



Métodos de reducción de escala: aplicaciones al tiempo, clima, variabilidad climática y cambio climático

Jorge A. Amador¹

Centro de Investigaciones Geofísicas (CIGEFI) y Escuela de Física. Universidad de Costa Rica,
2060 San José, Costa Rica

jorge.amador@ucr.ac.cr

Eric J. Alfaro

Centro de Investigaciones Geofísicas (CIGEFI) y Escuela de Física. Centro de
Investigaciones en Ciencias del Mar y Limnología (CIMAR), Universidad de Costa Rica

erick.alfaro@ucr.ac.cr

Fecha de recepción: 28/05/2008. Fecha de aceptación: 17/02/2009

Resumen

Los Modelos de Circulación General Atmosféricos-Oceánicos Acoplados muestran buena habilidad para simular la evolución de las circulaciones de escala global. Sin embargo, esta bondad no es muy útil para el estudio de impactos locales debido a que la resolución espacial de esos modelos está por encima de la escala de los impactos locales que se desean analizar. Es importante tomar esto en cuenta al estudiar impactos del clima en las actividades del hombre, en la biodiversidad, en ambientes marino-costeros y en arrecifes en las regiones tropicales, por ejemplo. Existen dos aproximaciones para lidiar con esta diferencia de escala e información: los métodos de reducción de escala dinámica y estadística. En este trabajo, se discuten los elementos básicos del sistema climático y las posibles causas de los cambios atmosféricos observados en este sistema. Se discuten brevemente los principales conceptos físicos del sistema climático, el clima de una región, la variabilidad climática y las generalidades del problema del cambio climático global con énfasis en el aspecto regional del mismo. Se describen también los esquemas metodológicos del proceso de reducción de escala y se presenta una discusión sobre sus ventajas y limitaciones, así como algunas aplicaciones al tiempo atmosférico y clima regional.

Palabras clave: Reducción dinámica de escala, reducción estadística de escala, clima, variabilidad climática, cambio climático.

Abstract

Coupled Atmosphere-Ocean General Circulation Models demonstrate good skill in simulating large scale circulations. However this output is not very useful to study local impacts, as its spatial resolution is coarser than the scale of local impacts. It is very important to consider this issue when studying, for instance, climate impacts on human activities, coastal-marine biodiversity and tropical coral reefs. In general terms, there have been two different approaches to deal with this scale and information difference: the dynamic and the statistic downscaling methods. In this work, the basic climate elements are presented and the possible physical causes of atmospheric changes are discussed. Also, a summary of the main physical concepts that define the climate system as well as the climate and climate variability of a region with respect to the mean atmospheric state and the general aspects of the problem of climate change with emphasis on regional scales, is presented. In addition, this study describes the methodological schemes of the downscaling process and presents a discussion of downscaling advantages and disadvantages, while providing applications for regional weather and climate as well as for socio-economic benefits in coastal, agricultural and tourism activities, among others.

Key words: Dynamic downscaling, statistical downscaling, climate, climate variability, climate change.

¹Autor de contacto



1. Introducción

En el presente trabajo, se discuten con algún detalle, los elementos básicos del sistema climático y las posibles causas de los cambios observados en el sistema físico. Se presentan además en forma resumida, los principales conceptos asociados al sistema climático, la definición de clima de una región, algunos aspectos de la variabilidad climática y las generalidades del problema del cambio climático global con énfasis en el aspecto regional del mismo (sección 2). Con el objetivo de ofrecer los elementos relevantes a la línea de trabajo a seguir en este artículo, se discuten en la sección 3, las guías metodológicas y los pasos más importantes del proceso de obtención de escenarios climáticos regionales (métodos de reducción de escala dinámicos y estadísticos). Una discusión somera sobre los métodos de predicción climática más comúnmente utilizados en la actualidad, se presenta en las secciones 4 y 5. Uno de los aspectos más importantes del proceso de obtención de estos escenarios climáticos regionales lo constituyen las bases de datos históricas disponibles en la región de interés, de manera que en la sección 6 se analiza lo relativo a los datos climáticos, la documentación histórica y los indicadores de representación y su importancia y utilización en el problema de la confección de escenarios climáticos regionales. La disponibilidad de recursos de tipo científico y tecnológico se analiza en la sección 7. En la misma sección se discuten algunas aplicaciones y ejemplos al tiempo meteorológico y a escenarios climáticos regionales derivados para ilustrar los métodos discutidos. Las recomendaciones y sugerencias de los autores se encuentran en la sección 8, que incluye aspectos de las necesidades de capacitación, entrenamiento y formación relativas al problema en cuestión.

Los conceptos técnicos y científicos utilizados en este trabajo siguen las definiciones básicas del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático y del Glossary of Meteorology del American Meteorological Society.

2. Elementos del sistema climático

El clima está constituido por aquellos rasgos o elementos básicos del sistema climático que tienen una variación relativamente lenta en el tiempo. Lo normal es caracterizar el clima por promedios simples de las componentes del sistema termodinámico (precipitación, viento y temperatura, por ejemplo) sobre períodos que pueden ir desde un mes o más hasta varios años, considerando siempre la variabilidad en el tiempo y en el espacio de esas cantidades promedio. Amador et al. (2006), presenta una discusión del clima regional y mecanismos físicos de forzamiento atmosférico para varias escalas de movimiento. En contraste al clima, el “tiempo atmosférico” es el estado a corto plazo (minutos a días) de la atmósfera caracterizado usualmente en términos de temperatura, humedad, precipitación, nubosidad, visibilidad y viento en esas escalas temporales. Para algunas aplicaciones, en especial cuando se trata de cambios en el clima, el periodo de tiempo sobre el cual se promedia es del orden de varias décadas o más (promedios a largo plazo). Marengo & Amador (2005) presentan un resumen de los principales modos de variabilidad regional y algunos ejemplos de cambio climático observado en América Latina.

2.1. Variabilidad climática

Al igual que el clima, el concepto de variabilidad climática puede ser definido en función de términos temporales o espaciales (desviaciones temporales o espaciales de las variables con respecto a los promedios considerados). En la escala temporal y más allá del orden de la escala sinóptica (varios días) se puede hablar, por ejemplo, de variabilidad intra-estacional, estacional, del ciclo anual o inter-anual, para caracterizar las señales o elementos que distinguen las condiciones de un área o región con respecto a sus promedios sobre el periodo elegido. En el aspecto espacial, el ejemplo más utilizado de esta variabilidad es la clasificación climática por zonas, cada una de ellas relativamente homogénea en espacio y tiempo con respecto a las variables



consideradas, durante periodos de tiempo previamente establecidos (p.e., métodos de Holdridge, Thornthwaite o Koeppen, véase Oliver 2005).

2.2. Cambio climático

El concepto de cambio climático es utilizado para caracterizar cambios sistemáticos sostenidos en los promedios a largo plazo de los elementos o variables climáticas (temperatura, vientos y precipitación, por ejemplo). El cambio climático en un sistema como el de la Tierra puede deberse a mecanismos físicos de forzamiento externo como cambios en las emisiones de radiación solar o cambios en los parámetros orbitales; así como también por procesos internos del sistema climático o a forzamiento de tipo antropogénico.

En el marco de este trabajo es usual la pregunta; ¿Cómo afecta o puede afectar el cambio climático global los diversos aspectos relativos a la variabilidad en escalas temporales y espaciales menores? Aún cuando se acepta generalmente que puede haber un efecto presente en estas escalas de circulación menores, no ha sido posible determinar hasta el momento cómo y en que medida afecta a cada una de esas escalas de movimiento.

3. Escenarios climáticos

El concepto de escenario climático se utiliza para denotar un estado probable o plausible, normalmente simplificado, del sistema climático ante uno o más diferentes tipos de forzamientos. El escenario está basado en un conjunto internamente consistente de relaciones físicas o estadísticas entre los distintos parámetros del sistema climático y se construye para ser utilizado explícitamente para identificar e investigar las posibles consecuencias de ese estado en diferentes sectores sociales. En este trabajo, se entiende que el cambio climático es esencialmente el debido al forzamiento de tipo antropogénico. Un escenario de cambio climático es simplemente la diferencia entre un escenario climático y el clima actual o de una línea o estado base.

Las proyecciones sobre del clima son generalmente resueltas en la escala global utilizando el sistema completo de ecuaciones dinámicas sobre el dominio geométrico del globo terrestre usando algún tipo de representación espacial y temporal de las variables (soluciones en diferencias finitas o mediante métodos espectrales, básicamente) e incluyendo en la mayor parte de los casos, procesos físicos de escalas menores no representados explícitamente en las ecuaciones (Holton 2004). Este tipo de aproximación al problema se realiza mediante los denominados Modelos Atmosféricos de Circulación General (MACG, Tremberth 1995).

Los modelos MACG Acoplados (MACGA) del tipo climático, constituyen en realidad una representación generalmente simple del sistema climático y se emplean para preparar las predicciones o proyecciones del clima hacia el futuro para diferentes horizontes de tiempo. Para este proceso se requiere un conocimiento adecuado de las condiciones iniciales del clima con base en una distribución apropiada de observaciones de los parámetros del sistema durante periodos adecuados. Datos faltantes en el tiempo o regiones con pocos datos climáticos introducen importantes incertidumbres en las predicciones, que junto a las representaciones simplificadas de los procesos físicos y dinámicos del sistema, conllevan a aumentar la dispersión e incertidumbre de los resultados y proyecciones (Washington & Parkinson 1986, Tremberth 1995).

Las predicciones y los escenarios climáticos regionales son generalmente derivados de los globales mediante distintos tipos de procedimientos, ya sean de tipo físico-dinámico, estadístico o mixto (híbrido) y en algunos pocos casos mediante inferencias subjetivas (Wilby & Dawson 2004). En esta fase, la disponibilidad de bases de datos regionales es un elemento de especial importancia. Un problema usual en el uso de datos climáticos es la diferencia en el espaciamiento temporal y espacial de los datos en relación con la información obtenida de los MACGA. Para la obtención de



escenarios climáticos regionales se transfiere la información global sobre el estado futuro del sistema a la escala espacio-temporal requerida (Washington & Parkinson 1986, Temberth 1995).

4. El problema físico de los estudios de adaptación

La mayor parte de los estudios de adaptación basados en escenarios de clima futuro derivados directa o indirectamente de MACGA son generalmente realizados en una de las siguientes tres escalas, a) simulaciones globales llevadas a cabo usando bases de datos climáticos interpolados a una resolución de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ o mayor; b) análisis regionales utilizando rejillas o mallas de más alta resolución donde los datos climáticos han sido reducidos de escala o ajustados a una escala requerida ("downscaling") con base en los resultados de los MACGA ó; c) estudios locales donde los resultados de los modelos y datos climáticos observados son interpolados de alguna manera a las coordenadas de algún sitio de interés (Price et al. 2001). A pesar de que cada uno de estos tres procedimientos poseen ventajas y desventajas, la escala global a) es muy extensa y solo provee un análisis "muy general", mientras que los impactos determinados por la c) atribuyen generalmente más certidumbre de lo garantizado por el MACGA y no pueden ser fácilmente utilizados para regiones en que se desea obtener implicaciones socio-económicas específicas y repuestas a los problemas de manejo de recursos. La escala intermedia b) tiene potencial para proveer análisis de escenarios que son de valor real para los que toman decisiones tomando en cuenta variaciones espaciales regionales e interacción con los elementos climáticos que la caracterizan. Jones et al. (2005), discuten con detalle algunos de estos aspectos para estudios de impacto y adaptación con énfasis en los países en desarrollo, además, en las conclusiones se encuentran algunos ejemplos de la generación de estos escenarios que requieren un trabajo interdisciplinario.

La necesidad de obtener datos con una alta resolución espacial se debe principalmente a dos razones: primera para permitir el muestreo del sector de interés con una intensidad tal que refleje la interacción entre clima, suelos (o superficies), hidrología e impactos humanos y segunda para proveer resultados de simulación en una escala operacional importante para la toma de decisiones (Wilby & Dawson 2004). En sectores relevantes (por ejemplo, recursos hídricos, marino-costeros, agricultura y salud humana) los cambios climáticos que ocurren a lo largo de muchos años o décadas son de especial importancia para determinar los efectos en la disponibilidad de electricidad, la alimentación y los riesgos de enfermedades asociadas a estos cambios, sin embargo, cambios en la variabilidad climática interanual o en escalas temporales menores afectan aspectos esenciales en el manejo de embalses de tipo plurianual, el cambio estacional de cultivos o la incidencia y frecuencia estacional de enfermedades ligadas a las condiciones climáticas. En algunos casos, como en el de los modelos de manejo de ecosistemas, se usan estimaciones horarias basadas en información diaria o mensual y en modelos más complejos que requieren valores diarios para representar los procesos humanos y se utilizan los generadores estocásticos de tiempo (Semenov & Barrow 2000) a partir de datos mensuales.

5. Métodos de predicción climática mediante ajuste o reducción de escala

Se han usado dos aproximaciones para lidiar con la información tan general que proveen los MACGA, las técnicas de ajuste de escala dinámico y las de tipo estadístico. Hoy en día, ambas técnicas muestran niveles similares de habilidad bajo las mismas condiciones climáticas al estimar variables atmosféricas superficiales (Gershunov et al. 2000; Wilby & Dawson 2004). A pesar de estos resultados, debe siempre tomarse en cuenta que las relaciones estadísticas no son relaciones de causalidad, lo que implica en principio menor habilidad para describir y entender la física y



dinámica de las interacciones entre los diversos componentes del sistema climático. Cabe mencionar que las relaciones estadísticas deben estar sustentadas por un modelo conceptual físico. Cuando se utilizan ambas técnicas de manera interrelacionada, es decir la numérica y la estadística, se habla de esquemas o técnicas híbridas o mixtas.

5.1. Métodos dinámicos

El método de ajuste dinámico es un procedimiento para obtener información de alta resolución sobre el tiempo atmosférico, clima o cambio climático a partir de MACGA de relativamente baja resolución. Típicamente, la resolución de estos modelos globales es del orden de 150-300 km. La mayoría de los modelos de impacto requieren información en escalas de 50 km o menos, de manera que este método de ajuste dinámico es conveniente o necesario para estimar la información requerida en escalas menores a las de los MACGA. El método de ajuste dinámico utiliza un modelo de área limitada de alta resolución (modelo climático regional o MCR) con condiciones de frontera como función del tiempo derivadas del MACGA. El MCR está dinámicamente inmerso en el modelo global (proceso de anidamiento) para obtener información en escalas menores a las de este modelo. Los MCR generalmente utilizan dominios de trabajo a nivel regional o sub-regional (por ejemplo $10^6 - 10^7$ km²) con resoluciones de 20 a 50-60 km. En casos especiales las resoluciones pueden llegar aún a escalas menores (Stolz 2004), sin embargo, se podría esperar que la incertidumbre asociada a los resultados aumente. Existe evidencia de que los MCR simulan significativamente mejor el clima y la meteorología regional que los MACGA, en especial sobre regiones montañosas (Giorgi & Mearns 1999), una característica importante del dominio espacial en Centroamérica. La reducción dinámica de escala también se puede aplicar a MACGA del tiempo atmosférico como el GFS (Sela 1982; 1988) y modelos anidados regionales (MR) utilizados usualmente también para tiempo atmosférico como el MM5 (Grell et al. 1993; Dudhia et al. 2005).

Como todo procedimiento en que interviene la incertidumbre sobre la naturaleza de las relaciones entre las distintas componentes del sistema climático, el ajuste dinámico posee algunas ventajas y desventajas (Wilby & Dawson 2004). Entre las ventajas más importantes de este método se puede argumentar el hecho de que actualmente los modelos dinámicos incorporan el “estado del arte” en cuanto a la física y dinámica conocida del sistema climático. Un aspecto importante de esta técnica es que el proceso se puede implementar utilizando retroalimentación dinámica, es decir, lo que sucede física y dinámicamente en el MCR puede ser transferido al MACGA, cada cierto tiempo de integración, vía las fronteras comunes del dominio de anidamiento modificando así los procesos de escala global, de manera que esta información a su vez es transferida de nuevo en el tiempo al MCR mediante un proceso de interacción continua.

La identificación del MACGA que mejor brinde información climática al MCR es un paso importante en la obtención de escenarios climáticos regionales a alta resolución si se utiliza esta técnica dinámica. Lo anterior conlleva un proceso de evaluación de los MACGA disponibles para identificar el modelo o el grupo de modelos que mejor brinde información sobre las condiciones de contorno (típicamente cada seis horas en el dominio de interés) al MCR (véase aplicación completa en Rivera & Amador 2008; 2009). Estos elementos forzantes del clima son imprescindibles por su relación física con escalas sub-regionales o locales, lo cual es indudablemente importante en la aplicación de los modelos de impacto. A pesar de las ventajas de tipo físico y dinámico, la aplicación de este método requiere considerable conocimiento del clima y la variabilidad climática regional, buena experiencia en modelado climático y en general tiene requerimientos altos de uso computacional, en algunos casos, como los necesarios para correr los MACGA. Este proceso de reducción de escala ha sido aplicado al caso del huracán Mitch (simulaciones numéricas) a fin de determinar

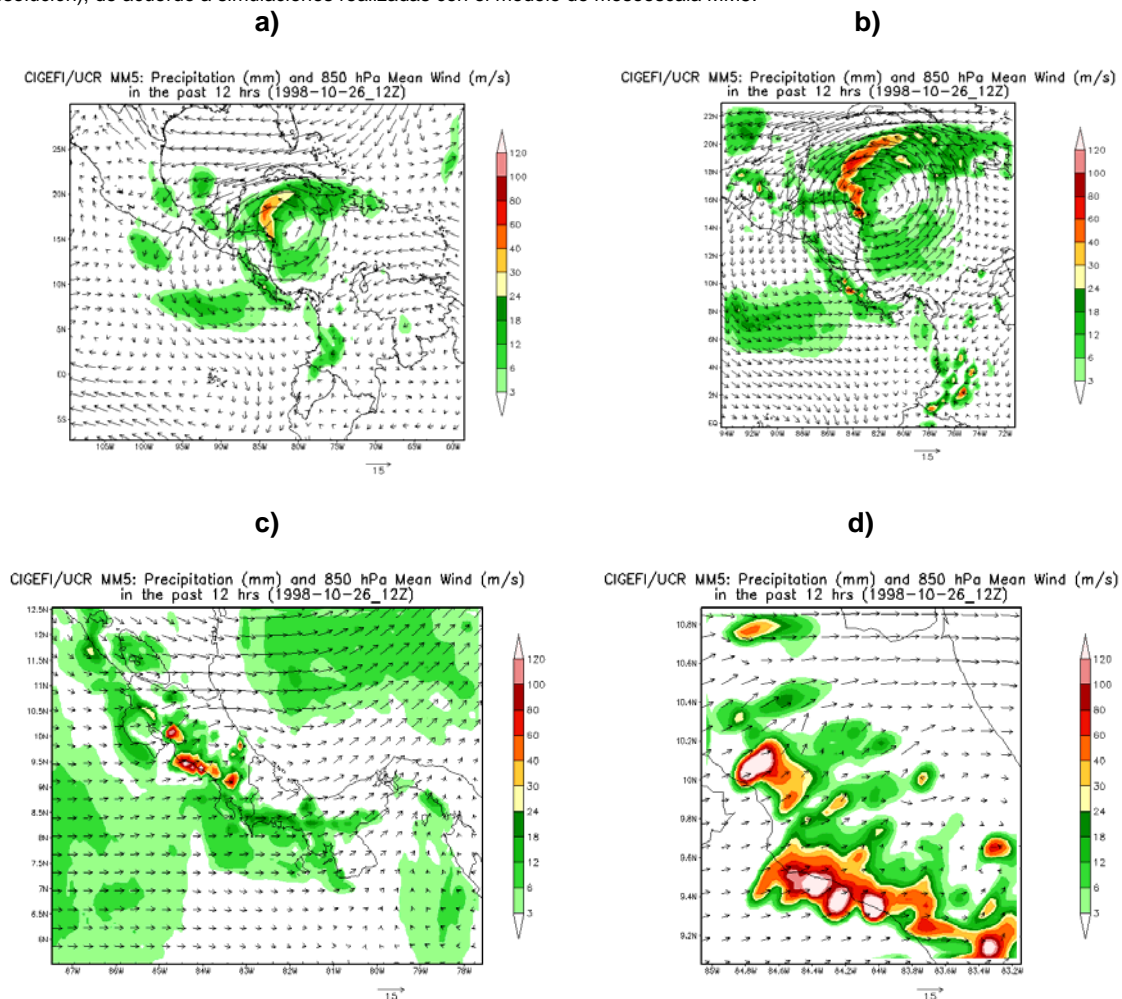


la distribución espacial y temporal de la precipitación para la costa Pacífica de Costa Rica (Amador & Bonilla 2007) en una escala de hasta 3.3 km para compararla con los datos observados en estaciones puntuales y con los impactos sociales sufridos.

La Figura 1 muestra un ejemplo de reducción dinámica utilizando datos de entrada del NCEP/NCAR (Kalnay et al. 1996) y el MM5 (Grell et al. 1993; Dudhia et al. 2005) como MCR. El caso estudiado es el del huracán Mitch (octubre-noviembre 1998) para cuatro dominios de integración utilizando interacción dinámica de dos vías entre los dominios de

90, 30, 10 y 3.3 km (Figura 1a, 1b, 1c, y 1d, respectivamente). Nótese el mejoramiento en el detalle del campo de vientos de precipitación conforme la resolución se hace más fina, es decir, conforme se va del dominio de 90 km al de 3.3 km. Este tipo de procedimiento se puede aplicar para los escenarios de cambio climático si se poseen predicciones de MACGA a varios horizontes de tiempo y se anida un MR del tipo MMM5 o WRF (Weather Research and Forecasting, Shamarock et al. 2005; Wang et al. 2007).

Figura 1. Vientos en 850 mb (1500 m de altura aproximadamente) y distribución de precipitación acumulada para el 25 de octubre de 1998 de las 00.00 GMT a las 12.00 GMT (06.00 p.m. del 25 de octubre a 06.00 a.m. del 26 de octubre de 1998, hora de Costa Rica) en a) el dominio madre (90 km de resolución), b) dominio 2 (30 km de resolución), c) dominio 3 (10 km de resolución) y d) dominio 4 (3.3 km de resolución), de acuerdo a simulaciones realizadas con el modelo de mesoescala MM5.



Fuente: Elaborado a partir de los datos de entrada del NCEP/NCAR (Kalnay et al. 1996)



5.2. Métodos estadísticos

Las técnicas de ajuste de escala estadístico usan las salidas de los MACGA y permiten la construcción de escenarios climáticos para sitios individuales o regiones con una resolución a diferentes escalas temporales como la diaria, la mensual y la estacional, utilizando para ello información estadística o de relación derivada de series de tiempo históricas. Estas técnicas son muy útiles cuando se requiere una evaluación rápida de escenarios climáticos locales a un relativamente bajo costo. Adicionalmente, éstas son en general flexibles y el uso de “ensembles” o agrupaciones de tipo estadístico de escenarios climáticos permite un análisis relativamente confiable de la dupla riesgo/incertidumbre (véase Tabla 1 con detalles sobre sus fortalezas y debilidades más adelante según Wilby & Dawson 2004).

Todos los esquemas de ajuste de escala estadístico se basan en relaciones empíricas entre los predictores de gran escala derivados de los MACGA (temperatura, viento y precipitación, p.e.) y los predictantes regionales o locales. Estos métodos difieren principalmente en la forma de calcular la función matemática de transferencia y en el proceso del ajuste estadístico. De especial atención en estas técnicas es el hecho de que las relaciones predictor-predictante son algunas veces no estacionarias (Wilby & Dawson 2004), lo cual, simula mejor el comportamiento real del sistema climático.

Dentro de los métodos estadísticos más usados están las técnicas del análisis multivariado. Como ejemplo de algunas de las técnicas ya implementadas y utilizadas en la región se pueden citar el Análisis de Correlación Canónica o ACC (Soley & Alfaro 1999; Alfaro 2007a, b), la Descomposición en Valores Singulares o DVS (Enfield & Alfaro 1999), las Funciones Ortogonales Empíricas o FOE (Alfaro 2002), los modelos Vectoriales Auto Regresivos-Medias Móviles o VARMM (Alfaro & Cid 1999; Alfaro & Soley 2001) y las Regresiones Lineales o RL (Alfaro 2000; Alfaro & Amador 2003).

Una de las técnicas que permite transferir en forma eficiente información de un campo de variables con un número grande de predictores hacia otro campo de variables con un número grande de predictantes es el ACC (Johnson & Wichern 1988; Soley & Alfaro 1999, Alfaro et al. 2006). En esta técnica se asocian patrones presentes y pasados del campo usado como predictor (temperatura superficial del mar, TSM, por ejemplo) al campo de la variable sobre la cual se quiere hacer el ajuste de escala tomado como predictante (por ejemplo, la precipitación; Gershunov & Cayan 2003; Alfaro 2007b). Una ventaja del uso de esta técnica es que no asume una relación estacionaria entre los campos de los predictores y los predictantes ya que se pueden incorporar las tendencias existentes en alguno de ellos como fuente de variabilidad (Gershunov & Cayan 2003).

Tabla 1. Balance general de las debilidades y fortalezas del ajuste de escala estadístico

Fortalezas	Debilidades
1. Brinda información en la escala de las estaciones meteorológicas usadas a partir de las salidas de los MACGA.	1. Depende del realismo del forzamiento en la frontera del MACGA.
2. Barato, poco demandante computacionalmente y fácil de transferir entre diferentes plataformas de trabajo.	2. La escogencia del tamaño del dominio y su localización afectan los resultados.
3. Los “ensambles” de los escenarios climáticos permiten el análisis de riesgo/incertidumbre.	3. Requiere datos de muy buena calidad para la calibración del modelo.
4. Es aplicable a predictantes “no-tradicionales” tales como la calidad del aire o altura del oleaje.	4. Las relaciones predictor-predictante son con frecuencia no estacionarias.
	5. La escogencia de las variables usadas como predictores afectan el resultado.
	6. La escogencia del esquema empírico de la función de transferencia afecta el resultado.
	7. La variabilidad climática de baja frecuencia se vuelve problemática, especialmente si se usan series de tiempo cortas.
	8. Los resultados no retroalimentan al MACGA.

Fuente: Elaboración con base en Wilby & Dawson (2004)



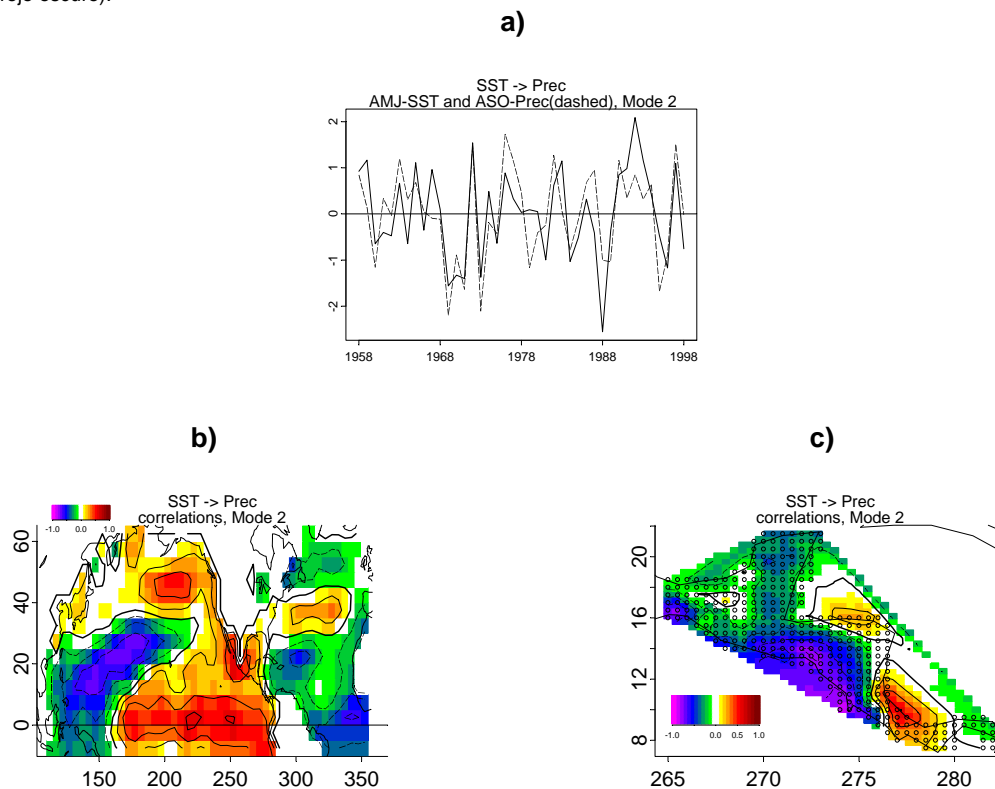
Se han obtenido algunos resultados para la precipitación sobre Centroamérica (Alfaro 2007b) usando esta técnica (véase Figura 2). En esta figura se muestra que un contraste fuerte de temperaturas entre el Pacífico ecuatorial del este y el mar Caribe durante el trimestre de Abril-Mayo-Junio (AMJ) afecta la distribución de precipitación en el istmo centroamericano durante el trimestre Agosto-Setiembre-Octubre (ASO). En la Figura 2 se observa que temperaturas anómalamente cálidas (frías) en el Pacífico ecuatorial del este acompañadas de temperaturas anómalamente frías (cálidas) en el Mar Caribe (Figura 2b) tienden a estar asociadas con una disminución (un aumento) de la precipitación sobre una porción amplia del istmo (Figura 2c), ubicado sobre la costa

Pacífica y el Norte de Centroamérica (Alfaro 2007b).

6. Datos climáticos, documentación histórica e indicadores por representación

La mayoría de las bases de datos para estudios y aplicaciones al problema del cambio climático en la región han sido recopiladas y organizadas por los Servicios Meteorológicos o Hidrológicos Nacionales y/o por otras instituciones nacionales o regionales de los países que tienen responsabilidad a nivel gubernamental para el ofrecimiento de servicios públicos a los diferentes sectores de la sociedad. Algunas bases de datos de carácter más regional, han sido implementadas por entes o instituciones nacionales de países desarrollados.

Figura 2. Segundo modo de variabilidad del ACC entre los campos de TSM durante el trimestre de AMJ y la precipitación sobre Centroamérica durante el trimestre de ASO. Las series de tiempo y su correlación se muestran en (a): TSM (línea sólida) y la precipitación (línea a trazos), la correlación entre las series es de 0.72. Los patrones espaciales de TSM (b) y de precipitación (c) se muestran como la correlación de los modos mostrados en (a) con las series de tiempo de los campos respectivos, es decir los valores de la rejilla de TSM en (b) y las estaciones de precipitación en (c). Los valores de correlación se representan por la escala de colores (-1: violeta, 1: rojo oscuro).



Fuente: Elaboración propia



El Climate Prediction Center del National Oceanic Atmospheric Administration (NOAA / CPC), por ejemplo, tiene un proyecto con el objetivo de desarrollar productos para el análisis y aplicación de datos de precipitación diarios, mensuales y estacionales mejorados en un sistema de mallas en apoyo al monitoreo del clima, predicción climática e investigación aplicada. Información y direcciones electrónicas de otras bases de datos para diferentes tipos de aplicaciones, incluyendo cambio climático, están disponibles en la Organización Meteorológica Mundial (World Meteorological Organization, WMO Distributed Databases).

Los científicos sociales pueden ofrecer una importante contribución al rescate e implementación de bases de datos históricas para aplicaciones al cambio climático, en especial porque una parte de su trabajo consiste en el análisis de información y documentos históricos de décadas o siglos atrás en los que a menudo se consignaban datos sobre el tiempo y clima de la región. Un ejemplo de este tipo de contribuciones se encuentra en los trabajos de Solano (1999) y Díaz & Solano (2005) que permiten aplicaciones como las de Amador (2003). En relación con los indicadores por representación (en inglés, proxy data) han sido utilizados en diferentes estudios de impactos locales (Parry et al. 2007).

7. Recursos científicos y tecnológicos para la obtención de escenarios climáticos

Por recursos científicos se entiende la información climática confiable, los modelos numéricos atmosféricos (de tiempo y clima) disponibles y en uso actual y las herramientas de diverso tipo adquiridas para la preparación de escenarios climáticos regionales. Los tecnológicos incluyen entre otros, las plataformas de computación, las comunicaciones para acceso a redes de datos y las redes de Internet.

Fundamentalmente hay dos tipos de modelos o herramientas para la adquisición de datos y la confección de escenarios de cambio climático, ambos de origen normalmente

académico ligado a universidades, centros o instituciones de investigación de países desarrollados. Algunos de estos modelos, por diferentes razones, son de dominio público y están disponibles por medio de la red de Internet en centros especializados. Uno de estos casos es el modelo de mesoescala denominado MM5 Modeling System Version 3 (MM5v3). Una aplicación de este modelo usando reducción dinámica de escala fue presentada en la Figura 1. El otro tipo de modelo es de uso más restringido, en ocasiones no se posee el código fuente (tipo caja negra) y sus aplicaciones están vinculadas a los intereses científicos y técnicos de los grupos que desarrollaron esa herramienta. En este tipo puede citarse el PRECIS. Ambos tipos de herramientas tienen ventajas y desventajas para su aplicación; algunas de ellas son descritas y discutidas en las siguientes secciones.

7.1. Modelos dinámicos de dominio público

El modelo MM5 tiene su origen en el desarrollo realizado por el grupo PSU/NCAR (Penn State University/Nacional Center for Atmospheric Research). Es un modelo de mesoescala de área limitada que fue diseñado para simular o predecir circulaciones regionales y de mesoescala. Ha sido desarrollado por PSU/NCAR como un modelo comunitario mejorado continuamente por contribuciones de usuarios de varias universidades y laboratorios gubernamentales alrededor del mundo. El "Fifth-Generation NCAR / Penn State Mesoscale Model (MM5)" es el último de una serie desarrollado a partir del modelo de mesoescala usado por Anthes en la Universidad Estatal de Pennsylvania a principios de los años 70, que fue luego documentado por Anthes & Warner (1978). Entre las principales características de este modelo se pueden citar: i) capacidad de anidamiento múltiple de dominios, ii) dinámica no-hidrostática que permite el uso del modelo en una escala de pocos km, iii) capacidad de multi-procesamiento en plataformas de memoria compartida y distribuida, iv) aptitud de asimilación cuatri-dimensional de datos y v) mayor número de opciones físicas en procesos parametrizables con respecto a



otras versiones anteriores del MM5. Este modelo tiene además el soporte de varios programas y rutinas auxiliares y todo el conjunto es referido colectivamente como el Sistema de Modelado MM5.

A pesar de que el MM5 está siendo utilizado de manera extensiva en muchos países, actualmente está en desarrollo el Weather Research and Forecasting (WRF) Model, el cual es un sistema de predicción numérico del tiempo diseñado no solo para aplicaciones de pronóstico operacional sino que puede cubrir necesidades de investigación atmosférica. El WRF es adecuado para un gran rango de aplicaciones que va, en la escala espacial, desde los pocos metros a los miles de kilómetros. El desarrollo de este modelo es un esfuerzo compartido principalmente entre NCAR, el National Oceanic and Atmospheric Administration/ National Centers for Environmental Prediction (NOAA/NCEP), el Forecast Systems Laboratory (FSL), la Air Force Weather Agency (AFWA), el Naval Research Laboratory, la Universidad de Oklahoma y la Federal Aviation Administration (FAA).

7.2. Modelos estadísticos de dominio público

Una herramienta útil y actualmente gratuita es el programa Statistical Downscaling Model o SDSM (Wilby & Dawson 2004). Este programa ha sido usado experimentalmente para la construcción de escenarios de cambio climático en diversos sitios de Centroamérica a escalas temporales diarias a partir de la salida de un MACGA (Alfaro & Amador, 2003). Actualmente el Instituto Canadiense para Estudios Climáticos (CICS) ha creado un sitio web desde el cual se pueden bajar los datos diarios del reanálisis del NCEP/NCAR para la identificación de los predictores y las salidas de varios experimentos de MACGA para distintos escenarios socioeconómicos (por ejemplo, A1 y A2, véase IPCC 2007), entre 1961 y 2099, para producir los escenarios de cambio climático. Estos experimentos cubren la región de interés, por lo que en un principio su uso es factible en esta área.

Otro programa usado para la generación de escenarios climáticos y también gratuito es el MAGICC/SCENGEN (Wigley 2004). El MAGICC es un programa amigable que toma los escenarios de emisiones de los gases de efecto invernadero, gases reactivos y de dióxido de azufre como entrada y produce como salida la temperatura global media y el aumento del nivel del mar. El MAGICC es un modelo acoplado del ciclo de los gases con un modelo climático. Este método ha sido usado en todos los reportes del IPCC para producir las proyecciones futuras del cambio de la temperatura global media y del nivel del mar. Las últimas versiones reproducen los resultados del Tercer Reporte de Evaluación o TAR del IPCC y el MAGICC puede ser usado para extender los resultados del TAR-IPCC a otros escenarios de emisiones (IPCC 2007).

El SCENGEN es un algoritmo de regionalización que usa el método de escalamiento de patrones (Santer et al. 1990) para producir escenarios de cambio climático en una rejilla de 5° de latitud por 5° de longitud. Los resultados regionales del SCENGEN están basados en las salidas de modelos acoplados de circulación atmósfera-oceano, los cuales pueden ser usados individualmente o en forma conjunta. Sin embargo, debido a que la salida del SCENGEN es una rejilla con variabilidad espacial con poco detalle (5° lat x 5° lon) es recomendable aplicar alguna técnica de ajuste de escala para los estudios de cambio climático de impacto local. Tradicionalmente, se asume en forma burda que el cambio de temperatura o precipitación para algún horizonte futuro de tiempo y asociado a este píxel grueso de 5° lat x 5° lon es el que se va a reflejar a una escala espacial más fina o incluso al nivel de estaciones. Cabe destacar que esta premisa no es necesariamente válida en una región de alta variabilidad climática, espacialmente hablando, como la de Centroamérica.

Finalmente, Stolz (2004) propone usar el SCENGEN para la región centroamericana observando los siguientes dos pasos previos. Evaluar primero en las salidas de los MACGA para escoger aquellos que capturen



elementos climáticos claves en la región como por ejemplo el “veranillo” (Magaña et al. 1999) y la corriente en chorro de bajo nivel en el Caribe (Amador 1998; Amador & Magaña 1999; Amador et al. 2000; Amador et al. 2003; Amador et al. 2006; Amador 2008). En segundo lugar, se deben determinar los puntos con información procedente del MAGICC/SCENGEN que se correlacionen mejor con las estaciones elegidas de la región y no necesariamente con aquellas que espacialmente coinciden con el píxel de la salida del MACGA, ya que por ejemplo una estación de régimen climático del Pacífico podría estar contenida dentro del área de un píxel del MACGA cuya información en su mayoría esta asociada con un ciclo anual del Caribe.

8. Conclusiones y recomendaciones

La elección de la técnica estadística o dinámica a usar depende del nivel de dominio de los conceptos de clima y variabilidad climática regional, los estadísticos y de las técnicas computacionales del grupo hacia el cual se requiere hacer esta transferencia. Si el nivel de dominio en estos temas por parte del grupo no es el adecuado, se deben considerar sesiones de entrenamiento en estos tópicos para subsanar parcialmente estas deficiencias.

El método del ACC es relativamente fácil de implementar en la región con usuarios que tengan un adecuado nivel de formación en estadística.

Los programas MAGICC/SCENGEN son de fácil manejo por parte de grupos heterogéneos en su nivel académico, pero con conocimientos climáticos básicos como el grupo participante en los Foros de Predicción Climática de Centroamérica. La ventaja de explorar su uso con este tipo de grupo es que este además puede aportar alguna interpretación preliminar de los resultados obtenidos como se mencionó anteriormente. Sin embargo, debido a que la salida del SCENGEN es una rejilla con variabilidad espacial poco detallada (5° lat x 5° lon) es recomendable aplicar alguna técnica de

ajuste de escala para los estudios de cambio climático de impacto local.

El bienestar social de los pueblos, especialmente de aquellos localizados en países con economías débiles, depende del uso racional de sus recursos naturales y de estrategias inteligentes de planificación a largo plazo. A pesar de esto, algunos elementos perturban los planes de desarrollo pues ocurren en dominios de tiempo y espacio más allá de las capacidades de información y toma de decisiones disponibles. Por un lado, es posible asociar con frecuencia, pérdidas económicas y sociales significativas con los impactos en los recursos naturales causados por fenómenos meteorológicos y climáticos. Por otro lado, las inversiones económicas no insertas en esos planes pueden causar severos daños a los recursos naturales y en muchos casos hacerlos insostenibles (Moreno 2008). Las regiones costeras son altamente susceptibles a pérdidas multisectoriales bajo el efecto de sistemas meteorológicos como tormentas severas, ondas, frentes fríos, huracanes y algunos fenómenos derivados de éstos como fuertes oleajes, crecimiento de los ríos, inundaciones y deslizamientos, algunos de los cuales ocurren en la cuencas altas y medias de los ríos e impactan económica y socialmente en forma análoga a las inversiones económicas no controladas en esas regiones.

Algunos sectores, como el agrícola y el ecoturismo se ven a menudo amenazados y severamente expuestos a condiciones meteorológicas y climáticas adversas. En muchos casos, el uso de la tierra y la distribución geográfica de los recursos determina fuertemente el nivel del impacto recibido ya que actúan como barrera natural ante los fenómenos (por ejemplo, los manglares ante oleaje producido por huracanes) o como mecanismo disparador de inundaciones o deslizamientos (por ejemplo, siembras de poca altura en pendientes pronunciadas o modificación abrupta de la rugosidad del terreno). En estos casos, los resultados de experimentos de reducción de escala como los discutidos en este trabajo, que permiten información más cercana y



confiable a los dominios de cuenca y ecosistemas, son de vital importancia para proveer los detalles que permitan estimar probables escenarios y sus riesgos asociados de manera que se utilicen metodologías adecuadas a la hora de plantear tendencias futuras y recomendaciones de política económica (Sáenz et al. 2008).

Para casos en que se integre un modelo de uso de la tierra y de la cadena de valor con un modelo hidrológico para explorar el elemento costo-efectividad de varios instrumentos basados en el mercado para promover la adopción agrícola de tecnologías de producción para la mejora de la calidad de aguas (Roebeling & van Grieken 2008), los escenarios climáticos generados se puede usar para analizar el impacto del cambio climático sobre la calidad y la cantidad de agua que entra en los sistemas fluviales y, a su vez, sobre la salud de los ríos y los ecosistemas costeros.

Los impactos que genera la actividad turística (Palafox & Segrado 2008), aunados a la identificación y cuantificación de los impactos producidos por fenómenos meteorológicos y climáticos en áreas sensibles, son elementos complementarios necesarios para hacer posible la sostenibilidad de los recursos naturales disponibles. Si se posee una adecuada información meteorológica y climática a una escala utilizable por los desarrolladores de turismo, la planificación de sus actividades puede redundar en más altos beneficios a este sector.

9. Agradecimientos

Se agradece a los proyectos: CRN-2050-IAI, VI-805-A7-002, VI-805-A8-606, VI-805-A7-755, VI-808-A7-520, Universidad de Costa Rica. El presente trabajo fue parcialmente financiado por el proyecto MM5-UCR de NOAA/OGP (VI-805-98-506). Se agradece también el apoyo y la oportunidad brindada por los organizadores del III Congreso Iberoamericano sobre Desarrollo y Ambiente. A Erick Rivera y Blanca Calderón por la ejecución del MM5 para el caso Mitch y a Natalie Mora, Estefanía Jiménez e Ingrid

Rivera por su colaboración en la preparación del manuscrito. A los revisores anónimos por su ayuda para mejorar la comprensión de este trabajo.

REFERENCIAS

- Alfaro, E. 2000. Response of Air Surface Temperatures over Central America to Oceanic Climate Variability Indices. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos* Vol. 7, No. 2: 63-72.
- Alfaro, E. 2002. Some Characteristics of the Annual Precipitation Cycle in Central America and their Relationships with its Surrounding Tropical Oceans. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos* Vol. 9, No. 2: 88-103.
- Alfaro, E. 2007a. Predicción Climática de la Temperatura Superficial del Aire en Centroamérica. *Ambientico* No. 165: 6-10.
- Alfaro, E. 2007b. Uso del Análisis de Correlación Canónica para la predicción de la precipitación en Centroamérica. *Revista Ingeniería y Competitividad* Vol. 9, No. 2: 33-48.
- Alfaro, E. & L. Cid. 1999. Ajuste de un modelo VARMA para los campos de anomalías de precipitación en Centroamérica y los índices de los océanos Pacífico y Atlántico Tropical. *Atmósfera* Vol. 12, No. 4: 205-222.
- Alfaro, E. & F. Soley. 2001. Ajuste de un modelo VAR como predictor de los campos de anomalías de precipitación en Centroamérica. *Revista de Matemática: Teoría y Aplicaciones* Vol. 8, No. 1: 99-116.
- Alfaro, E. & J. Amador. 2003. Assessment of some MACGA's features and applications of Downscaling in the Central American Region, en *Memories of the First Latin American and the Caribbean Regional Workshop, Assessment for Impacts and Adaptation to Climate Change in Multiple Regions and Sectors*. San José, Costa Rica. 27-30 mayo 2003. Disponible en: <http://www.aiaccproject.org/meetings/meetings.html>
- Alfaro, E., Gershunov, A. & D. Cayan. 2006. Prediction of Summer Maximum and Minimum Temperature over the Central and Western United States: The Roles of Soil Moisture and Sea Surface Temperature. *Journal of Climate* Vol. 19, No. 8: 1407-1421.
- Amador, J. 1998. A climatic feature of the tropical Americas: The trade wind easterly jet. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos* Vol. 5, No. 2: 91-102.
- Amador, J. 2003. Clima y variabilidad climática en Costa Rica a través de información histórica del siglo XIX. En: García-Martínez, B. & M. Prieto (eds). *Estudios sobre historia y ambiente en América, II: Norteamérica, Sudamérica y el Pacífico*. El Colegio de México / IPGH: 37-54.
- Amador, J. A. 2008: The Intra Americas Seas Low-Level Jet (IALLJ): Overview and Future Research. *Annals of the New York Academy of Sciences*. In: Gimeno, L.,



García R. & R. Trigo (eds). Trends and Directions in Climate Research. New York.

Amador, J. & V. Magaña, 1999. Dynamics of the Low-level jet over the Caribbean Sea, en Preprints 23rd Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology. American Meteorological Society, 10-15 January Vol. 2: 868-869.

Amador, J., Magaña, V. & J. Pérez. 2000. The low level jet and convective activity in the Caribbean. In Preprints 24th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology. American Meteorological Society, 29 May-2 June: 114-115.

Amador, J., Chacón, J. & S. Laporte. 2003. Climate and climate variability in the Arenal Basin of Costa Rica. In: Díaz, H. & B. Morehouse (eds). Climate, Water and Trans-boundary Challenges in the Americas. Kluwer Academic Publishers.

Amador, J., Alfaro, E., Lizano, O. & V. Magaña, 2006. Atmospheric forcing of the eastern tropical Pacific: A review. Progress in Oceanography Vol. 69: 101-142.

Amador, J. A. & A. Bonilla. 2007: Ciclones tropicales y sociedad: Una aproximación al enfoque científico de estos fenómenos atmosféricos como referente para la investigación social en desastres, en Concepciones y representaciones de la naturaleza y la ciencia en América Latina, Programa de Estudios Sociales de la ciencia, la Técnica y el Medio Ambiente, Centro de Investigaciones Geofísicas. En prensa.

Anthes, R. & T. Warner, 1978. Development of hydrodynamic models suitable for air pollution and other mesometeorological studies. Monthly Weather Review Vol. 106: 1045-1078.

Díaz, R. & F. Solano, 2005. La ciencia en Costa Rica: (1814-1914). Una mirada desde la óptica universal, latinoamericana y costarricense. San José, Costa Rica: Editorial Costa Rica.

Dudhia, J., Gill, D., Guo, Y-R., Manning, K., Wang, W. & C. Bruyere. 2005. PSU/NCAR Mesoscale Modeling System Tutorial Class Notes and Users' Guide: MM5 Modeling System Version 3. Mesoscale and Microscale Meteorology Division, NCAR.

Enfield, D. & E. Alfaro, 1999. The dependence of caribbean rainfall on the interaction of the tropical Atlantic and Pacific Oceans. Journal of Climate Vol. 12: 2093-2103.

Gershunov, A., Barnett, T., Cayan, D., Tubbs, T. & L. Goddard, 2000. Predicting and downscaling ENSO impacts on intraseasonal precipitation statistics in California: The 1997/98 event. Journal of Hydrometeorology Vol. 1: 201-209.

Gershunov, A. & D. Cayan, 2003. Heavy daily precipitation frequency over the contiguous United States: Sources of climate variability and seasonal predictability. Journal of Climate Vol. 16: 2752-2765.

Giorgi, F. & L. Mearns. 1999. Introduction to special section: Regional climate modeling revisited. Journal of Geophysical Research Vol. 104, No: D6: 6335-6352.

Grell, G., Dudhia, J. y D. Stauffer, 1993. A description of the fifth generation Penn State/NCAR mesoscale model. NCAR Tech. Note 398+IA.

Holton, J. 2004. An introduction to dynamic meteorology, Fourth Edition, Elsevier Inc.

IPCC, 2007. Fourth Assessment Report, Intergovernmental Panel on Climate Change. Disponible en: <http://www.ipcc.ch>

Johnson, R. & D. Wichern 1988. Canonical Correlation Analysis, en Applied Multivariate Statistical Analysis. 2da. ed. Prentice Hall, New York: 438-469.

Jones, P., Amador, J., Campos, M., Hayhoe, K., Marin, M., Romero J. & A. Fischlin. 2005. Generating climate change scenarios at high resolution for impact studies and adaptation: Focus on developing countries, en Robledo, C., Kanninen, M. y L. Pedroni (eds). Tropical Forests and adaptation to climate change: In search of synergies. CIFOR, Bogor Barat, Indonesia.

Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J., Zhu, Y., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Higgins, W., Janowiak, J., Mo, K. C., Ropelewski, C., Wang, J., Leetmaa, A., Reynolds, R., Jenne, R. & D. Joseph. 1996. The NCEP/NCAR Reanalysis 40-year Project. Bulletin of the American Meteorological Society Vol. 77, No. 3: 437-471.

Magaña, V., Amador, J. & S. Medina, 1999. The Mid-Summer Drought over México and Central America. Journal of Climate Vol. 12: 1577-1588.

Marengo, J. & J. Amador, 2005. Climate variability and climate change in Latin America, en T. Carter (ed). IPCC Fourth Assessment Report (AR4). Contribution to IPCC WG II, April 2004.

Moreno, M. 2008. Propuesta metodológica para valorar el impacto de las actividades económicas en áreas costeras. Revista de la Red Iberoamericana de Economía Ecológica No. 11: 29-38

Oliver, J. 2005. Climate Classification. In: Oliver, J. (ed) Encyclopedia of World Climatology. Springer: The Netherlands.

Palafox, A. & R. Segrado, 2008. Rehabilitación turística y capacidad de carga en Cozumel: propuesta metodológica. Este volumen.

Parry, M. L., Canziani, O. F., Palutikof, J. P., Adger, N. (UK), Aggarwal, P. (India), Agrawala, S. (OECD/France), Alcamo, J. (Germany), Allali, A. (Morocco), Anisimov, O. (Russia), Arnell, N. (UK), Boko, M. (Benin), Carter, T. (Finland), Casassa, G. (Chile), Confalonieri, U. (Brazil), Cruz, R. V. (Philippines), Alcaraz, E. (Mexico), Easterling, W. (USA), Field, C. (USA), Fischlin, A. (Switzerland), Fitzharris, B. (New Zealand), Gay García, C. (Mexico) Harasawa, H. (Japan), Hennessy, K. (Australia), Huq, S. (UK), Jones,



- R. (Australia), Kajfež Bogataj, L. (Slovenia), Karoly, D. (USA), Klein, R. (The Netherlands), Kundzewicz, Z. (Poland), Lal, M. (India), Lasco, R. (Philippines), Love, G. (Australia), Lu, X. (China), Magrín, G. (Argentina), Mata, L. J. (Venezuela), Menne, B. (WHO Euro/Germany), Midgley, G. (South Africa), Mimura, N. (Japan), Qader Mirza, M. (Bangladesh/Canada), Moreno, J. (Spain), Mortsch, L. (Canada), Niang-Diop, I. (Senegal), Nicholls, R. (UK), Nováky, B. (Hungary), Nurse, L. (Barbados), Nyong, A. (Nigeria), Oppenheimer, M. (USA), Patwardhan, A. (India), Romero Lankao, P. (Mexico), Rosenzweig, C. (USA), Schneider, S. (USA), Semenov, S. (Russia), Smith, J. (USA), Stone, J. (Canada), van Ypersele, J.-P. (Belgium), Vaughan, D. (UK), Vogel, C. (South Africa), Wilbanks, T. (USA), Wong, P. P. (Singapore), Wu, S. (China), Yohe, G. (USA). 2007: Technical Summary. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Parry, M. L., Canziani, O. F., Palutikof, J. P., van der Linden P.J. & C. E. Hanson (eds). Cambridge: University Press.
- Price, D.T., McKenney, D., Caya, D. & H. Côté. 2001. Transient climate change Scenarios for High Resolution Assessment of Impacts on Canada's Forest Ecosystems. In: Report to Climate Change Action Fund, July 2001.
- Rivera, E. & J. Amador. 2008. Predicción Estacional del Clima en Centroamérica mediante la reducción de escala dinámica. Parte I: Evaluación de los Modelos de Circulación General CCM3.6 y ECHAM4.5. *Revista de Matemática: Teoría y Aplicaciones* Vol. 15, No. 2: 131-173.
- Rivera, E. & J. Amador. 2009. Predicción Estacional del Clima en Centroamérica mediante la reducción de escala dinámica. Parte II: Aplicación del modelo MM5v3. *Revista de Matemática: Teoría y Aplicaciones* Vol. 16, No. 1: 76-104.
- Roebeling, P. C. & M. E. van Grieken. 2008. Explorando la costo-efectividad de instrumentos basados en el mercado para la mejora de la calidad del agua: una modelación espacial económico-ambiental. *Revista de la Red Iberoamericana de Economía Ecológica* No. 11: 17-28.
- Sáenz, F., Ruiz, K., Alonso, S. & R. Arce. 2008. Identificación de áreas de manejo crítico de la tierra: Propuesta metodológica para áreas metropolitanas: a partir de la GAM, Costa Rica. *Revista de la Red Iberoamericana de Economía Ecológica* No. 11: 1-15
- Santer, B., Wigley, T., Schlesinger, M. & J. Mitchell. 1990. Developing Climate Scenarios from Equilibrium MACGA Results. In: Max-Planck-Institut für Meteorologie Report No. 47, Hamburg, Germany.
- Sela, J. 1982. The NMC Spectral Model, en NOAA Tech. Rep. NWS-30.
- Sela, J. 1988. The new NMC operational spectral model. In: Eighth Conference on Numerical Weather Prediction, February 22-26, Baltimore, Maryland.
- Semenov, M. & E. Barrow. 2000. Development of climate change scenarios for agricultural applications. In: Carter, T., Hulme, M., Cramer, W. & R. Doherty (eds). *Climate Scenarios for Agricultural, Ecosystem and Biological Impacts, ECLAT-2. Second Workshop Report*, Climate Research Unit, University of East Anglia, Norwich, U.K.
- Shamarock, W., Klemp, J., Dudhia, J., Gill, D., Barker, D., Wang, W. & J. Powers. 2005. A Description of the Advanced Research WRF Version 2, en NCAR Tech. Note TN-468+STR, National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO.
- Solano, F. 1999. El proceso de institucionalización de la meteorología en Costa Rica en el siglo XIX. Tesis de Licenciatura. Escuela de Historia. Universidad de Costa Rica.
- Soley, F. & E. Alfaro. 1999. Aplicación de análisis multivariado al campo de anomalías de precipitación en Centroamérica. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos* Vol. 6, No. 2: 71-93.
- Stolz, W. 2004. Generación de escenarios de precipitación en Centroamérica para el siglo XXI, en Informe técnico. Centro de Investigaciones Geofísicas, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Tremberth, K. V. 1995. *Climate system modeling*. Cambridge: University Press.
- Wang, W., Barker, D., Bray, J., Bruyère, C., Duda, M., Dudhia, J., Gill, D. & J. Michalakes, 2007. WRF Version 2 Modeling System User's Guide. Disponible en: http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide/contents.html
- Washington, W. M. & C. L. Parkinson. 1986. *An introduction to three dimensional climate modeling*. Oxford: University Press.
- Wigley T. 2004. The MAGICC/SCENGEN 4.1: User Manual. Disponible en: <http://www.cgd.ucar.edu/cas/wigley/magicc/>
- Wilby, R. & C. Dawson. 2004. Using SDSM version 3.1-A decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. England, UK.