

Climatología

ALFREDO RUIZ BARRADAS · ADALBERTO TEJEDA MARTÍNEZ
SAÚL MIRANDA ALONSO · RODRIGO HUMBERTO FLORES ZAMUDIO



ALFREDO RUIZ BARRADAS

Investigador Asistente en el Departamento de Ciencia de la Atmósfera y el Océano en la Universidad de Maryland, EUA. Graduado en Ciencias Atmosféricas por la Universidad Veracruzana, con maestría en Ciencias (Geofísica) por la UNAM, y maestría y doctorado (Ph D) en Meteorología por la Universidad de Maryland, EUA. Sus áreas de investigación son: variabilidad del hidroclicma en EU, México y el Caribe, entendimiento y predicción de sequías multianuales, variabilidad del clima a escalas que van de estacionales a decenales. Ha publicado artículos sobre temas de hidroclicma en el *Journal of Climate*, una de las revistas líder en ciencia del clima, publicada por la Sociedad Americana de Meteorólogos. Dos de esos artículos se han convertido en citas obligadas en los temas de variabilidad en el Atlántico tropical (2000) y variabilidad de la lluvia y su modelaje con modelos globales del clima sobre el centro de EUA (2005).

ADALBERTO TEJEDA MARTÍNEZ

Doctor en Geografía por la UNAM, es miembro del Sistema Nacional de Investigadores, Nivel II. Es profesor de la Licenciatura en Ciencias Atmosféricas de la UV desde 1985. Su campo de especialidad es la climatología aplicada, en la que ha participado como coautor en 12 libros y en más de 20 artículos especializados publicados en revistas de circulación internacional. Ha sido asesor de la Planta Nucleoeléctrica de Laguna Verde y de la Comisión Federal de Electricidad. Desde 1992 colabora con el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM en diversos proyectos de investigación, principalmente sobre climatología urbana, cambio climático global y bioclimatología humana. Ha sido Coordinador General de la Unidad de Estudios de Posgrado y Director General de Investigaciones de la UV, Director General del Consejo Veracruzano de Ciencia y Tecnología y actualmente es Coordinador del Plan de Acción Climática para el estado de Veracruz.

SAÚL MIRANDA ALONSO

Doctor en Oceanografía Física por la Universidad de Hamburgo, Alemania, realizó la maestría también en Oceanografía Física por el Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada, Baja California, y la licenciatura en Física por la Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Se ha dedicado al manejo de las bases numéricas y modelación en climatología en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Ha colaborado en la modelación numérica del océano en la Secretaría de Marina y en la Universidad de Hamburgo. Es maestro en la Universidad Veracruzana desde 2000 hasta la fecha y en otras universidades desde 1973. Ha publicado 25 trabajos en extenso en congresos y numerosos informes técnicos, el más reciente: "Elaboración de un Atlas Climatológico Nacional Actualizado", 2007. Colabora actualmente en la Secretaría de Protección Civil del Gobierno del Estado de Veracruz y en el Centro Estatal de Estudios del Clima.

RODRIGO HUMBERTO FLORES ZAMUDIO

Pasante de Licenciatura en Ciencias Atmosféricas, se ha especializado en la elaboración de pronósticos meteorológicos. De 2005 a 2008 colaboró en proyectos de investigación en la Subcoordinación de Hidrometeorología del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Actualmente colabora en el Centro Estatal de Estudios del Clima de la Secretaría de Protección Civil del Gobierno del Estado de Veracruz. De 2005 a 2006 participó en el proyecto "Atlas Climatológico Actualizado de México"; en 2006, como expositor en el curso "Actualización en Meteorología y Equipos de Medición" en San Luis Potosí, SLP, y en 2007, también como expositor en el curso "Actualización en Meteorología y Equipos de Medición" en Veracruz. Ver.

LA GEOGRAFÍA DEL ESTADO DE VERACRUZ queda descrita, en buena medida, por la distribución de sus climas, y no sólo por lo que hace a sus paisajes, sino también a los hombres, que parecen adoptar el temperamento de sus tierras. Envueltos en sí mismos, los habitantes de los bosques serranos lindan tierras abajo con los mesurados pobladores de las áreas templadas de la media montaña. En las tierras bajas y la costa explotan festivas la flora, la fauna y la risa. Hasta el subsuelo se corresponde con el clima: la llanura costera es sinónimo de bochorno y explotación petrolera. Las otras llanuras, las de las mesetas montañosas, son semiáridas y frías en invierno, recordando frecuentemente paisajes de las faldas alpinas.

Del boceto anterior surgen dos preguntas: el *porqué* y el *cómo* de los climas veracruzanos. Es decir: ¿Por qué en una faja de territorio situada en latitudes tropicales es posible encontrar tal diversidad de climas, incluyendo glaciares perpetuos? ¿Cómo son las cartografías de temperaturas, lluvias, granizadas, heladas, etcétera, en el estado? En un sentido más práctico, también hay que tocar el punto de las adversidades atmosféricas, causas más frecuentes de desastres por fenómenos naturales en el estado.

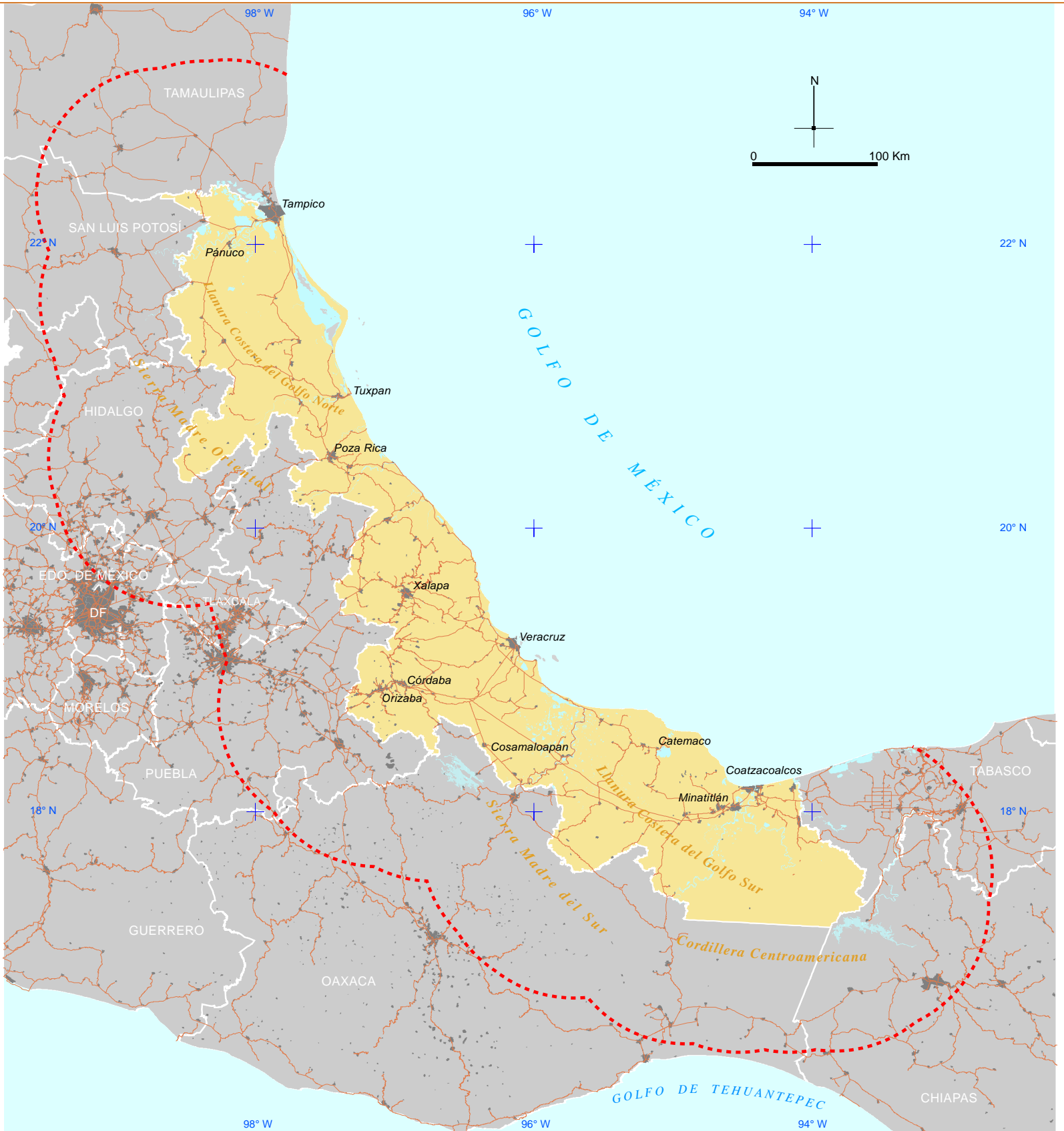
Las condiciones climáticas para el estado de Veracruz van desde el cálido húmedo en el sur hasta el cálido semiseco en el norte y en el centro del estado, pasando por las condiciones templadas y frías de la montaña. El mar, tan cercano a cualquier parte del estado, beneficia con su efecto regulador de la temperatura y aporta suficiente humedad y precipitación; propicia, a veces, las condiciones ideales para el desarrollo de las múltiples actividades de los veracruzanos y, en otras, genera factores de riesgo. Es decir, el estado de

Veracruz presenta características climáticas tan interesantes como complejas.

A continuación se presenta una descripción del clima de la región mostrada en el **MAPA 1**, a partir de datos del periodo 1976-2005; se incluye una franja de 100 km a partir de los límites del estado. Veracruz cuenta con una extensión superficial de 72,410.05 km² distribuidos en 212 municipios; tal superficie representa 3.7% del territorio nacional, de manera que ocupa el décimo primer lugar nacional por su extensión. Dos tercios son planicies y lomeríos, y un tercio está dominado por montañas. Se localiza entre los 17°03' y los 22°27' de latitud norte y los 93° 36' y 98° 38' de longitud oeste (INEGI, 2005).

Debido a su ubicación y complejidad orográfica —ya que se encuentra entre la Sierra Madre Oriental y el Golfo de México, y a que alrededor del paralelo de 19°N es atravesado por el Eje Neovolcánico—, el estado de Veracruz cuenta con una multitud de climas, zonas semiáridas, tropicales y hasta nieves perpetuas, en la cima del Pico de Orizaba. Ampliando el análisis de la situación orográfica del estado, se puede decir que la mayor parte se encuentra a menos de 300 msnm. La zona montañosa incluye la Sierra Madre Oriental que, como ya se dijo, se une con el Eje Volcánico Transversal en el centro de Veracruz. Además, abarca también sistemas montañosos aislados, como la Sierra de Los Tuxtlas y la de Tantima. Asimismo, los sistemas montañosos del norte de Oaxaca colindan con Veracruz. La planicie costera nororiental ocupa una franja de tierras bajas que se extiende hasta el centro de Veracruz. Este territorio también cuenta con una considerable cantidad de ríos que provenientes de la Sierra Madre Oriental, en su mayoría siguen una ruta que va de suroeste a noreste, hacia el Golfo de México (Tejeda, *et al.*, 1989).

MAPA 1. REGIÓN DE ESTUDIO



LOS CONTROLES PERMANENTES

Mosiño (1974) dice que los determinantes del clima son, por orden de importancia: 1) la latitud, 2) la orografía, 3) la distribución de tierras y aguas, 4) las corrientes marinas y 5) las tormentas junto con sus trayectorias. A los tres primeros se les considera “controles permanentes”, y a los dos últimos “controles variables” (Mosiño y García, 1973).

Por lo que hace al primer control permanente, se sabe que el estado de Veracruz se encuentra situado entre latitudes tropicales, pero su parte norte no está lejos del trópico de Cáncer, por lo que habrá de esperarse que también afecten los fenómenos extratropicales.

La orografía (el segundo control) es en parte escarpada, por lo que inducirá embalses, encañonamiento, elevamientos forzados de aire, desviaciones y demás variaciones que modifican sustancialmente los efectos de las tormentas y las masas de aire que afectan a la zona, y a su vez impedirán condiciones climáticas homogéneas en todo el territorio. Es decir, si la latitud hace que el estado atmosférico varíe a lo largo del año, la orografía provocará su modificación espacial.

El mar proveerá humedad a barlovento de la Sierra Madre Oriental; a estas tierras llegan básicamente dos tipos de masas de aire (a veces en forma de tormentas): el aire tropical en el semestre centrado en el verano, y las masas polares en los meses centrados en el invierno. En etapas de transición suele dominar el borde poniente del anticiclón de las Bermudas, cuya presión barométrica alta impide la formación de nubes y propicia los cielos despejados.

Para esta zona, los “controles” o “determinantes” más fuertes son la orografía y los sistemas de circulación atmosférica dominantes en distintas épocas del año.

En el litoral veracruzano la llanura costera puede dividirse en dos porciones: la que está al norte y la que está al sur de ese máximo estrechamiento localizado aproximadamente a 20° N.

La anchura media de la llanura en la región norte varía entre 40 y 160 km —en las cercanías de las sierras de Teziutlán y Zacoatlán, alcanza un mínimo de amplitud—, y en ella se localiza la región de las Huastecas. Como el clima es más húmedo que el de la subprovincia del extremo norte, la vegetación es de tipo

francamente tropical, el río más importante es el Pánuco con su afluente el Tamesí; al sur se localiza la laguna de Tamiahua y una serie de ríos de curso corto, como el Tuxpan, el Cazonces, El Tecolutla, el Nautla y otros (Jáuregui y Soto, 1975). En la parte sureña es donde la llanura costera alcanza su mayor desarrollo; su anchura varía entre 100 y 160 km.

Las tierras más bajas del istmo de Tehuantepec están interrumpidas por la sierra volcánica de Los Tuxtlas, que presenta algunos cráteres. El volcán de San Martín, de más de 1000 m de altitud, es el más elevado de esta sierra. Numerosos y caudalosos ríos drenan esta amplia zona, principalmente el Papaloapan y su afluente el San Juan y el Coatzacoalcos (Jáuregui y Soto, 1975).

SISTEMAS DE CIRCULACIÓN ATMOSFÉRICA EN VERACRUZ

Como ya se dijo, dos tipos de masas de aire se alternan en el dominio de la zona de estudio: la tropical, primordialmente en el semestre centrado en el verano, y la polar, que tiene incursiones frecuentes durante el 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.

Durante el invierno, el aire polar avanza del norte hacia el sur. En el verano llega aire tropical (cálido y húmedo) del oriente. De esta manera se hace patente el efecto de la latitud, que permite la llegada tanto de un tipo de aire como de otro.

El invierno

La presencia de aire polar en la parte veracruzana de la vertiente del Golfo de México puede ocurrir de octubre a mayo. A veces lo hace como un frente frío (llamado norte), consistente en un desprendimiento de la masa polar por el norte del Golfo, cuyo efecto no es muy profundo, pues en la vertical se extiende apenas hasta los 700 milibares (3,500 m de altitud aproximadamente). Hay una disminución sensible de la temperatura en superficie y bien puede asociarse con nublados en las cimas de las sierras que están de cara al Golfo. En el altiplano o al occidente de la cordillera de la Sierra Madre, estos nortes sólo ocasionalmente surten efectos.

Por el contrario, cuando las invasiones de aire polar están asociadas con el paso de vaguadas polares (parte sureña de las ondas de los vientos de oeste, que en otra época del año viajan en latitudes más altas), el enfriamiento también abarca al altiplano.

Las invasiones de aire polar juegan un papel muy importante en el balance energético del sistema climático mundial. Realizan un intercambio de energía que ayuda a compensar el déficit energético anual de latitudes medias y altas, “robándole” calor a las latitudes bajas.

Puesto que a la planicie costera y a la vertiente oriental de la sierra llega fácilmente humedad proveniente del Golfo, las invasiones de aire frío provocan nublados y lluvias ligeras, que apenas representan 10% de la lluvia anual. En las partes más elevadas, a partir de los 1,800 m, durante inviernos muy severos pueden presentarse nevadas.

En una situación típica de norte, los vientos más intensos se observan en la costa suroeste del Golfo, entre Nautla y Coatzacoalcos, siendo máximos entre Laguna Verde y el puerto de Veracruz, en donde el aire parece represarse con más fuerza al recargarse contra los flancos orientales de la sierra de Teziutlán, cuyas estribaciones llegan prácticamente a la costa frente a Laguna Verde. Entre esta sierra y la de San Martín Tuxtla, al sureste del puerto, también sobre la costa se forma un corredor donde, al pasar por dicho estrechamiento, el viento del norte es más violento. Un norte puede avanzar en un solo día desde Matamoros hasta Coatzacoalcos (Jáuregui, 1975).

El verano

La primavera en esta región —climáticamente hablando— se caracteriza por la disminución de la frecuencia de invasiones de aire polar y la ganancia de terreno por parte del aire tropical, que paulatinamente va emergiendo del sur hacia el norte. A veces, aún en mayo, se desprende algún norte poco profundo y poco severo, pero por lo regular para junio ya se estableció el aire tropical. Su forma de manifestarse son los vientos alisios. Puesto que soplan del Golfo hacia el continente, la Sierra Madre Oriental fuerza el ascenso de aire húmedo provocando las lluvias orográficas.

En ocasiones, los vientos adquieren la forma de “ondas del este”, en cuyo eje el viento cambia de dirección e intensidad

ocasionando inestabilidad atmosférica, con nubes de desarrollo vertical considerable. Las depresiones, tormentas y ciclones tropicales (huracanes) pueden ser graduales acentuaciones de estas ondulaciones en la circulación tropical.

Las ondas del este, primer nivel de inestabilidad convectiva de los vientos alisios, tienen su frecuencia máxima entre agosto y septiembre. Se forman en el Atlántico e ingresan al territorio continental después de cruzar la Península de Yucatán, y el paso de una de ellas puede dejar una secuela de tres a cuatro días con lluvia, a los que siguen unos días despejados cuando pasa la parte más sureña de la onda.

Cuando estas ondas alcanzan el nivel de depresión o tormenta tropical y llegan a chocar o a pasar cerca del territorio, dejan tras de sí cantidades considerables de lluvia en la vertiente del Golfo, mientras que en el Valle de México el tiempo es despejado. Su máxima ocurrencia es en septiembre, aunque pueden presentarse desde mayo hasta noviembre.

El efecto combinado de la orografía y las diversas formas de la circulación tropical hacen que para esta región la lluvia veraniega (mayo-octubre) represente alrededor de 80% del monto de la anual.

El sistema de alta presión conocido como Anticiclón de las Bermudas, a mitad de la estación de lluvias alcanza a afectar a la vertiente del Golfo, impide el desarrollo nuboso y mantiene los cielos despejados. Los días son tan calurosos como en mayo. Es la llamada “canícula” o sequía de medio verano. Desde luego, a medio invierno el Anticiclón llega a tocar esta región. La diferencia es que entonces las noches son significativamente frías. Es cuando en las partes medias y altas de la Sierra ocurren las heladas.

Los sistemas locales

Más allá de las modalidades que induce la orografía local sobre los sistemas de circulación atmosférica de gran escala, están la brisa marina y el terral, 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 en esta zona se desarrolla aproximadamente tres horas después de la salida del Sol. Durante el verano la brisa marina es muy persistente porque se sobrepone a los vientos alisios, mientras que en el invierno casi es borrada

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.

ELEMENTOS CLIMÁTICOS GENERALES

La temperatura

Domínguez (1941), en forma bastante sintética, había encontrado que para la vertiente del Golfo de México las estaciones del año tienen el siguiente comportamiento:

- Primavera (marzo a junio): caluroso, seco y calmoso.
- Verano (junio a septiembre): caluroso, húmedo y calmoso.
- Otoño (octubre y noviembre): frío, húmedo y ventoso.
- Invierno (diciembre a marzo): se alternan el tiempo seco y frío y ventoso con el frío, húmedo y calmoso.

Una comprensión más detallada se logra con los mapas que acompañan a este texto. En el **MAPA 2** se muestra la temperatura media anual observada de 1976 a 2005, disminuyendo de sur a norte y principalmente de la costa hacia la sierra, con los mínimos en las cimas volviendo a aumentar ligeramente en el occidente de la Sierra Madre. La disminución 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 (Mosiño, 1974).

El aumento de temperatura de norte a sur se debe a que las masas de aire polar y tropical ejercen con mayor facilidad su efecto a norte y sur del territorio, respectivamente. Así, en enero ese aumento es más notorio porque los nortes actúan con menor frecuencia en la parte sur. Por el contrario, en el mes de julio las temperaturas sobre la planicie costera al sur son menores que al norte, debido a que el aire tropical a



mitad del verano ya se hizo presente en el sur, acompañado de humedad y nubes que disminuyen la insolación.

En términos generales el estado puede ser regionalizado en muy caluroso (llanura costera sur), caluroso (llanura costera norte), templado (faldas de las sierras) y frío sólo en los picos de las montañas.

El mes más frío para todo el estado es enero. El mes más caluroso es mayo para el sur y el centro, mientras que para el norte es junio. Tal comportamiento se debe a la invasión paulatina de aire tropical que para junio ya se instaló sobre la porción sur provocando nublados y lluvias, mientras que al norte todavía se mantienen los cielos despejados. Puesto que el contenido de humedad en el aire determina la regularidad de la variación térmica, las zonas extremas se ubican al occidente de la Sierra Madre y eventualmente en las cimas de las montañas, hasta donde no logra llegar la humedad proveniente del Golfo.

El **MAPA 3** y el **MAPA 4** corresponden a los promedios anuales de temperaturas mínima y máxima, respectivamente, y presentan

una distribución similar al **MAPA 2**. Para las temperaturas se utilizó en los mapas una escala de colores que va desde el azul hasta el rojo, pasando por el verde y el amarillo; así, las zonas más frías están relacionadas con tonos en azul y la temperatura aumenta progresivamente al pasar al verde, el amarillo y el rojo, que representa las temperaturas más elevadas.

La lluvia

Dado que las lluvias se originan principalmente por la llegada a esta región de las masas de aire húmedo tropical, así como por su interacción con la orografía, la temporada de lluvias es el verano. Los máximos de precipitación se ubican sobre las sierras, ligeramente desplazados al NE (barlovento), y los mínimos a sotavento. Sobre la llanura costera los valores son intermedios. En todos los casos los máximos de precipitación corresponden a sistemas montañosos, lo mismo en la Sierra de Teziutlán que en el Pico de Orizaba y la Sierra de Los Tuxtlas (**MAPA 5**). Casi todo el estado de Veracruz es entre lluvioso y muy lluvioso.

El mes más lluvioso no es el mismo para todo el estado. Septiembre para el norte y el sur, donde preferentemente llegan las tormentas tropicales y las ondas del este, respectivamente, cuyas frecuencias máximas se encuentran en septiembre. Para el centro del estado es julio, mes previo a la sequía intraestival o canícula que, al igual que en otras partes del país, en el estado ocurre en agosto (Mosiño, 1974).

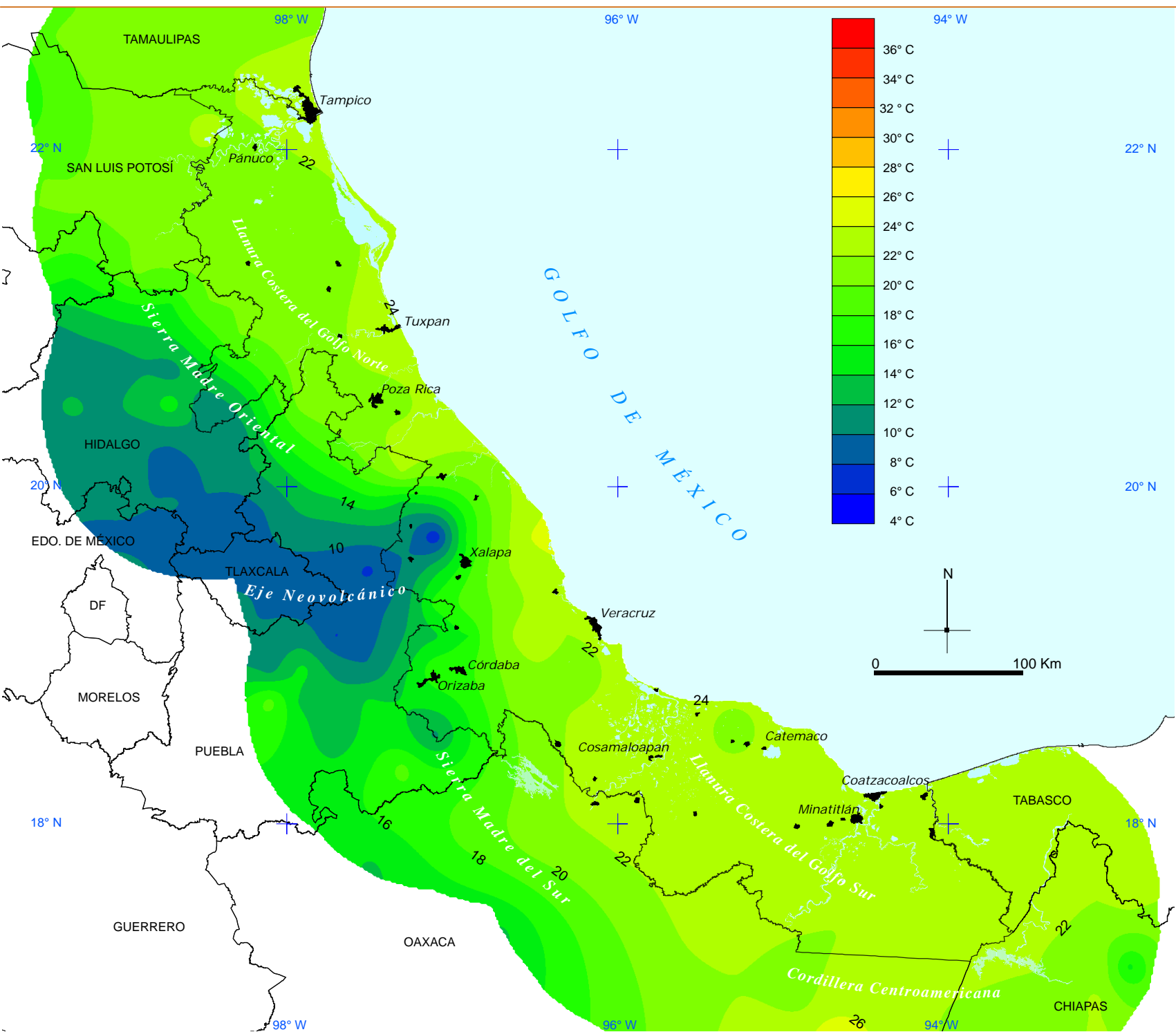
El periodo menos lluvioso es el invierno (diciembre a febrero) en las zonas montañosas, y la primavera (marzo a mayo) en la llanura costera.

Casi como un negativo del **MAPA 5** (precipitación), el **MAPA 6** presenta la evaporación medida en un tanque. Es decir, se trata de la evaporación potencial, la que ocurriría de haber disponibilidad de agua, por lo que los máximos corresponden a las zonas y periodos menos húmedas del estado.

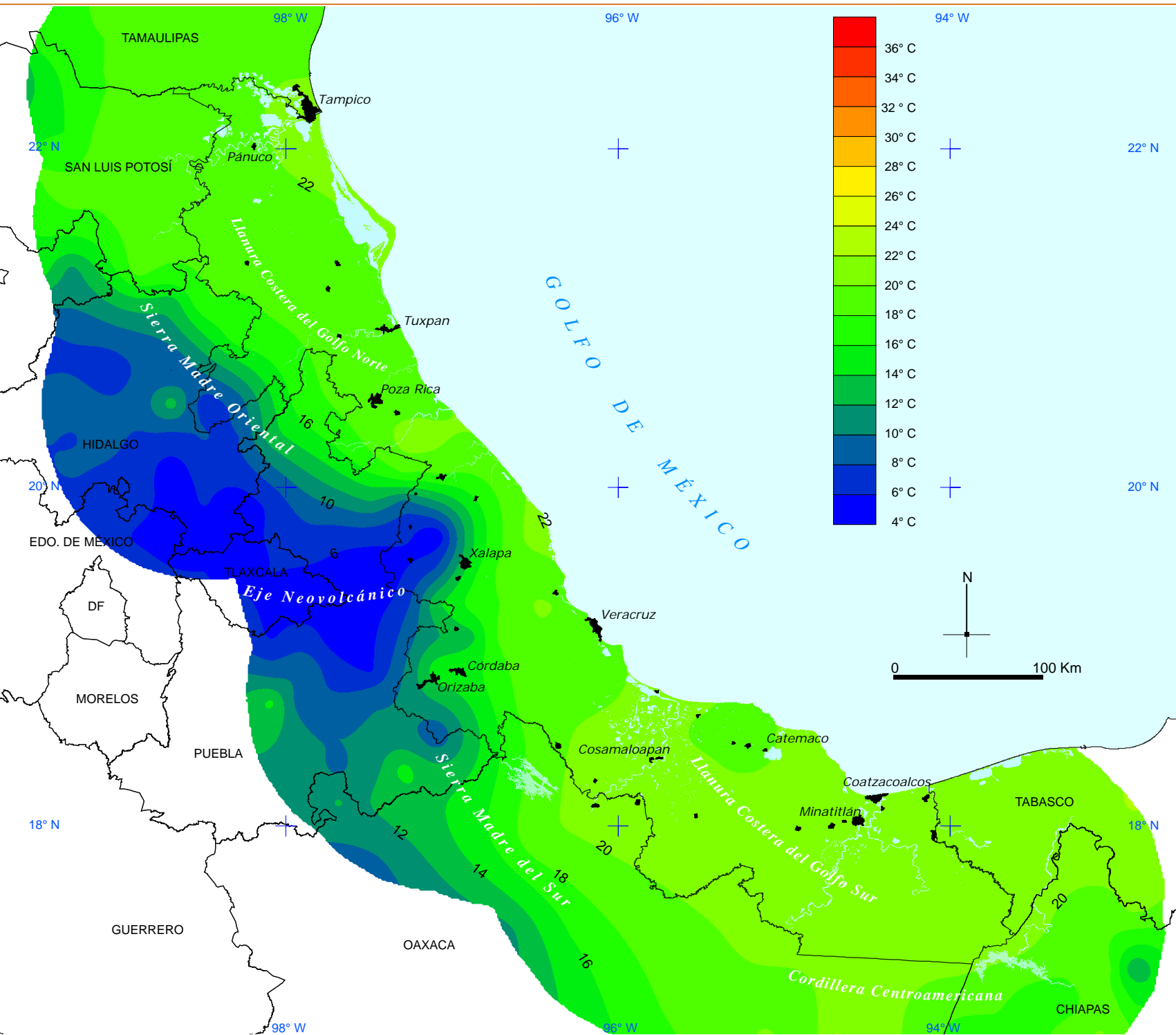
Los **MAPAS 7, 8 y 9** muestran gráficamente los valores promedio 1976-2005 de los días al año con granizo, nieblas y tormentas eléctricas, respectivamente. En los mapas de precipitación, los colores van del azul (mayor precipitación) seguido en orden descendente del verde, amarillo y rojo (mínima precipitación), como muestra la barra de colores a la derecha de la gráfica correspondiente.



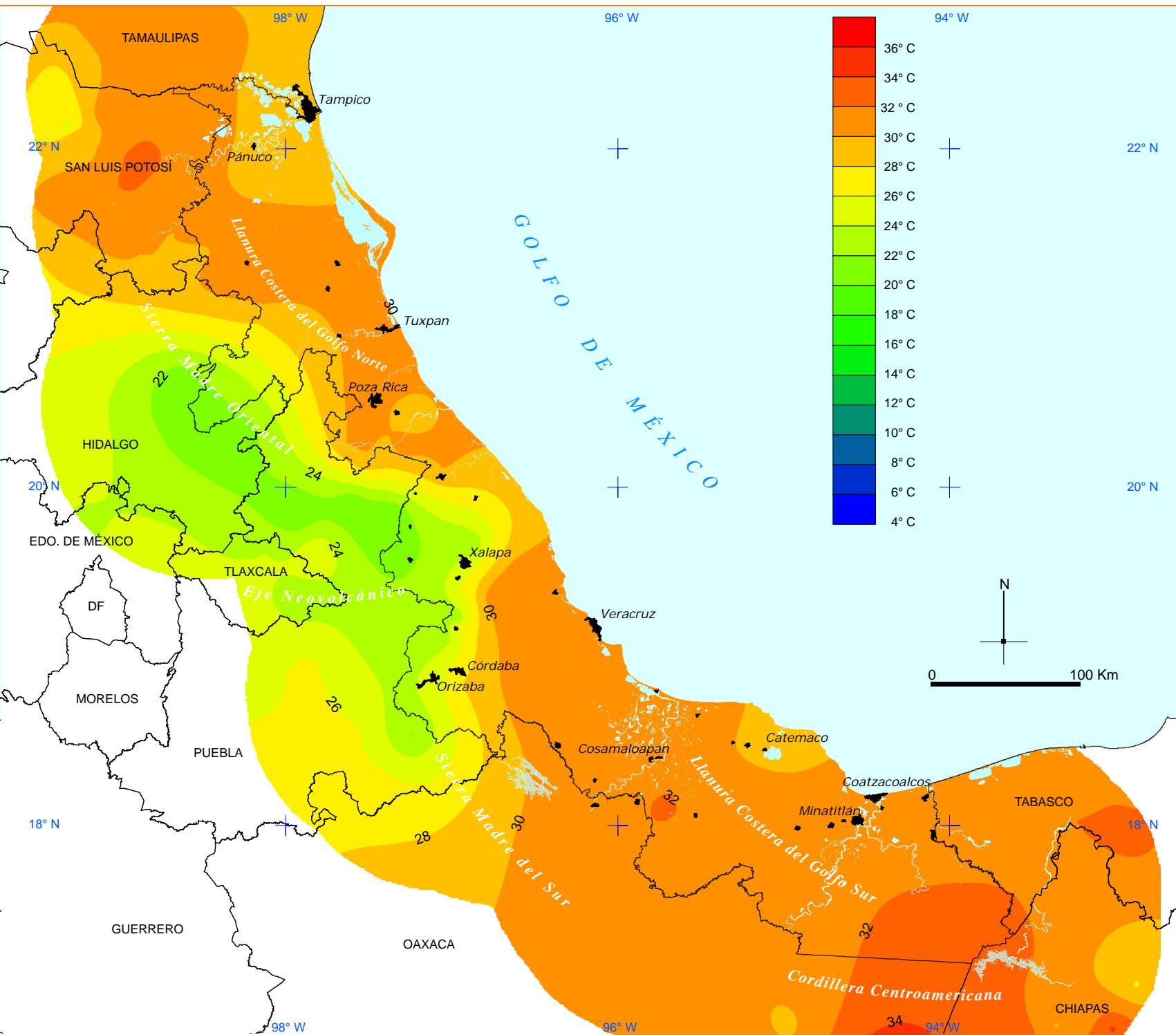
MAPA 2. TEMPERATURA MEDIA ANUAL (°C) 1976-2005



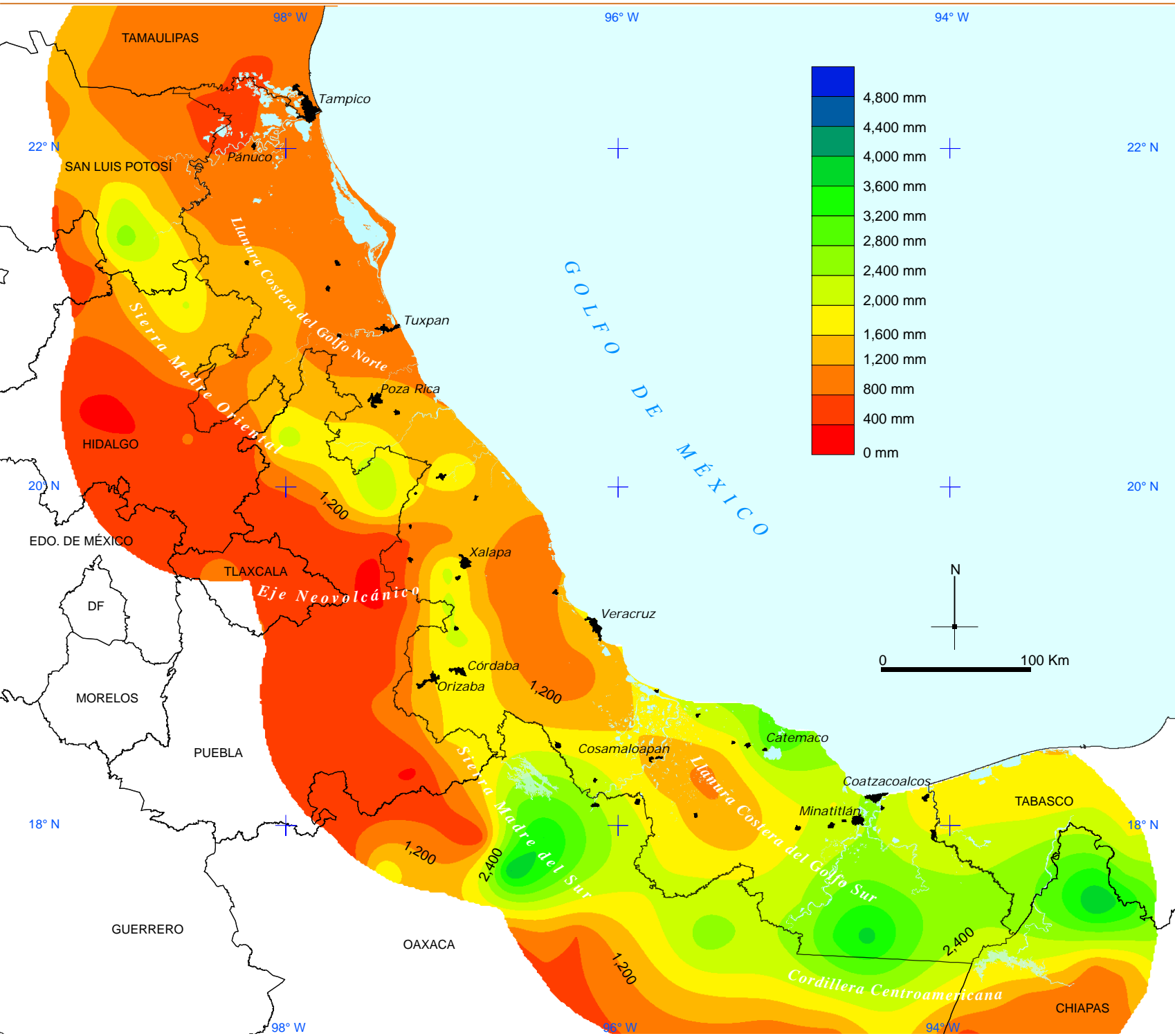
MAPA 3. TEMPERATURA MÍNIMA MEDIA ANUAL (°C) 1976-2005



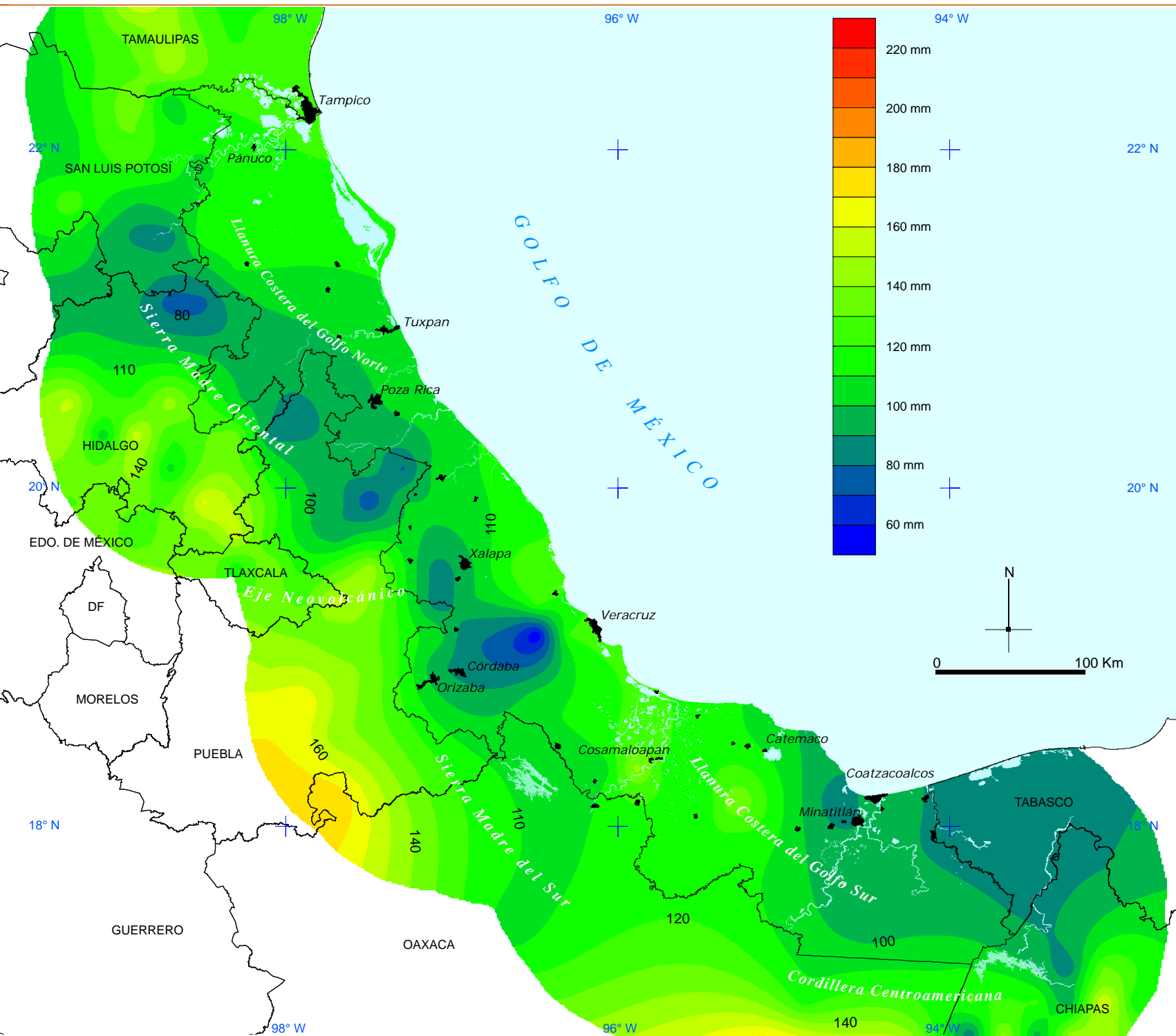
MAPA 4. TEMPERATURA MÁXIMA MEDIA ANUAL (°C) 1976-2005



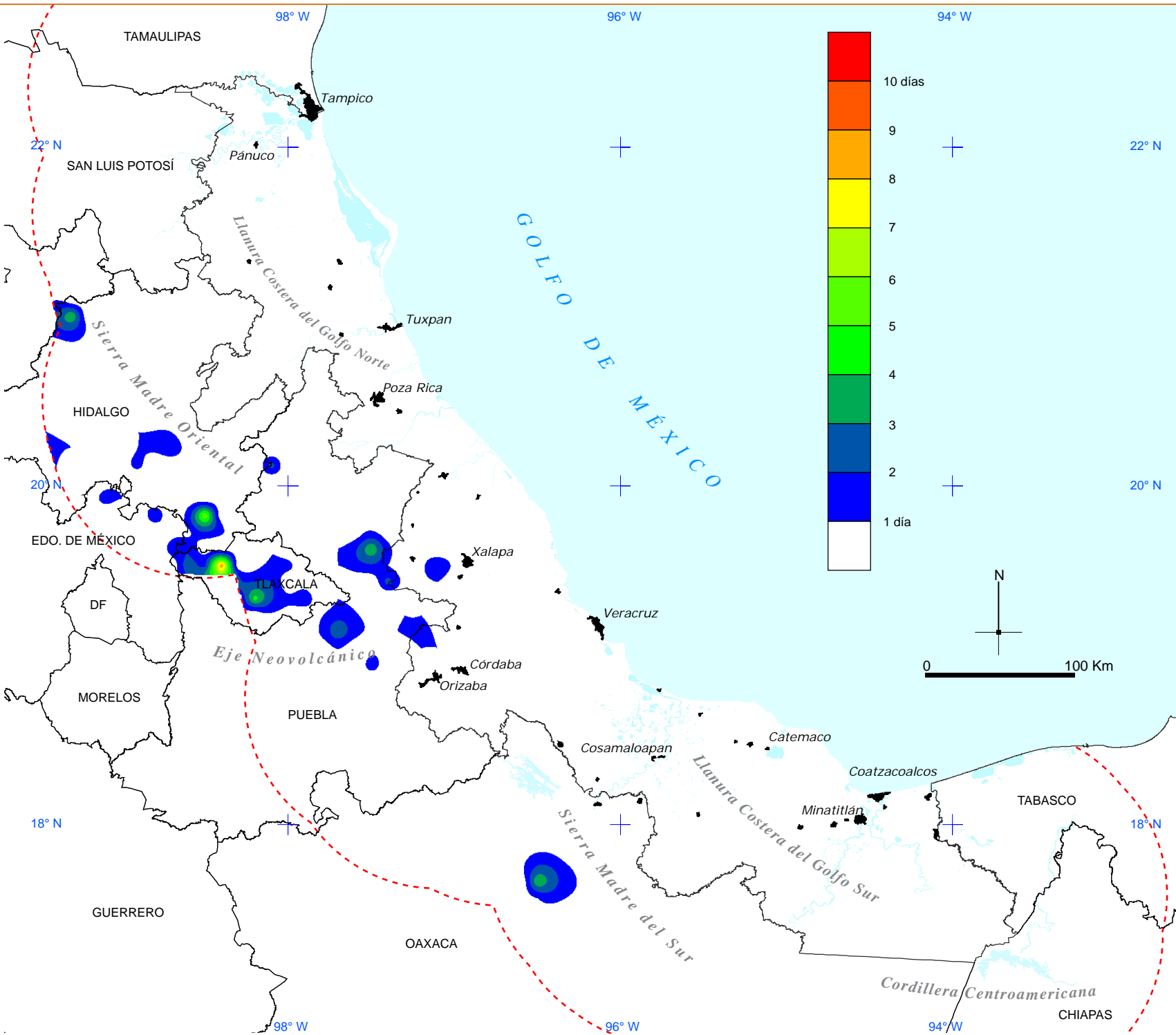
MAPA 5. PRECIPITACIÓN ACUMULADA ANUAL (mm) 1976-2005



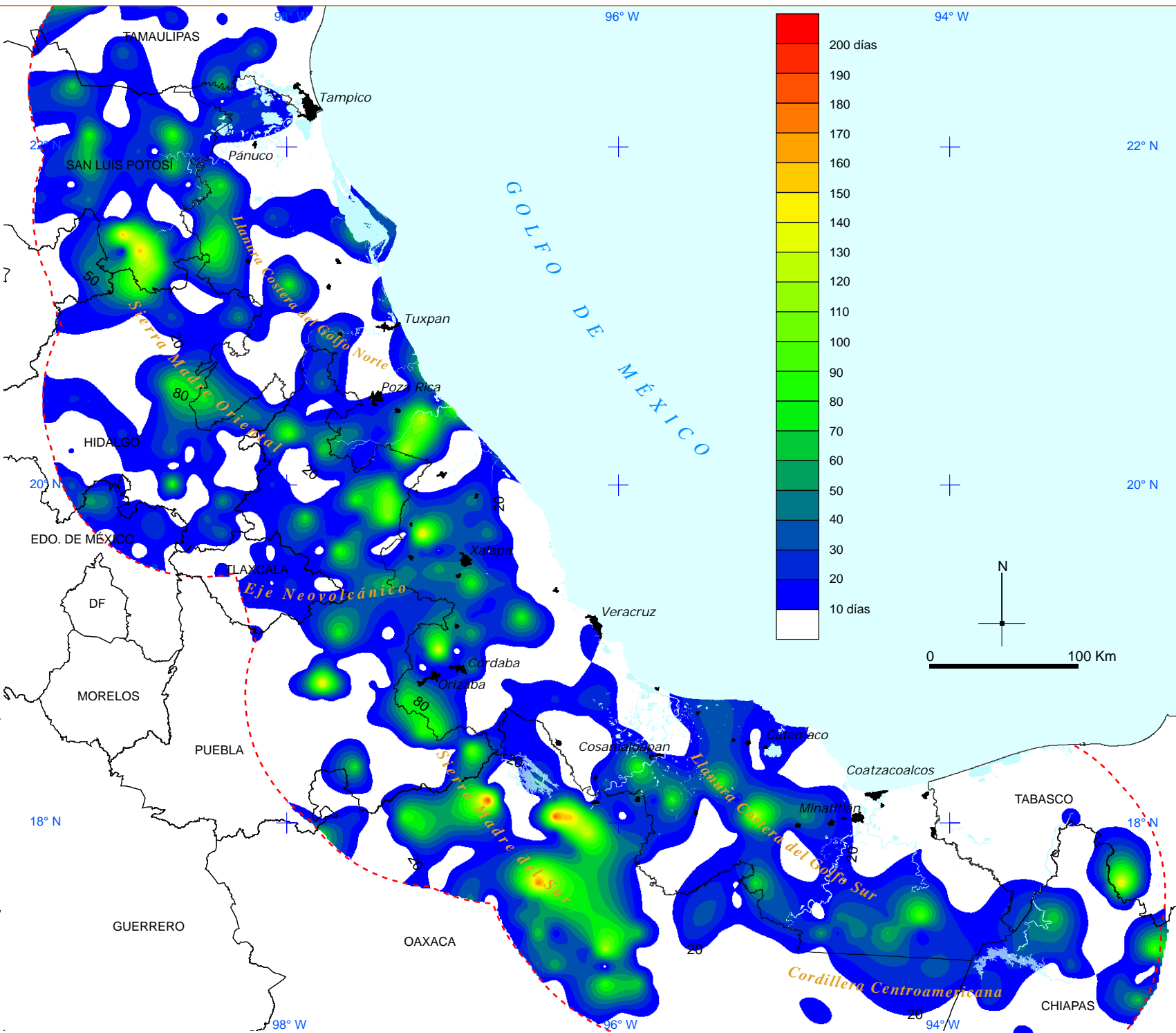
MAPA 6. EVAPORACIÓN MEDIA ANUAL (mm) 1976-2005



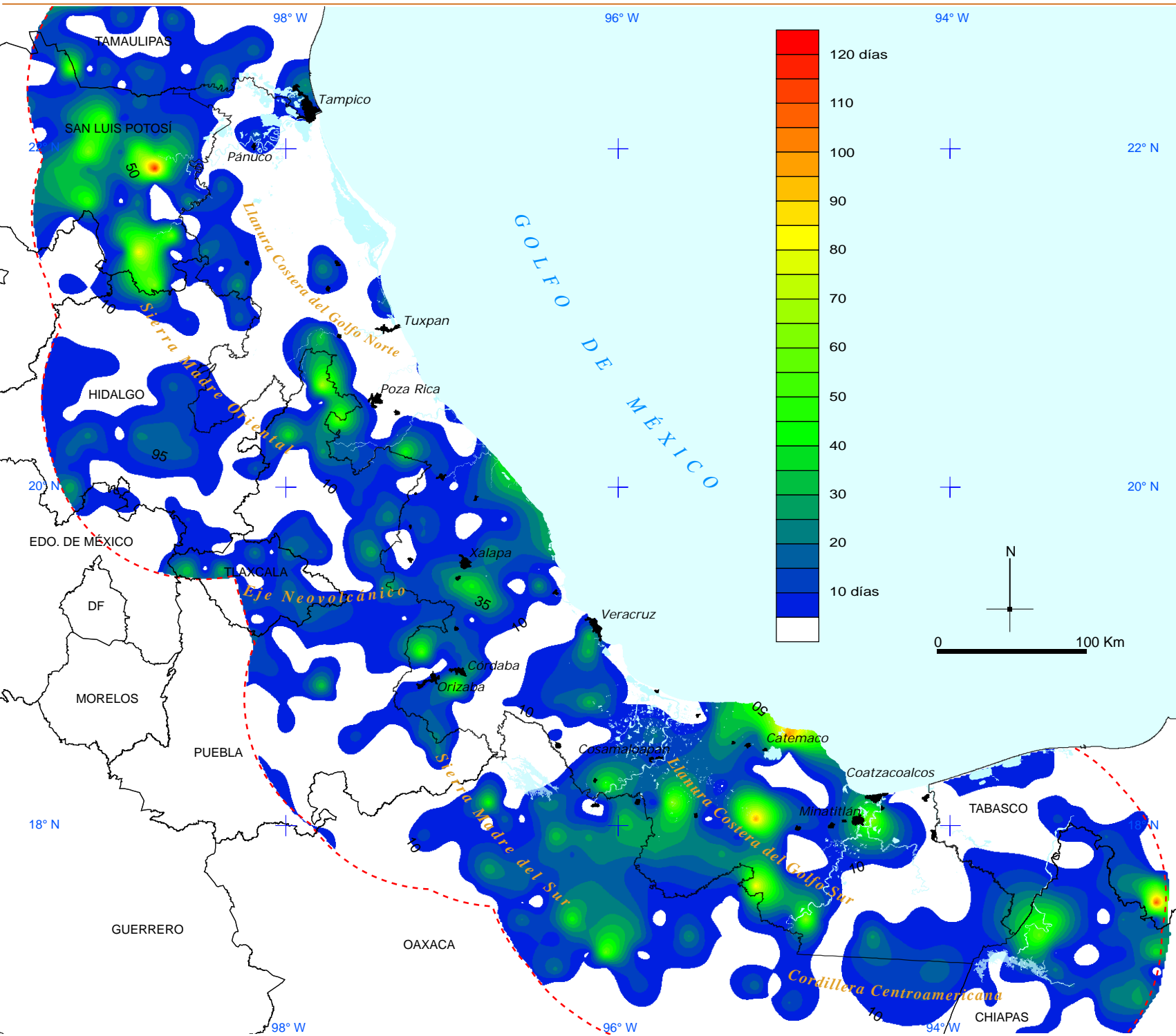
MAPA 7. DÍAS AL AÑO CON GRANIZO 1976-2005



MAPA 8. DÍAS AL AÑO CON NIEBLA 1976-2005



MAPA 9. DÍAS AL AÑO CON TORMENTA ELÉCTRICA 1976-2005



VARIABILIDAD Y CAMBIOS DEL CLIMA EN VERACRUZ

El bosquejo presentado hasta ahora no debe ser estático; hay variaciones y cambios que deben quedar manifiestos en este capítulo.

La variabilidad climática se presenta en un amplio espectro de escalas desde la estacional hasta la de milenios, y se han encontrado trabajos de investigación en todas ellas. La lluvia, siendo de vital importancia para la subsistencia de la sociedad y sus entornos, es objeto frecuente de análisis en esas escalas de tiempo.

A partir de los trabajos clásicos de Mosiño (1958, 1959, 1964), Mosiño y García (1966, 1973), y el más reciente de García (2003), sobre el ciclo anual de la precipitación y sus causas sobre México, se sabe que 1) la lluvia invernal sobre el territorio veracruzano tiene origen en los frentes fríos que incursionan desde las latitudes medias, que al interactuar con la humedad del Golfo de México y la Sierra Madre Oriental producen vientos violentos del norte, lloviznas y descenso de la temperatura generalizados; 2) las lluvias convectivas durante el verano tienen su origen en el calentamiento superficial diurno y la humedad transportada por los vientos alisios desde el Golfo; 3) las ondas del este, las tormentas tropicales y los huracanes ocasionan lluvias intensas en el territorio veracruzano desde junio a noviembre; 4) el sur y sureste mexicanos presentan un mínimo de lluvia durante el verano, conocido como la sequía interestival o canícula, y, aunque no corresponde con una sequía, limita la disponibilidad del agua para el buen funcionamiento de las comunidades; ésta generalmente ocurre en agosto para el estado.

La sequía interestival o canícula, desde su evaluación inicial por Mosiño y García (1966), no había recibido gran atención para explicar su existencia en la climatología regional sino hasta años recientes. Los trabajos de Magaña *et al.* (1999) y de Small *et al.* (2007) representan ideas encontradas respecto al origen y mantenimiento del mínimo en la lluvia a mitad del verano; mientras que en la hipótesis de Magaña *et al.* (1999) la interacción entre las temperaturas de la superficie del océano y la nubosidad en el Pacífico oriental ocupan un lugar preponderante, la hipótesis de Small *et al.* (2007) descansa sobre la retroalimentación entre los vientos alisios del noreste y la subsidencia/divergencia a niveles bajos asociadas a ellos.

A pesar de que los ciclones tropicales impactan Veracruz desde el Golfo de México, el Caribe y el Atlántico, el estado presenta la incidencia más baja de éstos de todos los litorales del país (Jáuregui y Zitácuaro 1995); una característica de las tormentas y ciclones tropicales que impactan las costas veracruzanas es que éstos se desvían hacia el suroeste cuando interactúan con la Sierra Madre Oriental (Zehnder 1993).

Se sabe que la oscilación de Madden-Julian, o MJO, por sus siglas in inglés, es un modo de variabilidad interestacional que influye sobre la lluvia en diversas partes de los trópicos (e.g. Madden y Julian 1994; Jones *et al.*, 2004); la MJO interrelaciona variaciones tanto en el viento y la temperatura de la superficie del océano como en la nubosidad y la lluvia. Barlow y Salstein (2006) muestran que la MJO es capaz de aumentar la lluvia diaria al menos un 25% más en su fase positiva que en la negativa, y este valor se incrementa hasta un 45% sobre el estado de Veracruz y la región del Golfo de México durante los meses de julio a septiembre.

Interanual a decadal

El principal problema en estudios de variabilidad climática a estas escalas es la falta de datos continuos y confiables. Precisamente, Vázquez Aguirre (2007) genera un conjunto de datos de precipitación sobre una rejilla regular a nivel nacional y a escalas temporales que van de las diarias hasta las mensuales para estudiar la variabilidad de la precipitación en el país. Aunque no se menciona, se puede ver que la lluvia en el territorio veracruzano experimenta variabilidad a escalas interanuales y decenales tanto en el invierno como en el verano. Otro hecho interesante es la evidente tendencia negativa a escala mensual y estacional durante el verano en la región.

Consecuencia de la variabilidad de la lluvia a estas escalas es la incidencia de periodos tanto de exceso como de déficit de lluvia. Lluvias por debajo de lo normal pueden causar tanto sequías meteorológicas como agrícolas e hidrológicas con grandes impactos en la agricultura regional. De hecho las sequías pueden llegar a tener una escala continental y una duración de hasta varios años. Aunque las sequías en México no han sido estudiadas extensivamente, Hernández Cerda (1994) en un análisis de anomalías anuales de precipitación (con respecto a la moda y no a la media) presenta una carta

de sequía meteorológica por frecuencia de años muy secos y extremadamente secos para el territorio nacional durante el período 1921-1980. De dicho estudio se deduce que durante ese período la mayoría del territorio veracruzano presenta sequías en entre el 10 y 15 % de los años, excepto la porción sur que tiene sequías en entre 5 y 10% de los años.

A escalas de décadas, el trabajo de Jáuregui (1997) apunta a un incremento de los vientos máximos del norte en la década de los sesenta, sugiriendo una mayor presencia de las invasiones de aire polar en dicho periodo en la vertiente del Golfo de México y, en consecuencia, la ocurrencia de temperaturas invernales anormalmente bajas.

Siglos a milenios

A escalas de tiempo de siglos a milenios, se sabe de episodios como las glaciaciones que ha experimentado el planeta. Estas glaciaciones se relacionan con variaciones periódicas de la órbita de la Tierra alrededor del Sol que reducen la cantidad de radiación solar que llega al planeta (e.g. Adem, 1981); dichas variaciones se deben al movimiento de precesión del eje de rotación del planeta, a cambios en la inclinación angular del eje de rotación respecto a la perpendicular de la órbita del planeta (u oblicuidad), y al cambio de la excentricidad de la órbita del Planeta. Sin embargo, las causas de la Pequeña Edad de Hielo, o LIA por sus siglas en inglés, no son tan claras (e.g. Bond *et al.*, 1997). Esta LIA se extendió entre los años de 1400 y 1850 y fue el último periodo de frío intenso de varios eventos a escalas de centurias a milenios del Holoceno, cuya región fuente fue el Atlántico Norte. Específicamente, la LIA tuvo un impacto en la duración de la época seca sobre la Sierra de Los Tuxtlas, la cual fue acortada debido al aumento de las lluvias invernales (Lozano-García *et al.*, 2007). A su vez, el aumento de lluvias modificó el ecosistema de la región al favorecer las condiciones para la expansión de la vegetación.

Caso de estudio: Inundaciones 2005

Durante el verano del 2005 se presentaron en el estado de Veracruz lluvias intensas que provocaron que la media mensual se rebasara en tan sólo 24 horas en varias localidades del estado. Dichas lluvias provocaron inundaciones y afectaciones en los distintos puntos del mismo y son analizadas desde el aspecto social hasta el meteorológico (Tejeda Martínez *et al.*, 2007). Eventos en la zona de Tecolutla semejantes a los ocurridos

durante el año de 1999 deberían ser puestos en contexto de la variabilidad climática en estudios futuros. Casos de estudio y análisis retrospectivos de anomalías ayudarían a un mejor entendimiento de la variabilidad climática regional.

Teleconexiones

Las teleconexiones o patrones de teleconexión pueden durar varias semanas, meses o inclusive hasta años, reflejando así la variabilidad climática interanual o interdecenal de la atmósfera. Algunos de esos patrones o modos de variabilidad pueden abarcar las cuencas oceánicas enteras y los continentes, y por su estructura pueden influir en el tiempo y clima sobre el territorio nacional. Tres modos de variabilidad destacan en la literatura: El Niño/Oscilación del Sur, la Oscilación Decenal del Pacífico y la Oscilación Multidecenal del Atlántico, respectivamente conocidos, por sus siglas en inglés, como ENSO, PDA, y AMO.

ENSO

El Niño/Oscilación del Sur, ENSO, se monitorea siguiendo las inestabilidades del sistema atmósfera-océano sobre el Pacífico ecuatorial (e.g. Rasmussen, 1985; Trenberth, 1997). Durante la fase cálida del fenómeno, o El Niño, el Pacífico ecuatorial central presenta anomalías positivas en la temperatura de la superficie del océano. La consecuencia de tal calentamiento es la disrupción del tiempo, no sólo en la zona de las anomalías sino sobre las áreas continentales también: lluvias intensas se presentan en las regiones donde climáticamente no llueve mucho, y la lluvia escasea sobre áreas donde climáticamente la lluvia cae en abundancia (e.g. Ropelewski y Halpert 1987, 1989, 1996). En la fase fría de ENSO, o La Niña, los patrones anómalos del tiempo se invierten nuevamente. ENSO es una oscilación irregular que tarda de 3 a 7 años para pasar de un evento cálido a uno frío, y viceversa, si bien no siempre un evento cálido es seguido por otro frío.

Aunque en las pasadas dos décadas varios trabajos han analizado los efectos de ENSO sobre el clima de México (e.g. Cavazos y Hastenrath, 1990; Magaña, 1999; Magaña *et al.*, 2003; Mendoza *et al.*, 2006), muy poco se ha hecho específicamente sobre el estado de Veracruz. Uno de esos pocos trabajos es el de Pereyra Díaz *et al.* (1994), que analiza el efecto que tiene ENSO sobre la sequía interestival, encontrando que el déficit de lluvia es menor o desaparece en años de El Niño para casi todo el estado, excepto para la región montañosa del centro. A pesar del posible aumento anómalo

de la lluvia durante el mes de la canícula durante años de El Niño, Pereyra Díaz y Sánchez (1995) encuentran que El Niño es capaz de inducir sequías multianuales sobre el territorio veracruzano. En esta misma línea, Jáuregui y Zitácuaro (1995) hacen notar que, durante años de El Niño, la disminución de la actividad ciclónica en el Atlántico tropical y Golfo de México inciden en la disminución del número de ciclones que afectan a Veracruz.

El impacto de ENSO sobre territorio mexicano ha sido evaluado recientemente por Magaña *et al.* (2003) y Vázquez (2007), quienes han encontrado que durante inviernos en periodos de El Niño se observan más lluvias en el norte y centro del país, inclusive en la península de Yucatán, pero disminuyen a lo largo del territorio veracruzano; en inviernos, bajo periodos de La Niña, la precipitación disminuye en las mismas zonas del país respecto a las observadas bajo condiciones de El Niño, pero sólo en la mitad sur del territorio veracruzano, donde se observa un aumento en la precipitación invernal, en contraste con la mitad norte, donde la precipitación decrece. Otro aspecto importante del clima invernal es la presencia de nortes, que se incrementan durante episodios de El Niño más que en los de La Niña; el aumento en los nortes acarrea un descenso de la temperatura en la región, al aumentar la incursión de masas de aire polar.

En periodos de El Niño, durante el verano, las condiciones conllevan a severas sequías en la mayor parte del territorio mexicano, exceptuando las penínsulas, mientras que en los veranos bajo condiciones de La Niña la lluvia regresa a su esquema normal o incluso lluvias por arriba de lo normal en la mayor parte del país. El territorio veracruzano es uno de los más afectados por el déficit de lluvias durante eventos de El Niño, y aunque la situación mejora en los veranos de La Niña, la lluvia se presenta por debajo de lo normal, particularmente en el centro del estado. La sequía que se observa durante El Niño está asociada a mecanismos tales como una subsidencia reforzada por causa de un desplazamiento hacia el sur de la Zona Intertropical de Convergencia y un menor número de ciclones tropicales en los mares intra-americanos, como muestran Jáuregui y Zitácuaro (1995).

Resultados similares los obtienen Miranda *et al.* (2007), quienes encuentran también, para el territorio veracruzano, una disminución de precipitación anual bajo condiciones de El Niño, principalmente en el norte y centro del estado. Mientras tanto, condiciones de La Niña traen consigo precipita-

ciones normales e incluso por encima de ella en todo el territorio veracruzano, más aún en el sur del estado, en aparente contradicción con los resultados de Magaña *et al.* (2003); dicha aparente contradicción se debe, probablemente, al uso de datos anuales en vez de estacionales en el estudio de Miranda *et al.* (2007).

La agricultura en el estado de Veracruz depende en gran medida de condiciones climáticas óptimas, que como se mencionó arriba, pueden ser perturbadas por fenómenos como ENSO. Afectaciones a la agricultura de la región debido a ENSO no sólo se asocian al exceso o déficit de lluvia sino también a la presencia de eventos tales como heladas y granizadas durante fases críticas del desarrollo de los cultivos. Tales asociaciones entre ENSO y heladas y granizadas con impacto en el cultivo del maíz han sido identificadas por Contreras Hernández (2003).

PDO

La Oscilación Decenal del Pacífico, PDO, es un modo de variabilidad del clima en el Pacífico de las latitudes medias con características espaciales similares a las de ENSO pero con una escala temporal de décadas (Mantua *et al.*, 1997). Sus fases frías y cálidas duran del orden de 20 a 30 años, con anomalías importantes en el sector del Pacífico Norte y Norteamérica, y anomalías secundarias en los trópicos. Las fases frías y cálidas de dicha oscilación afectan el clima sobre Norteamérica no sólo en invierno sino en verano también (Nigam *et al.*, 1999; Barlow *et al.*, 2001) y de manera distinta a los efectos de ENSO.

La modulación del clima por la PDO sobre el territorio mexicano, y en especial sobre Veracruz, no es clara. En el análisis de variabilidad de la precipitación hecho por Vázquez Aguirre (2007) se sugiere a la PDO como un posible modulador de la precipitación sobre México pero no se presenta tal evidencia. Sin embargo, en el trabajo de Pavia *et al.* (2006) el papel que juega la PDO, cuando se superpone a eventos de ENSO, es un tanto más claro. En general se observa que aunque El Niño favorece condiciones de lluvias por arriba de lo normal en los veranos, cuando la PDO está en su fase fría ocurre un déficit de lluvias en la parte central del territorio veracruzano. Por otro lado, las lluvias se incrementan en esa misma región en el invierno si la PDO está en su fase cálida. Las temperaturas veraniegas se incrementan por arriba de lo normal durante episodios de El Niño bajo la fase cálida de la PDO.

AMO

La Oscilación Multidecenal del Atlántico, AMO por sus siglas en inglés, es una oscilación de la temperatura de la superficie del océano Atlántico a escala de décadas que influye el clima de la región afectando tanto a Europa, como a África y Norteamérica. Esta oscilación se define a partir de las temperaturas superficiales del Atlántico Norte después de haber eliminado cualquier tendencia lineal (e.g. Kerr, 2000; Enfield *et al.*, 2001). Esta oscilación se relaciona con anomalías en la lluvia en varias partes del Globo, incluyendo sequías sobre Norteamérica y frecuencia de huracanes (e.g. Knight *et al.*, 2006; Zhang y Delworth, 2006).

En el análisis realizado por Vázquez Aguirre (2007) se sugiere que la AMO tiene un efecto sobre la lluvia del verano en el país. En particular, la fase positiva de la AMO se relacionaría con anomalías positivas de la lluvia sobre el territorio veracruzano, tanto a escala mensual como estacional, siendo el mayor impacto sobre la parte central del estado. Dada la relación que tiene la AMO con la frecuencia de huracanes sobre el Caribe, sería benéfico analizar esta relación y su impacto sobre el territorio veracruzano.

CAMBIO CLIMÁTICO ANTROPOGÉNICO

Existe el consenso científico de que el calentamiento global es consecuencia de la acción del hombre por su continuada emisión de gases de efecto de invernadero hacia la atmósfera (IPCC, 2007). Ante esta circunstancia, el clima durante el presente siglo a escala global se verá alterado y con él, los distintos ecosistemas. Indudablemente, las respuestas de los ecosistemas y de las comunidades dependientes de ellos serán de vital importancia para su supervivencia ante el eventual cambio climático, que a pesar de ser global en su alcance, tendrá características regionales.

Las respuestas de una sociedad ante esos cambios han de partir de estudios de impacto ante los posibles escenarios de cambio climático. De especial interés para el estado de Veracruz son las modificaciones del ciclo hidrológico y su impacto en la agricultura y ganadería, así como en sus recursos forestales, control de inundaciones y propagación de enfermedades; igualmente importante es el impacto del ascenso del nivel del mar a lo largo de las zonas costeras, que conlleva pérdidas de zonas habitables y hábitats naturales, así como la intrusión de agua salina por los sistemas ribereños y la contaminación de los mantos acuíferos.

En la década de los noventa y bajo los auspicios del Departamento de Estado de los EU, se inició en México lo que se conoce como Estudio de País, para elaborar investigaciones de impacto ante el cambio climático (e.g. Gay *et al.*, 1994, 1995). De esos estudios destacan los de Ortiz-Pérez (1994) y el de Garduño (1995), quienes apuntan los daños a los recursos naturales y de infraestructura de las costas veracruzanas por un posible aumento del nivel del mar. Similarmente Conde Álvarez y Palma Grayeb (2005) analizan, con proyecciones más recientes emanadas del Tercer Informe de Evaluación (IPCC, 2001), el impacto del ascenso del nivel del mar para tierras veracruzanas y concluyen que existe una situación de vulnerabilidad en el territorio, tanto para la infraestructura de las comunidades como para la agricultura regional.

Cambios regionales de la temperatura, como del ciclo hidrológico, consecuencia de un cambio climático inducido por el hombre, impactarían negativamente tanto en la agricultura como en la propagación de enfermedades infecciosas. Estudios hechos por Conde Álvarez (2003), Palma Grayeb (2005), Conde Álvarez y Palma Grayeb (2007) y Gay *et al.*, (2006) concuerdan en que los cultivos de maíz, caña y café en general se verían afectados negativamente. Asimismo, cambios en la temperatura y lluvia en el estado podrían influir en la incidencia de brotes epidémicos de enfermedades infecciosas, como lo sugiere Ramírez Salvador (2006) en su análisis para la ciudad de Coatzacoalcos.

