

EL CONCEPTO DE REGIÓN EN LOS ESTUDIOS CLIMATOLÓGICOS

Leticia Gómez Mendoza

Introducción

El clima es el conjunto de condiciones atmosféricas típicas en un periodo largo de tiempo. Estas condiciones están determinadas por la posición geográfica, latitud, longitud y latitud, su cercanía al mar, el tipo de cubierta vegetal y el grado de impacto antrópico de un lugar determinado. El clima forma parte de los procesos del medioambiente al ser resultado de ciclos biogeoquímicos, ciclos solares e intercambios energéticos. Igualmente, el clima es resultado de todos los componentes e interacciones del llamado sistema climático, donde no sólo juegan los factores físicos del medio como la atmósfera, sino también los de criósfera, la hidrósfera, la litosfera, la biosfera, así como todos los elementos y procesos antrópicos transformadores del medio: ciudades, emisiones de gases de efecto invernadero, contaminación y uso del suelo.

El clima puede ser determinante en los patrones espaciales de los elementos físicos sobre la superficie planetaria, tales como la distribución espacial de la vegetación, la biodiversidad y las geoformas. En este sentido, el clima puede ser considerado un proceso dentro de la esfera geográfica, ya que integra al tiempo y el espacio en su dinámica. La forma de representar esta complejidad climática planetaria es mediante los modelos globales del clima que presentan el estado atmosférico con una resolución espacial generalmente muy pobre. Es por ello que en los proyectos nacionales, regionales o locales de adaptación al cambio climático es necesario bajar la escala de dichos modelos globales a una resolución espacial más fina, de tal manera que se puedan obtener escenarios locales climáticos para diseñar políticas y programas de adaptación. Este documento presenta el concepto de región en los estudios climáticos, explica cómo se calculan los cambios en los climas locales a partir de las salidas de los modelos climáticos globales y

cómo se pueden aplicar estos resultados en la toma de decisiones hacia la adaptación y la mitigación del cambio climático.

El cambio climático y la geografía

Uno de los conceptos que relacionan los campos de estudio tanto de la geografía física como de la geografía humana es el concepto de escala geográfica. Recientemente, algunos autores han establecido que otro posible punto de unión entre la geografía física y la humana son los estudios de cambios en los patrones espaciales y temporales del cambio ambiental y climático que impactan positiva o negativamente sobre los socioecosistemas (Harrison *et al.*, 2004; Pitman, 2005). Schumm y Lichty (1965) incorporaron la relación espacio-tiempo y mostraron cómo los diferentes componentes del paisaje pueden variar en escala espacial y cómo éstos pueden cambiar de estratos de la dependencia del tiempo a la independencia del tiempo, mientras que McDowell, Thompson y Bartlein (1990) explican la articulación de la causa y el efecto del análisis del cambio climático en el área de estudio de la geografía.

Una de las múltiples tareas de la geografía es estudiar los complejos ambientales y sociales a cualquier escala, ya sea local, municipal, regional, en países o en grandes regiones del mundo, tanto en forma sintética como temática. La geografía regional es la disciplina que estudia los sistemas o complejos geográficos (Pitman, 2005). Si se reconocen las regiones, los paisajes y las relaciones que guardan con los actores sociales son sistemas complejos, por lo que se puede decir que los sistemas socioambientales tienen relaciones complejas con su clima. Por lo tanto, los conceptos de escala y cambio climático representan una oportunidad para comprender las causas y los impactos de la variación antrópica del clima como su posible asimilación por parte de las comunidades humanas. Dicha complejidad climática-antrópica sólo puede ser abordada al reconocer la región como concepto espacial integrador.

El sistema climático

Para comprender qué se entiende por región en las ciencias atmosféricas se debe comenzar indicando cómo actúa el clima a escala planetaria. Las simulaciones atmosféricas de los modelos de circulación global integran valores

del llamado sistema climático. El sistema climático está integrado por la atmósfera, la litósfera, la criósfera, la hidrósfera y la biosfera, así como las actividades humanas (Pexioto y Oort, 1993; IPCC, 2007). Los modelos simulan las interrelaciones entre todas esas esferas para generar escenarios de cambios en la temperatura y la precipitación planetaria. Estas relaciones son eminentemente geográficas e integran la comprensión de los patrones y procesos que estudian tanto la geografía como otras ciencias de la Tierra. Ahora bien, las escalas planetarias del clima son necesarias para comprender la dinámica a escala mundial. Sin embargo, cuando se trata de entender cuáles pueden ser los efectos del clima sobre un lugar específico, la resolución temporal de los modelos globales resulta insuficiente. Por ello, es necesario entender cómo actúa el clima a resoluciones espaciales más finas. Es en este punto donde los conceptos geográficos de escala, resolución, patrones espaciales y procesos geográficos cobran importancia para entender cómo el cambio climático puede afectar o beneficiar actividades económicas, sociales y de aprovechamiento de los recursos naturales.

LA ESCALO-DEPENDENCIA Y LA ESCALO-INDEPENDENCIA

En el ambiente es posible encontrar patrones y procesos. Un patrón se refiere a una configuración especial en el paisaje del cual se puede evaluar su tamaño o superficie, su ubicación geográfica o la distribución de varios de ellos. Mientras que un proceso se refiere a las características dinámicas de la ocurrencia y la evolución de fenómenos e incidentes en el paisaje (Turner, 1989; Fu *et al.*, 2011). De acuerdo con Ge, Jin, Stein, Chen, Wang, Wang, Cheng, Bai Liu y Atkinson (2019), la escales-dependencia se presenta cuando los valores o datos espaciales dependen de la escala. Entonces, si cambia la escala espacial, cambia el valor de las variables. Por otra parte, la escales-independencia indica que el patrón geográfico tiene propiedades independientes de la escala. Entonces, si cambia la escala, el valor de la variable es el mismo. En la medida que se identifique la escales-dependencia y la escales-independencia, se podrán hacer pronósticos de las variables geográficas que pueden manifestarse a través los cambios de resolución espacial (Cheng, 1999; Li y Cai, 2005). En este sentido, los modelos terrestres, en general (por ejemplo, los modelos climáticos, ecológicos, hidrológicos, edafológicos), pueden

ofrecer una serie de ecuaciones que corresponden al entendimiento de un proceso en la escala de interés y deben explicar si existe escalo-dependencia o escalo-independencia.

Ahora bien, las relaciones entre los patrones y los procesos nos llevan a incorporar el concepto de región. Desde el punto de vista físico, la región se refiere a un espacio sobre la superficie cuyos patrones espaciales y procesos presentan cierta homogeneidad en donde se ubican ciertas actividades humanas que consolidan dichos patrones y procesos. De acuerdo con Fernández (1975) y Ortiz (2019), la región natural es aquella en la que prevalece un criterio de homogeneidad, es decir, aquellos paisajes que poseen cierta uniformidad. El concepto de región geográfica se adquiere cuando se incluyen la integración de elementos culturales y el análisis económico.

Muchas definiciones pueden incluirse en los estudios geográficos sobre el concepto de región, desde el pensamiento geográfico del siglo XIX hasta la actualidad (véase Ramírez, 2007). Al respecto, se puede decir que los términos lugar, región y territorio han variado de acuerdo con las tendencias de pensamiento geográfico. Algunos pensadores como Taylor (1991) resaltan el papel de las comunidades humanas en la conformación de las regiones, ya que indica que varias organizaciones, instituciones y actores involucrados en la región pueden tener diferentes estrategias en relación el significado y la función de la región, así como de su identidad (Allen *et al.*, 1998). Sin embargo, en el concepto regional del clima imperan elementos del medio físico que estudió la geografía. Una de las experiencias en el campo de la geografía física es la determinación del clima regional y la evaluación de la vulnerabilidad que pueden indicarse a escalas regionales y en sus implicaciones en la toma de decisiones ante el cambio climático.

El concepto de región en las ciencias atmosféricas

En las ciencias del clima se aplica el concepto de región que se refiere a la cobertura geográfica de las simulaciones de los cambios esperados en la temperatura y la precipitación y que se calculan a partir de las condiciones atmosféricas propias de un espacio en la atmósfera. La llamada escala regional dentro del campo de las ciencias atmosféricas se entiende como el dominio geográfico en donde suceden fenómenos meteorológicos de dinámica

atmosférica propia. Dichos procesos obedecen a la latitud, a los fenómenos sinópticos más comunes y a los cambios estacionales dentro del patrón anual del clima. Así, por ejemplo, en regiones tropicales son comunes los huracanes, las ondas tropicales y la isothermalidad en el clima anual, mientras que en latitudes medias dominarán los sistemas ciclónicos extratropicales, los frentes fríos y una marcada estacionalidad en las temperaturas.

Por otra parte, otra acepción de región dentro de las ciencias atmosféricas se aplica a la resolución espacial de las salidas de los modelos de circulación general de la atmósfera que indican los cambios probables en la temperatura y precipitación a escala global. Para entender mejor cómo se concibe la climatología, la escala, los patrones y los procesos para luego proyectarlos a los escenarios climáticos y su aplicación a la escala local, es necesario entender las escalas geográficas de la predicción atmosférica.

Las escalas espaciales y temporales en la predicción meteorológica y climática

Los fenómenos meteorológicos suceden en diferentes escalas y rangos de tiempo. Dependiendo de la unidad de tiempo y el tamaño de la superficie en que se presenten, estos eventos se pueden caracterizar como climáticos y meteorológicos. Los eventos meteorológicos no van más allá de las dos semanas. Mientras que los eventos climáticos abarcan escalas mensuales y multianuales, en la escala temporal los fenómenos de microescala suceden entre los 100 metros y en horas o fracciones, por ejemplo, las turbulencias que se presentan en los campos agrícolas o remolinos. La mesoescala se refiere a aquellos fenómenos que se presentan entre los 1000 metros y a nivel de horas o días, tales como las tormentas, los tornados o la nubosidad (Oke, 1983). Las escalas sinópticas son aquellas que se presentan entre los cientos de kilómetros y las semanas, tales como los ciclones tropicales y los frentes fríos. Eventos con periodicidad mensual, anual y multianuales se conocen como eventos climáticos de ciclos estacionales, por ejemplo, El Niño, variaciones climáticas de largo plazo como la Oscilación Decadal del Pacífico y la Oscilación Multidecadal del Atlántico (Steyn *et al.*, 1981).

MULTIESCALAS EN LOS SISTEMAS DE MODELACIÓN DEL CLIMA TERRESTRE

Los modelos de simulación del clima tienen como salida resultados sobre diversos elementos climáticos en diversos tamaños de gradilla o cuadrícula de datos para un dominio espacial de sus corridas. Existen modelos de simulación desde los centímetros y un kilómetro cuadrado como las simulaciones numéricas directas. Los modelos de nubes, los modelos de pronóstico y los modelos de pronóstico numérico van de las decenas hasta los cientos de kilómetros cuadrados de su resolución espacial. Finalmente, se encuentran los modelos de resoluciones espaciales más bajas (cientos de kilómetros cuadrados por pixel). Entre ellos se encuentran los modelos de modelado de multiescala y de clima global (GCM, por siglas en inglés) que cubren todo el planeta. Finalmente, están los modelos de clima regional (RCM, por sus siglas en inglés) con detalle desde un kilómetro cuadrado.

EL NIVEL DE PREDICCIÓN

La predicción mediante modelos tiene un alcance espacial y temporal. Cada modelo tendrá un valor de incertidumbre. Es posible pronosticar desde minutos, horas, días, semanas, meses, hasta cien años en el futuro. Los modelos de pronóstico del estado del tiempo no pueden pronosticar a nivel de cientos de años. Lo mismo que los modelos del clima no podrán pronosticar escalas de tiempo atmosférico. Así, cada modelo tendrá utilidad para diversas actividades humanas: peligros, agricultura, inundaciones, generación de energía, usos hídricos, sequías, ondas de calor, entre otros. En ocasiones, las habilidades o bondades de los modelos pueden ser más precisas que las necesidades de los propios usuarios.

LOS ANÁLISIS ATMOSFÉRICOS Y EL SISTEMA CLIMÁTICO

Las predicciones atmosféricas y los escenarios climáticos incluyen información del estado atmosférico provenientes de datos instrumentales y datos proxy (registros de elementos naturales de la tierra tales como los anillos de crecimiento de los árboles, el polen fósil o las columnas estratigráficas

donde se encuentran señales del cambio en el clima en periodos previos a los registros con instrumentos meteorológicos). Estas simulaciones incluyen tanto las condicionantes del clima previo y actual como las emisiones de gases de efecto invernadero, así como elementos de desarrollo económico de escala mundial. Los modelos de simulación del clima son de escala planetaria e incluyen al sistema climático con todos sus subcomponentes: biosfera, atmósfera, hidrosfera, litosfera, criósfera y actividades humanas. Los análisis atmosféricos y pronósticos meteorológicos requieren un análisis de los aspectos continentales, oceánicos y superficie oceánica como condiciones de frontera (IPCC, 2007). Por ejemplo, la temperatura de la superficie del mar tiene influencia en la primera capa atmosférica (tropósfera). También son necesarios los datos de la superficie terrestre como la vegetación, el contenido de humedad y la rugosidad, ya que influyen en el comportamiento atmosférico al intercambiar energía y masa (IPCC, 2007). Por otra parte, la nieve sobre la superficie y el hielo sobre océanos y lagos tienen influencia, ya que cambian el albedo y la forma como se trasfiere el calor de la superficie terrestre a la atmósfera y cómo cambian la rugosidad de la superficie (Ropelewski y Arkin, 2019).

LA RESOLUCIÓN ESPACIAL DE LOS MODELOS

Diversos modelos globales pueden dar resultados de los cambios esperados en la temperatura y la precipitación para cualquier parte del mundo. Cada uno de estos modelos tiene diferente resolución espacial y temporal. Gráficamente, los resultados de los modelos se presentan en forma de malla o gradilla. El tamaño o la resolución de la gradilla varía de modelo en modelo. Gradillas más finas implican mayor precisión espacial en la asimilación de los datos y mayor capacidad técnica en el procesamiento de cómputo de los datos y las ecuaciones físicas.

LA RESOLUCIÓN ESPACIAL DE LOS DATOS CLIMATOLÓGICOS

Los datos obtenidos por estaciones climatológicas de superficie, radiosondeos atmosféricos, barcos y aeronaves que forman parte del sistema de

observación mundial del clima son almacenados y procesados en forma de gradillas o mallas. Estos valores se calculan por modelos atmosféricos cuyas salidas son bases de datos en gradillas uniformes en latitud y longitud (Ropelewski y Arkin, 2019). Algunos modelos pueden tener resoluciones espaciales de 2.5 grados de latitud y 2.5 de longitud, otros de 5 x 5 grados de latitud y longitud, y algunos otros de resolución más gruesa. Esta resolución se debe a que multitud de sitios de observación meteorológica han dejado de funcionar desde mediados del siglo xx. Para resolver este problema ha surgido el reanálisis, que puede utilizarse para fines de aplicación práctica en sectores que pueden verse afectados por el clima o cuya actividad depende del clima.

De esta manera, se recomienda que, si un sector y un sitio de interés requiere saber el comportamiento del clima y no cuenta con el monitoreo climático con alguna estación local, se debe recurrir al reanálisis y elegir la gradilla más cercana al sitio para obtener los datos climáticos de interés. A este procedimiento se le llama reescalamiento hacia abajo, *downscaling* o regionalización. En este punto es donde se aplican los arreglos espaciales del clima, tal como lo indica Ortiz, “desde los niveles altos de la atmósfera hasta la superficie terrestre se observa que existen arreglos variados con expresión o diseño distinto dispuestos en un patrón estratificado; en la medida en que modificamos la escala de observación o acercamiento, surge el proceso de descomposición espacial de un todo que habrá de zonificarse de acuerdo con el arreglo de las partes componentes” (Ortiz, 2019: 54).

Se puede decir que el clima regional está determinado, en gran medida, por la topografía y el uso de suelo. Las geoformas, la orientación de las laderas y la altitud del terreno modifican los patrones del calentamiento atmosférico y de la circulación del aire. La existencia de vegetación de diferentes comunidades vegetales (pastos, arbustos o árboles) ofrece distinta resistencia al viento y modifican la circulación local atmosférica. Lo mismo puede decirse de los diversos usos de suelo: las zonas urbanas, áreas agrícolas o rurales configuran diferentes patrones espaciales que provocan diferentes patrones de calentamiento de la superficie y, por lo tanto, patrones locales de circulación atmosférica (Cubasch y Cess, 1993). Así, los cambios en el uso de suelo provocan cambios en los procesos de intercambio de calor, humedad, momento y elementos químicos con la atmósfera, de tal manera que se pueden generar cambios locales del clima asociados con

las modificaciones en el albedo, la rugosidad del terreno y la humedad atmosférica y del suelo (Bonan, 2015).

El *downscaling*

Escalar significa transferir información entre escalas. En meteorología y climatología, se ha aplicado el concepto de reescalamiento espacial para modelos de climáticos (Berrocal *et al.*, 2012). Se conoce como *downscaling* al proceso de estimación del valor o los parámetros de un sitio específico a partir de los valores obtenidos de una gradilla de un reanálisis o modelo (Ropelewski y Arkin, 2019). El *downscaling* o desagregación hacia abajo significa predecir datos o información a una resolución espacial más fina o una escala temporal más corta (Atkinson, 2013). Con base en los modelos de clima de escala global, se pueden construir escenarios del clima a nivel de región, es por ello que el clima puede considerarse una variable física escalo-dependiente. Existen técnicas de reescalamiento de las salidas de los modelos que permiten incorporar los cambios de temperatura y la precipitación que se deriva de los modelos globales e incorporar los datos climatológicos de sitios en una región o localidad. El *downscaling* permite incorporar todos los elementos de la dinámica atmosférica local que no incorporan los modelos de escala global. Por ejemplo, las brisas locales, las variaciones estacionales y las diurnas de la temperatura, los eventos de precipitación y las características físicas del territorio como la cobertura vegetal y los vientos locales provocan que el clima de una región sea diferente de otra. Estas particularidades sólo son captadas por los datos climáticos *in situ* a través de largos periodos de registro. Algunos reescalamientos de los modelos del clima a nivel regional pueden realizarse a solicitud del usuario, por ejemplo, si a un tomador de decisiones le interesa identificar qué sucederá con el cambio climático en los recursos hídricos, el modelo regional del clima puede incorporar un submodelo del ciclo hidrológico regional siempre y cuando se cuente con estos datos. Así, los modelos regionales del clima pueden identificar los impactos del cambio climático y realizar una evaluación de estos en la escala de clima más local.

En los estudios de ciencias de la Tierra en general, y en específico para las ciencias atmosféricas, los procesos de *downscaling* pueden ser estadísticos

(Wood *et al.*, 2004) o dinámicos (Dai *et al.*, 2017) para las variables del clima. El reescalamiento estadístico utiliza métodos estadísticos con información auxiliar, para ello se utilizan diversos métodos como máquinas de aprendizaje, componentes principales, análisis canónico y modelos de regresión (Ge *et al.*, 2019). Un proceso de *downscaling* de tipo estadístico se obtiene por medio del desarrollo o la identificación de relaciones estadísticas entre observaciones de localidades específicas dentro de un área de una malla de un modelo con valores. Se comparan las series históricas del modelo contra los datos observados en el sitio. Los modelos dinámicos de *downscaling* son relativamente más caros que los estadísticos, ya que requieren de equipo de cómputo y de los modelos de circulación global (Fasbender y Ouara, 2010). Mientras que los *downscaling* dinámicos integran uno varios modelos de procesos que deben ser consistentes con la escala. Para el caso del *downscaling* dinámico, se requiere identificar una variable continua, por ejemplo, la temperatura, la cual puede tener infinidad de valores sobre la superficie terrestre, pero puede variar dependiendo de otras variables geográficas como la altitud, la cercanía al mar o la orientación. Para lograr reescalar la temperatura a escala local, es necesario auxiliarse de dichas variables conocidas como los factores climáticos que cambian el valor de la temperatura que indica un modelo general del clima a una resolución más gruesa. En la medida que se cuente con estos datos auxiliares (orientación, altitud, continentalidad) se podrá obtener el valor de una variable, por ejemplo, la temperatura de un sitio a una resolución más fina.

El uso de escenarios regionales para los procesos de adaptación al cambio climático

La regionalización de los modelos del clima confiere lograr una alta definición tanto en el espacio como en el tiempo. En el espacio, los modelos regionales entregan salidas que ya no son de 250 km x 250 km, sino de detalles de hasta 1 km². En el tiempo, los escenarios regionales pueden pasar de la escala anual o mensual (temperatura o precipitación, por ejemplo) a la escala diaria. De esa manera, al encontrar en dichos modelos las respuestas a preguntas como ¿cuál será el cambio de la temperatura para 2050 en la región? o ¿cuál será el cambio en la precipitación para 2030?, se miden los impactos del

cambio climático en diversos sectores productivos o sociales del sitio de estudio. Por ejemplo, se puede evaluar qué implicaciones en la biodiversidad de un área natural protegida tendrá un aumento de la temperatura en un grado centígrado, o bien, cuál es el efecto en la gestión de una presa al conocer que la precipitación se disminuirá en un 15 por ciento. Por un lado, la bondad de los escenarios climáticos permitirá gestionar el riesgo ante los cambios en el clima mediante acciones de mitigación de las amenazas del clima y, por otro, son una herramienta para gestionar la adaptación a dichos cambios mediante políticas públicas nacionales o locales que impidan que los efectos del cambio climático sean aún más graves para la población y los recursos de una región. Al incorporar los escenarios regionales, los valores de cambio de la precipitación y la temperatura se acotan a las realidades de los socioecosistemas regionales y se promueve la resiliencia de los servicios ambientales, la economía regional y la dinámica de crecimiento poblacional.

En la actualidad, tras la exigencia de los actores clave y los gestores de las políticas de cambio climático, los modelos se han vuelto cada vez más finos. Por ejemplo, la plataforma WorldClim (2019) incluye los escenarios del quinto informe de evaluación del IPCC (AR5) a una resolución de 10 minutos (18,5 km a la latitud del Ecuador). Igualmente, diversas agencias financiadoras de proyectos de mitigación y adaptación al cambio climático han generado diversas páginas electrónicas donde pueden observarse los resultados de las salidas de los modelos globales. Por ejemplo, en el portal del Banco Mundial existe la plataforma Climate Change Knowledge Portal donde se pueden obtener las climatologías actuales y las proyecciones futuras de la temperatura y la precipitación (World Bank Group, s. f.). Otro ejemplo es la Agencia de Administración Oceánica y Atmosférica (Physical Sciences Laboratory, s. f.).

Dentro del Marco de Políticas de Adaptación, instrumento guía para proyectos nacionales y locales que apoya dicha agencia (Lim y Spanger-Siegfried, 2005), un primer paso es la generación o recopilación de los escenarios de cambio climático. Con base en estos escenarios, se identifica la vulnerabilidad y se elabora la cartografía de estos para identificar espacialmente la amenaza y los sistemas bajo amenaza. Con base en la vulnerabilidad se identifican las estrategias de adaptación en los escenarios nacionales regionales o locales. Estos son los pasos que, en general, dictan los manuales de adaptación de diversas agencias internacionales y nacionales

dedicadas al cambio climático, entre ellos destacan el Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), el Global Environment Facility (GEF), el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y la Agencia de Cooperación Técnica Alemana (Lim y Spanger-Siegfried, 2005; Climate Adapt, 2022; Zorrilla y Kuhlmann, 2015).

Los escenarios de cambio climático regionalizados para México son fuente de información para analizar los impactos en sistemas humanos y naturales bajo diversas proyecciones en términos de probabilidades. Dichos escenarios son utilizados para la evaluación de la vulnerabilidad al cambio climático. Recientemente, el Atlas Nacional de Vulnerabilidad al Cambio Climático del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) identifica la exposición y la capacidad adaptativa de diversos sectores a nivel municipal: agricultura, ciudad, biodiversidad y salud, entre otros (INECC, s. f.). Para identificar los impactos del clima a nivel local y regional son necesarios los ejercicios de integración de actores clave para planear estrategias viables para la adaptación.

Algunas herramientas para el *downscaling*

Dada la dificultad de los procedimientos dinámicos, diversos ejercicios de adaptación han optado por herramientas de *downscaling* estadístico, aquí se mencionan algunos de ellos (Conde *et al.*, 2008). Climate Predictability Tool (CPT) (Mason y Tippet, 2016) es un sistema que integra las salidas de los modelos globales del clima, integra los datos de las fuentes de información climática local, corrige los errores sistemáticos de magnitud de los campos y las tendencias en cada región entre el modelo climático global y lo observado. Esto se conoce como validación del modelo. Los modelos de simulación del clima incluyen una fase en la que se genera el clima sintético para el periodo en el que ya se midió el clima (lo observado). Con base en lo observado, el modelo global proyecta una simulación a futuro (lo proyectado). El CPT verifica la diferencia entre lo observado y lo modelado para el clima actual y, con base en esto, corrige lo proyectado. Como resultado, se obtienen modelos de resoluciones espaciales más finas (Conde *et al.*, 2008). Por ejemplo, en la península de Yucatán se proyectaron los cambios de temperatura para cada mes del año. Los cambios para 2030 de 2° C y,

para 2100, de 2.5 a 3° C. Estos escenarios permitieron generar estrategias de adaptación en los ecosistemas de la región (Magaña y Gómez., 2010). Otro ejemplo de aplicación de estas técnicas en el estudio sobre las tendencias del clima en la Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca (Galván, 2019) en donde se aplicaron los escenarios regionalizados de la Unidad de Informática para las Ciencias Atmosféricas y Ambientales del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM (Uniatmos) para definir la tendencia de las temperaturas del área de influencia de esta reserva.

Existen trabajos académicos que han aplicado modelos regionales del clima para diversos propósitos de estrategias de adaptación. A nivel federal se realizaron los estudios estatales de adaptación al cambio climático que como primer paso integraron escenarios de cambio climático que indicaron el valor del cambio térmico y pluviométrico entre el clima actual y los escenarios cercanos y lejanos. Las proyecciones incluían hasta el año 2100. La plataforma más utilizada en México es la de la Uniatmos, con gradillas de resolución de 1 x 1 km (Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, 2019). Los estudios estatales han integrado una serie de recomendaciones a diversos sectores para la adaptación y gestión del riesgo climático. De acuerdo con la Estrategia Nacional de Cambio Climático Visión 10-20-40, aún es necesario ahondar más en la mitigación y las políticas locales (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2013).

LOS MODELOS ESTOCÁSTICOS DEL CLIMA

Los escenarios deben identificar eventos de tiempo extremo, cualidad que no tienen los escenarios globales, ya que sólo capturan el patrón general del clima. Los eventos extremos son tan importantes como la tendencia climática de largo plazo a la hora de evaluar los riesgos climáticos. Los pulsos de los eventos extremos (lluvias intensas, lluvias ciclónicas, ondas de calor, sequías hidrológicas) son las causas más próximas de los desastres asociados al clima. Dichos eventos forman parte de la variabilidad del clima de una región. Aunque se trata de fenómenos poco frecuentes (y por ello poco esperados), son causantes de grandes pérdidas económicas y humanas en el mundo. En sentido estricto, son eventos a los que cualquier país pone atención en el día a día. Algo que no pasa con los escenarios de cambio climático.

En este sentido, se requiere que los escenarios regionales integren datos de escala diaria, ya que en ellos se captura la variación de baja frecuencia en el clima. Los eventos extremos son de corta duración, pero de alta intensidad. Esta capacidad de los modelos para capturar esta baja frecuencia la integran los Generadores Estocásticos del Tiempo Atmosférico (GETM) que también son modelos estadísticos de reducción de escala o *downscaling*. Se dice que estos modelos son estocásticos porque son generadores sintéticos del estado atmosférico (estado del tiempo), es decir, el modelo selecciona aleatoriamente una serie de datos de una malla espacial con información tanto de los modelos globales como de las estaciones climatológicas de la región (Semenov y Brooks, 1999). Estos modelos estocásticos son utilizados siempre que se requieran modelos detallados de impacto del clima en el espacio.

Un ejemplo de aplicación de estos escenarios regionales es el caso de la Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca en donde se integraron escenarios de temperatura y precipitación para 2025 y 2050 (Sandoval, 2021). Los resultados indicaron un aumento en las precipitaciones extremas hacia el suroeste de la reserva que pueden ocasionar eventos de inundaciones severas. Otro ejemplo de esta aplicación se dio en el Área Natural Protegida de Sierra Gorda Guanajuato en donde se generaron escenarios de aumento de las temperaturas extremas y disminución de la precipitación que pueden provocar cambios importantes en la biodiversidad regional (Gómez *et al.*, 2017).

La adaptación y la región en la climatología

Con lo anteriormente expuesto, puede observarse que el concepto de región en climatología se basa en elementos físicos del medio y los resultados del clima global son reescalados al clima regional para evaluar la vulnerabilidad de los sistemas naturales y sociales al cambio climático y al estado del tiempo atmosférico. De esta manera, se debe comprender primero el funcionamiento del clima local para poder proponer estrategias de adaptación propias a los socioecosistemas. La conceptualización de la región en las ciencias atmosféricas parametriza el espacio y el tiempo y aplica ecuaciones físicas para su entendimiento. Sin duda alguna, esta abstracción conlleva una síntesis extrema de la complejidad de los paisajes y los territorios sociales. La dinámica actual de la configuración de los patrones

espaciales derivados de la pérdida de la cobertura vegetal, el incremento de la urbanización y la apertura de zonas de pastoreo, así como la expansión de la frontera agrícola conlleva un cambio en el clima local y regional, ya sea con cambios directos como aumentos de la temperatura y la lluvia o indirectos, es decir, mayor frecuencia de sequías, cambios en el ciclo hidrológico, incremento en los incendios, entre otros. Por otra parte, la geografía actual intenta entender las causas subyacentes de dichos cambios espaciales en los territorios tales como el incremento de la pobreza, las desigualdades sociales, la sobreexplotación de los recursos y la pérdida de los modos de vida. Ambas disciplinas, la climatología y la geografía, dialogan entre sí continuamente para comprender estos procesos.

En el marco del cambio climático, tanto la adaptación como la mitigación son procesos que deben seguir abordándose desde el concepto de región, ya que las sociedades, los recursos y las políticas públicas se comparten en un espacio definido, llámese localidad municipio, cuenca, estado o país. La forma en que se compartan compromisos para disminuir emisiones o para identificar nuevas formas de producir bienes y servicios sustentablemente depende de los sistemas de organización de las sociedades y entidades administrativas; evidentemente, esto se correlaciona con el espacio y el tiempo, dos elementos que, como se vio antes, se incluyen en la modelación del clima.

El esfuerzo de las ciencias físicas por resolver cada vez a mayor detalle espacial el clima del planeta (*downscaling*) es una manera de generar una lectura elástica de la regionalización y la región, ya que constantemente cambian los patrones físicos de los territorios y estos conllevan a un enfriamiento o calentamiento de la atmósfera. Las ecuaciones físicas logran resolver estos cambios en los escenarios regionales. Sin embargo, los actores clave y las sociedades no han logrado resolver la disminución de emisiones que evitarían un calentamiento terrestre con sus consecuencias negativas. En resumen, el carácter geográfico físico y humano está presente en todo ejercicio que promueva la disminución de impactos negativos del clima cambiante y requiere un esfuerzo multidisciplinario: entender y atacar sus consecuencias.

Reflexiones finales

El concepto de región sirve de puente entre la geografía física y humana como marco para atender problemas del cambio climático y cómo adaptarse a este fenómeno, ya que la geografía física analiza las características del medio y la geografía humana analiza cómo y por qué las sociedades humanas transforman ese medio de tal forma que dicho territorio sea homogéneo. Las ciencias de la Tierra analizan patrones y procesos que tienen correspondencia espacial y temporal, y cuyo análisis depende de la escala territorial. Es por ello que el cambio climático, sin dejar de ser un fenómeno global, puede ser un proceso dinámico regional en donde los actores clave se organicen para gestionar sustentablemente los recursos naturales y disminuyan las emisiones de gases de efecto invernadero, ya que comparten la homogeneidad del medio físico y su aprovechamiento.

La región en ciencias atmosféricas es un espacio físico en donde se presentan fenómenos propios del sistema de tiempo y clima con una temporalidad bien conocida a lo que se denomina el clima regional. Este clima regional obedece a las características atmosféricas y del uso de suelo, vegetación, altitud y continentalidad de un espacio sobre la superficie terrestre. En la actualidad, dichas características son muy dinámicas, sobre todo aquellas derivadas de la actividad antrópica, por lo que la información espacial actualizada es clave para poder generar los modelos de predicción del clima. De esta forma, las regiones climáticas ya pueden contar con modelos de cambio climático.

Conocer los escenarios regionales del clima es el primer paso de la adaptación, sin embargo, se requiere también la identificación de las amenazas bajo un esquema de multinivel como interacciones entre diversas escalas espaciales y temporales, así como entre estructuras institucionales y agentes clave, aceptando de inicio que los procesos globales tienen una repercusión local y/o regional. Las diferencias regionales de los efectos del cambio climático están basadas en el proceso de la influencia del espacio en el contexto social y, viceversa, lo que se conoce como vulnerabilidad y su construcción social. Es por ello que un proceso clave para la adaptación consiste en agrupar los actores clave que puedan indagar sobre la vulnerabilidad local conociendo las particularidades del clima regional y sus posibles cambios a futuro. En suma, la región climática y la territorial se convierten

en una sola cuando la planificación territorial es guiada hacia la adaptación al cambio climático para disminución de la vulnerabilidad. En ese instante, las fronteras entre las parametrizaciones físicas y la dinámica socioterritorial confluyen en un ejercicio de búsqueda de la sustentabilidad.

Fuentes

ALLEN, JOHN, JULIE CHARLESWORTH, ALLAN COCHRANE, GILL COURT, NICK HENRY, DOREEN MASSEY y PHIL SARRE
1998 *Rethinking the Region*. Londres: Routledge.

ATKINSON, PETER M.
2013 “Downscaling in Remote Sensing”, *International Journal of Applied Earth Observation Geoinformatics* 22, no. 1 (junio): 106-114.

BERROCAL, VERONICA J., PETER F. CRAIGMILE y PETER GUTTORP
2012 “Regional Climate Model Assessment Using Statistical Upscaling and Downscaling Techniques”, *Environmetrics* 23, no. 5 (abril): 482-492.

BONAN, GORDON
2015 *Ecological Climatology: Concepts and Applications*, 2ª ed. Cambridge: Cambridge University Press.

CHENG, QIUMING
1999 “Multifractality and Spatial Statistics”, *Computers and Geosciences* 25, no. 9 (abril): 949-961.

CLIMATE ADAPT
2022 *UNDP Adaptation Learning Mechanism*, en <<https://climate-adapt.eea.europa.eu/en/metadata/portals/undp-adaptation-learning-mechanism-year-of-launch>>, consultada en octubre de 2022.

CONDE ÁLVAREZ, ANA CECILIA y CARLOS GRAY GARCÍA
2008 *Guía para la generación de escenarios de cambio climático regional*. México: Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM.

CUBASCH, U. y R. D. CESS

1993 “Processes and Modelling”, en J. T. Houghton, G. J. Jenkins y J.J. Ephraums. eds., *Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC). Climate change*. Cambridge: Cambridge University Press.

DAI, AIGUO, ROY M. RASMUSSEN, KYOKO IKEDA y CHANGHAI LIU

2017 “A New Approach to Construct Representative Future Forcing Data for Dynamic Downscaling”, *Climate Dynamics* 55, no. 1-2 (abril): 1-9.

FASBENDER, DOMINIQUE y TAHA B. M. J. QUARDA

2010 “Spatial Bayesian Model for Statistical Downscaling of AOGCM to Minimum and Maximum Daily Temperatures”, *Journal of Climate* 23, no. 19 (octubre): 5222-5242.

FERNÁNDEZ, JESÚS GARCÍA

1975 *Organización del espacio rural en la España Atlántica*. Madrid: Siglo XXI.

FU, BOJIE, DI LIANG y NAN LU

2011 “Landscape Ecology: Coupling of Pattern, Process, and Scale”, *Chinese Geographical Science* 21, no. 4: 385-391.

GALVÁN, JUAN ANTONIO

2019 “La regulación del clima en áreas naturales protegidas: estudio tra-sescalar para la Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca”, tesis de licenciatura en Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, México.

GE, YONG, YAN JIN, ALFRED STEIN, YUEHONG CHEN,

JIANGHAO WANG, JINFENG WANG, QIUMING CHENG, HEXIANG BAI,

MENGXIAO LIU y PETER M. ATKINSON

2019 “Principles and Methods of Scaling Geospatial Earth Science data”, *Earth-Science Reviews* 197 (octubre): 102-897.

GÓMEZ MENDOZA, LETICIA, LOURDES BELLO MENDOZA

y DULCE ABIGAIL CRUZ TORRES

2017 “Escenarios regionales de cambio climático para la Reserva de la

Biosfera Sierra Gorda Guanajuato, México”, *Acta universitaria* 27, no. 1 (enero-febrero): 55-66.

HARRISON, STEPHAN, DOREEN MASSEY, KEITH RICHARDS,
FRANCIS J. MAGILLIGAN, NIGEL THRIFT y BARBARA BENDER

2004 “Thinking Across the Divide: Perspectives on the Conversations Between Physical and Human Geography”, *Area* 36, no. 4 (septiembre): 435-442.

INSTITUTO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA Y CAMBIO CLIMÁTICO

2019 “Atlas Climático Digital de México”, en <<http://uniatmos.atmosfera.unam.mx/ACDM/>>, consultada en septiembre de 2019.

INSTITUTO NACIONAL DE ECOLOGÍA Y CAMBIO CLIMÁTICO (INECC)

s. f. *Atlas Nacional de Vulnerabilidad al Cambio Climática*, en <<https://atlasvulnerabilidad.inecc.gob.mx/>>, consultada en julio de 2019.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC)

2007 *Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Summary for Policy Makers*. Cambridge: Cambridge University Press; Intergovernmental Panel on Climate Change.

LI, SHUANG-CHENG y YUN-LONG CAI

2005 “Some Scaling Issues of Geography”, *Geographical Research* 24, no. 1, 11-18.

LIM, BO y ERIKA SPANGER-SIEGFRIED

2005 *Adaptation Policy Frameworks for Climate Change: Developing Strategies, Policies and Measures*. Reino Unido: Cambridge University Press.

MAGAÑA, VÍCTOR y LETICIA GÓMEZ-MENDOZA

2010 “Escenarios regionales de cambio climático e impactos en las áreas naturales protegidas: hacia una estrategia de adaptación”, G. Sánchez-Rojas, C. Ballesteros-Barrera y N. Pavón, coords., *Cambio climático. Aproximaciones para el estudio de su efecto en la biodiversidad*. Hidalgo: Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 39-47.

MASON, SIMON J y MICHAEL K. TIPPET

2016 *Climate Predictability Tool (CPT)*, en <<https://academiccommons.columbia.edu/doi/10.7916/D8NSoTQ6>>.

MCDOWELL, PATRICIA, WEBB THOMPSON y PATRICIA BARTLEIN

1990 “Long-term Environmental Change”, en B. L. Turner, ed., *The Earth as Transformed by Human Action*. Cambridge: Cambridge University Press, 143-62.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA)

s. f. NOAA´s *Climate Change Web Portal*, en <<https://www.esrl.noaa.gov/psd/ipcc/cmip5/>>, consultada en agosto de 2019.

OKE, T.R.

1983 “Surfaces, Scales and Scale Interactions in Urban Climatology”, *International Association of Meteorology Atmosphere Physics IUGG Congress*, Hamburgo.

ORTIZ, MARIO

2019 *Apuntes de geografía física y del paisaje*, editado Luis Miguel y Oliva Valdés. Mexico: Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México.

PEXIOTO, JOSÉ P. y ABRAHAM H. OORT

1993 *Physics of Climate*. Nueva York: American Institute of Physics.

PHYSICAL SCIENCES LABORATORY

s. f. “NOAA’s Climate Change Web Portal”, en <<https://psl.noaa.gov/ipcc/cmip5/>>.

PITMAN, A. J.

2005 “On the Role of Geography in Earth System Science”, *Geoforum* 36, no. 2, 137-148.

RAMÍREZ, BLANCA REBECA

2007 “La geografía regional: tradiciones y perspectivas contemporáneas”, *Investigaciones geográficas*, no. 64, 116-133.

ROPELEWSKI, CHESTER F. y PHILLIP A. ARKIN

2019 *Climate Analysis*. Cambridge: Cambridge University Press.

SANDOVAL, YESSICA

2021 “Escenarios regionales de cambio climático en la Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca mediante LARS”, tesis licenciatura en Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, México.

SCHUMM, S. A. y R. W. LICHTY

1965 “Time, Space and Causality in Geomorphology”, *American Journal of Science* 263, no. 1, 110-119.

SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES

2013 *Estrategia Nacional de Cambio Climático: visión 10-20-40*. México: Secretaría de Medio ambiente y Recursos Naturales.

SEMENOV, MIKHAIL A. y ROGER J. BROOKS

1999 “Spatial Interpolation of the LARS-WG Stochastic Weather Generator in Great Britain”, *Climate Research* 11, no. 2, 137-148.

STEYN, D. G., T. R. OKE, J. E. HAY y J. L. KNOX

1981 “On Scales in Meteorology and Climatology”, *Climate Bulletin*, no. 39, 1-8.

TAYLOR, PETER

1991 “A Theory and Practice of Regions: The Case of Europes”, *Environment and Planning D: Society and Space*, no. 9, 183-95.

TURNER, MONICA GOIGEL

1989 “Landscape Ecology: The Effect of Pattern on Process”, *Annual Review of Ecology and Systematics* 20, no. 1, 171-197.

WOOD, A.W., L. R. LEUNG, V. SRIDHAR y D. P. LETTENMAIER

2004 “Hydrologic Implications of Dynamical and Statistical Approaches to Downscaling Climate Model Outputs”, *Climatic Change* 62, no. 1-3, 189-216.

WORLD BANK GROUP

s. f. *Climate Change Knowledge Portal*, en <<https://climateknowledgeportal.worldbank.org/>>, consultada en septiembre de 2019.

WORLDCLIM

2019 “Global Climate Data”, en <http://worldclim.org/cmip5_10m>, consultada en septiembre de 2019.

ZORRILLA, MARÍA y ANDREA KUHLMANN

2015 *Metodología de Priorización Medidas de Adaptación al Cambio Climático. Guía de uso y difusión*. México: Proyecto Alianza Mexicana-Alemana de Cambio Climático; Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat); Dirección General de Políticas para el Cambio Climático (DGPPC).