacional y calcularon indicadores de cambio

climático en Irlanda para el siglo pasado, con la red de estaciones sinópticas. La detección de una tendencia es difícil debido a la influencia del Océano Atlántico Norte. El análisis de los registros de temperatura media indica un incremento similar a las tendencias globales particularmente con referencia al calentamiento de inicios del siglo XX y más importante el rápido calentamiento en los 90's. La precipitación se ha incrementado durante los inviernos en el noroeste del país, mientras que durante el verano han decrecido las lluvias del sureste. Indicadores del clima secundario tales como la frecuencia de días cálidos han aumentado mientras que los fríos han disminuido. En general los autores concluyeron que el clima de Irlanda está siguiendo trayectorias similares a las predichas por los modelos globales utilizados por el IPCC (IPCC, 2001).

En el estado de Veracruz se cuenta con las investigaciones de Ojeda *et al.*, 1993 que presentan un análisis de tendencias utilizando promedios móviles en las series de temperatura media anual y lluvia total anual para el periodo 1923-1988, en la región central del estado de Veracruz. Particularmente, las zonas donde se ha incrementado la población han mostrado aumento en la temperatura y en cuanto a la precipitación no obtuvieron cambio significativo alguno. Vázquez, *et al.*, 2008 y Torres *et al.*, 2010 presentan un análisis de la señal del cambio climático y la variabilidad climática, mediante los índices del Grupo de Expertos en Detección e Índices de Cambio Climático (ETCCDI). Obtuvieron evidencia de condiciones más cálidas en años recientes, con el aumento de días cálidos y la disminución de días fríos, mientras que en precipitación no hay cambios significativos en las series anuales o sobre eventos extremos.

Capítulo 1: Descripción de la zona de estudio y bases de datos

El estado de Veracruz se localiza entre los 17°03' y los 22°27' de latitud norte y los 93° 36' y 98° 38' de longitud oeste (INEGI, 2011). Cuenta con una extensión superficial de 72,410.05 Km² distribuidos en 212 municipios, representando así el 3.7% del territorio nacional. La superficie del estado se encuentra formada por: Sierra Madre Oriental, Llanura Costera del Golfo Norte, Eje Neovolcánico, Sierra Madre del Sur, Llanura Costera del Golfo Sur, Sierra de Chiapas, Guatemala y Cordillera Centroamericana (Figura 1.1). La elevación más alta es la cima del volcán Pico de Orizaba o Citlaltépetl, con 5,610 msnm (metros sobre el nivel del mar).

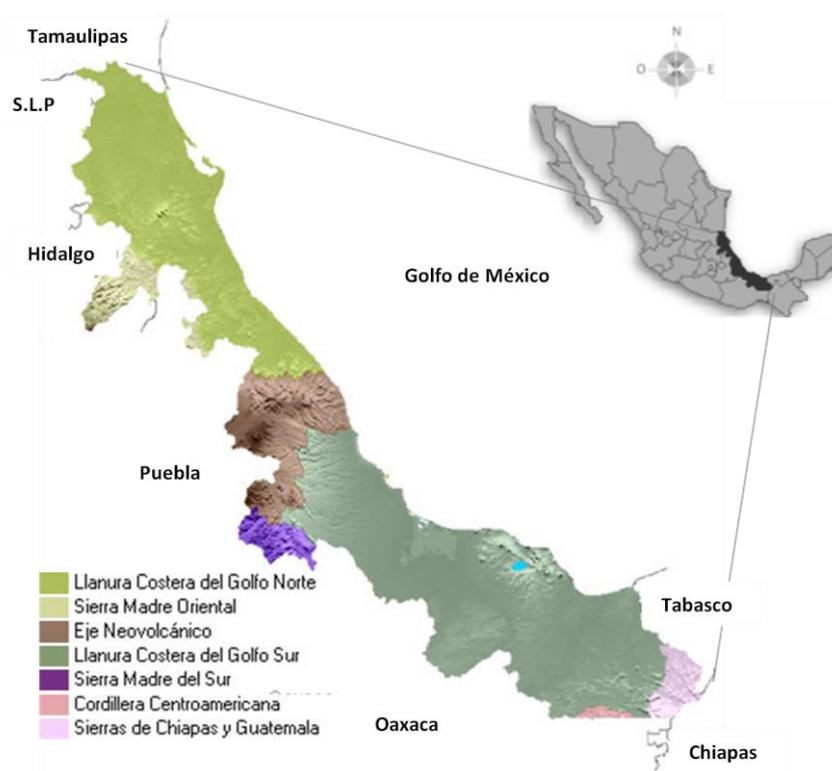


Figura 1.1. Relieve en el estado de Veracruz. (INEGI, 2011)

El estado de Veracruz ocupa el tercer lugar a nivel nacional en población con 7,643,194 habitantes (que representa el 6.8% de la población del país), de estos, 3,947,515 son mujeres y 3,695,679 son hombres. Los diez municipios con mayor población son Veracruz, Xalapa, Coatzacoalcos, Córdoba, Poza Rica, Papantla, Minatitlan, San Andrés Tuxtla, Tuxpan y Boca del Río, englobando el 32% de la población estatal, según el censo de población y vivienda 2010.

1.1 Sistemas de circulación atmosférica en Veracruz

Tejeda *et al.*, (1989) mencionan que la zona de estudio es afectada por dos tipos de masas de aire: durante el verano predominan las tropicales mientras que las polares se presentan durante el semestre de invierno. Existen periodos de transición cuando se pasa de un semestre a otro y estas masas de aire se van alternando; en ocasiones no hay una situación bien definida.

De octubre a mayo la vertiente del Golfo de México es afectada por masas de aire polar que se desplazan desde el norte del continente hacia el sur, presentándose en ocasiones como un frente frío llamado “norte”, el cual según Pereyra *et al.*, (1995) “...está asociado con una masa de aire continental modificada, la cual, en forma de cuña densa y fría, penetra al Golfo por la parte norte como un frente frío difuso que separa al aire marítimo tropical caliente del aire polar modificado para constituir una invasión de aire frío o templado desde latitudes extratropicales hacia las intertropicales. Afectan a los estados de Tamaulipas, Veracruz, Tabasco, Campeche y a la península de Yucatán, si son debiles; si son profundos, afectan también al Altiplano y al norte del país, donde provocan heladas. Los primeros son llamados *catafrentes* y los segundos los *anafrentes*”.

Así entonces, los frentes fríos pueden ocasionar en el Golfo de México vientos del norte por arriba de 30 m/s, descensos de temperatura de 2°C a 15°C en 24 horas, nubosidad baja y en ocasiones precipitación sobre las cordilleras del este de México y Centroamérica; la duración de un norte generalmente es mayor de 24 horas, y su permanencia en el Golfo de México varía de acuerdo con la rapidez con que se desplaza la onda proveniente de latitudes medias (Schultz *et al.*, 1998).

En verano los principales fenómenos que afectan al estado son las ondas del este. Tejeda *et al.*, (1989) describe que “Las ondas del este (primer nivel de inestabilidad convectiva de los vientos alisios) tienen su frecuencia máxima entre agosto y septiembre”. Las ondas del este se originan frente a la costa occidental de África; la primera zona del país que atraviesan es la Península de Yucatán, para después continuar su paso por la zona centro –sur del país y por lo general traen con ellas mal tiempo (Jáuregui, 1967).

Las ondas del este pueden derivar a ciclones tropicales si llegan a presentarse las condiciones necesarias para que estos fenómenos se desarrollen. Así, cuando una onda del este pasa por las zonas de ciclogénesis del Atlántico tropical y Mar Caribe, pueden originar ciclones tropicales que pueden afectar al estado de Veracruz. Una vez

que se ha formado un ciclón su trayectoria tiende a ser diferente a la de la onda del este que viaja hacia el oeste (Jáuregui, 2003).

Las tormentas tropicales que se forman en el Atlántico y el Mar Caribe, que pueden llegar a afectar a las costas veracruzanas, llegan a ser intensas ya que tienen la oportunidad de desarrollarse durante su recorrido por las tibias aguas del océano tropical (Jáuregui y Zitácuaro, 1995). Sin embargo, dichos autores mencionan que las tormentas tropicales y ciclones que afectan al sur del Golfo de México son, en general, ciclones o tormentas tropicales debilitadas al momento que pasaron por el continente, específicamente sobre la península de Yucatán, pero que pueden en ocasiones volver a intensificarse y tocar tierra como ciclón tropical sobre las costas veracruzanas.

Gómez (2006) comenta que los ciclones tropicales que tocan tierra veracruzana y que nacen en el Atlántico Norte Tropical y en el Mar Caribe, previamente impactan en su recorrido a otros espacios continentales. Entre ellos se encuentra la península de Yucatán y posteriormente entran al Golfo de México donde se incrementa el riesgo de dirigirse a la costa Veracruzana. Los ciclones tropicales que han impactado el entorno de Veracruz durante el periodo de 1930 al 2005 fueron 43 en total, de los cuales el 13.95% fueron depresiones tropicales, el 30.23% tormentas tropicales y el 55.81% huracanes. Los ciclones tropicales que se formaron en aguas del Atlántico Norte fueron el 20.93%, en el Mar Caribe el 23.25% y en la cuenca del Golfo de México el 55.81%. En relación al lugar de impacto el 65.11% entró a tierra por la parte norte del litoral veracruzano, el 11.62% por la parte central, el 16.27% arribaron por el centro-sur y el 6.97% únicamente ingresaron por el sur. El mes de septiembre tuvo el mayor ingreso de ciclones tropicales, posteriormente agosto y julio.

Ruíz *et al.*, (2010) describen los efectos locales de la brisa marina y el terral como “circulaciones debidas a los contrastes térmicos entre el mar y el continente. El terral es el viento nocturno que va del continente al mar. La brisa marina es el viento persistente que fluye en el día, desde el mar hacia tierra, que en esta zona se desarrolla tres horas después de la salida del sol. Durante el verano la brisa marina es muy persistente porque se sobrepone a los alisios, mientras que en el invierno casi es nula al presentarse los Nortes. Si hay brisa marina su efecto llega hasta Xalapa, haciéndose patente por un máximo relativo de humedad absoluta alrededor del medio día”.

1.2 Temperatura y precipitación

Como muestra la figura 1.2, la temperatura media anual del estado oscila de 6°C, en la estación más cercana al Pico de Orizaba, a 24°C en la porción sur del estado, no considerando la cima del Pico de Orizaba que mantiene nieves perpetuas. Como lo mencionan Ruíz *et. al.* (2010) “La temperatura disminuye de la costa hacia la sierra y el subsecuente aumento a sotavento, claramente se debe al efecto orográfico, pues estamos en presencia de climas tropicales modificados por la orografía.”

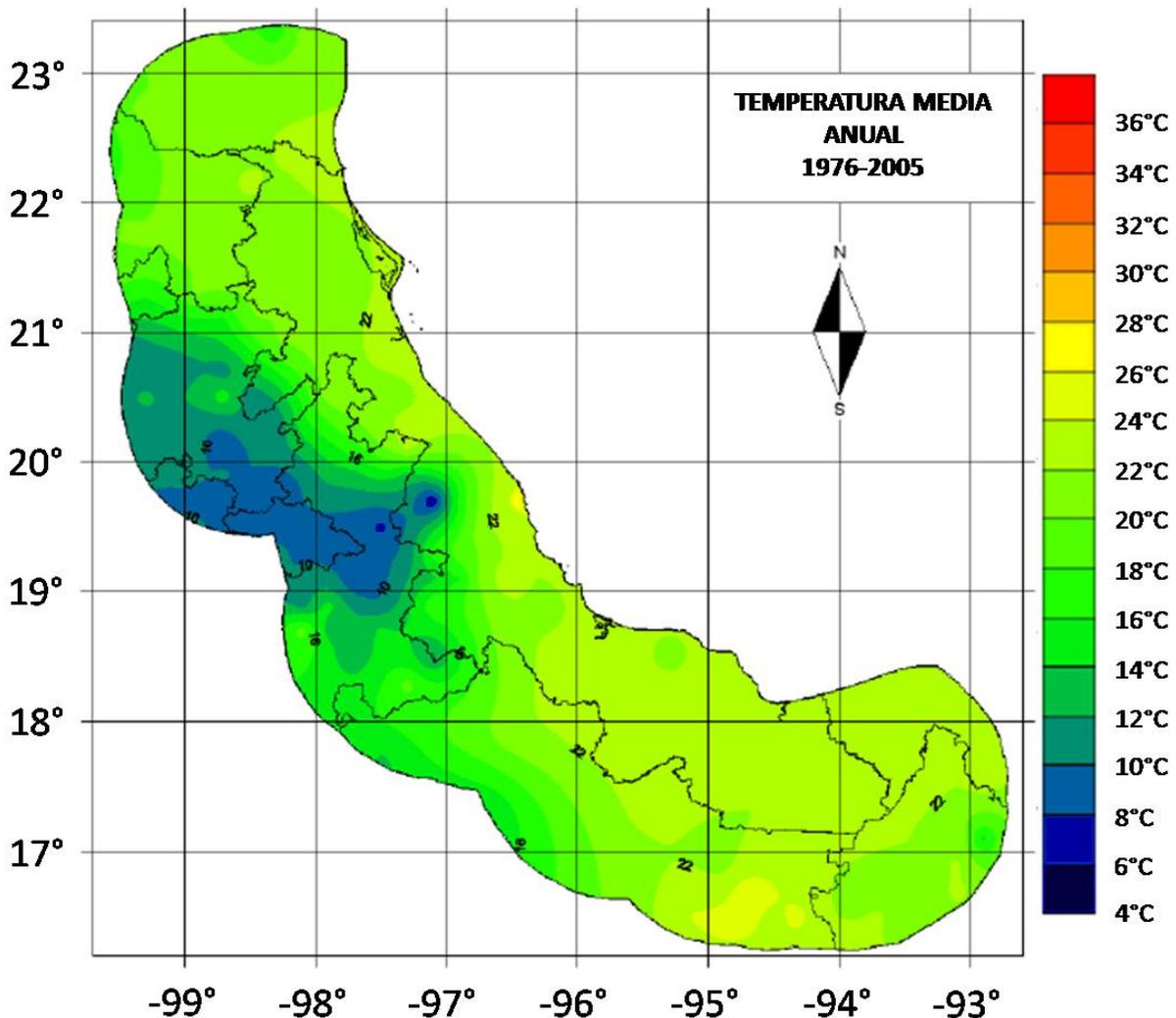


Figura 1.2 Temperatura media anual del estado de Veracruz. (Tomado de Ruíz, *et. al.* 2010.)

La precipitación se presenta (Fig. 1.3) mayormente en la porción sur del estado, sobre la Sierra de Los Tuxtlas, con un promedio anual cercano a 3,600 mm y con la menor precipitación en la parte del Altiplano veracruzano con alrededor de 600 mm. La precipitación en más del 80% se produce por la llegada de masas de aire húmedo tropical que interaccionan con la orografía en el semestre centrado en el verano (junio, julio, agosto, septiembre, octubre y noviembre).

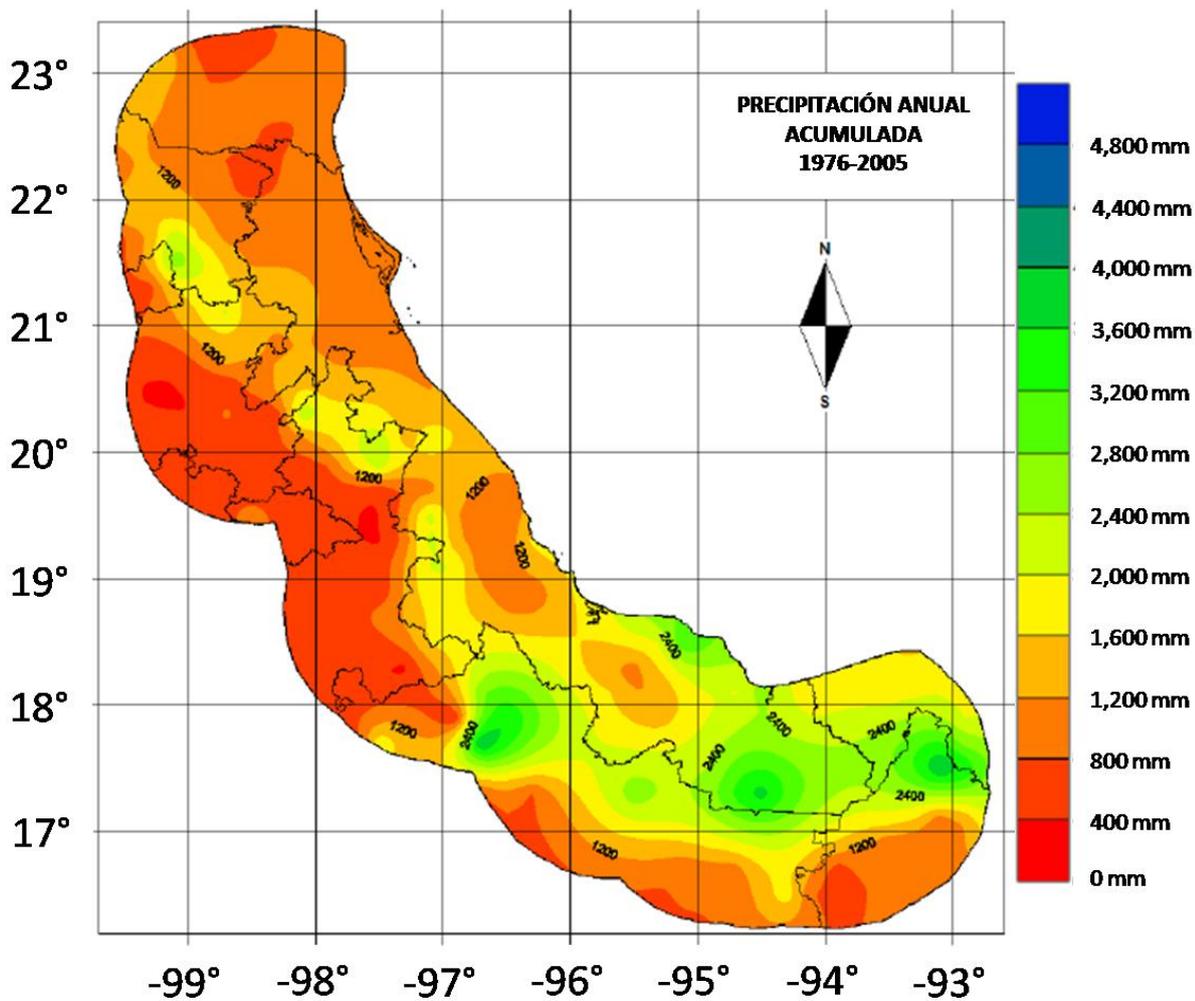


Figura 1.3 Precipitación anual acumulada del estado de Veracruz. (Tomado de Ruíz, *et. al.* 2010.)

1.3 Revisión de datos

Ante la carencia en Veracruz de series largas de datos meteorológicos de calidad, se han elaborado depuraciones de éstos para detectar qué estaciones pueden ser utilizadas con fines de investigación. Una muestra de ello se tiene en Bravo et al. (2006), Juárez et al. (2009) y Torres et al. (2010), que trabajaron sobre la depuración de las estaciones climatológicas con registros en el estado de Veracruz, realizando pruebas de control de calidad. En principio, en el estado se cuenta con 386 estaciones climatológicas, de las cuales funcionan en nuestros días cerca de 110. En dichas estaciones climatológicas, el observador debe registrar precipitación, temperatura observada, temperatura máxima, temperatura mínima y evaporación diaria.

Los datos utilizados fueron de las estaciones climatológicas operadas por la Comisión Nacional del Agua (CNA), a través de la base de datos ERIC III, cuyas siglas significan Extractor Rápido de Información Climatológica.

Con la finalidad de generar un análisis comparativo de bases de datos, se hizo una revisión de estaciones climatológicas, donde se comprobó que la serie de datos no muestre inhomogeneidades, que contenga el mayor número de datos registrados posibles y que el periodo de datos registrados sea lo más extenso y actualizado posible. Estos criterios serán descritos más adelante.

A continuación, para la temperatura máxima, se presentan gráficas de cuatro estaciones climatológicas, que son ejemplos de la mala calidad de datos con las que cuenta el estado de Veracruz.

La figura 1.4 muestra las series de registros para las estaciones con clave 30073, 30166, 30244 y 30357. La estación 30073 no cuenta con registros actuales y es inhomogénea a partir de 1956, pues presenta una forma de variabilidad antes y después de este año, la estación 30166 tiene datos faltantes, la 30244 contiene una baja cantidad de datos registrados y la estación 30357 contiene registros actuales pero no son extensos.

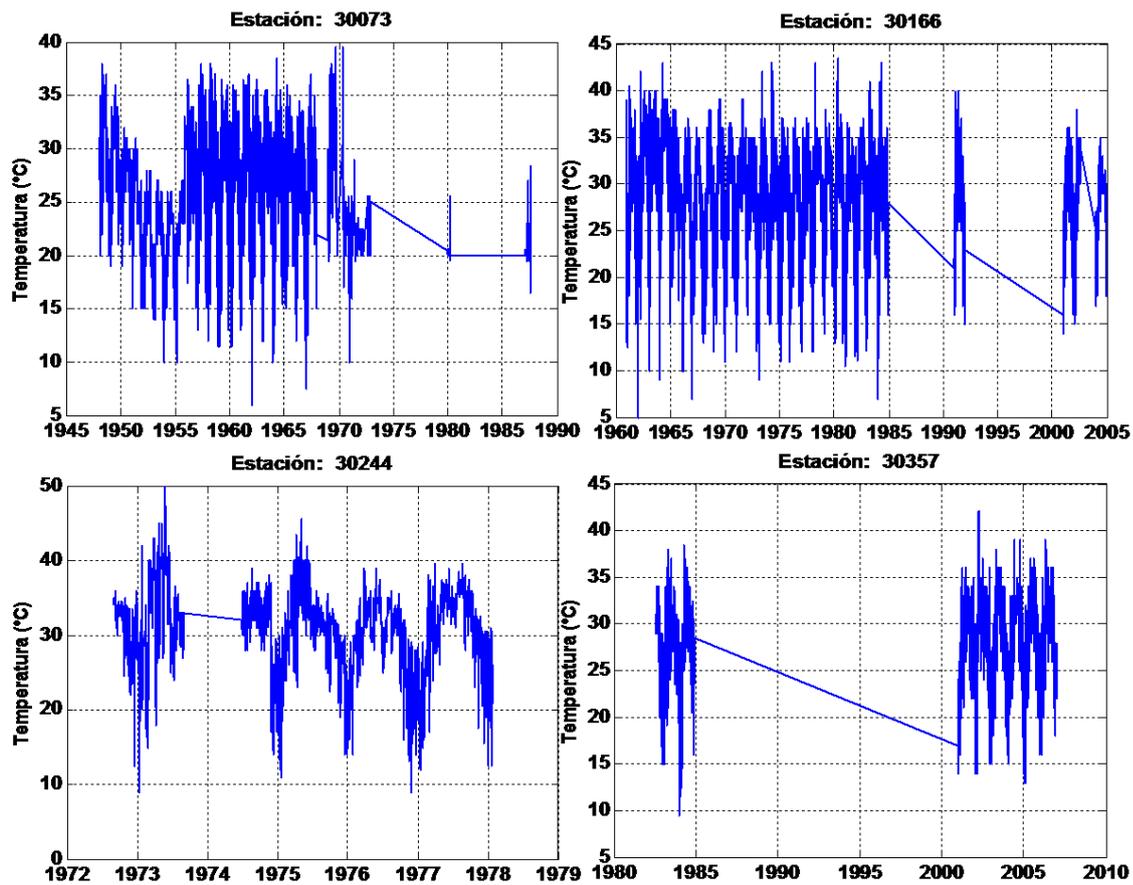


Figura 1.4. Series de tiempo de temperatura máxima diaria, de las estaciones climatológicas 30073,30166, 30244 y 30357 que presentan datos de mala calidad.

Por lo anterior, se seleccionaron las estaciones que no muestran este tipo de errores y que presentan las series más completas. La figura 1.5 ejemplifica el tipo de estaciones que fueron extraídas como aceptables.

Con el propósito de realizar una comparación con una preselección de estaciones climatológicas de la base ERIC III, se procedió a la revisión de los datos de reanálisis de la base de Series de Tiempo de la Unidad de Investigación del Clima versión 3.0 (CRU TS 3.0, por sus siglas en inglés de la Universidad de East Anglia) y validar con la metodología planteada por Dequé (2003).

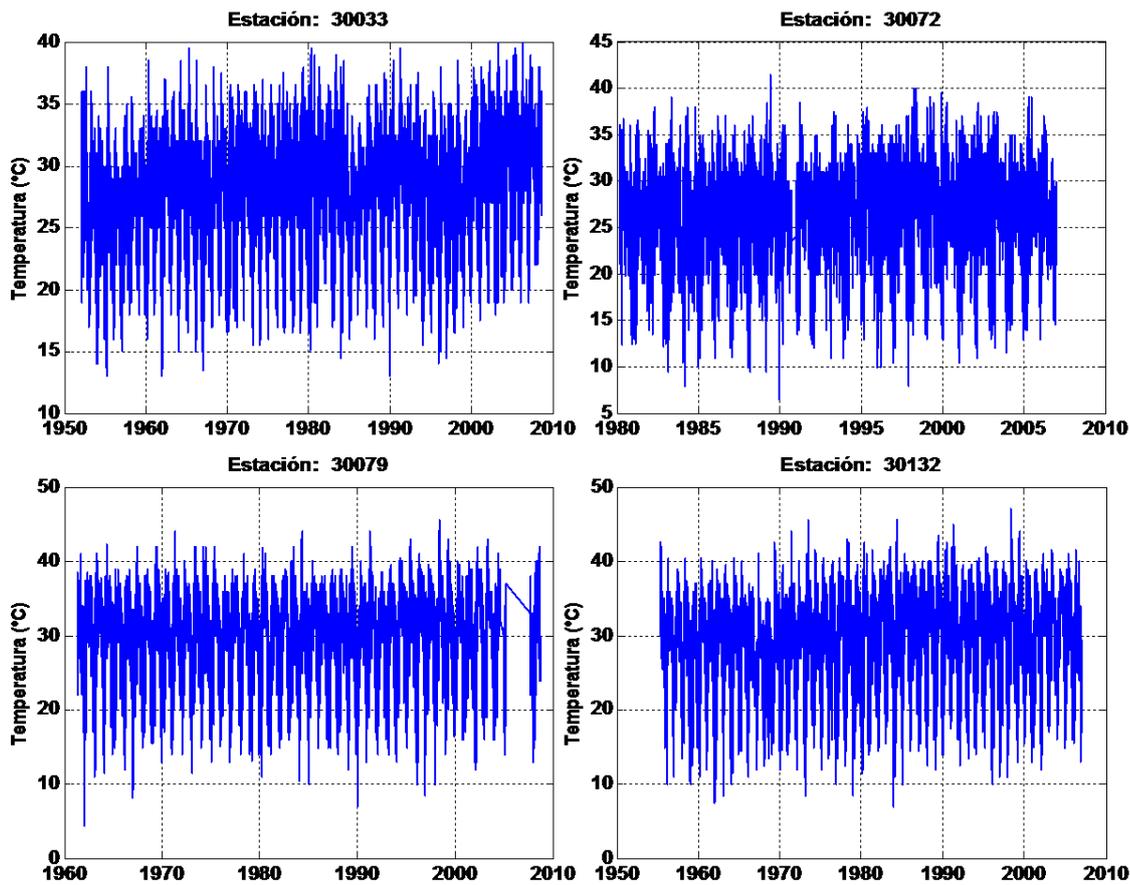


Figura 1.5 Ejemplo de estaciones con datos aceptables

En este trabajo se utilizaron las estaciones mencionadas en la tabla 1.1 que fueron seleccionadas a partir de los criterios ya mencionados, para comparar contra los datos de la base CRU TS 3.0, la comparación resultó satisfactoria como es mostrado en los resultados, la CRU se usó como la fuente de datos para la presente investigación debido a que es una base homogénea y extensa para la región del estado de Veracruz.

1.3.1 Reanálisis

Es un método para el desarrollo de un registro completo de cómo el estado del tiempo y el clima están cambiando con el tiempo. En el reanálisis, las observaciones y un modelo numérico que simula uno o más aspectos del sistema terrestre se combinan objetivamente para generar una estimación sintetizada del estado del sistema, en este caso la atmósfera. Un reanálisis por lo general se extiende por varias décadas o más, y cubre todo el planeta desde la superficie de la Tierra hasta por arriba de la estratósfera. Los datos de reanálisis se utilizan ampliamente en la investigación del

clima, incluyendo el seguimiento y la comparación de las condiciones climáticas actuales con las del pasado, la identificación de las causas de las variaciones del clima y la preparación de las predicciones climáticas (<http://reanalyses.org/>).

1.3.2 Descripción de la base CRU TS 3.0

La base CRU TS 3.0 son datos de reanálisis de la superficie terrestre distribuidos por el BADC (British Atmospheric Data Centre). Las variables con las que cuenta la base CRU TS 3.0 son la temperatura máxima, mínima en promedios mensuales y precipitación acumulada mensual, en mallas de alta resolución (0.5° latitud x 0.5° longitud). Así el formato de la base CRU TS 3.0 es en ASCII, en una malla de 360-latitud x 720-longitud, por lo que se presenta con 720 columnas, 360 filas y por 1272 meses (periodo 1901-2006). La primera fila se encuentra centrada en 89.75S y la primera columna está centrada en 179.75W.

1.3.3 Selección de estaciones climatológicas

Para realizar la validación de la base de datos CRU TS 3.0 se utilizaron estaciones climatológicas de la base del ERIC III, localizadas dentro de los cuadros de la malla de la base CRU TS 3.0, las estaciones climatológicas seleccionadas contaron con el mayor número de registros de temperatura máxima y mínima mensual, y que además aprobaran pruebas empíricas de calidad de datos. En la tabla 1.1 se muestran el nombre de la estación, coordenadas, clave de la estación, porcentaje de datos completos y los años del periodo registrado. Además, la figura 1.6 muestra un mapa de las estaciones usadas en los diversos cuadros de la malla. Cabe destacar que al no contar con algunas estaciones aceptables en Veracruz se utilizaron estaciones de otros estados. Con 40 cuadros de malla quedó delimitado el territorio estatal, así se muestra en la figura 1.9 en donde se establece una separación por zonas para facilitar su explicación.

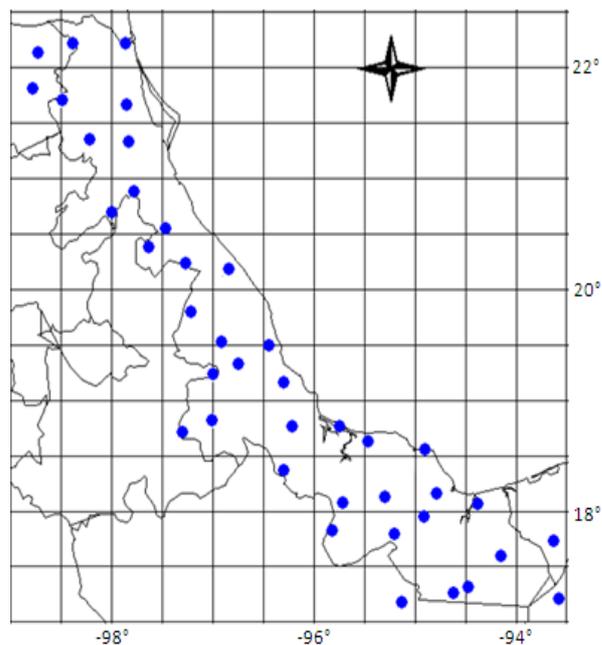


Figura 1.6 Mapa de las estaciones climatológicas utilizadas para la validación.

Los criterios empíricos aplicados de selección de las estaciones para realizar la comparación fueron los siguientes:

- La estación debería coincidir dentro del cuadro de malla.
- Contener un mínimo de 30 años de registros, con un porcentaje de datos mayor al 85%.
- Que las series estuvieran actualizadas por lo menos para el año 2000.
- Que las series no presenten inhomogeneidades como cambios de 5°C en la estructura promedio de la serie, lo que se puede interpretar como algún tipo de error debido a reubicación de la estación o por falla de los instrumentos.

Algunas de las estaciones sólo satisfacen algunos de estos criterios, pero de no haber sido utilizadas no habría forma de realizar comparación alguna con la base CRU TS 3.0. Tal caso es el de las estaciones como Ozuluama, Tantoyuca, Tantima, Acultzingo, Las Vigas, Alvarado, Cosamaloapan, Huazuntlan, Nanchital, Mosquitero, estas estaciones no cuentan con datos actualizados.

La tabla 1.1 se encuentra asociada a la figura 1.9, debido a una selección de cuadros de malla (estaciones), para asociarlos en zonas. La zona 1 cuenta con los cuadros de malla del 1 al 14, la zona 2 con los cuadros del 15 al 23 y la zona 3 con los cuadros del 24 al 40.

Tabla 1.1. Estaciones utilizadas de la base de datos ERIC III.

Cuadro de malla (Ver fig. 1.9)	Nombre de la estación	Coordenadas Estación		Clave	Porcentaje de datos completo	Año	
		Latitud	Longitud			Inicial	Final
Zona 1, 1	El Coco, Tamuín	22.13	-98.73	24017	95.9%	1965	2001
2	Ébano, Ébano	22.22	-98.38	24015	98.4%	1961	2001
3	Tampico, Tampico (DGE)	22.22	-97.87	28111	91.6%	1961	2002
4	La Gloria, Tanlajas	21.82	-98.78	24133	91.5%	1973	2001
5	El Fiscal, S.V. Tancuayala	21.73	-98.59	24020	99.7%	1972	2001
6	Ozuluama, Ozuluama	21.67	-97.85	30122	91.2%	1925	1983
7	Tantoyuca, Tantoyuca	21.35	-98.22	30169	91.1%	1925	1972
8	Tantima, Tantima	21.33	-97.83	30168	96.6%	1944	1988
9	Ixhuatlan del Café	20.70	-98.00	30072	97.6%	1980	2003
10	Sombrerete, Temapache	20.88	-97.78	30361	93.5%	1982	2003
11	Poza Rica De Hidalgo	20.55	-97.47	30132	99.0%	1961	2003
12	Chicualque, Coyutla	20.38	-97.63	30355	96.1%	1982	2001
13	Joloapan, Papantla	20.23	-97.27	30079	98.4%	1961	2004
14	El Raudal, Nautla	20.32	-96.70	30054	100.0%	1961	2002
Zona 2, 15	Atzalan, Atzalan	19.8	-97.22	30012	94.8%	1924	2001
16	Las Animas, Xalapa	19.533	-96.917	30087	98.1%	1953	1993
17	Mozomboa, Actopan	19.5	-96.45	30112	98.4%	1960	2001
18	Totutla, Totutla	19.23	-96.95	30187	89.7%	1959	2002
19	Jalcomulco, Jalcomulco	19.33	-96.75	30076	98.7%	1961	2004
20	Loma Fina, Paso de Ovejas	19.17	-96.30	30093	97.2%	1952	2003
21	Acultzingo, Acultzingo	18.72	-97.30	30004	100.0%	1961	1980
22	Naranjal, Fortín (CFE)	18.82	-96.95	30115	100.0%	1958	2004
23	Las Vigas, Tlaxicoyan	18.77	-96.22	30092	97.9%	1955	1988
Zona 3, 24	Heroica Alvarado	18.77	-95.75	30009	72.9%	1954	1984
25	Ángel R. Cabada	18.63	-95.47	30011	100.0%	1956	2003
26	Coyame, Catemaco	18.43	-95.02	30033	99.7%	1952	2004
27	La Granja, Cosamaloapan	18.37	-96.30	30082	97.1%	1949	1989
28	Villa Azueta, José Azueta	18.08	-95.72	30013	98.8%	1949	2003
29	Cuatotolapan	18.13	-95.30	30035	99.7%	1948	2003
30	Huazuntlan	18.167	-94.783	30065	99.1%	1961	1980
31	Nanchital	18.067	-94.383	30113	99.0%	1960	1984
32	Playa Vicente	17.833	-95.817	30131	97.3%	1961	2003
33	Bellaco, San Juan Evangelista	17.8	-95.2	30014	97.9%	1948	1980
34	Acayucan, Acayucan	17.95	-94.917	30001	100.0%	1961	1981
35	Tecuanapa, Las Choapas	17.6	-94.15	30172	97.9%	1954	1990
36	Mosquitero, Huimanguillo	17.733	-93.633	27033	97.3%	1948	1979
37	La Itsmeña, Matias Romero	17.183	-95.133	20334	94.0%	1980	1999

38	Cedillo, Hidalgo	17.267	-94.617	30265	88.5%	1974	2003
39	La Laguna, Hidalgo	17.3	-94.517	30281	95.9%	1975	2003
40	Malpaso, Tecpatan	17.214	-93.582	7112	86.7%	1958	2003

En la figura 1.7 se muestra de forma visual el porcentaje de datos de las estaciones correspondientes a cada cuadro de malla de la figura 1.6 y la tabla 1.1.

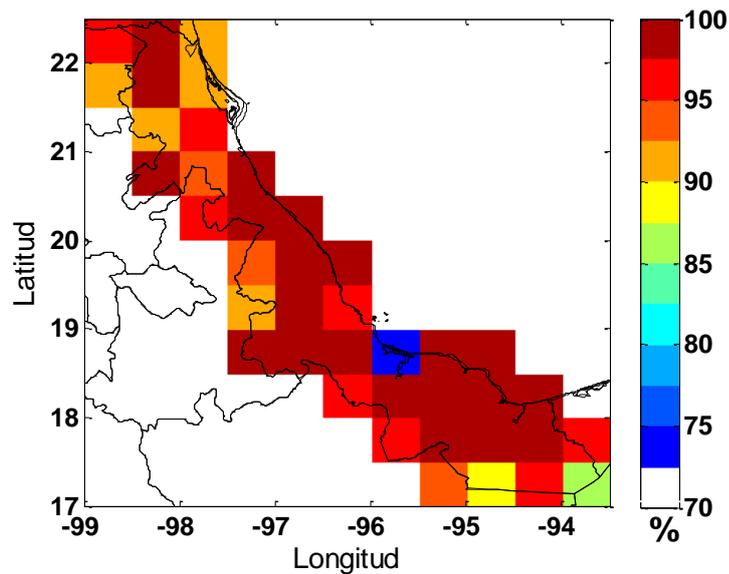


Figura 1.7. Porcentaje de datos de las estaciones.

Así mismo, considerando la base de datos ERIC III, se muestra en la figura 1.8 la densidad de datos de acuerdo a la serie más extensa y completa en cada zona. Se cuenta con una serie máxima de 62 años y una mínima de 20 años de datos mensuales.

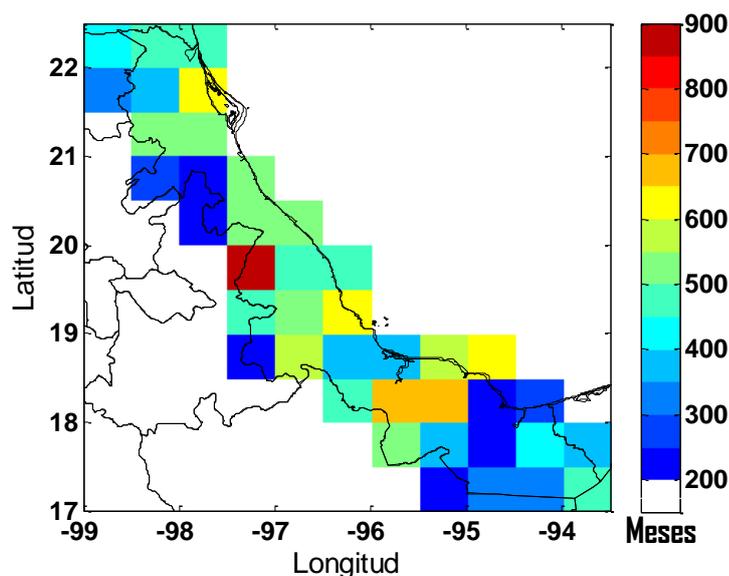


Figura 1.8 Número de datos extraídos de cada estación

1.3.4 Separación por zonas

Para facilitar la manera de representar los resultados, fue planteada la separación en zona norte, centro y sur del estado de Veracruz, en relación a la estructura de los datos contenidos en la base CRU TS 3.0 (figura 1.9).

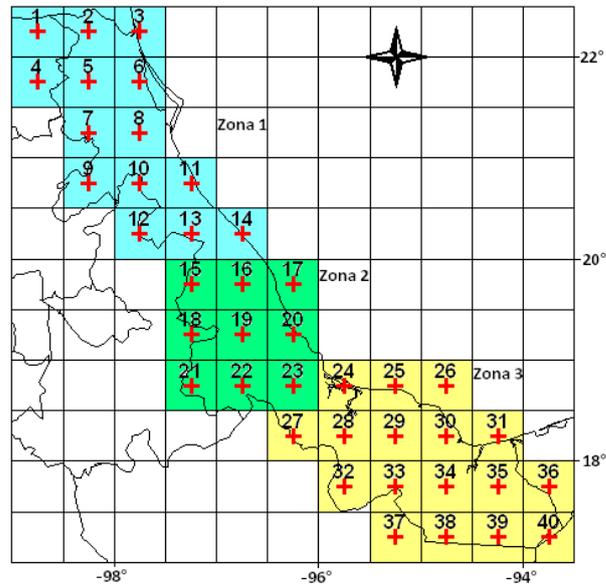


Figura 1.9. División del estado de Veracruz en tres zonas.

Las zonas se encuentran determinadas por los puntos de malla empleados y se agrupan en la tabla 1.1 con el nombre de las estaciones climatológicas usadas para validar la malla de datos que acotan las diferentes zonas.

En resumen, se analizaron las series de tiempo de las estaciones climatológicas en el estado de Veracruz, posteriormente se analizó la estructura y tipo de información con la que cuenta la base CRU TS 3.0, así como la extracción sobre los datos climatológicos del estado. Esta base contiene una malla de resolución de medio grado, y se seleccionaron las estaciones climatológicas del estado que contuvieran datos climáticos aceptables, realizando nuevamente una preselección de las estaciones por su zona geográfica representativa de un cuadro de malla, para realizar la comparación entre las observaciones y los datos de reanálisis.

Capítulo 2: Modelo clásico de regresión lineal, supuestos detrás del método de mínimos cuadrados.

A continuación se describen las características de la metodología de mínimos cuadrados y los supuestos que se deben cumplir para la generación de un modelo de regresión lineal.

Para analizar si las condiciones climáticas han cambiado, se propone hacerlo a través de un modelo de regresión lineal. La tendencia es un patrón de comportamiento de los elementos de un entorno particular durante un período, de tal modo que un valor de tendencia positiva indica un aumento de la cantidad y un valor negativo indica una disminución y generalmente se expresa ya sea como un porcentaje o como una fracción (IPCC, 2001). Además para mejorar el modelo de regresión lineal se incorporó un análisis de cambios estructurales en las series de temperaturas, considerando que un cambio o inestabilidad estructural ha sido interpretado comúnmente en la literatura como “cambios en los parámetros de regresión” (Maddala y Kim, 1998).

El modelo clásico de regresión lineal (MCRL) se sustenta en definiciones básicas que se comentan a continuación. Para revisar con detalle ver Gujaratí (2004) y Brooks (2008).

Función de regresión poblacional (FRP)

La FRP (Ec. 2.1) denota que el valor esperado de la distribución de Y dada X_i , está relacionado funcionalmente con X_i , es decir, la media o respuesta promedio de Y varía con X , simbólicamente:

$$E(Y / X_i) = f(X_i) \quad (2.1),$$

donde Y es la variable explicada y X_i es la variable explicativa. La forma de $f(X_i)$ es desconocida, debido a que en una situación real en general no se cuenta con la disposición total de la población. Por lo tanto, en una primera aproximación se puede suponer que la forma de $f(X_i)$ es una función lineal:

$$Y_i = \beta_1 + \beta_2 X_i + u_i \quad (2.2),$$

donde β_1 , β_2 son los coeficientes de regresión y u_i es la perturbación aleatoria (error) asociada por la especificación de la forma $f(X_i)$. La ecuación 2.2 es conocida como la función de regresión lineal poblacional. La FRP no se puede observar directamente, por lo que se estima a partir de la función de regresión muestral (FRM):

$$\hat{Y}_i = \hat{\beta}_1 + \hat{\beta}_2 X_i + \hat{u}_i \quad (2.3),$$

donde \hat{Y}_i es el estimador de Y_i , $\hat{\beta}_{1,2}$ los estimadores de $\beta_{1,2}$ y \hat{u}_i es el término residual. Un *estimador* es un coeficiente que se aproxima al parámetro poblacional a partir de la información obtenida de la muestra disponible; en el mejor de los casos, la FRP en base a la FRM es una aproximación.

2.1 Modelo clásico de regresión lineal

Para obtener los coeficientes de la regresión lineal se utiliza el método de mínimos cuadrados ordinarios MCO. Las ecuaciones 2.4 y 2.5 muestran cómo se calculan los estimadores de los coeficientes:

$$\hat{\beta}_2 = \frac{\sum X_i Y_i}{\sum X_i^2} \quad (2.4)$$

$$\hat{\beta}_1 = Y - \hat{\beta}_2 X \quad (2.5)$$

Los coeficientes obtenidos se conocen como estimadores de mínimos cuadrados. A partir de las ecuaciones anteriores se pueden obtener los valores de los estimadores ($\hat{\beta}_1$ y $\hat{\beta}_2$), pero lo que se desea es hacer inferencia estadística sobre los valores β_1 y β_2 de la población. Por inferencia estadística se entiende el conjunto de métodos y procedimientos para deducir propiedades de una población a partir de una muestra (Canavos, 1998).

La ecuación 2.2 indica que Y_i depende de X_i y u_i . Mientras no se especifique cómo se generan las X_i y u_i no se puede realizar alguna inferencia estadística sobre Y_i , por lo que el modelo clásico de regresión lineal plantea 10 supuestos, que serán enunciados a continuación (estos supuestos se describen mejor en Gujaratí (2004) y Maddala (1996)):

1. Los coeficientes de la regresión son lineales (ecs. 2.4 y 2.5).
2. Los valores de X son considerados fijos en muestreo repetido, X se supone no aleatoria. *El análisis de regresión es condicional, es decir, condicionado a los valores dados del regresor X .*
3. El valor esperado de la perturbación u_i es igual a cero. Dado el valor de X , la media o valor esperado del término aleatorio de perturbación es cero.

$$E(u_i / X_i) = 0 \quad (2.6)$$

La figura 2.1 muestra que las distancias por arriba y por debajo de los valores medios no son otra cosa que los u_i y lo que se necesita es que en promedio las desviaciones correspondientes sean cero. Así, lo que el supuesto menciona es que los factores que no están incluidos explícitamente en el modelo y que se encuentran incorporados en u_i , no afectan sistemáticamente el valor de la media de Y , es decir, los valores positivos de u_i cancelan a los negativos de tal manera que el promedio sobre Y es cero.

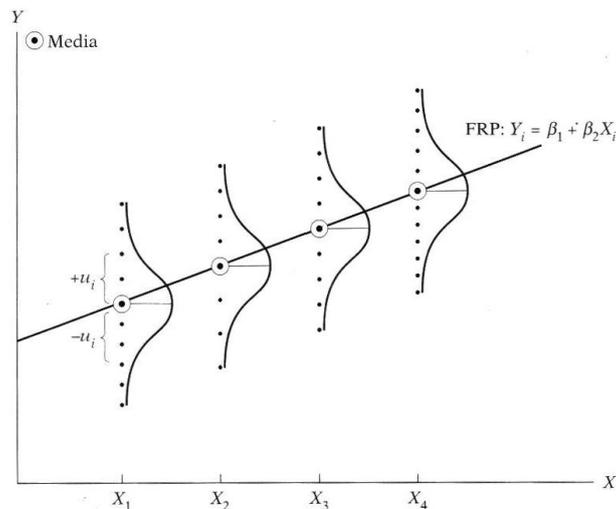


Figura 2.1. Representación gráfica del tercer supuesto (Gujarati, 2004).

4. Homocedasticidad o igual varianza de u_i . Dado el valor de X_i la varianza de u_i es la misma para todas las observaciones.

$$\text{var}(u_i / X_i) = \sigma^2 \quad (2.7),$$

donde *var* significa varianza, que establece que la varianza de u_i para cada X_i es algún número positivo constante igual a σ^2 . La ec. 2.7 plantea que la varianza es la misma para los valores de X : ni aumenta ni disminuye conforme X varía. La figura 2.2 esquematiza la descripción de este supuesto.

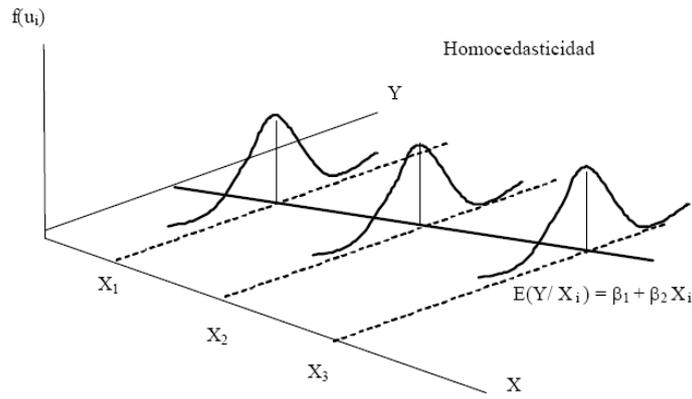


Figura 2.2. Representación de homocedasticidad (Gujaratí, 2004).

Por el contrario, al no cumplirse el supuesto 4, entonces la varianza poblacional varía con respecto a X , lo que se conoce como heterocedasticidad o varianza desigual. La figura 2.3 esquematiza cómo, para diferentes secciones de la población, la varianza se modifica conforme se incrementa la variable independiente. La ecuación 2.8 representa simbólicamente a la heterocedasticidad:

$$\text{var}(u_i / X_i) = \sigma_i^2 \quad (2.8)$$

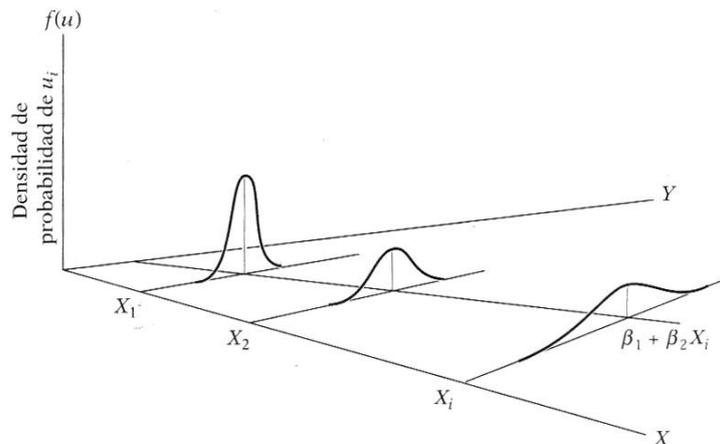


Figura 2.3. Representación de una población con heterocedasticidad (Gujaratí, 2004).

5. No existe autocorrelación entre las perturbaciones. Dados dos conjuntos de valores de X cualesquiera $X_i, X_j (i \neq j)$, la correlación entre dos $u_i, u_j (i \neq j)$ es cero.

$$\text{cov}(u_i, u_j / X_i, X_j) = 0 \quad (2.9),$$

donde *cov* significa covarianza. Este supuesto es de no correlación serial o no autocorrelación, es decir, los errores son linealmente independientes para todo valor de X . Si u_i y u_{i-1} están correlacionados positivamente, entonces Y_j no

depende únicamente de X_i , sino también de u_{i-1} , debido a que u_{i-1} determina a u_i .

6. La covarianza entre u_i y X_i es cero

$$\text{cov}(u_i, X_i) = 0 \quad (2.10),$$

establece que la perturbación u y la variable explicativa X no se encuentran correlacionadas. En el caso de que u y X estén correlacionadas, no es posible determinar sus efectos individuales sobre Y , así el comportamiento que tome X afectará directamente a u .

7. El número de observaciones n debe de ser mayor que el número de parámetros por estimar.
8. Variabilidad en los valores de X . No todos los valores de X en una muestra dada deben de ser iguales. El modelo de MCO requiere que exista una dispersión entre las X para poder calcular los valores de los coeficientes.
9. El modelo de regresión debe ser correctamente especificado. Alternativamente, no debe existir un sesgo de especificación o error en el modelo utilizado en el análisis empírico. Debe poseer las variables correctas, no se incluyan variables irrelevantes ni excluir las relevantes; también la forma funcional debe ser correcta.
10. No hay multicolinealidad perfecta. Es decir, no deben de existir relaciones perfectamente lineales entre las variables.

2.1.1 Propiedades de los estimadores de Mínimos Cuadrados Ordinarios

Al cumplirse los supuestos mencionados, los estimadores de β_1 y β_2 determinados por MCO tendrán un número de características deseables conocido como el Teorema de Gauss-Markov, que enuncia: dados los supuestos clásicos de regresión lineal, los estimadores de mínimos cuadrados ordinarios dentro de la clase de estimadores lineales insesgados, tienen mínima varianza, es decir, son los mejores estimadores lineales insesgados (MELI).

"Mejor" significa que el estimador β de MCO tiene mínima varianza.

"Estimador" se refiere a los estimadores del valor poblacional de β_1 y β_2 .

"Lineal", $\hat{\beta}_1$ y $\hat{\beta}_2$ son estimadores lineales, lo que significa que las fórmulas para $\hat{\beta}_1$ y $\hat{\beta}_2$ son combinaciones lineales de las variables aleatorias (en este caso, Y y u).

"Insesgado", es decir, en promedio los valores estimados de $\hat{\beta}_1$ y $\hat{\beta}_2$ serán iguales a sus valores poblacionales.

Existe un supuesto más que no es esencial en el MCRL y los estimadores seguirán siendo MELI.

11. Normalidad de u : con el supuesto de normalidad es posible establecer que los estimadores de mínimos cuadrados de los coeficientes de regresión siguen la distribución normal con base en el estadístico $(n-k) \frac{\hat{\sigma}^2}{\sigma^2}$, que sigue la distribución χ^2 (con $n-k$ grados de libertad). Podrían utilizarse las pruebas t (t de Student) y F para verificar diversas hipótesis estadísticas, sin importar el tamaño de la muestra (n), siendo k el número de variables regresoras, $\hat{\sigma}^2$ la varianza estimada a partir de la muestra y σ^2 la varianza poblacional.

2.2 Posibles errores al violarse algún supuesto

A continuación se menciona brevemente por qué se deben tomar en cuenta los supuestos del MCRL, y los posibles errores que se cometen si no se cumple alguna prueba de especificación.

Forma funcional. Linealidad en los estimadores β_1 y β_2 . Al adaptar un modelo lineal a unos datos que no presentan una dispersión lineal, los valores serán sobre y subestimados en diversos momentos de la curva y los errores reflejarán la forma funcional que debe tener el modelo.

No autocorrelación. Los errores son independientes. En el caso de presencia de autocorrelación los estimadores siguen siendo lineales, insesgados y consistentes, pero ya no muestran mínima varianza. Al hacer caso omiso de este supuesto: la varianza de los residuos subestima a la verdadera, se sobrestima el valor de R^2 , la varianza del estimador puede subestimar a la varianza del modelo autoregresivo y las pruebas de significancia t y F dejan de ser válidas.

Correcta especificación. Se propone un componente sistemático correcto que contiene todas las variables significativas y no omite alguna significativa.

Permanencia estructural. Los estimadores deben ser estables, es decir, ser válidos para toda la muestra y que la relación entre las variables sea estable durante todo el periodo.

Exogeneidad. Se refiere a que los términos de error ε_i y la variable independiente X_i sean independientes $E(u_i, X_i) = 0$.

No Multicolinealidad. La multicolinealidad es un problema que surge cuando las variables explicativas del modelo están correlacionadas entre sí. Este es un problema, porque en cualquier regresión las variables explicativas van a presentar algún grado de correlación. Existen dos tipos de multicolinealidad:

No estricta o de grado.

Estricta o perfecta.

El caso de multicolinealidad estricta es debido a que alguna variable explicativa es combinación lineal de otras y el sistema de ecuaciones tiene infinitas soluciones, por lo que no es posible estimar por MCO.

En el caso de la multicolinealidad no estricta, se puede realizar la estimación de los parámetros por MCO, pero es asociado a un gran error que podría producir que este coeficiente deje de ser significativo estadísticamente. Esta estimación no está bien definida en el sentido de que la relación lineal entre las variables no está identificada de forma única, ya que no es posible encontrar el efecto separado de cada variable independiente sobre la dependiente.

Considérese la siguiente regresión que es utilizada como ejemplo de multicolinealidad estricta.

$$Y_i = \beta_1 + \beta_2 X_{i2} + \beta_3 X_{i3} + \varepsilon_i \quad (2.11),$$

donde $X_{i2} = \lambda X_{i3}$, X_{i3} es una variable conocida, λ es un parámetro constante conocido y ε_i es un término de error aleatorio. Al introducir esta dependencia lineal entre las variables explicativas en el modelo 2.11, se obtiene:

$$Y_i = \beta_1 + (\beta_2 \lambda + \beta_3) X_{i3} + \varepsilon_i \quad (2.12),$$

es decir, es posible estimar por MCO individualmente los coeficientes pero habrá infinitas soluciones para el coeficientes β_2 y existirá un gran error en el coeficiente. Así que, no es posible encontrar el efecto que aportan las variables X_{i3} y X_{i2} sobre la variable dependiente.

Homocedasticidad. Al no cumplirse la homocedasticidad, decimos que existe heterocedasticidad es cuando la varianza de cada termino de perturbación (u_i) no es un número constante, y dependerá conforme se incrementen las observaciones σ_i^2 . El problema surge debido a que la varianza se incrementa, al no ser constante durante la muestra analizada.

Los supuestos fueron validados por las pruebas estadísticas mencionadas en la tabla 2.2, las pruebas se explican en el apartado Anexo. Las pruebas fueron realizadas con el software econométrico Eviews, se analizaron que las pruebas fueran significativas con un 95% de confianza, así sobre la probabilidad asociada se determino el mejor modelo de especificación general. La tabla 2.2 enmarca las principales pruebas estadísticas aplicadas a las series (Brooks, 2008).

El programa EViews puede realizar un análisis de tendencias, con el propósito de determinar si existe un aumento o disminución de la temperatura o si se mantiene. Con EViews se puede generar un análisis de regresión lineal mediante mínimos cuadrados y realizar pruebas estadísticas para comprobar los supuestos que determinan la significancia de la tendencia. Además identifica y toma en cuenta *outliers* y se pueden proponer cambios estructurales que puedan influir en la serie y por tanto en la tendencia.

Tabla 2.2 Resumen de los supuestos estadísticos evaluados sobre el modelo de regresión lineal (Brooks, 2008).

Prueba de especificación	Nombre
Forma funcional	Ramsey-RESET
No autocorrelación	Breusch-Godfrey Correlograma de los residuales
Normalidad	Jarque- Bera
Heterocedasticidad	White
Heterocedasticidad condicional autorregresiva	ARCH
Permanencia estructural	Quandt-Andrews

En el anexo se describen las pruebas para la detección de problemas en los supuestos del modelo de regresión lineal.

Capítulo 3: Métodos

3.1 Método de validación de la base CRU TS 3.0

Para realizar la validación, seleccionaron las estaciones climatológicas mencionadas en la tabla 1.1, que fueron sometidas a criterios de selección empíricos de control de calidad en los datos atmosféricos, y por situarse dentro de los cuadros de malla de la base CRU TS 3.0. Para realizar la comparación se extrajeron de la base CRU TS 3.0 sólo los datos existentes en las estaciones contenidas en ERIC III para comparar sobre los mismos periodos y realizar la validación. El método utilizado es el propuesto por Dequé (2003), donde se utiliza el coeficiente de correlación de Pearson (R), la raíz del error cuadrático medio (RMSE), error medio absoluto (MAE), error medio absoluto normalizado (NMAE) y sesgo (BIAS), que se muestran a continuación:

Coficiente de correlación (Pearson). Este coeficiente proporciona el grado de relación lineal que existe entre dos variables, Φ y Φ_{obs} , donde a cada valor de Φ le corresponde uno de Φ_{obs} . La expresión para calcularlo es:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (\phi_i - \bar{\phi})(\phi_{iobs} - \bar{\phi}_{obs})}{(n-1)S_{\phi}S_{\phi_{obs}}} ({}^{\circ}C) \quad (3.1),$$

donde Φ corresponde a datos del CRU y Φ_{obs} a los datos de las estaciones climatológicas (tabla 1.1), donde n es el número de observaciones y S_{ϕ} y $S_{\phi_{obs}}$ son las desviaciones estándar obtenidas en cada cuadro de malla de la base CRU TS 3.0 y a partir de las observaciones, respectivamente.

Raíz del error cuadrático medio (Root Mean Square Error, RMSE). Indica el grado de error promedio entre pares individuales de valores de la CRU y los observados.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\phi_i - \phi_{iobs})^2}{n}} ({}^{\circ}C) \quad (3.2)$$

Error Absoluto Medio (Mean Absolute Error, MAE). Es una medida de la cercanía entre los valores del CRU y los observados, este criterio de validación es más resistente que el RMSE al efecto de *outliers*, debido a que no es calculado mediante el cuadrado de las diferencias. En caso de que la base CRU TS 3.0 no represente a la observación y

la diferencia sea grande, el efecto es mayor en el RMSE de lo que posiblemente debería de ser.

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |\phi_i - \phi_{iobs}|}{n} (\text{°C}) \quad (3.3)$$

Error Absoluto Medio Normalizado (Normalized Mean Absolute Error, NMAE). Similar al MAE, pero aquí se toma en cuenta el peso del error respecto al rango de variación de la variable medida. Es un porcentaje del error en la relación de la base CRU TS 3.0 con respecto a las observaciones.

$$NMAE = \frac{\sum_{i=1}^n |\phi_i - \phi_{iobs}|}{n} \bigg/ |\Delta\phi_{iobs}| \quad (3.4)$$

Sesgo (Mean Error o BIAS). Proporciona información sobre el sesgo que tiene la base CRU TS 3.0 respecto a las observaciones, es decir, sobrestimar o subestimar.

$$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (\phi_i - \phi_{iobs})}{n} (\text{°C}) \quad (3.5)$$

A partir de los criterios de comparación propuestos se determinó que la base CRU TS 3.0 es representativa del estado de Veracruz, esto con el fin de realizar inferencias estadísticas necesarias para el análisis de tendencias y cambio estructural.

3.2 Metodología para el análisis de tendencias

El modelo general planteado en la ecuación 3.6 se analizó de forma estacional sobre los meses representativos de primavera, verano, otoño e invierno (abril, julio, octubre y enero) para las variables de temperatura máxima y mínima de la base CRU TS 3.0.

$$Y_i = \alpha + \beta t_i + \varepsilon_i \quad (3.6)$$

donde Y es la temperatura, t el tiempo en años, ε es la perturbación aleatoria y α, β son los coeficientes de regresión. Para el modelo general previamente se realizó el análisis de las pruebas estadísticas planteadas en la tabla 2.2. A partir de estas pruebas se incorporaron algunos estimadores que complementan el modelo de la ec. 3.6. Lo anterior para representar el efecto de algún cambio estructural (CE) o por los efectos

de procesos autorregresivos en los residuales, así como también por la presencia de datos outliers que inducen en la normalidad de los residuales. La ecuación 3.7 muestra el modelo de especificación corregido en caso de no satisfacer los supuestos del Teorema de Gauss- Markov.

$$Y_i = \alpha_0 + \alpha_1(P) + \beta_0 t_i + \beta_1 t_i(Q) + \delta(R) + AR_{1,2,\dots,n-1} + \varepsilon_i \quad (3.7)$$

Para esta evaluación α_0 es el valor medio, α_1 es un punto de cambio mostrado sobre el valor medio en el año P, β_0 es el coeficiente con respecto a la tendencia, β_1 es un cambio sobre la tendencia en el año Q y δ es la eliminación del efecto de la observación durante la regresión para el año R (outlier). Los procesos autorregresivos son designados por el término AR, donde el orden del proceso autorregresivo puede variar dependiendo del rezago necesario a introducir para corregir el modelo y así contener más de un proceso autorregresivo en el modelo.

A continuación se describe el procedimiento realizado para un cuadro de malla sobre el que se analizó la serie de datos. Este cuadro de malla está centrado en las coordenadas 22.25°N y 98.75°W, el cual fue comparado con la estación El Coco, Tamuín localizada en 22.13°N y 98.73°W, en el estado de San Luis Potosí, por no existir una estación en el estado de Veracruz dentro del cuadro de malla que almacenara datos aceptables.

Se analizará la temperatura máxima en el mes representativo de verano (julio) en el periodo 1901-2006, mediante el modelo de especificación general (3.6), observado en la figura 3.1. El modelo es construido por una constante y un término de tendencia (agregando como variable independiente al tiempo). Este modelo no plantea la representación de la serie de tiempo, lo que se espera es observar si en la serie se encuentra contenida una *tendencia* que sea significativa sobre toda la serie de tiempo o sobre algún periodo en específico.

Una vez obtenido el modelo se procede a realizar las pruebas de especificación sobre los residuales, esto para validar los supuestos sobre los mínimos cuadrados ordinarios.

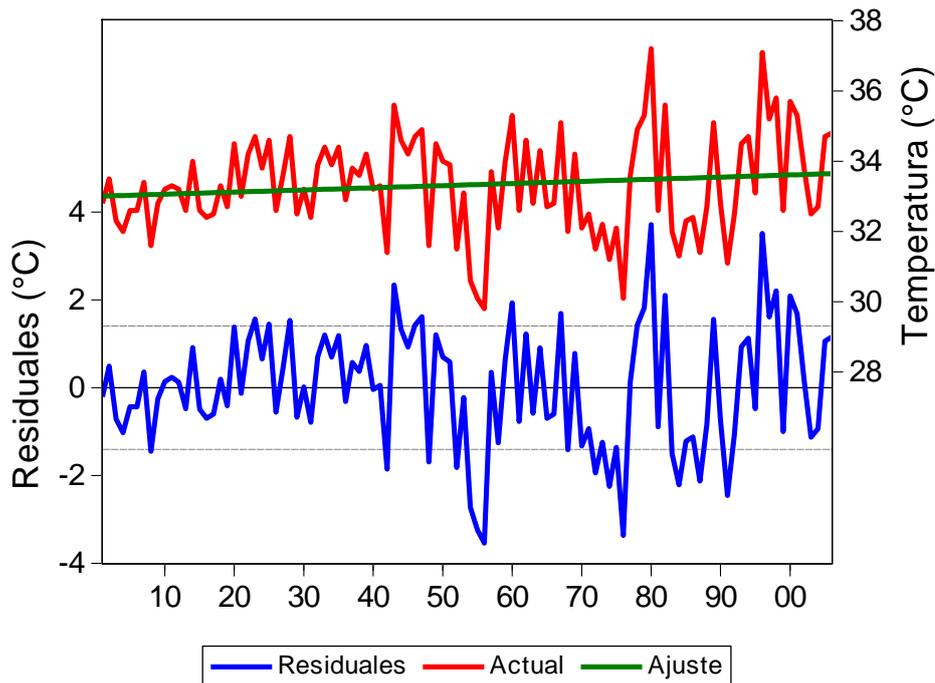


Figura 3.1. Modelo de especificación general (ec. 3.6) aplicado sobre el cuadro de malla centrado en las coordenadas 22.25°N y 98.75°W, donde se muestra la serie temporal de datos (roja), el modelo ajustado (verde) y los residuales (azul).

La tabla 3.1 incluye en la primera columna las pruebas de especificación realizadas y también los estadísticos empleados en cada prueba; la segunda columna corresponde al modelo de especificación general realizado, esta columna a su vez se subdivide en dos: la parte izquierda es el valor del estadístico obtenido y la derecha es la probabilidad asociada a cada estadístico; y la tercera columna es la corrección aplicada a esta serie con el modelo propuesto en la ecuación 3.7.

Las pruebas de la tabla 2.2 fueron analizadas para un nivel de significancia del 5%, utilizando el programa Eviews, así cuando la probabilidad asociada al estadístico es menor a este valor (0.05), se encuentra algún problema en las pruebas. La identificación es inmediata de acuerdo a la hipótesis nula (H_0) de cada una de las pruebas estadísticas (mostradas en el Anexo).

A continuación se mencionan en forma de resumen los problemas encontrados en el modelo de especificación general (ec. 3.6) analizado sobre el cuadro de malla centrado en coordenadas 22.25°N y 98.75°W.

Pruebas de análisis de residuales:

- Jarque–Bera (JB) al ser mayor la probabilidad de 0.05 muestra que los residuales se distribuyen de forma normal.
- Breusch-Godfrey (ML) es una prueba de autocorrelación de residuales, al analizar para los distintos rezagos planteados (1, 2, 3, 4 y 8) muestra que existen problemas de autocorrelación.
- WHITE es una prueba de heterocedasticidad y la probabilidad asociada es menor a 0.05, lo que muestra que hay problemas de heterocedasticidad.
- ARCH indica para los diferentes rezagos (1, 2, 3, 4 y 8) existen problemas de heterocedasticidad condicional.

Pruebas de estabilidad:

- Quandt-Andrews: es una prueba que detecta el año en que ocurre un cambio estructural (CE) en series de tiempo, esta prueba se puede aplicar de forma general al modelo de especificación (ec. 3.6) o individualmente sobre los coeficientes α , β . En el caso del ejemplo propuesto las probabilidades asociadas a la prueba muestra para el coeficiente α que la probabilidad es mayor a 0.05 (H_0 : No hay cambio estructural) por lo que se acepta la hipótesis nula y no cambio estructural sobre el valor de la constante y para el coeficiente de la tendencia β la probabilidad asociada es menor a 0.05, así, en el año de 1952 se detecta un cambio estructural sobre el coeficiente β .
- Ramsey-RESET indica que la forma funcional planteada es aceptable.

Para la aplicación de estas pruebas y el uso de ellas con *Eviews* las explican con detalle Pulido y Pérez (2003). Dado que en diversas pruebas, existen problemas, se realizaron los ajustes necesarios para corregir el modelo especificado. Para corregir el problema del cambio estructural en el coeficiente de la tendencia se agregó el término a partir del año de detección del cambio, encontrado por la prueba Quandt-Andrews para el año de 1952, así con la incorporación de una función escalón mostrada en la fig. 3.2 que al introducirlo en el modelo de especificación dé un efecto de cambio.

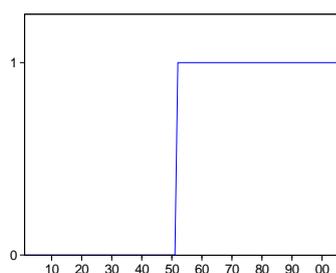


Figura 3.2. Ejemplo de función escalón empleada en el coeficiente de tendencia.

En el caso del problema de autocorrelación en la prueba de Breusch-Godfrey, a partir del análisis muestra haber autocorrelación en los rezagos analizados, para esto se utilizará el correlograma que trabaja sobre la función de autocorrelación y correlación parcial de los residuales, de forma visual se observa que las barras exceden las bandas de significancia en el primero, segundo, sexto y décimo sexto rezago. Al introducir esto en el modelo de especificación general el rezago que fue significativo al 0.05 es el de 2° orden; a partir de introducir el término necesario en el modelo, la autocorrelación fue corregida.

Tabla 3.1. Evaluación de supuestos para el cuadro de malla centrado en las coordenadas 22.25°N y 98.75°W y validado por la estación de El Coco, Tamuín.

	Tmax Julio		Tmax Julio Corregido	
	Prueba	Probabilidad	Prueba	Probabilidad
JB	0.1803	0.9137	0.0132	0.9934
ML (1)				
F-statistic	6.7426	0.0108	2.8786	0.0929
Obs*R ²	6.5127	0.0107	2.9385	0.0865
ML (2)				
F-statistic	6.4212	0.0024	1.5318	0.2213
Obs*R ²	11.8536	0.0027	3.1526	0.2067
ML(3)				
F-statistic	4.3083	0.0067	1.0385	0.3791
Obs*R ²	12.0258	0.0073	3.2364	0.3566
ML(4)				
F-statistic	3.2211	0.0157	1.1892	0.3205
Obs*R ²	12.0987	0.0166	4.9100	0.2967
ML(8)				
F-statistic	2.4479	0.0186	1.1742	0.3232
Obs*R ²	17.9597	0.0215	9.6351	0.2916
WHITE				
F-statistic	7.4713	0.0009	1.0145	0.4345
Obs*R ²	13.4295	0.0012	9.2097	0.4181
ARCH(1)				
F-statistic	3.0500	0.0837	0.9575	0.3301
Obs*R-squared	3.0198	0.0823	0.9672	0.3254
ARCH(2)				
F-statistic	4.0878	0.0196	2.0972	0.1281
Obs*R-squared	7.7881	0.0204	4.1468	0.1258
ARCH(3)				
F-statistic	3.0940	0.0304	1.4662	0.2284
Obs*R-squared	8.8293	0.0316	4.3815	0.2231
ARCH(4)				
F-statistic	5.1125	0.0009	0.1128	0.9777
Obs*R-squared	17.7598	0.0014	0.4725	0.9761
ARCH(8)				
F-statistic	2.9047	0.0063	1.8904	0.0713
Obs*R-squared	20.2901	0.0093	14.2338	0.0759
	Quandt-Andrews α -1948		Quandt-Andrews β 0	
Exp LR F-statistic	1.9526	0.0558	PRUEBA NO APLICABLE	
Exp Wald F-statistic	1.9526	0.0558	PRUEBA NO APLICABLE	
	Quandt-Andrews β -1952		Quandt-Andrews β 1	
Exp LR F-statistic	4.0413	0.0032	PRUEBA NO APLICABLE	
Exp Wald F-statistic	3.7048	0.0056	PRUEBA NO APLICABLE	
Ramsey RESET Test (1)				
F-statistic	0.6505	0.4218	0.1168	0.7333
Log likelihood ratio	0.6674	0.4140	0.1226	0.7262
Ramsey RESET Test (2)				
F-statistic	MATRIZ NO INVERTIBLE		0.3467	0.7079
Log likelihood ratio	MATRIZ NO INVERTIBLE		0.7332	0.6931
Ramsey RESET Test (3)				
F-statistic	MATRIZ NO INVERTIBLE		0.2452	0.8645
Log likelihood ratio	MATRIZ NO INVERTIBLE		0.7858	0.8529
Ramsey RESET Test (4)				
F-statistic	MATRIZ NO INVERTIBLE		MATRIZ NO INVERTIBLE	
Log likelihood ratio	MATRIZ NO INVERTIBLE		MATRIZ NO INVERTIBLE	

Tabla 3.2. Correlograma de los residuales

Autocorrelation	Partial Correlation	AC	PAC	Q-Stat	Prob
		1 0.247	0.247	6.6536	0.010
		2 0.276	0.229	15.049	0.001
		3 0.074	-0.040	15.651	0.001
		4 0.051	-0.022	15.940	0.003
		5 -0.103	-0.131	17.151	0.004
		6 -0.207	-0.191	22.044	0.001
		7 -0.058	0.085	22.435	0.002
		8 -0.093	0.011	23.450	0.003
		9 -0.130	-0.118	25.431	0.003
		10 -0.054	0.013	25.783	0.004
		11 -0.005	0.020	25.786	0.007
		12 -0.057	-0.098	26.182	0.010
		13 0.024	0.072	26.253	0.016
		14 0.019	0.010	26.296	0.024
		15 0.043	-0.037	26.524	0.033
		16 0.218	0.273	32.579	0.008
		17 0.044	-0.084	32.834	0.012
		18 0.238	0.116	40.210	0.002
		19 0.069	0.046	40.841	0.003
		20 0.122	-0.029	42.830	0.002
		21 0.022	0.021	42.894	0.003
		22 -0.080	-0.047	43.765	0.004
		23 -0.069	-0.075	44.427	0.005
		24 -0.263	-0.177	54.112	0.000
		25 -0.178	-0.008	58.611	0.000

El modelo quedó de la siguiente forma

$$T \max_ Julio_i = \alpha_0 + \beta_0 t_i + \beta_1 t_i (1952) + AR_2 + \varepsilon_i \quad (3.8)$$

De esta forma fue corregido el modelo a partir de las pruebas estadísticas analizadas (vistos en la tercera columna de la tabla 3.1). El modelo de especificación (ec. 3.7) es adecuado para los fines deseados y se encuentra que la tendencia es significativa en dos periodos: 1901-1951 y 1952-2006. Las tendencias significativas tienen diferente coeficiente, para el periodo 1901-1951 el coeficiente es de 0.044°C/año y el incremento en la temperatura fue de 2.25°C y para el periodo de 1952-2006 el coeficiente es de 0.014°C/año y el incremento fue de 0.8°C. Ambos muestran tendencias positivas significativas a pesar del cambio estructural mostrado en el año de 1952, lo que llevó a un “salto” y dividió prácticamente en dos secciones a la serie mostrando dos tipos de climas en una misma serie de registros. La tabla 3.3 muestra la prueba *t* con un nivel de significancia de 0.05 para los coeficientes determinados y la figura 3.3 muestra la forma que determina el modelo de la ec. 3.8, que no representa a la serie en sí pero representan las tendencias encontradas.

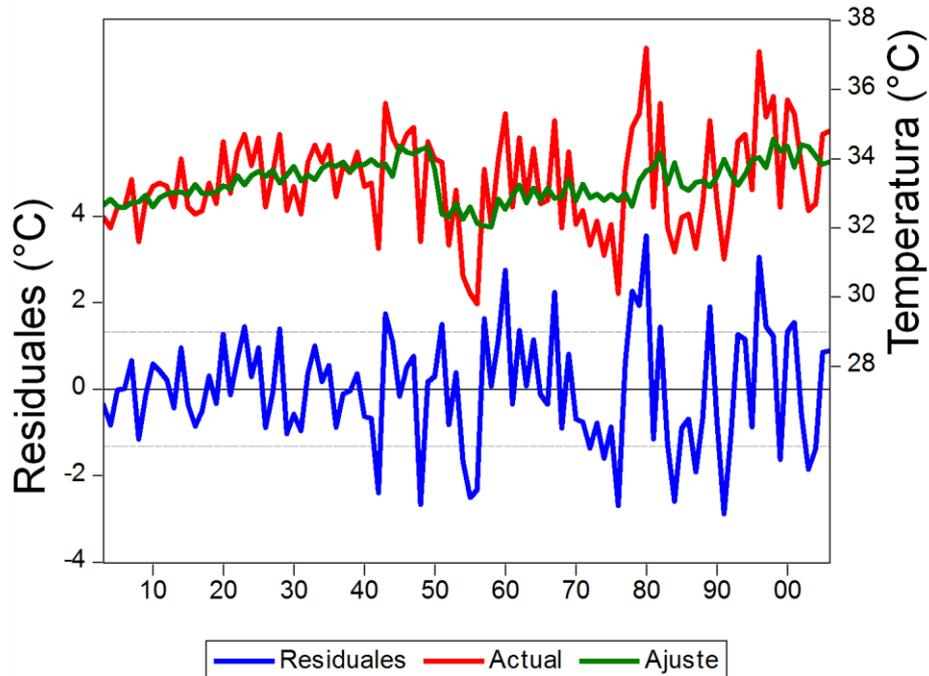


Figura 3.3. Modelo corregido realizado sobre el cuadro de malla validado con la estación El Coco, Tamuín, donde se muestra la serie temporal de datos (roja), el modelo ajustado (verde) y los residuales (azul).

Tabla 3.3. Relación de significancia de los coeficientes a partir del modelo representado por la ecuación 3.7.

Coefficiente	Variable	Valor del Coeficiente	Error Estándar	Estadístico t-	Probabilidad
α_0		32.17805	0.338513	95.05702	0.0000
B_0	t_i	0.044124	0.012865	3.429834	0.0009
B_1	$t_i(1952)$	-0.029319	0.010006	-2.930108	0.0042
AR(2)		0.234061	0.113761	2.057475	0.0422

Análisis similares se realizaron para 40 cuadros de malla validados en los que se encontraron problemas similares con los supuestos, para las variables de temperatura máxima y mínima.

En el siguiente apartado se presentan los resultados obtenidos a partir de la metodología, donde se comentará acerca de la validación de la base CRU TS 3.0 y principalmente el análisis de tendencia en el estado de Veracruz.

Capítulo 4: Resultados

4.1 Validación de la base CRU TS 3.0

Durante la validación realizada se obtuvieron los siguientes gráficos, que representan esquemáticamente el resultado de la validación de la base de datos CRU TS 3.0. A continuación se comenta acerca de cada una de las comparaciones realizadas entre la temperatura media.

Correlación de Pearson. La correlación entre las estaciones climatológicas y los cuadros de malla de la base, cerca del 75% de las comparaciones tienen un coeficiente mayor a 0.9. En particular los casos de las estaciones Mozomboa, La Itsmeña y la Laguna Hidalgotitlan son los peores casos representados por la base de datos CRU TS 3.0.

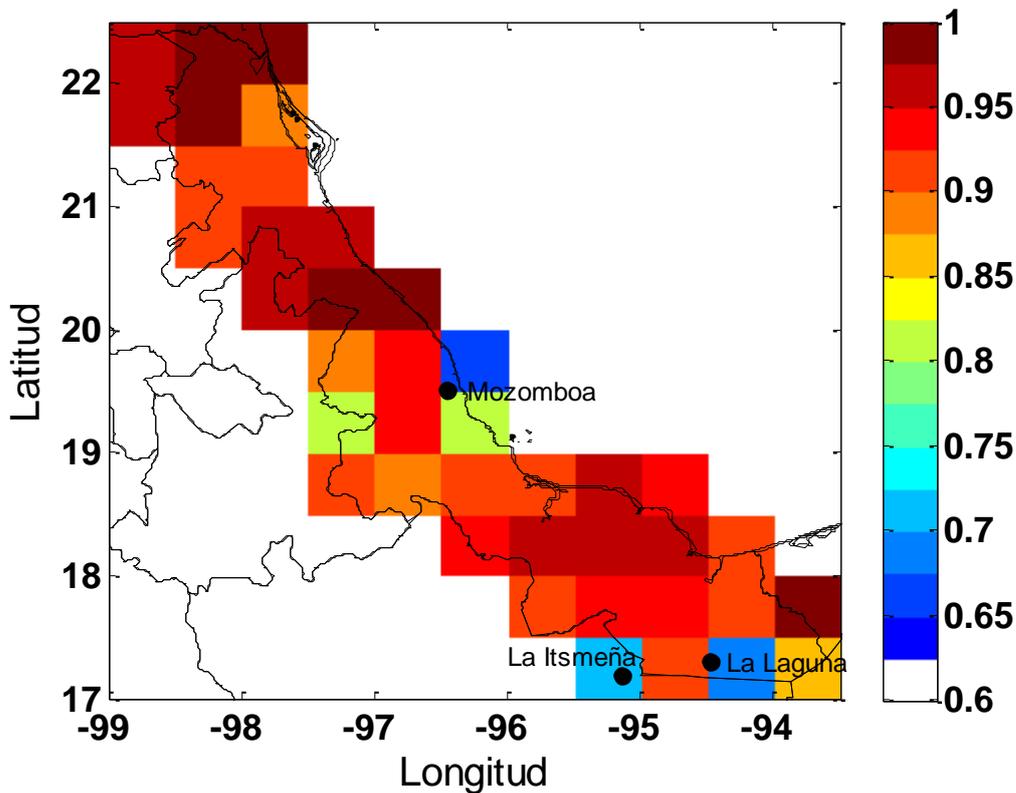


Figura 4.1. Coeficiente de correlación de Pearson (R) de temperatura media entre estaciones climatológicas y la base CRU TS 3.0 para el estado de Veracruz.

Error Cuadrático Medio. El 67% de la malla muestra tener un error menor a 2°C (cuadros azul rey en la figura 4.2). Sin embargo, existen datos, como los de las estaciones de Tantoyuca, Loma Fina y La Itsmeña con errores cercanos a 6°C.

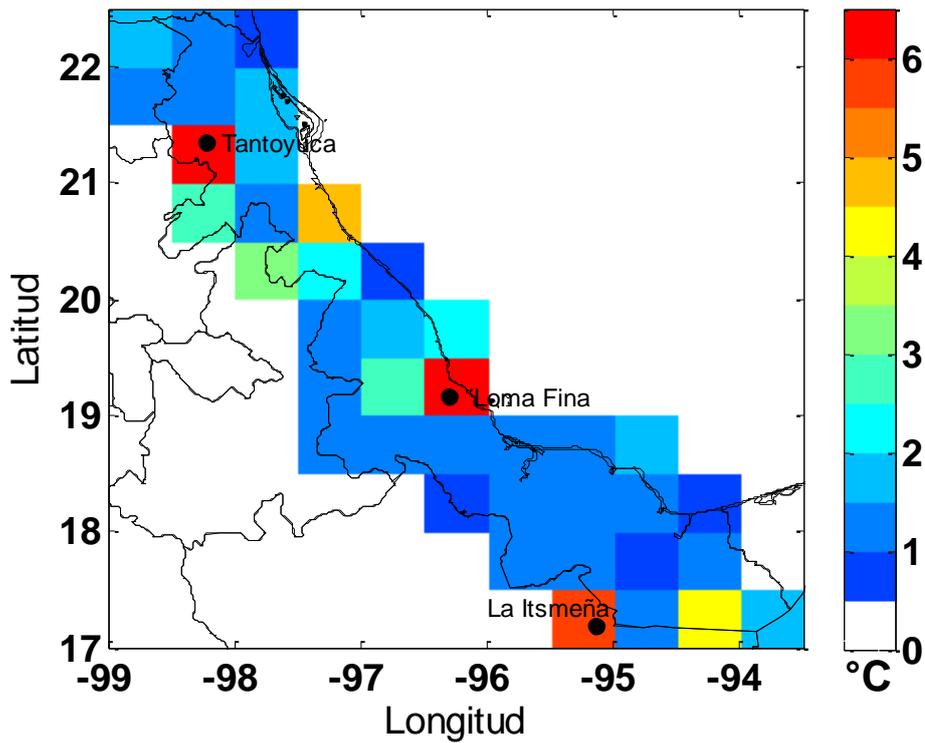


Figura 4.2 Raíz del error cuadrático medio de las estaciones contra la base de datos CRU TS 3.0

El Error Absoluto Medio en la figura 4.3 muestra que estos errores son muy semejantes a la raíz del error cuadrático medio, es de considerar como se comento en el apartado 3.1, la raíz del error cuadrático medio muestra valores mayores debido a los efectos de valores outliers.

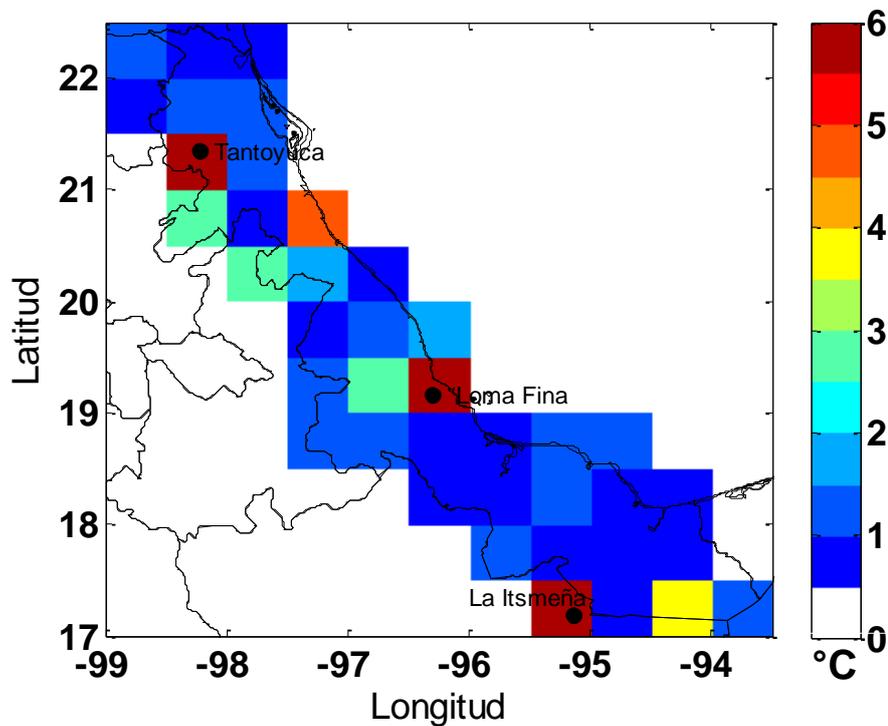


Figura 4.3. Error absoluto medio entre valores observados y CRU TS 3.0

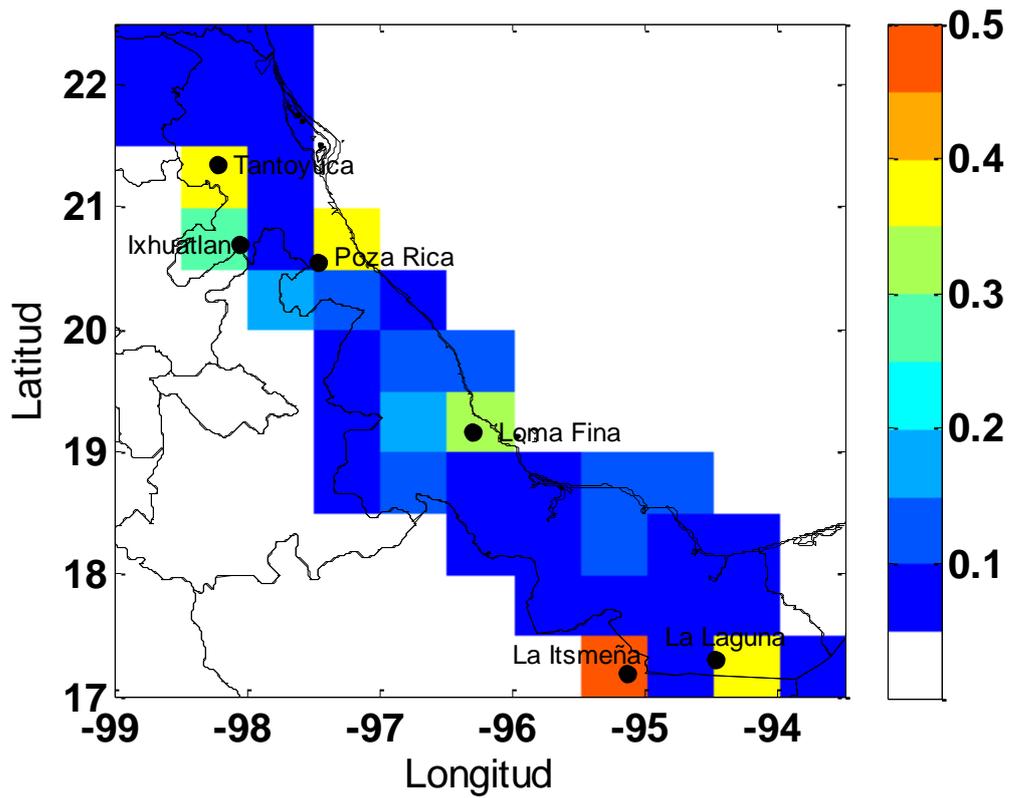


Figura 4.4. Error absoluto medio normalizado

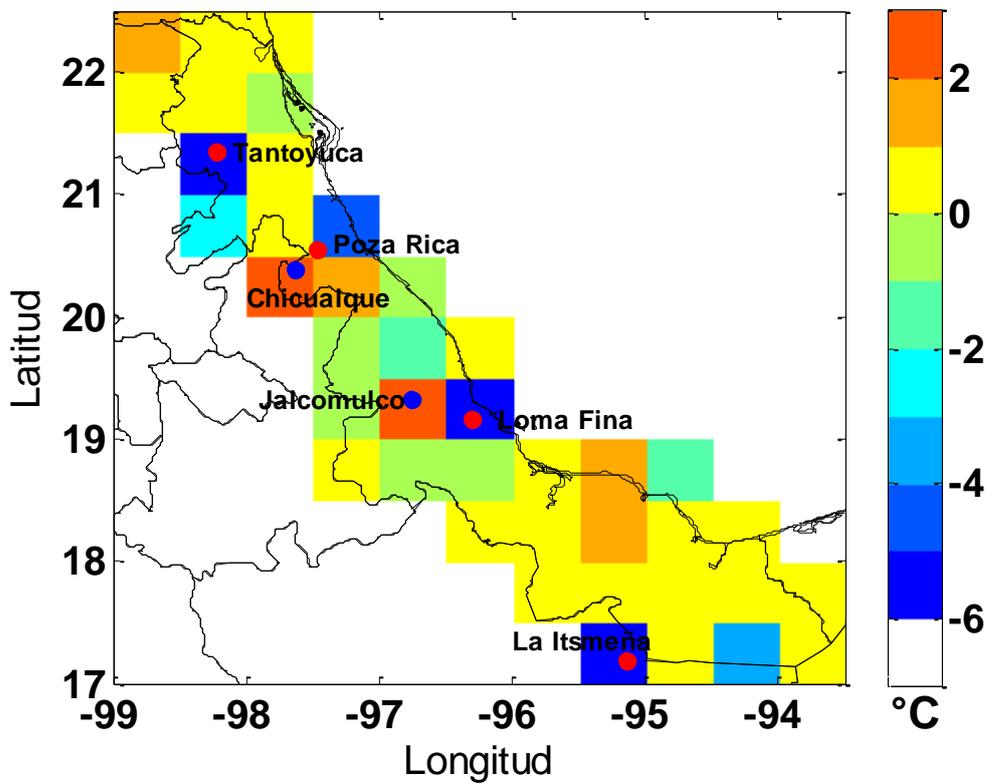


Figura 4.5. Sesgo calculado entre CRU TS 3.0 y las observaciones.

La Fig. 4.4 muestra el error absoluto medio pero normalizado entre el rango de las observaciones, obteniendo un porcentaje sobre el error calculado entre la base CRU TS 3.0 y las observaciones, en la figura se representa cómo seis de las estaciones muestran que los errores asociados entre las bases son mayores al 25% (Tantoyuca, Ixhuatlan, Poza Rica, Loma Fina, La Laguna y La Itsmeña) y el máximo error asociado es alrededor del 45% (La Itsmeña).

El sesgo (fig. 4.5) muestra que el 38% de las estaciones se encuentran sesgadas negativamente, así que, la base CRU TS 3.0 sobrestima a las observaciones, en el peor de los casos cerca de 6°C en cuatro cuadros de malla (Tantoyuca, Loma Fina, La Itsmeña y Poza Rica). Por otro lado la base CRU TS 3.0 subestima cerca de 2.5°C en las estaciones de Chiquilque y Jalcomulco.

Para complementar la validación se realizaron regresiones con sus intervalos de confianza al 95%. A continuación se ejemplifican cuatro de las mejores comparaciones encontradas: las estaciones del Fiscal, Joloapan, Mosquiterio Huimanguillo y Ebano donde se muestran las regresiones con las bandas de bondad normalizadas. Estas estaciones son representativas del 75% de las que son consideradas aceptables.

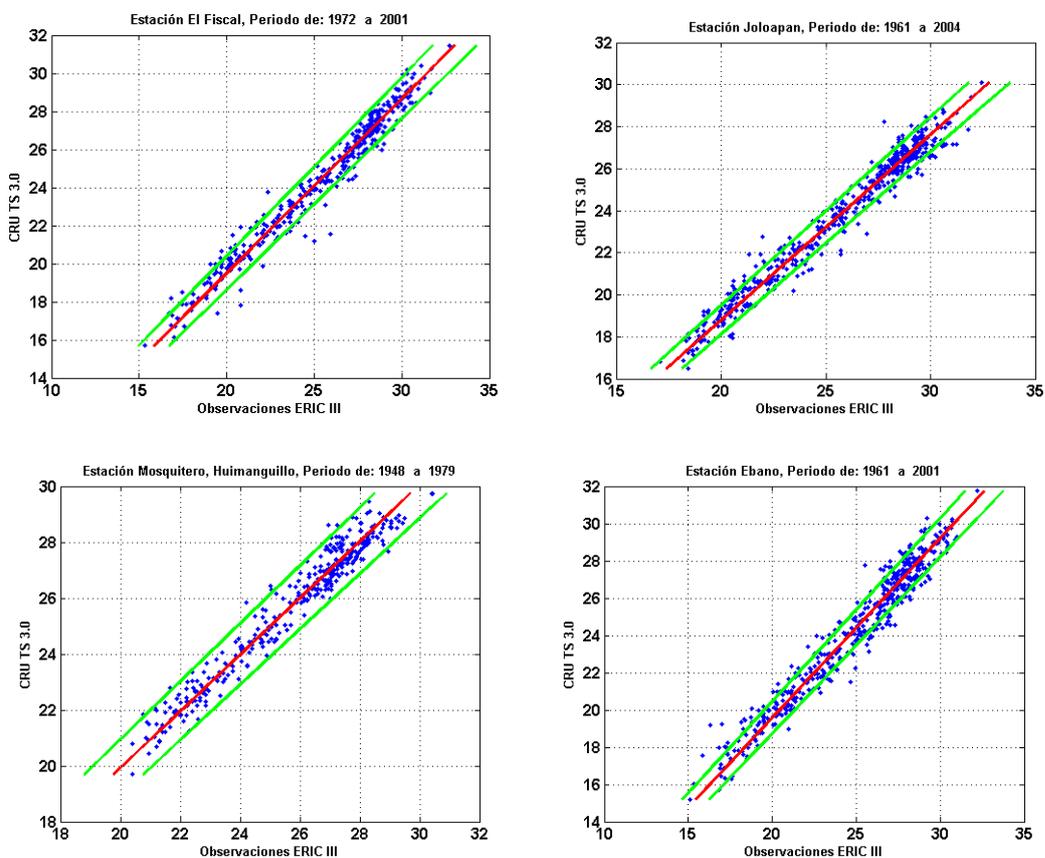


Figura 4.6. Los mejores ajustes encontrados entre las observaciones y la base CRU TS 3.0

Las regresiones con la correlación más baja son la de Mozombo, La Laguna, Hidalgotitlan; Itsmeña, Matías Romero y Loma Fina, Paso de Ovejas, estas estaciones muestran la peor correlación obtenida y son ejemplos de los diez cuadros de malla con las peores relaciones encontradas entre la base CRU TS 3.0 y las observaciones.

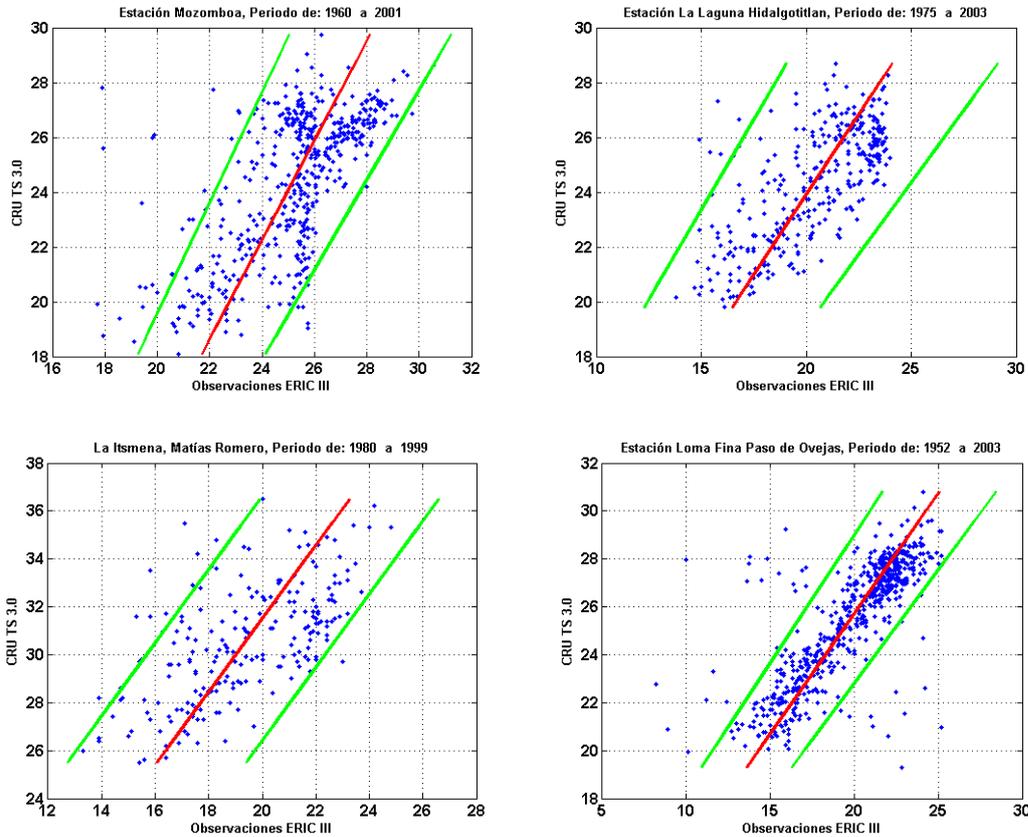


Figura 4.7. Las correlaciones más bajas entre las observaciones y la base de datos CRU TS 3.0.

También se comparó el patrón medio anual de las observaciones contra el de la base CRU TS 3.0. A continuación se muestra el patrón del ciclo anual de las estaciones que tienen mejor correlación.

Es importante revisar que los patrones observados del ciclo anual de temperatura sean representados adecuadamente por la base CRU TS 3.0. La figura 4.8 muestra el ciclo anual de las estaciones El Fiscal, Joloapan, Mosquitero y Ebano, en donde se observa que la base CRU TS 3.0 subestima a las observaciones, en 1°C en la estación de El Fiscal y alrededor de 2°C en Joloapan principalmente durante la primavera y el verano.

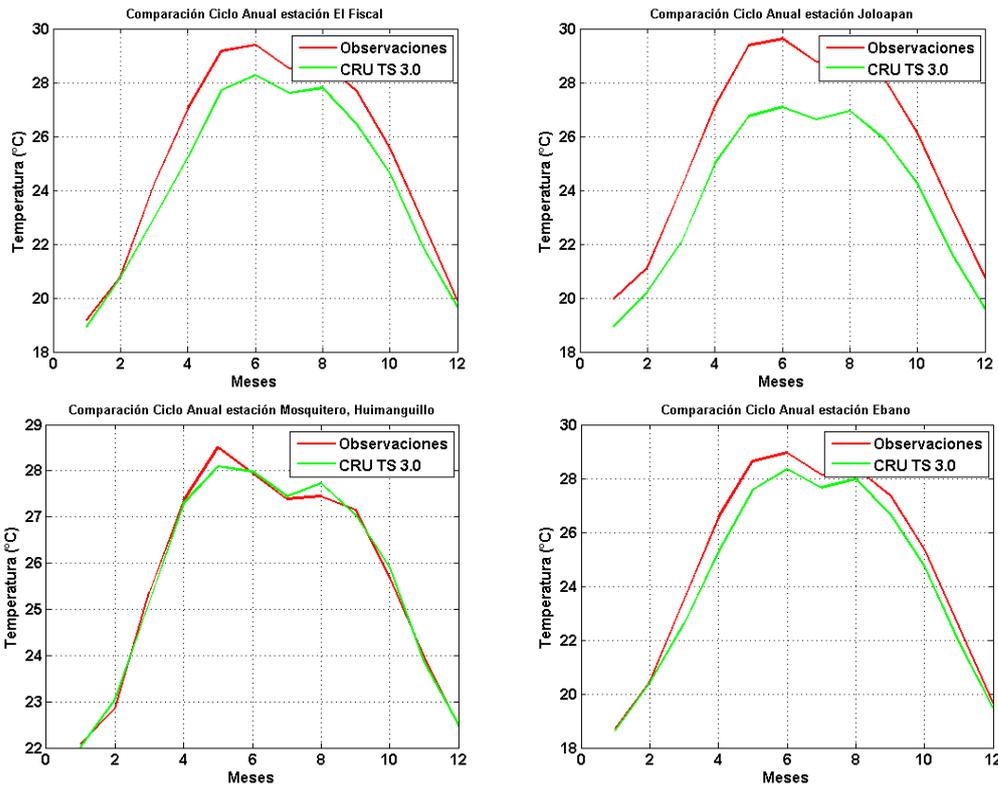


Figura 4.8. Comparación entre los ciclos anuales observados y la base CRU TS 3.0 para las estaciones con la correlación más alta.

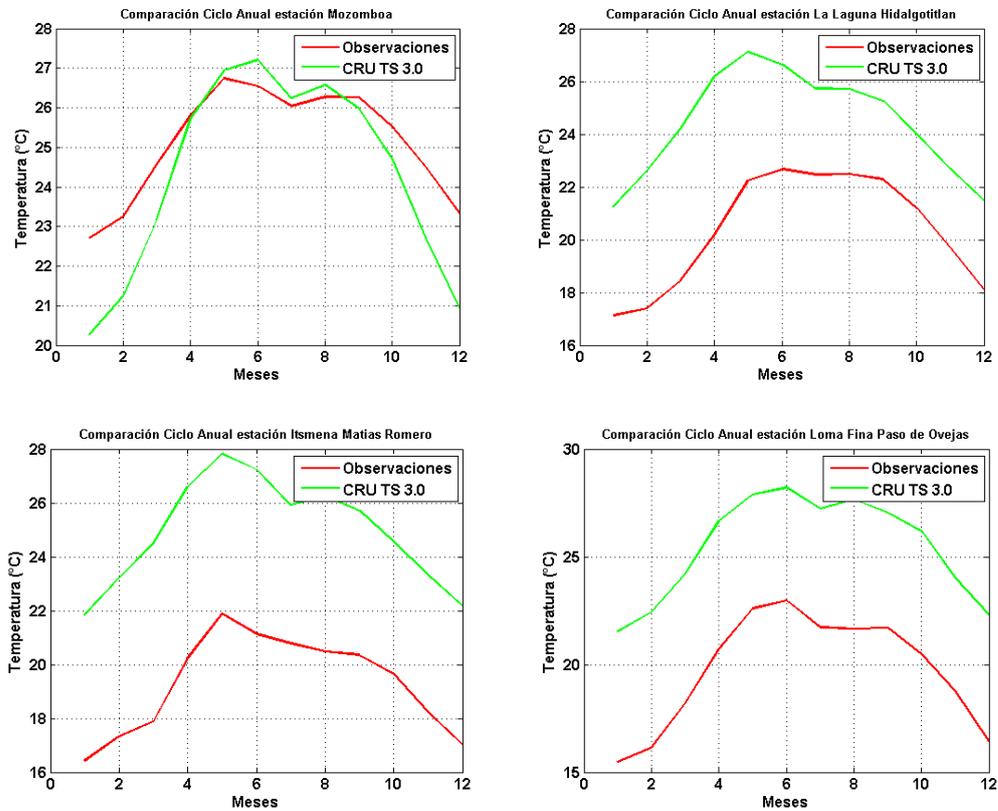


Figura 4.9. Comparación entre los ciclos anuales observados y la base CRU TS 3.0 para las estaciones con la correlación más baja.

En la fig 4.9 en la estación de Mozomboa la base CRU TS 3.0 reproduce la forma del ciclo anual en los meses de abril a septiembre, los demás meses la base CRU TS 3.0 subestima al patrón de las observaciones del ciclo anual. En las estaciones La Laguna, Itsmeña y Loma Fina la forma del ciclo anual es reproducida, pero la base CRU TS 3.0 sobrestima a las observaciones hasta con 6°C durante todo el año, lo que pone en cuestionamiento la elección de las estaciones. También es posible que la diferencia entre una base de escala regional y estaciones locales no sea el método más adecuado de comparación.

A continuación se presenta la tabla 4.1 con las estadísticas obtenidas para cada estación.

Tabla 4.1 Estadísticas comparativas de las estaciones de Veracruz contra la base CRU TS 3.0.

Cuadro de malla	Nombre de la estación	Porcentaje de datos completo	RMSE (°C)	MAE (°C)	NMAE	BIAS (°C)	Correlación de Pearson
1	El Coco, Tamuín	95.9%	1.7586	1.4742	0.084	1.2869	0.9637
2	Ébano, Ébano	98.4%	1.0142	0.8248	0.0482	0.5822	0.977
3	Tampico, Tampico (DGE)	91.6%	0.8927	0.7307	0.0474	0.3913	0.9776
4	La Gloria, Tanlajas	91.6%	1.0773	0.7817	0.0458	0.3252	0.9645
5	El Fiscal, S.V. Tancuayala	99.7%	1.219	1.0214	0.0587	0.9226	0.9818
6	Ozuluama, Ozuluama	91.3%	1.8243	1.1117	0.0684	-0.5844	0.8861
7	Tantoyuca, Tantoyuca	91.1%	6.1782	5.9997	0.3593	-5.9966	0.9118
8	Tantima, Tantima	96.7%	1.6807	1.2011	0.0728	0.448	0.9071
9	Ixhuatlan del Café	97.6%	2.9882	2.5907	0.2565	-2.5222	0.9114
10	Sombrerete, Temapache	93.6%	1.0182	0.7677	0.0524	0.4981	0.9649
11	Poza Rica De Hidalgo	99.0%	4.8814	4.7961	0.3501	-4.7961	0.9646
12	Chicualque, Coyutla	96.2%	3.0534	2.8594	0.1728	2.8589	0.9687
13	Joloapan, Papantla	98.5%	2.0111	1.8624	0.1213	1.855	0.9834
14	El Raudal, Nautla	100.0%	0.9575	0.7437	0.0583	-0.5853	0.9751
15	Atzalan, Atzalan	94.8%	1.0795	0.8098	0.0578	-0.1262	0.8952
16	Las Animas, Xalapa	98.1%	1.6548	1.4517	0.1383	-1.4036	0.9421
17	Mozomboa, Actopan	98.4%	2.1706	1.7563	0.1367	0.8066	0.6531
18	Totutla, Totutla	89.8%	1.412	1.0513	0.073	-0.4724	0.8139
19	Jalcomulco, Jalcomulco	98.7%	2.696	2.6075	0.1715	2.5259	0.9362
20	Loma Fina, Paso de Ovejas	97.3%	6.0148	5.7664	0.3392	-5.7252	0.8007

21	Acultzingo, Acultzingo	100.0%	1.4705	1.2532	0.0908	0.9696	0.9157
22	Naranjal, Fortín (CFE)	100.0%	1.4274	1.132	0.1068	-0.9423	0.8984
23	Las Vigas, Tlalixcoyan	98.0%	1.361	0.9499	0.0788	-0.8133	0.9086
24	Heroica Alvarado	73.3%	1.1367	0.8971	0.0726	0.5378	0.9224
25	Ángel R. Cabada	100.0%	1.3244	1.1261	0.0962	1.0561	0.9514
26	Coyame, Catemaco	99.7%	1.6622	1.4206	0.1297	-1.4104	0.9306
27	La Granja, Cosamaloapan	97.1%	0.9147	0.6427	0.0516	0.138	0.9429
28	Villa Azueta, José Azueta	98.8%	1.0059	0.7828	0.0626	0.6564	0.9569
29	Cuatotolapan	99.7%	1.4861	1.2493	0.0999	1.198	0.945
30	Huazuntlan	99.1%	1.026	0.8155	0.0777	0.7384	0.9596
31	Nanchital	99.0%	0.9479	0.7098	0.0743	0.0261	0.9139
32	Playa Vicente	97.3%	1.4071	1.0996	0.0761	0.7918	0.8954
33	Bellaco, San Juan Evangelista	98.0%	1.302	0.9611	0.0745	0.8023	0.931
34	Acayucan, Acayucan	100.0%	0.9819	0.7895	0.0655	0.2531	0.9305
35	Tecuanapa, Las Choapas	97.9%	1.1491	0.7985	0.0629	0.5492	0.9178
36	Mosquitero, Huimanguillo	97.4%	0.4945	0.3821	0.038	-0.0032	0.9784
37	La Itsmeña, Matias Romero	94.0%	5.8826	5.6113	0.4879	-5.6113	0.7125
38	Cedillo, Hidalgotitlan	88.6%	1.1424	0.923	0.0779	0.3713	0.9168
39	La Laguna, Hidalgotitlan	96.0%	4.383	3.9821	0.3904	-3.9821	0.7024
40	Malpaso, Tecpatan	86.9%	1.6293	1.0886	0.085	0.9465	0.8516

En el análisis anterior se puede observar que en el 75 % de los casos, la base de datos CRU TS 3.0 reproduce los datos de las estaciones climatológicas convencionales, así la propuesta de utilizar los datos de reanálisis, para el análisis de las series temporales de información fortalece la opción de utilizar los datos de reanálisis sobre los datos observados. Al ser la CRU TS 3.0 una base que cuenta con gran cantidad de información y también ser una base homogénea que comienza en 1901 con datos mes a mes hasta el 2006, además de tener una alta resolución, constituye una base ideal para regionalizar ya que el relieve del estado es complejo se necesita de la mayor información posible para tener una buena descripción climática.

Los análisis estadísticos previos sobre las regresiones llegan a mostrar en algunas estaciones que la base de datos subestima o sobrestima a los datos observados, lo cual

se podría compensar realizando un ajuste sobre la serie. Este procedimiento no fue elaborado debido a que si modificamos la serie de la base de datos CRU TS 3.0 para aproximar a la serie de los datos observados, surgen algunas situaciones:

En el caso de datos faltantes se sabe que una aproximación sobre datos interpolados puede llegar a ser aceptable, pero ¿Qué sucede en aquellas regiones sobre las que se tendría que extrapolar por falta de registros? particularmente se realizaría un pronóstico que se tendría que evaluar sobre alguna base o por métodos estadísticos sofisticados, lo que lleva un análisis más profundo sobre las series analizadas.

Otro caso surge cuando se introduce una modificación a las series incorporando una nueva forma a la serie temporal, que podría enmascarar la señal que principalmente se pretende analizar en esta investigación, enfocada al estudio de tendencias de temperatura. Así, al introducir otra serie en el modelo de regresión planteado, se daría el enmascaramiento citado. Ésta es la principal causa por la que se descarta una modificación a la serie de datos CRU TS 3.0.

Con esto se justifica la elección del uso de datos de reanálisis en lugar de las observaciones, las cuales se mostró que en algunos casos tienen datos registrados de mala calidad. Una vez aceptada la base CRU TS 3.0 se prosigue con la metodología planteada para la revisión de tendencias en las series de temperatura.

4.2 Análisis de tendencias

En esta sección se presentan mapas de los diferentes coeficientes obtenidos con la metodología explicada en el capítulo 3. Aquellos cuadros de malla en los que existen coeficientes que indican tendencias significativas (al 95% de confianza) fueron representados en mapas, así como también el periodo representativo para el coeficiente. Se plantea el uso de dos mapas en cada análisis realizado para mostrar la existencia de cambio estructural (CE) en las series de datos de temperatura mínima y máxima. En las figuras cada cuadro de malla muestra el periodo en que las tendencias son significativas. También se anexan tablas (4.2-4.9), donde señalan año con cambio estructural, coeficientes de tendencias calculados, periodo y los errores de cada coeficiente considerando la *prueba t* para evaluar su significancia al 5% y solo se presentan aquellos cuadros de malla con coeficientes de tendencia significativos.

4.2.1 Mapas de tendencia de temperatura mínima

Primavera.

La figura 4.10 representa los cuadros de malla con tendencias significativas y en la tabla 4.2 se muestra los datos; la primera columna muestra la zona, la segunda columna el cuadro de malla de referencia, la tercera columna la estación con la que fue validado el cuadro de malla, cuarta columna el indicador si hay cambio estructural en la serie (CE), quinta y sexta el periodo y coeficiente antes del cambio estructural, séptima y octava el periodo y coeficiente después del cambio estructural y también en el caso de no haber cambio.

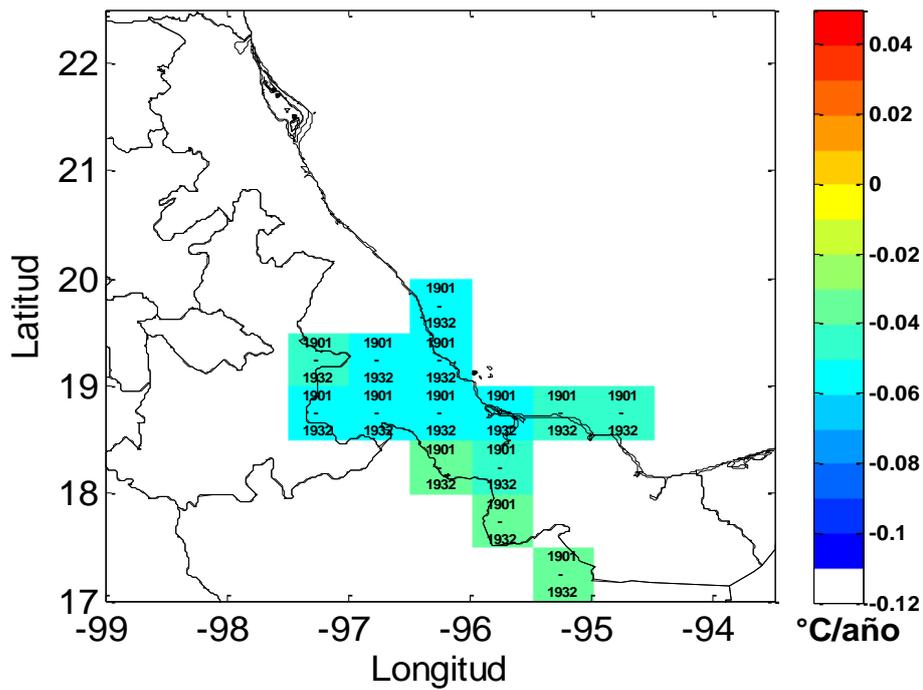


Figura 4.10a. Coeficientes de tendencias de temperatura mínima significativos (al 95% de confianza) en primavera, primer periodo antes del CE, los números dentro de los cuadros de la malla muestran el periodo en que son significativas las tendencias.

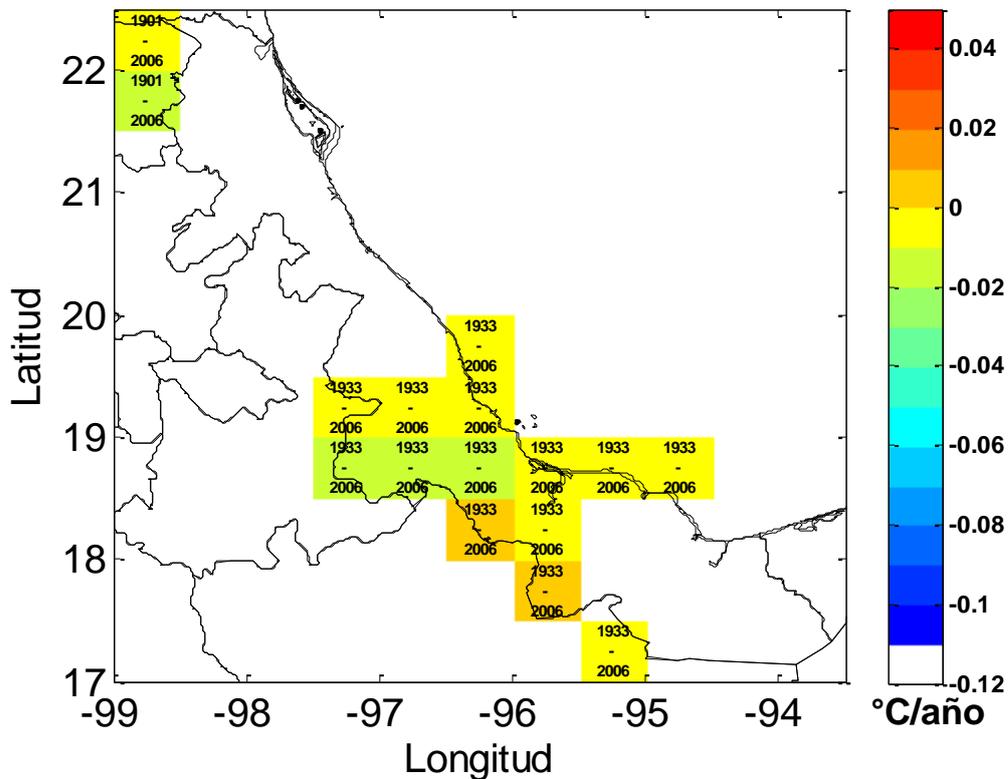


Figura 4.10b. Coeficientes de tendencias de temperatura mínima significativos (al 95% de confianza) en primavera, segundo periodo después del CE, los números dentro de los cuadros de la malla muestran el periodo en que son significativas las tendencias.

Zona 1. Se tienen tendencias negativas en los cuadros 1 y 4 en el periodo 1901-2006, con un enfriamiento alrededor de $-0.1^{\circ}\text{C}/\text{década}$, para acumular un total de -1.05°C .

Zona 2. Se encuentra un CE en el año de 1933 que muestra una tendencia de enfriamiento alrededor de $-0.5^{\circ}\text{C}/\text{década}$ en los cuadros de malla del 17 al 23, posteriormente del 17 al 20 disminuye el enfriamiento alrededor de $-0.05^{\circ}\text{C}/\text{década}$, así, después del CE la temperatura ha disminuido -0.35°C . Para los cuadros de malla del 21 al 23 el coeficiente disminuye a $-0.16^{\circ}\text{C}/\text{década}$ para acumular -1.16°C .

Zona 3. Existe un CE en 1933, antes del cambio el coeficiente de tendencia tiene un valor cercano a $-0.4^{\circ}\text{C}/\text{década}$ y para el periodo posterior a el cambio los cuadros de malla 24, 25, 26, 28 y 37 tienen un coeficiente negativo de $-0.05^{\circ}\text{C}/\text{década}$, así la temperatura ha disminuido cerca de 0.35°C en el periodo posterior al CE, en el cuadro 32 el coeficiente se incrementa disminuyendo la tendencia a $0.005^{\circ}\text{C}/\text{década}$ de forma que acumula 0.036°C y el cambio más destacable es el cuadro 27 encontrado al sur de la zona 2 se incrementa a una tendencia positiva de $0.06^{\circ}\text{C}/\text{década}$ logrando así acumular cerca de 0.45°C en el periodo.

Tabla 4.2. Coeficientes de tendencias significativas de temperatura mínima en la primavera

ZONA	CUADRO DE MALLA	ESTACIÓN	CE	PERIODO	COEFICIENTE ($^{\circ}\text{C}/\text{Año}$)	ERROR ($^{\circ}\text{C}/\text{Año}$)	PERIODO	COEFICIENTE ($^{\circ}\text{C}/\text{Año}$)	ERROR ($^{\circ}\text{C}/\text{Año}$)
1	1	EL COCO	NO	-	-		1901-2006	-0.0093	0.0044
	4	LA GLORIA	NO	-	-		1901-2006	-0.0108	0.0046
2	17	MOZOMBOA	SI	1901-1932	-0.0534	0.0156	1933-2006	-0.0057	0.0033
	18	TOTUTLA	SI	1901-1932	-0.0492	0.012	1933-2006	-0.0049	0.0025
	19	JALCOMULCO	SI	1901-1932	-0.0500	0.013	1933-2006	-0.005	0.0028
	20	PASO OVEJAS	SI	1901-1932	-0.0543	0.015	1933-2006	-0.0053	0.0032
	21	ACULTZINGO	SI	1901-1932	-0.0546	0.0115	1933-2006	-0.0172	0.0049
	22	NARANJAL	SI	1901-1932	-0.0552	0.0122	1933-2006	-0.0164	0.0052
	23	LAS VIGAS	SI	1901-1932	-0.0561	0.0136	1933-2006	-0.0156	0.0057
3	24	ALVARADO	SI	1901-1932	-0.0525	0.0148	1933-2006	-0.0055	0.0031
	25	ANGEL CABADA	SI	1901-1932	-0.0459	0.0139	1933-2006	-0.0041	0.0029
	26	CATEMACO	SI	1901-1932	-0.0444	0.0133	1933-2006	-0.0047	0.0028
	27	COSAMALOAPAN	SI	1901-1932	-0.0371	0.0113	1933-2006	0.0061	0.0024
	28	VILLA JOSE AZUETA	SI	1901-1932	-0.0473	0.0127	1933-2006	-0.0062	0.0027
	32	PLAYA VICENTE	SI	1901-1932	-0.0318	0.012	1933-2006	0.0005	0.0002
	37	ITSMENA	SI	1901-1932	-0.0384	0.0119	1933-2006	-0.0067	0.0025

Verano.

Zona 1. Sólo es significativo el cuadro 11 que muestra un CE de la serie pero sobre el valor medio (α_1 del modelo de especificación obtenido, ec. 3.7) en 1970; tiene la misma tendencia tanto antes como después del CE de $0.08^\circ\text{C}/\text{década}$.

Zona 2. Los cuadros de malla 21, 22 muestran tener un CE sobre el valor medio (α_1) en el año de 1954, donde el coeficiente es negativo $-0.13^\circ\text{C}/\text{década}$. En el caso del cuadro de malla 17 se muestra en cambio en la tendencia en el año de 1939 por un CE, con un coeficiente antes de $-0.24^\circ\text{C}/\text{década}$ para después ser de $-0.04^\circ\text{C}/\text{década}$.

Zona 3. Los cuadros de malla 27, 30, 33 y 34 no muestran CE, los cuales tienen tendencia negativa alrededor de $-0.04^\circ\text{C}/\text{década}$ logrando un enfriamiento en el periodo de -0.42°C . En el caso de los cuadros 28, 29 y 37 coinciden con un cambio estructural en 1936, donde el coeficiente de estos oscila entre $-0.28^\circ\text{C}/\text{década}$ a $-0.41^\circ\text{C}/\text{década}$ antes del CE y posteriormente tienen un valor cercano a $-0.1^\circ\text{C}/\text{década}$ por lo que disminuye el enfriamiento. Para el caso de los puntos 36, 39 y 40 tienen tendencias significativas que son positivas y con CE, los cuadros 36 y 39 muestran CE (1946 y 1950) sobre la media y el coeficiente es alrededor de $0.01^\circ\text{C}/\text{década}$, y en el cuadro de malla 40 el CE es en 1946 con un coeficiente antes del cambio de $0.18^\circ\text{C}/\text{década}$ y posteriormente al cambio el coeficiente de la tendencia disminuyó a $0.02^\circ\text{C}/\text{década}$.

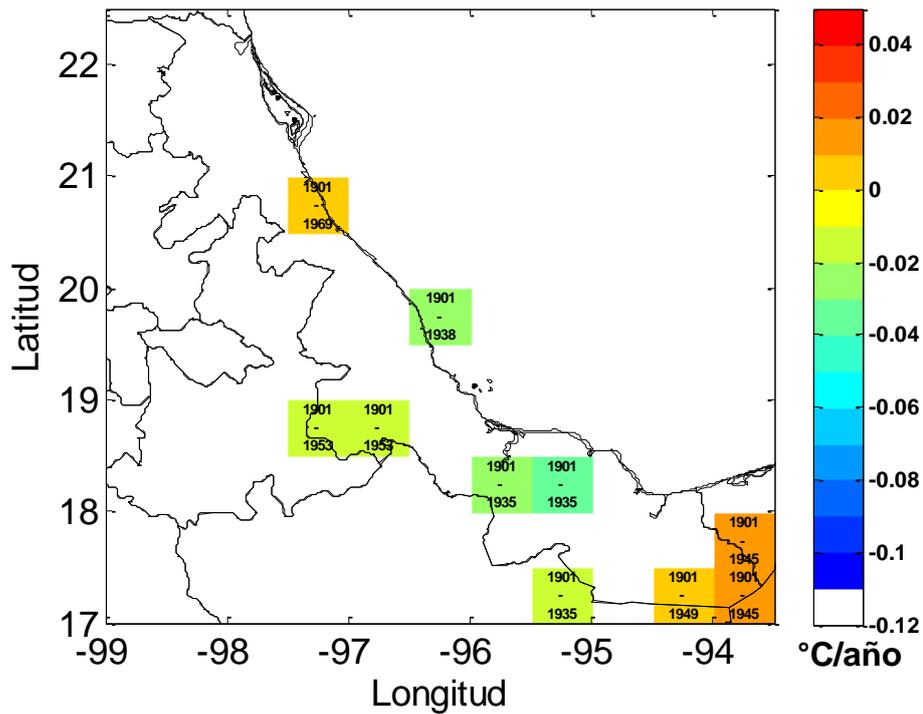


Figura 4.11a. Coeficientes de tendencias de temperatura mínima significativos (al 95% de confianza) de verano, primer periodo antes del CE, los números dentro de los cuadros de la malla muestran el periodo en que son significativas las tendencias.

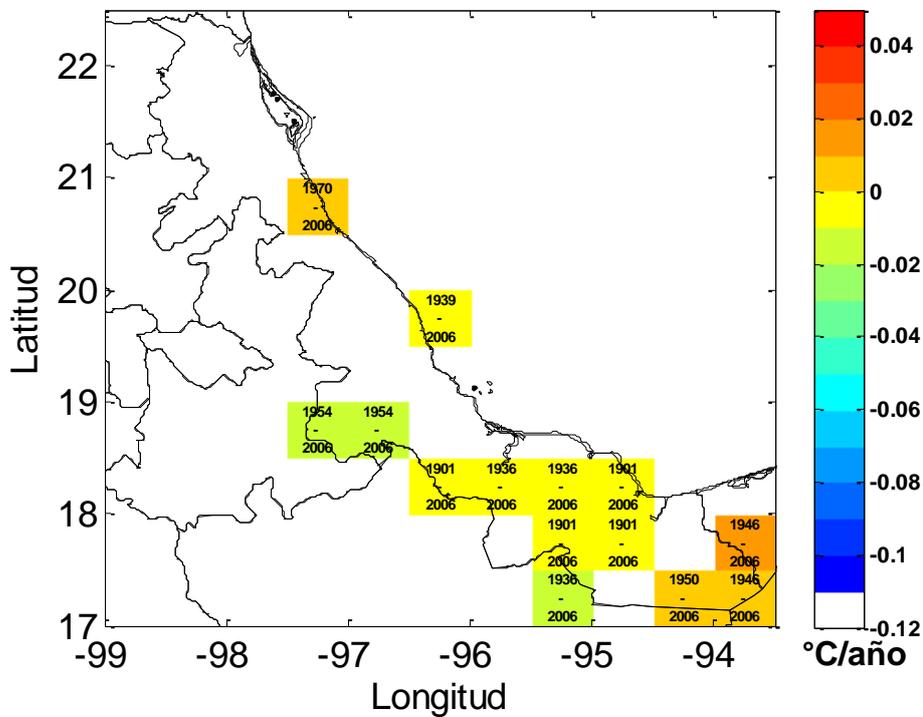


Figura 4.11b. Coeficientes de tendencias de temperatura mínima significativos (al 95% de confianza) de verano, segundo periodo después del CE, los números dentro de los cuadros de la malla muestran el periodo en que son significativas las tendencias.

Tabla 4.3 Coeficientes de tendencias significativas de temperatura mínima en el verano.

ZONA	CUADRO DE MALLA	ESTACIÓN	CE	PERIODO	COEFICIENTE (°C/Año)	ERROR (°C/Año)	PERIODO	COEFICIENTE (°C/Año)	ERROR (°C/Año)
1	11	POZA RICA	SI	1901-1969	0.0081	0.0029	1970-2006	0.0081	0.0029
2	17	MOZOMBOA	SI	1901-1938	-0.0239	0.0073	1939-2006	-0.0041	0.0015
	21	ACULTZINGO	SI	1901-1953	-0.014	0.0044	1954-2006	-0.014	0.0044
	22	NARANJAL	SI	1901-1953	-0.0121	0.0034	1954-2006	-0.0121	0.0034
3	27	COSAMALOAPAN	NO	-	-		1901-2006	-0.0036	0.0017
	28	VILLA JOSE AZUETA	SI	1901-1935	-0.0284	0.0073	1936-2006	-0.0078	0.006
	29	CUATOTOLAPAN	SI	1901-1935	-0.037	0.0103	1936-2006	-0.0098	0.0084
	30	HUAZUNTLAN	NO	-	-		1901-2006	-0.0037	
	33	BELLACO SAN JUAN	NO	-	-		1901-2006	-0.0049	0.0024
	34	ACAYUCAN	NO	-	-		1901-2006	-0.0048	0.0022
	36	MOSQUITERO	SI	1901-1945	0.0101	0.0042	1946-2006	0.0101	0.0042
	37	ITSMEÑA	SI	1901-1935	-0.0415	0.0145	1936-2006	-0.0098	0.003
	39	LA LAGUNA	SI	1901-1949	0.0074	0.0031	1950-2006	0.0074	0.0031
40	MALPASO	SI	1901-1945	0.0188	0.0065	1946-2006	0.002	0.0012	

Otoño.

En esta estación del año se encontraron tendencias significativas sobre todo el periodo de 1901 al 2006, en las tres zonas se tienen estos casos pero con una mayor concentración en la zona 3, que existe un enfriamiento. También se muestran cambios estructurales que se localizan en la región norte y sur.

La estación de otoño se encuentra representada en la figura 4.12 y la tabla 4.4.

Zona 1. Los cuadros 1 y 4 muestran un CE en el año de 1926 con un coeficiente antes de $-1^{\circ}\text{C}/\text{década}$ y posteriormente con un valor cercano a $-0.2^{\circ}\text{C}/\text{década}$ para acumular un enfriamiento de -1.6°C , el cuadro 9 muestra tendencia positiva además de tener un CE en 1950, antes del CE tiene un coeficiente de $0.38^{\circ}\text{C}/\text{década}$ y posterior al cambio de $0.08^{\circ}\text{C}/\text{década}$ por lo que se ha incrementado en el periodo de 1950 al 2006 cerca de 0.45°C y el cuadro 13 existe enfriamiento de $-0.063^{\circ}\text{C}/\text{década}$ por lo que ha disminuido la temperatura al final del periodo cerca de -0.67°C .

Zona 2. El cuadro de malla 16 no existe evidencia estadística de CE, el cuadro muestra una tendencia negativa de $-0.06^{\circ}\text{C}/\text{década}$ acumulando cerca de -0.64°C .

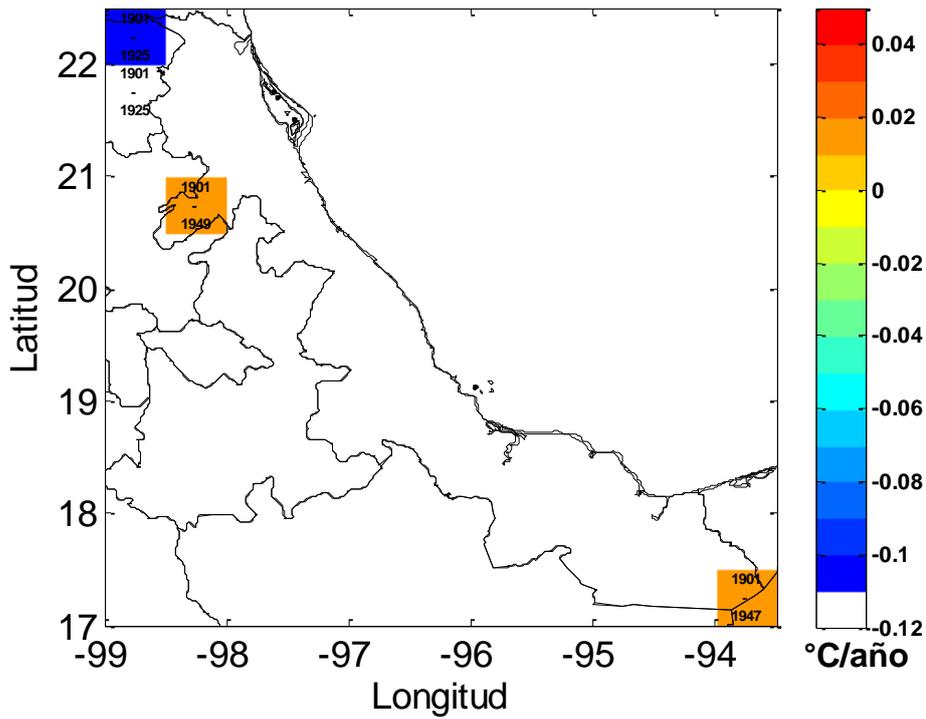


Figura 4.12a. Coeficientes de tendencias de temperatura mínima significativos (al 95% de confianza) de otoño, primer periodo antes del CE, los números dentro de los cuadros de la malla muestran el periodo en que son significativas las tendencias.

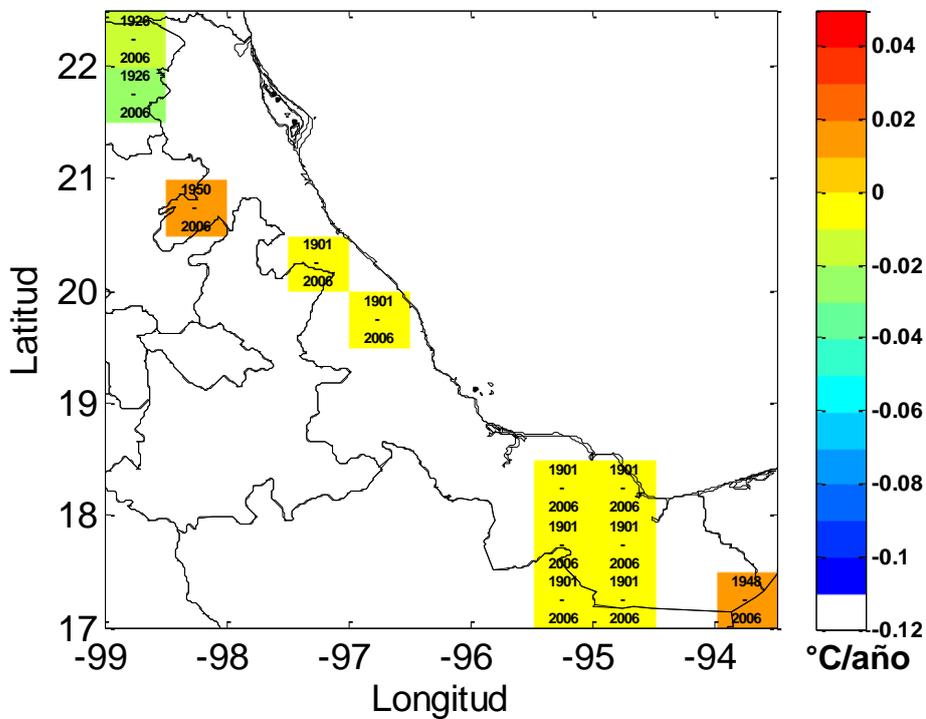


Figura 4.12b. Coeficientes de tendencias de temperatura mínima significativos (al 95% de confianza) de otoño, segundo periodo después del CE, los números dentro de los cuadros de la malla muestran el periodo en que son significativas las tendencias.

Zona 3. Los cuadros de malla 29, 30, 33, 34, 37 y 38 tienen tendencias negativas significativas con un valor cercano a $-0.05^{\circ}\text{C}/\text{década}$ acumulando para estos cuadros alrededor de 0.5°C . En el cuadro 40 hay CE que no modifica a la tendencia sino al valor medio, la tendencia es positiva cerca de $0.108^{\circ}\text{C}/\text{década}$ acumulando de 1948 al 2006 0.62°C .

Tabla 4.4 Coeficientes de tendencias significativas de temperatura mínima en el otoño.

ZONA	CUADRO DE MALLA	ESTACIÓN	CE	PERIODO	COEFICIENTE ($^{\circ}\text{C}/\text{Año}$)	ERROR ($^{\circ}\text{C}/\text{Año}$)	PERIODO	COEFICIENTE ($^{\circ}\text{C}/\text{Año}$)	ERROR ($^{\circ}\text{C}/\text{Año}$)
1	1	EL COCO	SI	1901-1925	-0.1063	0.0247	1926-2006	-0.0179	0.0108
	4	LA GLORIA	SI	1901-1925	-0.1169	0.0243	1926-2006	-0.0212	0.0211
	9	IXHUATLAN DEL CAFÉ	SI	1901-1949	0.0384	0.0118	1950-2006	0.008	0.0042
	13	JOLOAPAN	SI	-	-		1901-2006	-0.0063	0.0028
2	16	LAS ANIMAS	NO	-	-		1901-2006	-0.006	0.003
3	29	CUATOTOLAPAN	NO	-	-		1901-2006	-0.0057	0.0019
	30	HUAZUNTLAN	NO	-	-		1901-2006	-0.0044	0.0021
	33	BELLACO SAN JUAN	NO	-	-		1901-2006	-0.005	0.0018
	34	ACAYUCAN	NO	-	-		1901-2006	-0.0051	0.0024
	37	ITSMEÑA	NO	-	-		1901-2006	-0.0049	0.0017
	38	CEDILLO	NO	-	-		1901-2006	-0.0047	0.0017
	40	MALPASO	SI	1901-1947	0.0108	0.0043	1948-2006	0.0108	0.0043

Invierno.

La figura 4.13 y tabla 4.5 presentan los datos y distribución de las tendencias significativas encontradas en la estación de invierno.

Zona 1. Los cuadros de malla 5, 7 y 9 tienen un CE a partir del año 1953, el CE es sobre el valor de la constante, el coeficiente de la tendencia encontrado es aproximado de $0.22^{\circ}\text{C}/\text{década}$ acumulando en el periodo de 1953 al 2006 cerca de 1.16°C .

Zona 2. Los cuadros 17 y 19 al 23 tienen tendencias negativas y no presentan CE con los coeficientes alrededor de $-0.07^{\circ}\text{C}/\text{década}$, por lo que la zona ha pasado por un enfriamiento en el periodo de -0.73°C .

Zona 3. Toda la zona muestra tendencia significativa en el caso de los cuadros 36 y 40 tienen un CE en el año de 1944 con un valor antes alrededor de $0.28^{\circ}\text{C}/\text{década}$, después del cambio la tendencia se modificó pero se mantiene positiva con valores cercanos a $0.1^{\circ}\text{C}/\text{década}$, por lo que partir de 1944 al 2006 se ha incrementado en 0.62°C . En los cuadros del 24 al 35 y del 37 al 39, tienen tendencia negativa promedio de $-0.075^{\circ}\text{C}/\text{década}$ por lo que se ha enfriado alrededor de -0.8°C .

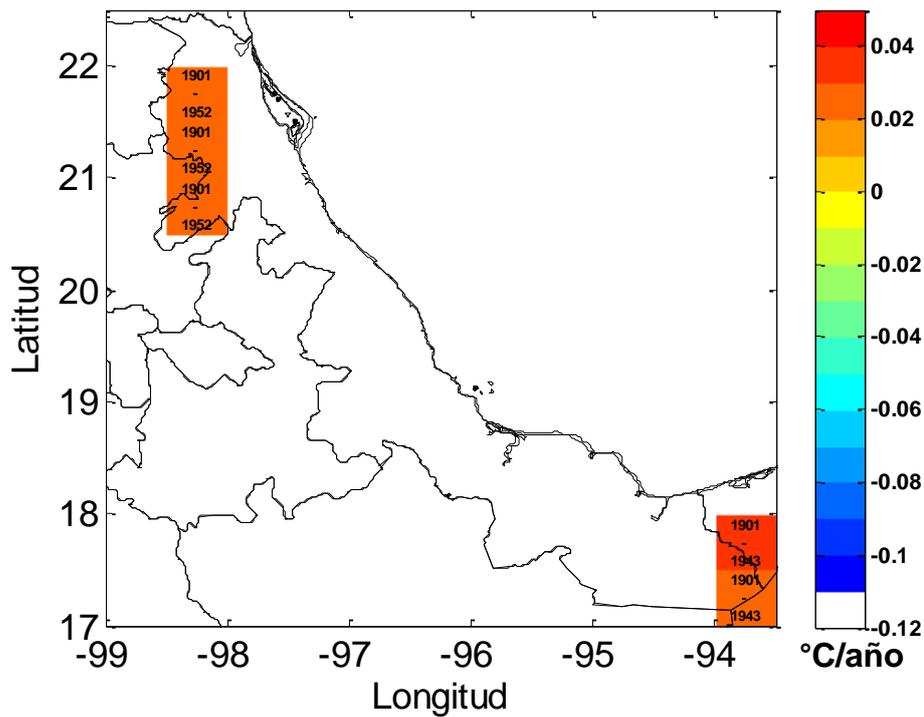


Figura 4.13a. Coeficientes de tendencias significativas de temperatura mínima significativos (al 95% de confianza) de invierno, primer periodo antes del CE, los números dentro de los cuadros de la malla muestran el periodo en que son significativas las tendencias.

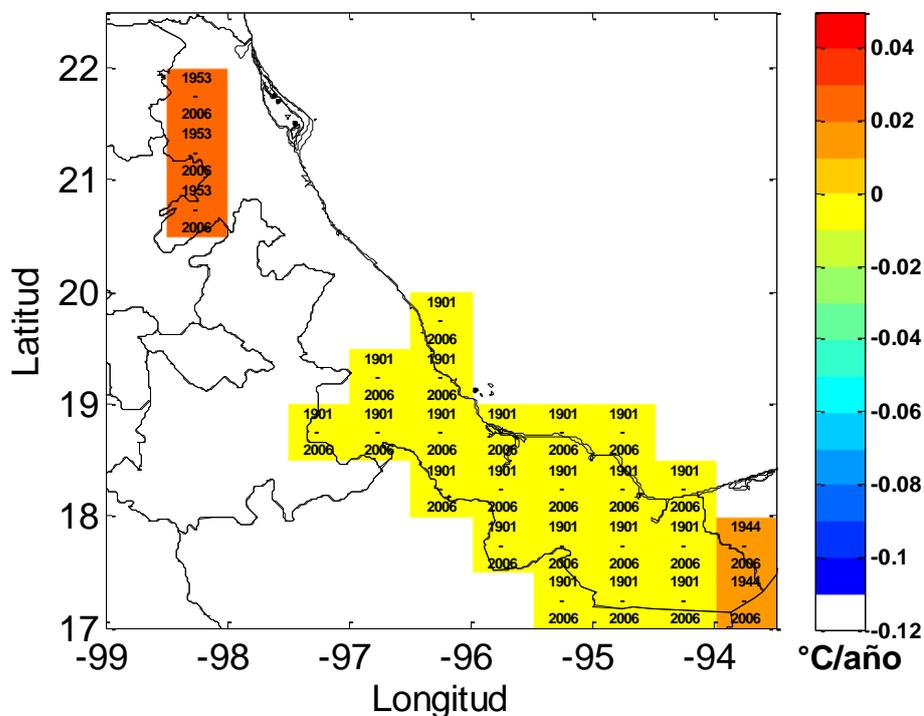


Figura 4.13b. Coeficientes de tendencias de temperatura mínima significativos (al 95% de confianza) de invierno, segundo periodo después del CE, los números dentro de los cuadros de la malla muestran el periodo en que son significativas las tendencias.

En el invierno se tiene, para la región centro y sur del Estado, tendencias significativas sin cambio estructural donde se presentan enfriamientos. En la zona 1 se muestran cambios estructurales sobre el valor medio, en la década de los cincuentas, y dichas tendencias son positivas. Otros cambios estructurales se encuentran en la zona 3, hallados en el año de 1944, donde las tendencias antes de este año eran positivas y acentuadas, para después decrecer.

Tabla 4.5 Coeficientes de tendencias significativas de temperatura mínima en el invierno.

ZONA	CUADRO DE MALLA	ESTACIÓN	CE	PERIODO	COEFICIENTE (°C/Año)	ERROR (°C/Año)	PERIODO	COEFICIENTE (°C/Año)	ERROR (°C/Año)
1	5	EL FISCAL	SI	1901-1952	0.0224	0.0093	1953-2006	0.0224	0.0093
	7	TANTOYUCA	SI	1901-1952	0.022	0.0089	1953-2006	0.022	0.0089
	9	IXHUATLAN DEL CAFÉ	SI	1901-1952	0.0228	0.0088	1953-2006	0.0228	0.0088
2	17	MOZOMBOA	NO	-	-		1901-2006	-0.0074	0.0032
	19	JALCOMULCO	NO	-	-		1901-2006	-0.0068	0.0030
	20	PASO OVEJAS	NO	-	-		1901-2006	-0.007	0.0031
	21	ACULTZINGO	NO	-	-		1901-2006	-0.0066	0.0028
	22	NARANJAL	NO	-	-		1901-2006	-0.007	0.0030
3	23	LAS VIGAS	NO	-	-		1901-2006	-0.0072	0.0030
	24	ALVARADO	NO	-	-		1901-2006	-0.0084	0.0029
	25	ANGEL CABADA	NO	-	-		1901-2006	-0.0074	0.0030
	26	CATEMACO	NO	-	-		1901-2006	-0.0075	0.0028
	27	COSAMALOAPAN	NO	-	-		1901-2006	-0.0078	0.0030
	28	VILLA JOSE AZUETA	NO	-	-		1901-2006	-0.0088	0.0029
	29	CUATOTOLAPAN	NO	-	-		1901-2006	-0.0095	0.0029
	30	HUAZUNTLAN	NO	-	-		1901-2006	-0.0082	0.0029
	31	NANCHITAL	NO	-	-		1901-2006	-0.0073	0.0030
	32	PLAYA VICENTE	NO	-	-		1901-2006	-0.0072	0.0028
	33	BELLACO SAN JUAN	NO	-	-		1901-2006	-0.008	0.0029
	34	ACAYUCAN	NO	-	-		1901-2006	-0.0075	0.0029
	35	TECUANAPA	NO	-	-		1901-2006	-0.0067	0.0029
	36	MOSQUITERO	SI	1901-1943	0.0304	0.0105	1944-2006	0.0122	0.0100
	37	ITSMEÑA	NO	-	-		1901-2006	-0.0071	0.0028
38	CEDILLO	NO	-	-		1901-2006	-0.0061	0.0027	
39	LA LAGUNA	NO	-	-		1901-2006	-0.0056	0.0025	
40	MALPASO	SI	1901-1943	0.0266	0.0096	1944-2006	0.0111	0.0092	

En la primavera la mayoría de los coeficientes son negativos, predominando en las zonas 2 y 3. En el verano, algunas regiones de las zonas 1 y 3 muestran coeficientes positivos, en la zona 2 y en regiones de la 3 se tienen coeficientes negativos, predominando estos en el verano. En otoño, para un cuadro de malla tanto en la zona 1 como en la zona 3 se encuentran coeficientes de tendencias de temperatura

positivas, pero también en la zona 1, 2 y 3 se presentan casos de coeficientes de temperatura negativos, siendo de estos 3 cuadros de malla en la zona 1, 1 cuadro en la zona 2 y 4 cuadros de malla en la zona 3. En el invierno en la zona 1 y 3 se muestran coeficientes positivos y con CE, para la zona 2 y 3 existen coeficientes de tendencias negativas que resultaron así para todo el periodo analizado de 1901 al 2006, siendo entonces éstas las que predominan.

En general, se puede decir que la temperatura mínima está disminuyendo con mayor grado sobre las zonas 2 y 3 (centro y sur del estado de Veracruz), lo que se observa mejor en la primavera e invierno. En las estaciones de otoño y verano se observa que la temperatura mínima tiende a disminuir, pero esas tendencias se han amortiguado a partir de mediados de siglo (visto en los CE). Cabe destacar que en verano, otoño e invierno en las zonas 1 y 3 aparece un grupo pequeño de cuadros de malla que mantienen tendencias positivas, en la zona 1 los cuadros de malla no muestran agruparse en alguna región en particular, mientras que en la zona 3 tienden a ser más destacables los cuadros de malla encontrados al sureste de la zona.

4.2.2 Mapas de tendencia de temperatura máxima

Primavera.

Zona 1. El cuadro 13 muestra CE en 1934, donde antes del cambio se tiene un coeficiente de $0.69^{\circ}\text{C}/\text{década}$ y después se tiene una disminución del coeficiente con $0.14^{\circ}\text{C}/\text{década}$, así existe un calentamiento de cerca de 1°C .

Zona 2. Los cuadros de malla 15, 16, 21, 22 y 23 muestran tener evidencia de CE sobre el año de 1934, donde los valores estimados antes del cambio estructural se encuentran en promedio de $0.68^{\circ}\text{C}/\text{década}$ y después del cambio el coeficiente es alrededor de $0.14^{\circ}\text{C}/\text{década}$ teniendo un calentamiento de cerca de 1°C en el periodo de 1934 al 2006.

Zona 3. En este caso se tienen dos situaciones diferentes, la primera corresponde a los cuadros 25, 27, 29, 30, 32, 33, 37 y 38, que tienen CE en 1934 y su tendencia antes del cambio es positiva, siendo en promedio de $0.59^{\circ}\text{C}/\text{década}$, después del cambio el coeficiente de tendencia disminuye a ser promedio $0.1^{\circ}\text{C}/\text{década}$, mostrando un incremento de temperatura de 0.8°C , la segunda situación que ocurre es con otro CE en el año de 1963 para los cuadros 34, 35, 39 y 40, estos cuadros sólo muestran tener

tendencia significativa después del CE que es alrededor de $0.16^{\circ}\text{C}/\text{década}$ existiendo un calentamiento cerca de 1.16°C .

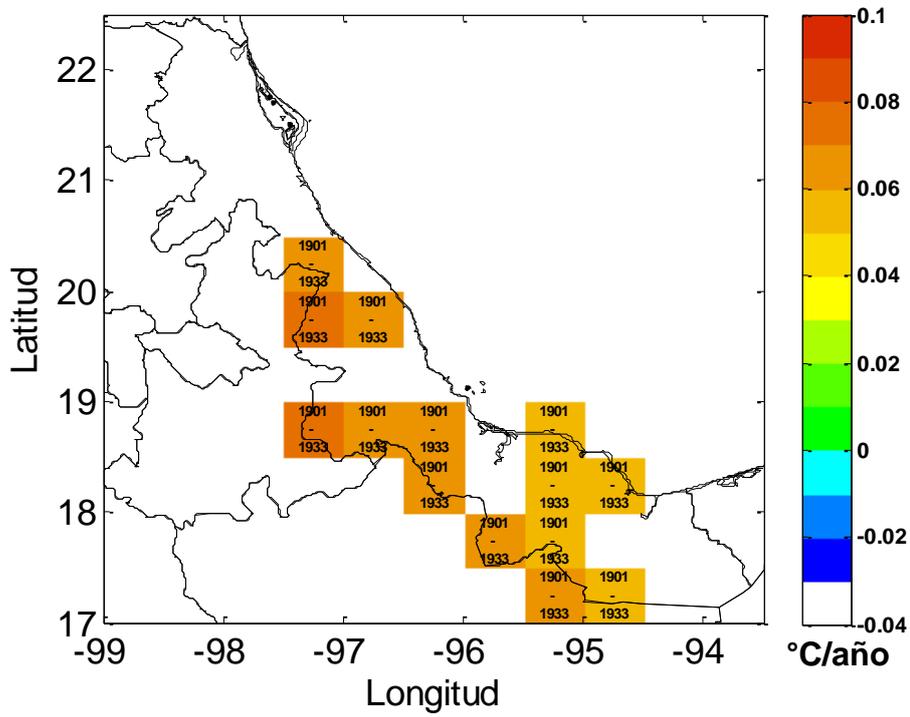


Figura 4.14a. Coeficientes de tendencias de temperatura máxima significativos (al 95% de confianza) de primavera, primer periodo antes del CE, los números dentro de los cuadros de la malla muestran el periodo en que son significativas las tendencias.

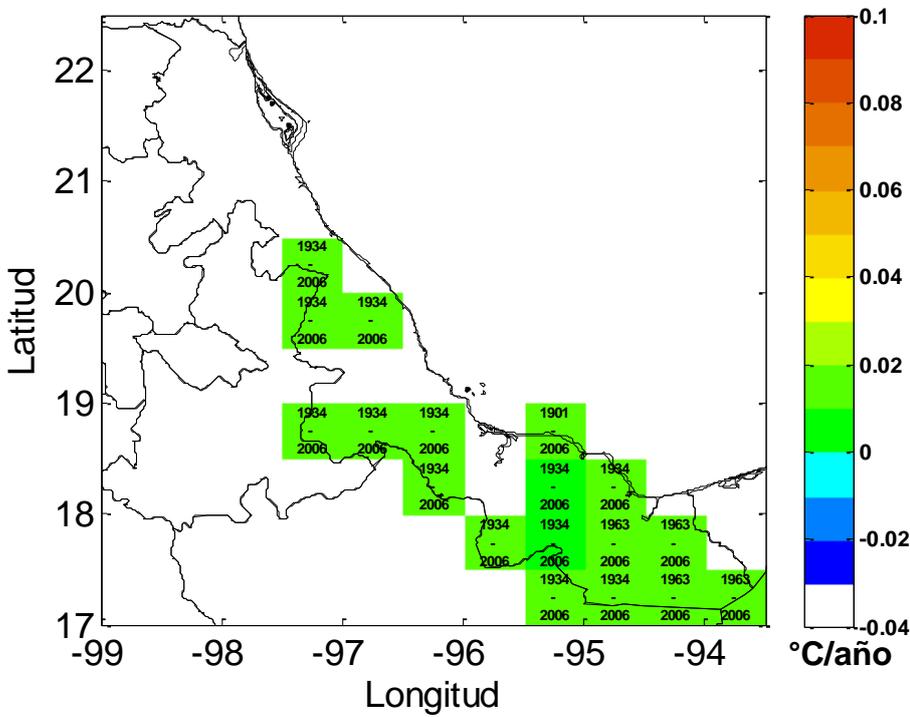


Figura 4.14b. Coeficientes de tendencias de temperatura máxima significativos (al 95% de confianza) en la primavera, segundo periodo después del CE, los números dentro de los cuadros de la malla muestran el periodo en que son significativas las tendencias.

Tabla 4.6. Coeficientes de tendencias significativas de temperatura máxima en la primavera

ZONA	CUADRO DE MALLA	ESTACIÓN	CE	PERIODO	COEFICIENTE (°C/Año)	ERROR (°C/Año)	PERIODO	COEFICIENTE (°C/Año)	ERROR (°C/Año)
1	13	JOLOAPAN	SI	1901-1933	0.0693	0.0157	1934-2006	0.0137	0.0131
	15	ATZALAN	SI	1901-1933	0.0704	0.0186	1934-2006	0.0141	0.0039
2	16	LAS ANIMAS	SI	1901-1933	0.0662	0.0173	1934-2006	0.0134	0.0036
	21	ACULTZINGO	SI	1901-1933	0.071	0.0196	1934-2006	0.015	0.0041
	22	NARANJAL	SI	1901-1933	0.0675	0.0181	1934-2006	0.0142	0.0038
	23	LAS VIGAS	SI	1901-1933	0.0654	0.0163	1934-2006	0.0143	0.0137
	25	ANGEL CABADA	SI	1901-1933	0.056	0.016	1934-2006	0.0124	0.0034
3	27	COSAMALOAPAN	SI	1901-1933	0.0626	0.0169	1934-2006	0.0128	0.0035
	29	CUATOTOLAPAN	SI	1901-1933	0.0573	0.0169	1934-2006	0.0094	0.0035
	30	HUAZUNTLAN	SI	1901-1933	0.0534	0.0152	1934-2006	0.0102	0.0032
	32	PLAYA VICENTE	SI	1901-1933	0.0617	0.0169	1934-2006	0.0116	0.0035
	33	BELLACO SAN JUAN	SI	1901-1933	0.0596	0.0173	1934-2006	0.0099	0.0036
	34	ACAYUCAN	SI	-	-	-	1963-2006	0.02	0.0043
	35	TECUANAPA	SI	-	-	-	1963-2006	0.0167	0.0036
	37	ITSMEÑA	SI	1901-1933	0.0628	0.0164	1934-2006	0.0111	0.0034
	38	CEDILLO	SI	1901-1933	0.0585	0.0162	1934-2006	0.0107	0.0034
	39	LA LAGUNA	SI	-	-	-	1963-2006	0.0111	0.0067
	40	MALPASO	SI	-	-	-	1963-2006	0.0158	0.0035

Verano.

Zona 1. Los cuadros de malla 1 y 4 mostraron una mayor razón de calentamiento de $0.37^{\circ}\text{C}/\text{década}$ y contienen un CE en 1951 que es sobre el valor α_0 , de 1951 al 2006 la temperatura se incrementó alrededor de 2.11°C . Los cuadros del 11 al 14 tienen una menor tendencia siendo aún positiva y con un CE en el mismo año de 1951 también sobre el valor medio. Con un coeficiente promedio de $0.21^{\circ}\text{C}/\text{década}$, obteniendo al final del periodo un calentamiento promedio de 1.2°C . En los cuadros 2, 3, 6 y 8 se tienen una razón de calentamiento cercana a $0.09^{\circ}\text{C}/\text{década}$ lo que lleva a que alrededor del siglo de datos se ha incrementado la temperatura cerca de 1°C .

Zona 2. En esta zona también se encuentra CE en 1951 sólo para el valor de la constante α_0 , los cuadros de malla del 15 al 20 y el 23 con coeficientes positivos de tendencia en promedio de $0.21^{\circ}\text{C}/\text{década}$, sumando para el periodo de 1951 al 2006 obteniendo un incremento cercano a 1.2°C . Los cuadros que no presentan CE son el 21 y 22 tienen tendencia positiva sobre todo el periodo con una razón de calentamiento alrededor de $0.06^{\circ}\text{C}/\text{década}$ teniendo un aumento de la temperatura de 0.64°C .

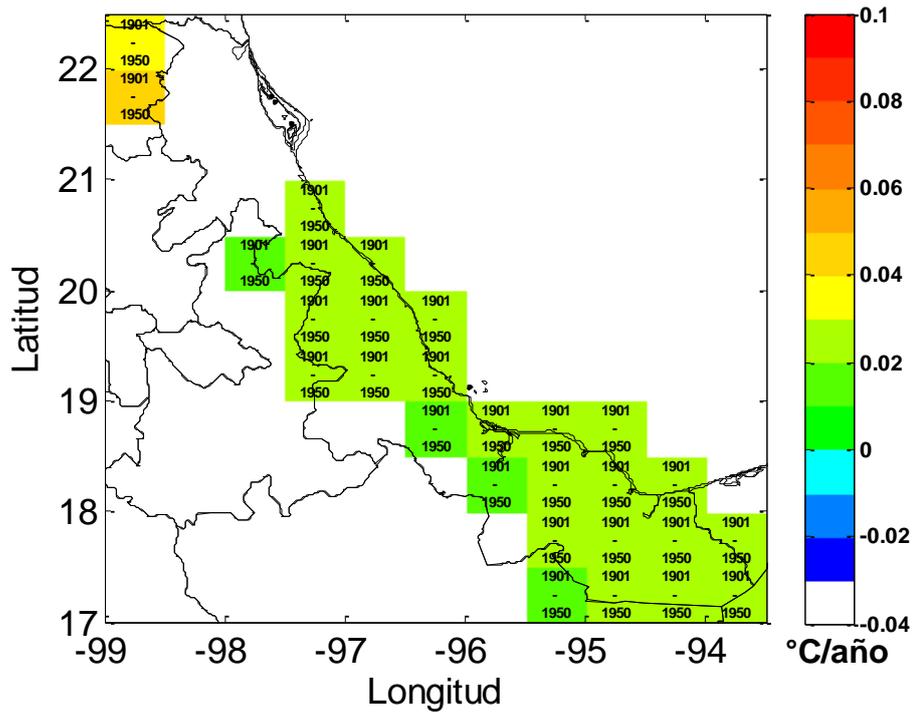


Figura 4.15a. Coeficientes de tendencias de temperatura máxima significativos (al 95% de confianza) en verano, primer periodo antes del CE, los números dentro de los cuadros de la malla muestran el periodo en que son significativas las tendencias.

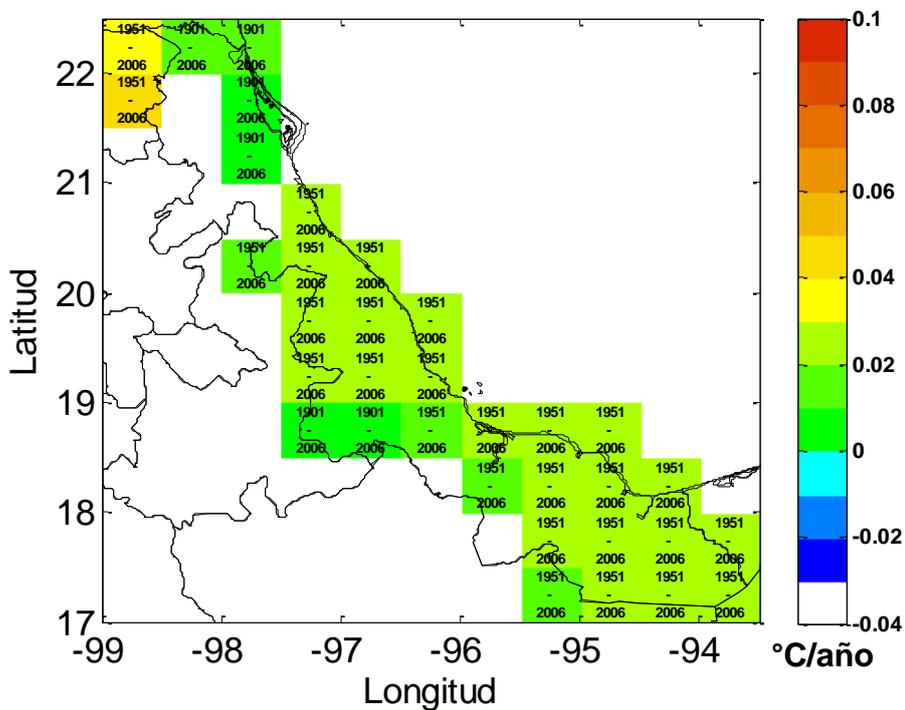


Figura 4.15b. Coeficientes de tendencias de temperatura máxima significativos (al 95% de confianza) en verano, segundo periodo después del CE, los números dentro de los cuadros de la malla muestran el periodo en que son significativas las tendencias.

Zona 3. La mayoría de los cuadros de malla de la zona se encuentran con tendencia significativa, exceptuando los cuadros 27 y 32. Así la zona contiene un CE en el año de 1951 sobre el valor medio; en promedio la tendencia de la zona es 0.22°C/década, por lo que existe un calentamiento alrededor de 1.25°C para el periodo de 1951-2006.

Tabla 4.7 Coeficientes de tendencias significativas de temperatura máxima en el verano.

ZONA	CUADRO DE MALLA	ESTACIÓN	CE	PERIODO	COEFICIENTE (°C/Año)	ERROR (°C/Año)	PERIODO	COEFICIENTE (°C/Año)	ERROR (°C/Año)	
1	1	EL COCO	SI	1901-1950	0.034	0.0100	1951-2006	0.034	0.0100	
	2	EBANO	NO	-	-		1901-2006	0.0108	0.0044	
	3	TAMPICO	NO	-	-		1901-2006	0.0102	0.0035	
	4	LA GLORIA	SI	1901-1950	0.0415	0.0090	1951-2006	0.0415	0.0088	
	6	OZULUAMA	NO	-	-		1901-2006	0.0085	0.0042	
	8	TANTIMA	NO	-	-		1901-2006	0.0072	0.0039	
	11	POZA RICA	SI	1901-1950	0.0226	0.0058	1951-2006	0.0226	0.0058	
	12	CHICUALQUE	SI	1901-1950	0.0178	0.0059	1951-2006	0.0178	0.0059	
	13	JOLOAPAN	SI	1901-1950	0.0254	0.0056	1951-2006	0.0254	0.0056	
	14	EL RAUDAL	SI	1901-1950	0.0204	0.0046	1951-2006	0.0204	0.0046	
	2	15	ATZALAN	SI	1901-1950	0.0232	0.0053	1951-2006	0.0232	0.0053
		16	LAS ANIMAS	SI	1901-1950	0.0208	0.0046	1951-2006	0.0208	0.0046
		17	MOZOMBOA	SI	1901-1950	0.0217	0.0042	1951-2006	0.0217	0.0042
		18	TOTUTLA	SI	1901-1950	0.0243	0.0058	1951-2006	0.0243	0.0058
19		JALCOMULCO	SI	1901-1950	0.0218	0.0053	1951-2006	0.0218	0.0053	
20		PASO OVEJAS	SI	1901-1950	0.0206	0.0042	1951-2006	0.0206	0.0042	
21		ACULTZINGO	NO	-	-		1901-2006	0.0064	0.003	
22		NARANJAL	NO	-	-		1901-2006	0.0059	0.0028	
23		LAS VIGAS	SI	1901-1950	0.0183	0.0043	1951-2006	0.0183	0.0043	
3	24	ALVARADO	SI	1901-1950	0.0227	0.0043	1951-2006	0.0227	0.0043	
	25	ANGEL CABADA	SI	1901-1950	0.0201	0.0041	1951-2006	0.0201	0.0041	
	26	CATEMACO	SI	1901-1950	0.0216	0.0043	1951-2006	0.0216	0.0043	
	28	VILLA JOSE AZUETA	SI	1901-1950	0.0147	0.0038	1951-2006	0.0147	0.0038	
	29	CUATOTOLAPAN	SI	1901-1950	0.0268	0.0083	1951-2006	0.0268	0.0083	
	30	HUAZUNTLAN	SI	1901-1950	0.0257	0.0059	1951-2006	0.0257	0.0059	
	31	NANCHITAL	SI	1901-1950	0.0245	0.004	1951-2006	0.0245	0.004	
	33	BELLACO SAN JUAN	SI	1901-1950	0.022	0.0088	1951-2006	0.022	0.0088	
	34	ACAYUCAN	SI	1901-1950	0.0233	0.008	1951-2006	0.0233	0.008	
	35	TECUANAPA	SI	1901-1950	0.0261	0.0081	1951-2006	0.0261	0.0081	
	36	MOSQUITERO	SI	1901-1950	0.0223	0.0048	1951-2006	0.0223	0.0048	
	37	ITSMÉÑA	SI	1901-1950	0.0158	0.006	1951-2006	0.0158	0.006	
	38	CEDILLO	SI	1901-1950	0.0211	0.0063	1951-2006	0.0211	0.0063	
	39	LA LAGUNA	SI	1901-1950	0.0239	0.0051	1951-2006	0.0239	0.0051	
	40	MALPASO	SI	1901-1950	0.0254	0.0058	1951-2006	0.0254	0.0058	

Otoño.

Zona 1. Los cuadros de malla con tendencia significativa son 1, 2, 4, 5, 7, 9 y 10, y tienen CE en 1943 en el coeficiente de la tendencia; en el periodo de 1901 a 1942 se tiene un coeficiente promedio de $0.55^{\circ}\text{C}/\text{década}$, para el periodo de 1943 al 2006 la tendencia disminuye a valores cercanos a $0.12^{\circ}\text{C}/\text{década}$ por lo que al final del periodo se muestra un incremento alrededor de 0.77°C .

Zona 2. Los cuadros de malla 16, 17, 19, 20, 22 y 23 no tienen CE; sus tendencias son positivas con un coeficiente promedio de $0.067^{\circ}\text{C}/\text{década}$, manteniendo en la zona un aumento de la temperatura de 0.71°C para el periodo de 1901 al 2006.

Zona 3. Surgen cuatro casos: 1) los cuadros del 24 al 27 no tienen CE, su tendencia es sobre todo el periodo y su coeficiente es en promedio $0.067^{\circ}\text{C}/\text{década}$, por lo que se ha incrementado la temperatura en 0.71°C ; 2) el cuadro 28 tiene un CE en 1958 que modifica el coeficiente de la tendencia, así, de 1901 a 1957 el coeficiente es negativo e igual a $-0.12^{\circ}\text{C}/\text{década}$ para posteriormente volverse positivo de 1958 al 2006 e igual a $0.01^{\circ}\text{C}/\text{década}$; 3) el cuadro 33 tiene un CE en 1952 y es a partir de este cambio que la tendencia se vuelve significativa, el coeficiente es $-0.23^{\circ}\text{C}/\text{década}$, por lo que la temperatura ha disminuido en -1.27°C ; 4) los cuadros del 29 al 31, 34, 35, 37, 38 y 40 tienen CE en 1968 pero sobre el valor de la constante α_0 , no afectando directamente el coeficiente de la tendencia, los coeficientes son en promedio $-0.15^{\circ}\text{C}/\text{década}$ por lo que la temperatura ha disminuido alrededor de -0.6°C .

Tabla 4.8. Coeficientes de tendencias significativas de temperatura máxima en el otoño.

ZONA	CUADRO DE MALLA	ESTACIÓN	CE	PERIODO	COEFICIENTE (°C/Año)	ERROR (°C/Año)	PERIODO	COEFICIENTE (°C/Año)	ERROR (°C/Año)
1	1	EL COCO	SI	1901-1942	0.0619	0.0110	1943-2006	0.0111	0.0090
	2	EBANO	SI	1901-1942	0.0545	0.0106	1943-2006	0.0114	0.0081
	4	LA GLORIA	SI	1901-1942	0.0678	0.0146	1943-2006	0.0154	0.0116
	5	EL FISCAL	SI	1901-1942	0.0499	0.0125	1943-2006	0.0094	0.0049
	7	TANTOYUCA	SI	1901-1942	0.0505	0.0133	1943-2006	0.0117	0.0105
	9	IXHUATLAN DEL CAFÉ	SI	1901-1942	0.0565	0.0119	1943-2006	0.013	0.0092
	10	SOMBRERETE	SI	1901-1942	0.0475	0.016	1943-2006	0.0129	0.0114
2	16	LAS ANIMAS	NO	-	-	-	1901-2006	0.0051	0.0024
	17	MOZOMBOA	NO	-	-	-	1901-2006	0.0067	0.0023
	19	JALCOMULCO	NO	-	-	-	1901-2006	0.0058	0.0021
	20	PASO OVEJAS	NO	-	-	-	1901-2006	0.0076	0.0023
	22	NARANJAL	NO	-	-	-	1901-2006	0.0071	0.0030
	23	LAS VIGAS	NO	-	-	-	1901-2006	0.008	0.0022
3	24	ALVARADO	NO	-	-	-	1901-2006	0.0068	0.0021
	25	ANGEL CABADA	NO	-	-	-	1901-2006	0.0077	0.0022
	26	CATEMACO	NO	-	-	-	1901-2006	0.0068	0.0027
	27	COSAMALOAPAN	NO	-	-	-	1901-2006	0.0056	0.0020
	28	VILLA JOSE AZUETA	SI	1901-1957	-0.0121	0.0057	1958-2006	0.0011	0.0008
	29	CUATOTOLAPAN	SI	1901-1967	-0.0163	0.0069	1968-2006	-0.0163	0.0069
	30	HUAZUNTLAN	SI	1901-1967	-0.0147	0.0065	1968-2006	-0.0147	0.0065
	31	NANCHITAL	SI	1901-1967	-0.0092	0.0043	1968-2006	-0.0092	0.0043
	33	BELLACO SAN JUAN	SI	-	-	-	1952-2006	-0.0231	0.0060
	34	ACAYUCAN	SI	1901-1967	-0.0204	0.0080	1968-2006	-0.0204	0.0080
	35	TECUANAPA	SI	1901-1967	-0.0194	0.0073	1968-2006	-0.0194	0.0073
	37	ITSMENA	SI	1901-1967	-0.0121	0.0061	1968-2006	-0.0121	0.0061
	38	CEDILLO	SI	1901-1967	-0.0162	0.0063	1968-2006	-0.0162	0.0063
40	MALPASO	SI	1901-1967	-0.0133	0.0064	1968-2006	-0.0133	0.0064	

Invierno.

Zona 1. El cuadro de malla 4 tiene CE en el año de 1989 con un coeficiente positivo de 1.4°C/década; los cuadros de malla 12 al 14 tienen CE en 1958, estos cambios son sobre el valor medio, teniéndose un coeficiente promedio de 0.29°C/década, obteniendo un calentamiento aproximado de 1.46°C.

Zona 2. Todos los cuadros de la zona tienen tendencias significativas, además de presentarse CE en el año de 1958; este cambio es sobre el coeficiente de α_0 , en promedio el coeficiente de la tendencia es 0.32°C/década, por lo que la temperatura se ha incrementado en el periodo 1958 al 2006 alrededor de 1.58°C.

Zona 3. Los cuadros de malla del 24 al 28 tienen un CE en 1958 sobre el valor medio con un coeficiente promedio de 0.28°C/década, así, al final del periodo tiene un

incremento de 1.4°C. Los cuadros 29, 30 y 34 al 40 tienen un cambio estructural en el año de 1953 sobre el valor α_0 , el coeficiente promedio de la tendencia es de 0.25°C/década, por lo que se ha incrementado la temperatura en el periodo de 1952 al 2006 cerca de 1.35°C.

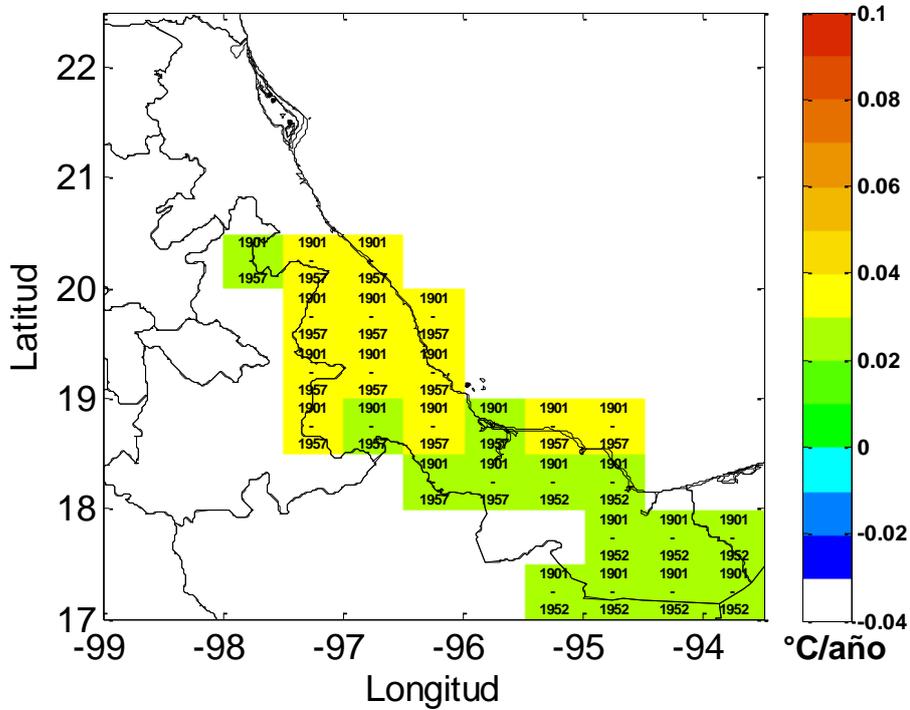


Figura 4.17a. Coeficientes de tendencias de temperatura máxima significativos (al 95% de confianza) en invierno, primer periodo antes del CE, los números dentro de los cuadros de la malla muestran el periodo en que son significativas las tendencias.

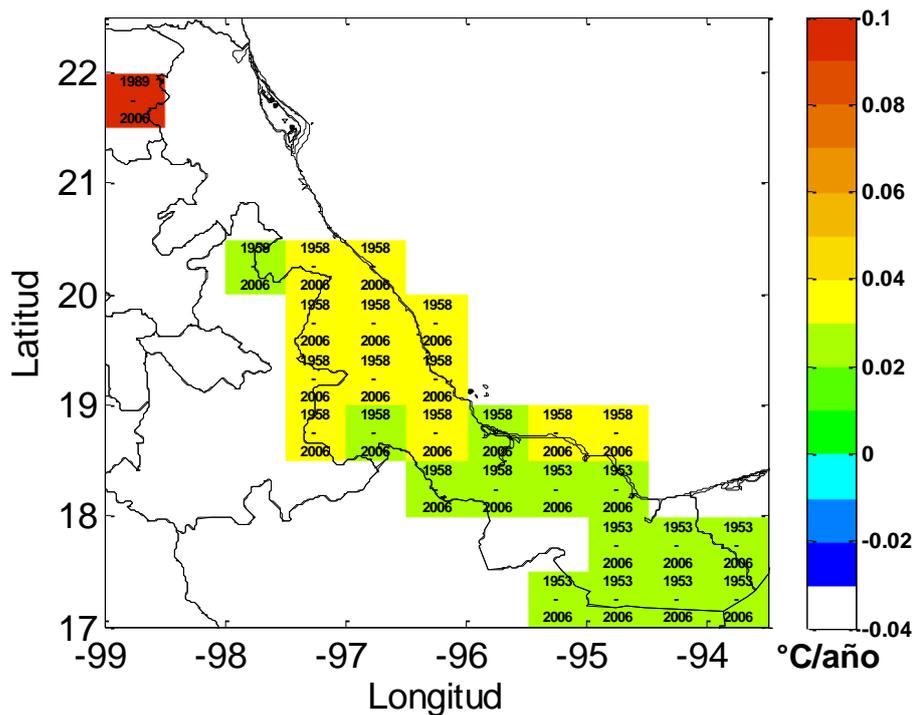


Figura 4.17b. Coeficientes de tendencias de temperatura máxima significativos (al 95% de confianza) en invierno, segundo periodo después del CE, los números dentro de los cuadros de la malla muestran el periodo en que son significativas las tendencias.

Tabla 4.9. Coeficientes de tendencias significativas de temperatura máxima en el invierno.

ZONA	CUADRO DE MALLA	ESTACIÓN	CE	PERIODO	COEFICIENTE (°C/Año)	ERROR (°C/Año)	PERIODO	COEFICIENTE (°C/Año)	ERROR (°C/Año)
1	4	LA GLORIA	SI	-	-		1989-2006	0.1448	0.0453
	12	CHICUALQUE	SI	1901-1957	0.0261	0.0082	1958-2006	0.0261	0.0082
	13	JOLOAPAN	SI	1901-1957	0.0306	0.0082	1958-2006	0.0306	0.0082
	14	EL RAUDAL	SI	1901-1957	0.0326	0.0071	1958-2006	0.0326	0.0071
2	15	ATZALAN	SI	1901-1957	0.0332	0.0080	1958-2006	0.0332	0.0080
	16	LAS ANIMAS	SI	1901-1957	0.0313	0.0070	1958-2006	0.0313	0.0070
	17	MOZOMBOA	SI	1901-1957	0.0342	0.0074	1958-2006	0.0342	0.0074
	18	TOTUTLA	SI	1901-1957	0.032	0.0079	1958-2006	0.032	0.0079
	19	JALCOMULCO	SI	1901-1957	0.0323	0.0068	1958-2006	0.0323	0.0068
	20	PASO OVEJAS	SI	1901-1957	0.0326	0.0073	1958-2006	0.0326	0.0073
	21	ACULTZINGO	SI	1901-1957	0.0342	0.0101	1958-2006	0.0342	0.0101
	22	NARANJAL	SI	1901-1957	0.0298	0.0071	1958-2006	0.0298	0.0071
	23	LAS VIGAS	SI	1901-1957	0.031	0.0059	1958-2006	0.031	0.0059
	3	24	ALVARADO	SI	1901-1957	0.0279	0.0060	1958-2006	0.0279
25		ANGEL CABADA	SI	1901-1957	0.0316	0.0067	1958-2006	0.0316	0.0067
26		CATEMACO	SI	1901-1957	0.0312	0.0053	1958-2006	0.0312	0.0053
27		COSAMALOAPAN	SI	1901-1957	0.0271	0.0057	1958-2006	0.0271	0.0057
28		VILLA JOSE AZUETA	SI	1901-1957	0.0233	0.0065	1958-2006	0.0233	0.0065
29		CUATOTOLAPAN	SI	1901-1952	0.0264	0.0064	1953-2006	0.0264	0.0064
30		HUAZUNTLAN	SI	1901-1952	0.0239	0.0061	1953-2006	0.0239	0.0061
34		ACAYUCAN	SI	1901-1952	0.0266	0.0064	1953-2006	0.0266	0.0064
35		TECUANAPA	SI	1901-1952	0.0243	0.0062	1953-2006	0.0243	0.0062

36	MOSQUITERO	SI	1901-1952	0.0221	0.0064	1953-2006	0.0221	0.0064
37	ITSMENA	SI	1901-1952	0.0227	0.0060	1953-2006	0.0227	0.0060
38	CEDILLO	SI	1901-1952	0.0259	0.0059	1953-2006	0.0259	0.0059
39	LA LAGUNA	SI	1901-1952	0.0266	0.0063	1953-2006	0.0266	0.0063
40	MALPASO	SI	1901-1952	0.0265	0.0061	1953-2006	0.0265	0.0061

En síntesis, para las diferentes estaciones del año se puede afirmar lo siguiente:

En la primavera, sobre un cuadro en la zona 1, 5 en la zona 2 y 8 en la zona 3 muestran coeficientes de tendencias positivas con CE, antes del cambio los coeficientes eran mayores, después del cambio estructural los coeficientes disminuyeron pero se mantuvieron positivos.

En el verano la mayoría de los cuadros de malla en las tres zonas tienen coeficientes positivos de tendencia.

En el otoño en la zona 1 se muestran coeficientes positivos de tendencia además de un CE, en la zona 2 se tienen coeficientes positivos y en la zona 3 se tiene 5 cuadros de malla con coeficientes positivo y 9 cuadros de malla con coeficientes negativos altos. En el invierno en las zonas 2 y 3 se tienen coeficientes positivos, siendo los de la zona 2 los coeficientes más altos por zona; en la zona 1 se encuentra un cuadro de malla con un alto valor del coeficiente de tendencia partir de un CE en el año de 1989 y la zona cuenta con otros cuadros que también tienen coeficientes positivos de tendencia.

En general de la temperatura máxima se tiene que se ha estado calentando en las cuatro estaciones particularmente: en la primavera las zonas 2 y 3, en verano la mayor porción de las tres zonas, en otoño la zona 1 y 2 y en invierno las zonas 2, 3 y la porción sur de la zona 1. En el caso especial del otoño para la zona 3 al sur y sureste existe un enfriamiento. La estación de invierno es la que más calentamiento observa debido al análisis realizado, la estación de primavera también mostraba un alto calentamiento hasta antes del CE posteriormente cesó.

En cuanto a los cambios estructurales para la temperatura mínima, se puede afirmar lo siguiente:

En la primavera se tiene el año 1933 como un año en común en las zonas 2 y 3.

Para el verano no hay un año en común para el CE, así que se esperaría que fuera por efectos locales, aunque en una menor escala, los años de 1936, 1946 en la zona 3 y 1954 en la zona 2; estos cambios se asociaron a más de un cuadro de malla.

En el otoño sólo la zona 1 presenta en dos cuadros de malla CE en el año 1926.

En invierno el año de 1953 para la zona 1 y 1943 en la zona 3, fueron los años con CE en común.

En el caso de la temperatura máxima, en la primavera surge el caso de que el CE en 1934 engloba a todas las zonas, en verano surge una situación similar para las tres zonas con el CE en 1950.

En el otoño, la zona 1 el CE es en 1943, en la zona 3 el cambio es en 1968.

Finalmente para el invierno, el CE predominante es 1958 para la zona 1, 2 y porción norte de la zona 3; en la porción centro-sur de la zona 3 el año es en 1953.

Finalmente las tablas 4.10 a 4.11, resumen los coeficientes promedio de temperatura y el periodo, la frecuencia de cuadros de malla por zona y finalmente el incremento o decremento asociado al coeficiente de tendencia asociado. La zona 1 se encuentra representada por 14 cuadros de malla, la zona 2 por 9 cuadros y la zona 3 por 17 cuadros de malla.

Para la temperatura mínima en la zona 1, en primavera hay decremento de la temperatura en -1.1°C en el periodo 1901-2006 en dos cuadros de malla; en otoño hay decremento de -1.6°C en el periodo de 1926-2006 en dos cuadros. Para el verano hay incremento de 0.3°C de 1970-2006 en un cuadro de malla, para otoño incremento de 0.5°C en el periodo de 1950-2006 en un cuadro de malla y en el invierno hay incremento de temperatura de 1.2°C en el periodo de 1953 al 2006 en tres cuadros de malla.

En la zona 2, para la primavera hay decremento de -0.7°C en el periodo de 1933 al 2006 en 7 cuadros de malla; para el verano el decremento es de -0.7°C en el periodo 1954-2006 en dos cuadros de malla; para otoño el decremento es de -0.6°C en el periodo 1901-2006 para un cuadro de malla y en invierno existe decremento -0.7°C en el periodo de 1901-2006 en seis cuadros de malla.

Para la zona 3, en primavera hay incrementos de temperatura de 0.2°C en cinco cuadros de malla para el periodo 1933-2006 y también decrementos de -0.4°C en el periodo de 1933-2006 en dos cuadros de malla; en verano hay incremento de la temperatura en 0.4°C en el periodo de 1946-2006 en dos cuadros de malla y decrementos de -0.5°C en el periodo de 1901-2006 en cuatro cuadros de malla, también disminución de -0.6°C en el periodo de 1936-2006 en tres cuadros de malla; para otoño existen incremento de temperatura de 0.6°C en el periodo de 1948-2006 en un cuadro de malla y decrementos de -0.5°C de 1936 al 2006; en invierno se tienen

incremento de 0.7°C en el periodo de 1944-2006 y decremento de -0.8°C en el periodo de 1901-2006 en quince cuadros de malla.

Para la temperatura mínima la zona 2 presenta decrementos ~0.7°C en todas las estaciones del año, con mayor frecuencia en las estaciones de primavera e invierno en los periodos señalados. En la zona 1 hay incrementos en la temperatura mínima de verano a invierno, siendo en invierno la mayor frecuencia y el incremento más notable de 1.2°C; también en la zona 1 hay decrementos en la temperatura mínima, en la estación de primavera con -1.1°C y en otoño -1.2°C ambas estaciones con baja frecuencia. En la zona 3 se tiene el aumento de la temperatura mínima que oscila de 0.2°C en primavera a 0.7°C en invierno, la frecuencia de los cuadros de malla fueron los situados en la región sureste de la zona 3; para esta zona también existen decrementos que van de -0.4°C en primavera a -0.8°C en invierno, siendo más notables ya que la frecuencia de cuadros de malla que muestran decrementos en la temperatura mínima es mayor y particularmente en el invierno con 15 cuadros de 17 contenidos en toda zona 3.

Tabla 4.10. Coeficientes promedio de tendencia de temperatura mínima mensual, error del coeficiente, incrementos o decrementos de temperatura, error del incremento, periodo y frecuencia de cuadros de malla en las zonas 1 (norte), 2 (centro) y 3 (sur) del estado de Veracruz.

	PRIMAVERA		VERANO		OTOÑO		INVIERNO	
	Coeficiente promedio (°C/Año)	Incremento /decremento (°C)						
ZONA 1 (14)	-0.0100 (±0.0045) (1901-2006) 2	-1.1 (±0.5)	0.0081 (±0.0029) (1970-2006) 1	0.3 (±0.1)	0.0080 (±0.0042) (1950-2006) 1	0.5 (±0.2)	0.0224 (±0.0090) (1953-2006) 3	1.2 (±0.5)
					-0.0195 (±0.0160) (1926-2006) 2			
ZONA 2 (9)	-0.0100 (±0.0039) (1933-2006) 7	-0.7 (±0.3)	-0.0131 (±0.0039) (1954-2006) 2	-0.7 (±0.2)	-0.0060 (±0.0030) (1901-2006) 1	-0.6 (±0.3)	-0.0070 (±0.0030) (1901-2006) 6	-0.7 (±0.3)
ZONA 3 (17)	0.0033 (±0.0013) (1933-2006) 2	0.2 (±0.1)	0.0065 (±0.0027) (1946-2006) 2	0.4 (±0.2)	0.0108 (±0.0043) (1948-2006) 1	0.6 (±0.3)	0.0116 (±0.0096) (1944-2006) 2	0.7 (±0.6)
	-0.0054 (±0.0023) (1933-2006) 5		-0.0043 (±0.0021) (1901-2006) 4		-0.5 (±0.2)		-0.0050 (±0.0019) (1901-2006) 6	
			-0.0091 (±0.0058) (1936-2006) 3	-0.6 (±0.4)				

Para la temperatura máxima en la zona 1 en la primavera se tiene un incremento de 1°C en el periodo de 1934 al 2006, en verano incremento de 1.5°C de 1951 al 2006 en seis cuadros de malla y de 1°C en el periodo de 1901-2006 en cuatro cuadros de malla; en otoño el incremento es de 0.8°C durante el periodo de 1943-2006 en siete cuadros de malla; en invierno particularmente en un cuadro de malla del periodo de 1989-2006 tiene un incremento de 2.6°C y también en otros de 1.5°C en el periodo de 1958-2006 de en tres cuadros de malla.

En la Zona 2; para la primavera hay incremento de 1°C en el periodo de 1934-2006 en cinco cuadros de malla, en verano existe incremento de 1.2°C en siete cuadros de malla en el periodo de 1951-2006 y otro incremento de la temperatura en 0.7°C en dos cuadros de malla en el periodo de 1901-2006; en otoño hay incremento de 0.7°C en el periodo de 1901-2006 en seis cuadros de malla y para invierno el incremento es de 1.6°C en el periodo de 1958-2006 en nueve cuadros de malla.

En la zona 3, para la primavera hay incremento de temperatura de 0.8°C de 1934-2006 en ocho cuadros de malla y otro incremento de 0.7°C en el periodo de 1963-2006 en cuatro cuadros de malla; para verano existe incremento de 1.2°C en el periodo de 1951-2006; para otoño hay incremento de 0.6°C en cuatro cuadros de malla en el periodo de 1901-2006 y una disminución de -0.7°C de 1968-2006 en ocho cuadros de malla y para invierno hay incrementos en dos periodos: de 1958-2006 el incremento es de 1.4°C en cinco cuadros de malla y otro en el periodo de 1953-2006 de 1.2°C en nueve cuadros de malla.

Para la temperatura máxima en la zona 1 se está incrementando durante todas las estaciones del año en al menos un cuadro de malla, las estaciones con mayor frecuencia son: otoño con siete cuadros de malla y un incremento de 0.8°C y en verano con diez cuadros de malla con un incremento $\sim 1.3^\circ\text{C}$, teniendo también en invierno incrementos de 1.5°C y un caso extremo de 2.6°C situado en la región noroeste de la zona 1. En la zona 2 existen incrementos nuevamente durante todas las estaciones del año, siendo el menor incremento en otoño con 0.7°C y al mayor en invierno con 1.6°C, en la Tabla 4.11 se muestra la frecuencia de cuadros de malla es relativamente alta con un mínimo en primavera con 4 de sus 9 cuadros de malla muestran incremento en la temperatura máxima. En la zona 3 existe incremento durante todas las estaciones del año con una frecuencia mínima en otoño de 5 cuadros e incremento $\sim 0.6^\circ\text{C}$ y máxima en verano con 15 cuadros y con un incremento de 1.2°C; para la zona 3 también se cuenta con decrementos de la temperatura en el otoño $\sim 0.7^\circ\text{C}$ en ocho cuadros de malla encontrados en la región sur y sureste de la zona 3.

Tabla 4.11. Coeficientes promedio de tendencia de temperatura máxima mensual, error del coeficiente, incrementos o decrementos de temperatura, error del incremento, periodo y frecuencia de cuadros de malla en las zonas 1 (norte), 2 (centro) y 3 (sur) del estado de Veracruz.

	PRIMAVERA		VERANO		OTOÑO		INVIERNO	
	Coeficiente promedio (°C/Año)	Incremento /decremento (°C)	Coeficiente promedio (°C/Año)	Incremento /decremento (°C)	Coeficiente promedio (°C/Año)	Incremento /decremento (°C)	Coeficiente promedio (°C/Año)	Incremento /decremento (°C)
ZONA 1 (14)	0.0137 (±0.0131) (1934-2006) 1	1.0 (±1.0)	0.0269 (±0.0069) (1951-2006) 6	1.5 (±0.4)	0.012 (±0.0091) (1943-2006) 7	0.8 (±0.6)	0.1448 (±0.0453) (1989-2006) 1	2.6 (±0.8)
			0.0091 (±0.0040) (1901-2006) 4	1.0 (±0.4)			0.0297 (±0.0172) (1958-2006) 3	1.5 (±0.8)
ZONA 2 (9)	0.0142 (±0.0058) (1934-2006) 5	1.0 (±0.4)	0.0215 (±0.0048) (1951-2006) 7	1.2 (±0.3)	0.007 (±0.0024) (1901-2006) 6	0.7 (±0.3)	0.0323 (±0.0075) (1958-2006) 9	1.6 (±0.4)
			0.0061 (±0.0029) (1901-2006) 2	0.7 (±0.3)				
ZONA 3 (17)	0.0110 (±0.0034) (1934-2006) 8	0.8 (±0.3)	0.0224 (±0.0058) (1951-2006) 15	1.2 (±0.3)	0.006 (±0.0023) (1901-2006) 4	0.7 (±0.2)	0.0282 (±0.0060) (1958-2006) 5	1.4 (±0.3)
	0.0159 (±0.0045) (1963-2006) 4	0.7 (±0.2)			-0.0152 (±0.0065) (1968-2006) 8		-0.6 (±0.3)	0.0250 (±0.0062) (1953-2006) 9

Los errores encontrados en cada coeficiente en algunas ocasiones son del mismo orden de magnitud pero no mayores, particularmente sucede solo en algunos casos de cuadros de malla aislados, que se encontraron coeficientes de tendencias significativas pero con un error relativamente alto. Los errores asociados de la temperatura mínima son en su mayoría del mismo orden de magnitud, así la disminución de la temperatura mínima llega a ser en algunos casos poco representativa debido al error asociado, pero en el caso de la temperatura máxima es claro que el error asociado es en su mayoría menor que el 50% del valor del coeficiente, por lo que la temperatura máxima ha aumentado en los cuadros de malla con tendencias significativas ya mostrados de la figura 4.14 a la 4.17.

En el cuarto reporte del IPCC, 2007 hace mención, que la temperatura de la superficie a nivel mundial (al promedio de la temperatura del aire cerca de la superficie de la tierra y de la temperatura de la superficie del mar) se ha incrementado en 0.74°C (+0.18°C), en 100 años en el periodo de 1906 al 2005, superior a la tendencia indicada en el tercer reporte (IPCC, 2001) de 0.6°C (+0.2°C), tomando como medida de referencia

el promedio de 30 años de 1961-1990. En el caso particular de México el cuarto reporte plantea que la temperatura superficial de 1970 al 2004, se ha incrementado entre 1°C y 2°C en el norte y noroeste del país, y en el resto las variaciones son entre 0.2°C y 1.0°C, así los resultados obtenidos del estado de Veracruz en el periodo de 1901-2006, se obtienen incrementos ponderados de temperatura máxima 1.2°C (+0.4) y mínima 0.7°C (+0.3°C), y en algunas regiones decrementos de temperatura máxima -0.6°C (+0.3°C) y mínima de -0.9°C (+0.5°C), de manera que los incrementos de temperatura se encuentran dentro de lo considerado por el IPCC y en el caso de los decrementos el IPCC no contempla en algunas regiones sobre posibles decrementos, cabe mencionar que el IPCC se basa en la temperatura promedio superficial y no por temperaturas extremas.

En el caso de los cuadros de malla con cambio estructural se encuentran representados también en las tablas 4.10 y 4.11, a partir del año en que se divide la serie en dos partes. En algunos casos los años de cambio estructural se asociaron por una o más zonas, por lo que estas agrupaciones de cuadros de malla con el mismo año de cambio estructural se puede asociar a efectos de escala sinóptica de acuerdo a la clasificación de Orlanski (1975), así que, por realizar un esfuerzo como posible explicación de los años de cambio estructural se planteó al fenómeno del niño como posible explicación, la Tabla 4.12, resume las coincidencias de años de cambio estructural con años del fenómeno del ENSO, el año con mayor presencia de cambio estructural es 1951 con 28 cuadros de malla que corresponde a una fase negativa del ENSO, en los casos de 1933, 1953, 1958 y 1968 coinciden con la presencia de una fase positiva de ENSO y los años de 1934 y 1943 son condiciones neutras de ENSO. En realidad esta comparación de años debe ser analizada cuidadosamente para encontrar si existe una relación directa de las temperaturas de Veracruz, debido a la presencia del fenómeno del ENSO. Siendo así los años con cambios estructurales el inicio de una nueva investigación que permita explicar los procesos físicos que modifican los patrones en las series de temperatura máxima y mínima.

Al tratar de explicar los cambios estructurales de aquellos cuadros de malla que se presentó de manera aislada, se solicitó a las instituciones encargadas de las estaciones climatológicas convencionales, la información relacionada a eventos extraordinarios durante los años de cambio estructural, cambio en el equipo instrumental, información de reubicación de la estación; a lo que las instituciones encargadas de las estaciones respondieron que no cuentan con este tipo de información.

Tabla 4.12. Años de cambio estructural en temperatura máxima y mínima que coinciden con el fenómeno del ENSO

Años con cambio estructural		Años de ENSO	
Temperatura Máxima	Temperatura Mínima	Fase positiva (Niño)	Fase negativa (Niña)
	1933 (14)	1932-1933	
1934 (14)			
1943 (7)			
1951 (28)			1950-1951
1953 (9)	1953 (3)	1953-1954	
1958 (17)		1957-1958	
1968 (8)		1968-1969	

Capítulo 5: Conclusiones

Para contestar la pregunta de si la temperatura en el estado de Veracruz está experimentando una tendencia climática, la principal barrera fue contar con datos atmosféricos con registros que superen pruebas de calidad. Por lo anterior, en este trabajo se optó por la sustitución de datos observados por datos de reanálisis cuyo uso implica la pérdida de detalle del comportamiento de variables climáticas que se tendría con datos observados de buena calidad. Estos datos de reanálisis fueron previamente validados para el estado de Veracruz.

La validación se llevó a cabo entre los datos observados de la base de datos de ERIC III y los de la base de datos CRU TS 3.0, cuyos criterios estadísticos para validar fueron la correlación, el error cuadrático medio y el sesgo, principalmente. Así, se encontró que los datos de CRU TS 3.0 representaron en un 75% a los datos observados de las estaciones climatológicas seleccionadas. Además se seleccionaron algunas estaciones para comprobar que el CRU TS 3.0 representara el ciclo medio anual, dando como resultado que en la mayoría de ellas fue así e incluso las curvas de promedio medio anual coincidieron. Sin embargo en algunos otros casos las series del CRU TS 3.0 sobrestimaron lo observado, pero la forma del ciclo anual se conservó. De esta manera se comprobó que los datos de CRU TS 3.0 son una opción a falta de series de datos observados confiables, por lo que las series fueron viables para ser utilizadas en esta investigación.

Para estudiar los posibles cambios en la temperatura, por mínimos cuadrados ordinarios se ajustó un modelo lineal a los datos de temperatura y se consideraron los coeficientes de tendencia para evaluar estadísticamente si se evidencia un incremento o disminución, con respecto a condiciones medias observadas en las series de tiempo de una década o más, o que simplemente no hay evidencia de cambio alguno.

Los métodos estadísticos son ampliamente usados en el análisis de tendencias de temperaturas, para comprobar la existencia de incrementos o disminuciones dentro de series, con respecto a las condiciones medias en los periodos de tiempo observados. Se planteó entonces en esta investigación la utilización de un método simple de mínimos cuadrados que sea estadísticamente adecuado, por lo que el modelo de especificación general ajustado a las series fue evaluado bajo los supuestos que sustenta el Teorema de Gauss- Markov.

La aplicación del método de mínimos cuadrados para las diferentes estaciones del año (primavera, verano, otoño e invierno), resulta innecesario para los fines deseados, por lo que se estudiaron los meses que se consideraron representativos de esas

estaciones: enero para invierno, abril para primavera, julio para verano y octubre para otoño.

En cuanto a una distribución espacial, se decidió en este trabajo dividir al estado en tres zonas, correspondientes aproximadamente al norte, centro y sur estatal.

Los coeficientes de tendencia de temperatura máxima (Tabla 4.11) indican que, la temperatura máxima, está aumentando con respecto a las condiciones medias del periodo analizado (1901-2006), particularmente en la zona centro y sur del estado de Veracruz, con mayor intensidad en las estaciones de primavera con 0.9°C ($\pm 0.7^{\circ}\text{C}$), verano con 1°C ($\pm 0.4^{\circ}\text{C}$) e invierno con 1.5°C ($\pm 0.4^{\circ}\text{C}$). El caso de otoño muestra que en la porción sur de la zona 3 la temperatura está disminuyendo de 1968 a 2006 en -0.6°C (± 0.3) y también aumentando en la porción norte de la misma zona de 1901 al 2006 en 0.7°C ($\pm 0.2^{\circ}\text{C}$), así como también en las zonas 1 y 2 la temperatura también se ha incrementado en el periodo de 1943 al 2006 en 0.7°C ($\pm 0.5^{\circ}\text{C}$)

En cuanto a la temperatura mínima, los resultados de la Tabla 4.10 muestran para la zona 1, en primavera y otoño, un decremento de la temperatura mínima $\sim 1.4^{\circ}\text{C}$ (0.9°C); en cambio, para verano hay incrementos de 0.3°C (± 0.1) y en invierno el incremento es de 1.2°C ($\pm 0.5^{\circ}\text{C}$). En la zona 2 y 3 existen disminuciones de la temperatura alrededor de -0.6°C ($\pm 0.3^{\circ}\text{C}$) y -0.7°C ($\pm 0.5^{\circ}\text{C}$), en las cuatro estaciones del año. También en la zona sur se detectaron incrementos de temperatura que se intensifican de primavera a invierno que van desde 0.2°C ($\pm 0.1^{\circ}\text{C}$) a 0.7°C ($\pm 0.6^{\circ}\text{C}$).

En el estado de Veracruz para el periodo de 1901-2006, se obtienen incrementos promedios de temperatura máxima 1.2°C (± 0.4) y mínima 0.7°C ($\pm 0.3^{\circ}\text{C}$), y en algunas regiones decrementos de temperatura máxima de -0.6°C ($\pm 0.3^{\circ}\text{C}$) y mínima de -0.9°C ($\pm 0.5^{\circ}\text{C}$), de manera que los incrementos de temperatura en el estado de Veracruz se encuentran dentro de lo considerado por el IPCC y en el caso de los decrementos el IPCC no contempla sobre posibles decrementos, cabe mencionar que el IPCC se basa en la temperatura promedio superficial y no por temperaturas extremas.

Es importante señalar que es posible que la tendencia no cambie en los cuadros de malla que tienen un cambio estructural sobre el valor medio α_0 . Esos cambios estructurales obligan a que la serie de datos se analice en dos partes, las cuales mantienen la misma razón del coeficiente de tendencia. Lo anterior debe de considerarse ya que podría ocurrir que se mantuvieran coeficientes de tendencias altos y erróneos.

Los cambios estructurales (CE) de las series de temperatura mínima vistos en la tabla 4.10 se distribuyeron de la siguiente forma: en primavera predomina el año de 1933 para la zona centro y sur; en el caso de verano existen CE para las tres zonas, pero no existe un año que predomine por lo que podría considerarse algunos fenómenos aislados. En otoño solo en la zona norte y sur se encuentran algunos años de CE y en invierno en la zona norte predomina el CE en el año de 1953 en tres cuadros de malla, y en la zona sur en el año de 1944 con dos cuadros de malla.

En el caso de la temperatura máxima aumenta la densidad de años con CE, en la primavera el año de 1934 predomina en las tres zonas, otro año que predomina es en 1963 en la zona 3 en el suroeste. En verano el año de 1951 predomina en las tres zonas con 28 de los 40 cuadros de malla que representan el estado de Veracruz, en otoño en la zona norte predomina el año de 1943 con CE en la mitad de los cuadros de malla y para la zona sur el año que predomina es 1968 con 8 cuadros de malla. En invierno el año más abundante en las tres zonas con CE fue en 1958, en la zona norte porción sur con 3 cuadros de malla, la zona centro, la zona sur porción norte con 5 cuadros de malla, también en la zona sur porción sur y suroeste en el año de 1953 se tiene CE en 9 cuadros de malla.

Al encontrar cambios estructurales asociados por regiones, se puede atribuir a la influencia de fenómenos de gran escala capaces de modificar los patrones en las series de temperatura máxima y mínima.

Los cambios estructurales encontrados se agruparon por zonas, esto no necesariamente coincidió para las dos variables analizadas (temperatura máxima y mínima), ni en las estaciones del año. Sin embargo, este estudio permitió analizar cambios estructurales en las series de registros de datos y por regiones. En los casos locales, o de menor escala, sería importante el uso de series de datos observados –si estos existieran y fueran de calidad- y no de reanálisis.

Con esta metodología no es posible afirmar que las tendencias positivas en las temperaturas extremas son producto de cambios en el clima producidos por acciones humanas o de origen natural. El IPCC en su reporte del 2007, realizó esfuerzos por **atribuir** el calentamiento observado a acciones humanas, pero este tema no es objeto de estudio en el presente trabajo. El aporte de la presente tesis se enfoca en la detección de tendencias y de cambios estructurales, bajo los criterios estadísticos que sustenta la aplicación rigurosa del método de mínimos cuadrados.

La atribución de las causas que provocan los cambios en la temperatura que en este trabajo se describen, tendrá que ser producto de investigaciones posteriores. Lo que si aporta el presente estudio es establecer en dónde y de qué magnitud son los cambios descritos (ver tablas 4.10 a 4.11). En particular, es claro que los cambios detectados pueden ser producto de diferentes causas, desde cambios en el entorno de las estaciones climatológicas (deforestación, por ejemplo), hasta cambios causados por fenómenos climáticos de mayor escala.

Los cambios detectados en la mayor parte de las subregiones del estado, por ejemplo, el resultado obtenido de que la temperatura máxima está aumentando, particularmente en las zonas centro y sur del Estado de Veracruz, durante el verano, la primavera y el invierno, difícilmente estaría asociado a causas locales, probablemente estará asociado a cambios de mayor escala, lo que sería fundamental averiguar para poder establecer proyecciones e impactos futuros.

El Equipo de Expertos de CC1/CLIVAR para la Detección de Cambio Climático e Índices (por sus siglas en ingles, ETCCDI), detecta el Cambio Climático por medio de índices y plantean el uso de tendencias en los índices. Alexander, *et al.*, 2006, utilizan el estimador de Kendall para calcular las tendencias, ya que el estimador no asume una distribución de los residuos y es robusto en el sentido de los valores extremos de la serie, pero ineficiente ante una serie con autocorrelación. Sin embargo, considerando la incorporación de los supuestos del Teorema de Gauss-Markov podría enriquecer el uso de tendencias en los índices y mejorarlo.

La aplicación de la metodología del ETCCDI no fue empleada en este estudio, pero tendría sentido aplicarla particularmente en aquellos casos en donde se detectaron tendencias positivas. Evidentemente, los cambios en los índices citados será un trabajo posterior importante, utilizando el método plantado en este estudio para series mensuales, estacionales, o anuales.

Recomendaciones

La elección de las estaciones climatológicas por medio de un control de calidad, así como la incorporación de otras bases de datos, que engloben áreas de interés (costa, mar, montaña).

Realizar una depuración de los datos climatológicos del estado para la creación de una base homogénea, en la que se plantee una nueva regionalización del estado de Veracruz, que pudiera evitar el uso de datos de reanálisis.

Realizar una investigación sobre los cambios estructurales en las series, sobre las posibles causas que pudieran inducir el cambio, ya sea por fenómenos o errores (particularmente al usar datos observacionales) y validar, dado algún evento, de qué manera influyen patrones de mayor escala directamente en el cambio o punto de quiebre en las series climáticas.

Incorporar y generalizar el método de mínimos cuadrados validado con los supuestos, dado que ésta es una herramienta estadística ampliamente utilizada en la rama de la econometría, para la que se han desarrollado infinidad de modelos. Así que el análisis de los supuestos estadísticos en un modelo, que utiliza la estimación de coeficientes por mínimos cuadrados, valida estadísticamente al modelo al considerar a los coeficientes los mejores estimadores lineales insesgados (MELI).

Iniciar estudios que indiquen si se han dado, a raíz de los cambios detectados en este trabajo, impactos en las características biofísicas en diferentes regiones en Veracruz. Por ejemplo, sigue pendiente el saber si en las regiones que muestren mayor calentamiento se han presentado cambios en recursos hídricos, en migración de aves, o en la floración de diferentes especies vegetales.

Anexo

Descripción de pruebas de especificación

Para el modelo principal (Ec. A.1):

$$T_i = \beta_0 + \beta_1 t_i + \varepsilon_i \quad (\text{A.1})$$

donde la variable independiente es el tiempo (t), y la variable dependiente es la temperatura (T), se presenta a continuación de manera descriptiva, el uso de las pruebas de especificación empleadas para la evaluación de los supuestos del Teorema de Gauss-Markov.

Forma funcional

Prueba Ramsey RESET test

Conocida como prueba del error de especificación en regresión, es una prueba de especificación de variables omitidas y para una forma funcional incorrecta. Considera la hipótesis nula (H_0): La forma funcional es correcta, la prueba fue evaluada en este trabajo para una significancia del 0.05. A continuación se mencionan los pasos considerados en la prueba RESET.

A partir del modelo seleccionado obténgase el T_i estimado, es decir \hat{T}_i .

Nuevamente se efectúa la regresión introduciendo \hat{T}_i , en alguna forma como una o varias regresiones adicionales, si se observa que hay una relación de ε_i y \hat{T}_i , se puede introducir \hat{T}_i^2 y \hat{T}_i^3 , de forma que se pueda efectuar la regresión:

$$T_i = \alpha_0 + \alpha_1 t_i + \alpha_2 \hat{T}_i^2 + \alpha_3 \hat{T}_i^3 + \varepsilon_i \quad (\text{A.2}),$$

de la cual se obtiene un coeficiente de determinación (R^2) para la ecuación A.1 y un R^2 de la ecuación A.2, con lo cual se puede hacer una prueba conjunta del estadístico F .

De forma que

$$F = \frac{(R_2^2 - R_1^2)/H}{(1 - R_2^2)/(n - m)} \quad (\text{A.3}),$$

siendo R_i el coeficiente de correlación de los distintos modelos de regresión, H el número de regresores, m el número de parámetros en el nuevo modelo introducidos en la ec. A.2 ($\hat{T}_i^2, \hat{T}_i^3, \dots, \hat{T}_i^r$) y n el número de observaciones.

Si el valor F calculado es significativo, a cierto nivel de significancia (0.05) se puede especificar que el modelo está mal planteado, pudiendo ser por la forma funcional o indica la necesidad de la incorporación de una variable omitida.

No autocorrelación

Prueba de Breusch-Godfrey. Es una prueba de autocorrelación, para analizar la relación entre los residuales de algún modelo y permite evaluar:

- 1.-Variables regresoras no aleatorias como valores rezagados.
- 2.-Esquemas autoregresivos de mayor orden (1,2,..., n-1).
- 3.-Promedios móviles de términos de error con ruido blanco de orden superior.

Primero se estima el modelo propuesto y se obtienen los residuales

$$\hat{T}_i = \beta_0 + \beta_1 t_i + \varepsilon_i \quad (\text{A.4}),$$

suponiendo que el término de error ε_i sigue el esquema autoregresivo de orden p (ec. A.5). Así, la relación A.5 muestra que los errores pueden estar relacionados con valores rezagados y ser una combinación que pueden llegar a ser de orden p y obtener una variable puramente aleatoria e_i .

$$\varepsilon_i = \rho_1 \varepsilon_{i-1} + \rho_2 \varepsilon_{i-2} + \dots + \rho_p \varepsilon_{i-p} + e_i \quad (\text{A.5}),$$

donde e_i es un término de ruido blanco donde la hipótesis nula a probar es $H_0: \rho_1 = \rho_2 = \dots = \rho_p = 0$, es decir que los términos autoregresivos sean cero (H_0 : no hay autocorrelación), con lo que se usara la regresión auxiliar:

$$\hat{\varepsilon}_i = \alpha_1 + \alpha_2 t_i + \rho_1 \hat{\varepsilon}_{i-1} + \rho_2 \hat{\varepsilon}_{i-2} + \dots + \rho_p \hat{\varepsilon}_{i-p} + e_i \quad (\text{A.6}),$$

de la cual se obtendrá el coeficiente de determinación (R^2); si la muestra es grande, Breusch-Godfrey comprobaron que $(n-p)R^2 \sim \chi_p^2$ es semejante a una distribución Ji-cuadrada, así si el valor $(n-p)R^2$ es mayor que el χ_p^2 , a partir de tablas, se rechaza la hipótesis nula y por lo menos una $\rho \neq 0$.

Los regresores incluidos en el modelo de regresión pueden contener valores rezagados de la variable Y , es decir $Y_{t-1}, Y_{t-2},$ etc. y aparecer como variables explicativas. La

desventaja de la prueba, es que el valor de p , la longitud de la serie auxiliar, no puede especificarse *a priori*.

Normalidad

Prueba Jarque-Bera. Esta prueba analiza si la forma de la distribución de los residuales es normal, se analiza a partir de la curtosis (K) y la asimetría(AS) de los residuales.

$$JB = \frac{n}{6} \left[AS^2 + \frac{(K-3)^2}{4} \right] \quad (A.7),$$

donde la H_0 supone la Normalidad de los residuales, la cual se rechaza al evaluar la condición $JB_{calculado} > JB_{Tablas}$. La prueba Jarque-Bera sigue una distribución Ji-cuadrada con (n-número de estimadores) grados de libertad, por lo tanto la distribución t puede ser usada para establecer intervalos de confianza sobre los coeficientes estimados ($\hat{\beta}_i$), es decir:

$$\frac{\hat{\beta}_i}{\hat{\sigma}_\beta} = \frac{n}{\chi^2} \sim t \quad (A.8)$$

Heterocedasticidad

Prueba White. Es una prueba para analizar la heterocedasticidad de los residuales y revisar cómo es el comportamiento de la varianza a partir del modelo utilizado, considérese la ecuación con dos variables (A.9).

$$\hat{Y}_i = \alpha + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{2i} + \varepsilon_i \quad (A.9),$$

con la cual se utiliza la regresión auxiliar que se encuentra modificada para el análisis del cambio en la varianza en la serie de residuales.

$$\hat{\varepsilon}_i^2 = \alpha_1 + \alpha_2 X_{1i} + \alpha_3 X_{2i} + \alpha_4 X_{1i}^2 + \alpha_5 X_{2i}^2 + \alpha_6 X_{1i} X_{2i} + \nu_i \quad (A.10),$$

es decir, con los residuos al cuadrado de la regresión original se realiza la regresión sobre las variables X originales, sobre sus valores al cuadrado y sobre el producto cruzado de las regresoras. Para obtener el valor del coeficiente de determinación(R^2) y el factor $nR^2 \sim \chi^2$. Así, si el valor nR^2 obtenido excede el valor crítico χ^2 , al nivel de significancia de 0.05, se concluye que hay heterocedasticidad; en el caso contrario si el

valor calculado de nR^2 no excede χ^2 , no hay heterocedasticidad, lo que dice, que los coeficientes estimados a partir de la regresión auxiliar que incorporan las variables independientes no genera cambios en la varianza sobre la serie por lo que $\alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_6 = 0$.

Prueba ARCH. La prueba ARCH (heterocedasticidad autoregresiva condicional), a diferencia de la prueba de White (heterocedasticidad no condicional), analiza la autocorrelación que pueda existir sobre la propia varianza, considérese el modelo planteado en A.11.

$$Y_i = \alpha + \beta X_i + e_i \quad (\text{A.11}),$$

Se plantea el siguiente esquema acerca de los residuales.

$$e_i \sim N(0, \alpha_0 + \alpha_1 e_{i-1}^2) \quad (\text{A.12}),$$

es decir los residuales (e_i) se distribuyen de forma normal, con media cero y varianza ($\alpha_0 + \alpha_1 e_{i-1}^2$), que depende de un término constante y otro un residual rezagado al cuadrado.

Así la varianza de e_i sigue un proceso ARCH(1). La varianza del error podría no sólo depender del término rezagado del error al cuadrado, sino también de diversos términos de error al cuadrado rezagado de orden p , de la siguiente forma.

$$\text{var}(e_i) = \sigma^2 = \alpha_0 + \alpha_1 e_{i-1}^2 + \alpha_2 e_{i-2}^2 + \dots + \alpha_p e_{i-p}^2 \quad (\text{A.13}),$$

de forma que la H_0 plantea que no hay autocorrelación en la varianza de los residuales $H_0: \alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_p = 0$. La hipótesis anterior se puede probar usando la regresión auxiliar.

$$e_i^2 = \alpha_0 + \alpha_1 e_{i-1}^2 + \alpha_2 e_{i-2}^2 + \dots + \alpha_p e_{i-p}^2 \quad (\text{A.14})$$

La hipótesis nula se puede mostrar usando $nR^2 \sim \chi_p^2$, la cual tiene p grados de libertad, si la Ji-Cuadrada calculada es mayor que la del valor crítico se rechaza la hipótesis nula.

Permanencia estructural

Prueba Quandt-Andrews. Para analizar si existe cambio estructural en la serie de registros se utiliza la prueba de Chow de forma generalizada, para cada intervalo de tiempo, lo cual consta de lo siguiente.

Prueba de Chow

Se divide la muestra en dos periodos basándose en algún criterio, $T=T_1+T_2$ la prueba consiste en estimar tres veces la regresión.

$$\hat{Y}_i = \alpha + \beta X_i + \varepsilon_i \quad (\text{A.15})$$

- 1.- Para la muestra completa T
- 2.- Para la muestra T_1
- 3.- Para la muestra T_2

Se calculan la suma de los errores al cuadrado total SECT y para cada una de las muestras $SECT_1$ y $SECT_2$. se observa si no hay cambio estructural.

$$SECT = \sum_{i=1}^k n_i (\hat{Y}_i - Y)^2 \quad (\text{A.16}),$$
$$SECT = SECT_1 + SECT_2$$

donde el estadístico empleado para probar la H_0 : No hay cambio estructural entre T_1 y T_2 es:

$$F = \frac{(SECT - (SECT_1 + SECT_2)) / k}{\frac{SECT_1 + SECT_2}{n - 2k}} \quad (\text{A.17})$$

k es el número de coeficientes de la regresión.

Por lo que se realiza una prueba de Chow para cada posible observación entre dos fechas T_1 y T_2 en un determinado número de R pruebas de Chow y la prueba Quandt-Andrews la resume en un solo estadístico.”

Referencias

Alexander, L. V., et al. (2006) Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation, *J. Geophys. Res.*, 111, D05109, doi:10.1029/2005JD006290.

Bravo JL., C. Gay, C. Conde y F. Estrada (2006) Probabilistic description of rains and ENSO phenomenon in a coffee farm area in Veracruz, México. *Atmósfera* 19 (2).49-74p.

Brooks, C. (2008). *Introductory Econometrics for finance*. Cambridge University Press. Ed. 2. 641p.

Canavos, C. G. (1998) Probabilidad y estadística aplicaciones y métodos (Urbina, M. EG. Trad.) México, DF., México: McGraw-Hill/Interamericana de México (Original en inglés, 1988).

Deque, M. (2003) Continuos Variables: First-Orden Moments. In: Forecast verification: A partitioner's guide in atmospheric. In: [Jolliffe, I. T. y D. B. Stephenson (eds.)]. John Wiley & Sons Ltd. 97-119 p.

Gómez, M. R. (2006). Trayectorias históricas de los ciclones tropicales que impactaron el estado de Veracruz de 1930 a 2005. Scripta Nova. *Revista electrónica de geografía y ciencias sociales*. Barcelona: Universidad de Barcelona, vol. X, núm. 218:15p.

Gujarati, D. N. (2004). *Econometría*. (Garmendia, G D. y Arango, M. G. Trad.) México DF. McGraw-Hill Interamericana. 4 ed. 972p. (Original en inglés, 2003).

IPCC (2001) *Climate change 2001: The scientific basis*. [Houghton, J.T., Ding, Y., Griggs, D., Noguet, M., van der Linden, P., Dai, X., Maskell, K., Johnson, C.A. (eds)]. Cambridge: Cambridge University Press.

IPCC (2001). *Glosario En: Orientación del IPCC sobre las buenas prácticas y la gestión de la incertidumbre en los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero*. Publicaciones IPCC. 23pp

IPCC- WGI (2007) *Resumen para Responsables de Políticas*. En: *Cambio Climático 2007: Impactos y Vulnerabilidad. Contribución del Grupo de Trabajo I al Cuarto Informe de Evaluación del IPCC*, Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Zenhen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido. <http://www.ipcc.ch/> (visitado, mayo 2010)

IPCC-WGII (2007) *Resumen para Responsables de Políticas*. En: *Cambio Climático 2007: Impactos y Vulnerabilidad. Contribución del Grupo de Trabajo II al Cuarto Informe de Evaluación del IPCC*, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden y C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido. [<http://www.ipcc.ch/> visitado, mayo 2010].

Jáuregui, E. (1967) Las ondas del este y los ciclones tropicales en México. *Ingeniería hidráulica en México*. 21, 197-208p.

Jáuregui, E. (2003) Climatology of landfalling hurricanes and tropical storms in México, *Atmósfera*, 14:125-138p

Jáuregui, E. e I. Zitácuaro, (1995) Impacto de los ciclones tropicales del Golfo de México, en el estado de Veracruz. *Revista de la Universidad Veracruzana La ciencia y el hombre*. 21: 75-119p.

Juárez C. SF., R. Jiménez Z., ML. Velasco V., AL. Díaz P., CA. Ochoa M., A. Jiménez L. y L. Jiménez L. (2009) Análisis estadístico histórico de variabilidad climática. En: Plan Veracruzano ante al Cambio Climático, Compilador. Tejeda, Adalberto. Junio 2009: 53p.

Maddala, G. S. (1996) Introducción a la econometría. Ed. Prentice Hall

Maddala, G. S. y In-Moo Kim (1998). *Unit Root, Cointegration and Structural Change*.Cambrige University Press.

McElwain, L. y J. Sweeney (2003) Climate change in Ireland. recent trends in temperature and precipitation. *Irish Geography*, Volume 36(2): 97-111p.

Michaels, P. J., R Balling, C., R. Vose, S. y P. Knappenberger, C. (1998) Analysis of trends in the variability of daily and monthly historical temperature measurements. *Clim. Res.* Vol. 10: 27–33p.

Ojeda, M. M., A. Tejeda, M., M. Mahe y S. Ruíz (1993) Análisis preliminar de las tendencias climáticas en tres localidades del estado de Veracruz, y sus posibles causas. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*. No. 27: 49-68p.

Orlanski, I. (1975). A rational subdivision of scales for atmospheric processes. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 56(5): 527-530.

Pereyra D. D., A. Tejeda M. y B. E. Palma G (1995) *Panorámica de la climatología del estado de Veracruz. En Veracruz: cifras y perfiles 1970-1990*. IIESES. Universidad Veracruzana, Xalapa, Ver. 441: 109-145p.

Pulido, SR. A y Pérez, G. J (2003). Modelos Econométricos: Guía para la elaboración de modelos econométricos con Eviews. Ed. Pirámide. 218p

Rosenzweig, C., G. Casassa, D.J. Karoly, A. Imeson, C. Liu, A. Menzel, S. Rawlins, T.L. Root, B. Seguin, P. Tryjanowski, 2007: Assessment of observed changes and responses in natural and managed systems. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. Van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Ruíz, B. A., A. Tejeda, M., S. Miranda, A. y Z. Flores, RH. (2010). Climatología. *En: Atlas del Patrimonio Natural, Histórico y Cultural de Veracruz. Tomo I Patrimonio natural* [Benítez, B. G. y Welsh R. C (eds.)] Gobierno del Estado de Veracruz y Universidad Veracruzana, 280: 65-84p.

Schultz, D., W. Braken y L. Bozart, (1998) Planetary and synoptic scale signatures associated with Central American Cold Surges. *Monthly Weather Review*. 126: 5-27p.

Tejeda M. A., F. Acevedo y E. Jáuregui (1989): Atlas climático del Estado de Veracruz. *Textos Universitarios, Universidad Veracruzana*. 1ª Edición. 150 p.

Torres, A. JA., A. Tejeda M., JL Vázquez A., I. Brunet M., P. Hernández A. y B. Ruíz A. (2010). Índices de cambio climático y análisis de la variabilidad en el estado de Veracruz, México. En: Compiladores: Felipe Fernández García, Encarna Galán Gallego y Rosa Cañada Torrecilla. Publicaciones de la Asociación Española de Climatología (AEC), Serie A, nº. 7.

Vázquez, A. JL., I. Brunet, M. y P. Jones, D. (2008). Cambios observados en los extremos climáticos de temperatura y precipitación en el estado de Veracruz, México a partir de datos diarios. En: Compiladores: J. Sigró Rodríguez, M. Brunet India y E. Aguilar Anfrons (Eds.) Publicaciones de la Asociación Española de Climatología (AEC), 2008, Serie A, nº 6. Artyplan, Tarragona, 823 p.

Referencias internet

<http://badc.nerc.ac.uk/browse/badc/cru/data> (visitada, diciembre 2010)

<http://cccma.seos.uvic.ca/ETCCDMI/index.shtml> (visitada, noviembre 2010)

<http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/ver/poblacion/default.aspx?tema=me&e=30>, (visitado septiembre 2011)

<http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/ver/territorio/relieve.aspx?tema=me&e=30> (Visitado junio 2011)

<http://www.Eviews.com> Eviews es una marca registrada de QMS (Quantitative Micro Software) (visitada, noviembre 2010).

(<http://reanalyses.org/>) (Visitada, febrero 2012)

http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/spanish/A3_Glossary_ES.pdf (visitada, julio 2011).