

APLICACIÓN DEL MODELO ESTADÍSTICO DE REDUCCIÓN DE ESCALA (SDSM) A ALGUNAS CIUDADES DE MÉXICO

O. Rafael GARCÍA-CUETO¹, Ernesto LÓPEZ-VELÁZQUEZ²,
Néstor SANTILLÁN-SOTO³, África CASILLAS-HIGUERA⁴,
Gonzalo BOJÓRQUEZ-MORALES⁵, David FLORES-JÍMENEZ⁶

^{1,2,3,4,6}*Instituto de Ingeniería. UABC*

⁵*Facultad de Arquitectura y Diseño. UABC*

rafaelcueto@uabc.edu.mx, ernesto.lopez.velazquez@uabc.edu.mx
nsantillan@uabc.edu.mx, casillas.africa@gmail.com
gonzalo.bojorquez.morales@uabc.edu.mx, david.flores80@uabc.edu.mx

RESUMEN

Los modelos de circulación global (MCG) son la principal herramienta para proyecciones futuras del cambio climático usando diferentes escenarios de emisiones. Un problema que surge con el uso de las salidas de los MCG para aplicaciones locales es su baja resolución espacial. Una técnica de re-escalamiento, comúnmente usada, para realizar predicciones diarias de variables climáticas futuras a escala regional es el Modelo de Downscaling Estadístico (SDSM). Dado que varias de las ciudades de México han crecido de manera notable, tanto superficial como poblacionalmente, y han mostrado en varias ocasiones su vulnerabilidad a eventos meteorológicos y climáticos, en esta comunicación se aplicó el SDSM para generar escenarios de temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación en 16 ciudades de México, ubicadas en diferentes regiones geográficas y climáticas, con dos Rutas de Concentración Representativa (RCP), de 2.6 y 8.5 W/m², para los horizontes temporales de 2006-2037, 2038-2069 y 2070-2100. Todas las ciudades tendrán que enfrentar en el futuro un clima más cálido y un régimen lluvioso variable, por lo que algunos planes de mitigación tendrán que ser propuestos.

Palabras clave: modelo estadístico de reducción de escala, ciudades de México, Rutas de Concentración Representativa, Temperatura, Precipitación.

ABSTRACT

Global circulation models (GCM) are the main tool for future projections of climate change using different emission scenarios. One problem that arises with the use of GCM outputs for local applications is their low spatial resolution. A downscaling technique, commonly used, to make daily predictions of future climatic variables at a regional scale is the Statistical Downscaling Model (SDSM). Several cities in Mexico have grown significantly, both in area and in population, and have repeatedly shown their vulnerability to meteorological and climatic events, so in this communication the SDSM was applied to generate scenarios of maximum temperature, minimum temperature and precipitation in 16 cities of Mexico, located in different geographic and climatic regions. Two Representative Concentration Pathways (RCP), of 2.6 and

8.5 W/m², were selected for the time horizons of 2006-2037, 2038-2069 and 2070-2100. It is observed that all cities will have to face a warmer climate and a variable rainy regime in the future, so some mitigation plans will have to be proposed.

Key words: Statistical Downscaling Model, cities of México, Representative Concentration Pathways, Temperature, Rainfall.

1. INTRODUCCIÓN

El uso de combustibles fósiles ha causado un incremento en la concentración de gases de efecto invernadero y a su vez el calentamiento del sistema climático. Las implicaciones de estas tendencias térmicas crecientes están impulsando los esfuerzos en la modelación para comprender el futuro del clima de la Tierra. Estudios recientes han mostrado que los Modelos de Circulación General (MCG) además de proveer la descripción más precisa del complejo sistema climático, pueden predecir adecuadamente las temperaturas globales y los cambios en la distribución espacial y temporal de la precipitación (Mahmod y Babel, 2013). Sin embargo, la resolución típica de los MCG, del orden de 100 a 200 km, no explica la heterogeneidad regional que puede afectar el clima a escalas más pequeñas, y por lo tanto no pueden ser utilizados para estudios de impacto local (Wilby y Dawson, 2013). Para resolver este problema de escala espacial en las salidas de los modelos de MCG, para predecir temperaturas y precipitación, se han propuesto Modelos de Downscaling (MD), tanto dinámicos, como estadísticos. Los MD estadísticos se basan en relaciones empíricas entre predictores de escala global y predictandos de escala local (Mearns et al., 2003). Esta aproximación se ha usado comúnmente para reescalar los datos de salida de los MCG debido a su baja demanda computacional y al número relativamente pequeño de parámetros que se necesitan para generar escenarios climáticos (Wilby et al. 2002; Von Storch et al., 2000, Hashmi et al., 2009).

El Modelo de Downscaling Estadístico (SDSM), propuesto por Wilby et al. (2002) que es la aproximación utilizada en esta comunicación, se ha comparado con otros métodos de downscaling, y se ha demostrado que es una técnica útil, capaz de reproducir la variabilidad climática observada. En la sección de métodos se describe ampliamente este modelo.

Sin lugar a dudas, los centros urbanos, especialmente los que están en el mundo desarrollado, son la principal fuente de emisiones de gases de efecto invernadero y por lo tanto están implicados en el cambio climático global. Las tasas de crecimiento de la población urbana, no tienen precedente y en el último siglo se han realizado en menos del 3% de la superficie terrestre mundial, sin embargo, el impacto, atribuido a las ciudades ha sido global con un 78% de las emisiones de carbono, el 60% del uso de agua residencial, y el 76% de la madera utilizada para fines industriales (Grimm et al., 2008). Como motores clave de la economía mundial, las ciudades son responsables de la mayor parte de la producción nacional, la innovación y el empleo, y constituyen las puertas de enlace clave a flujos de capital transnacional y cadenas de suministro mundial. Por tanto, no es sorprendente que estas consuman entre el 60 y el 80% de la producción de energía en todo el mundo y representen una parte más o menos igual

de las emisiones globales de efecto invernadero, y por tanto agentes cruciales en los esfuerzos de mitigación global.

El efecto sinérgico del cambio climático global por el forzamiento radiativo inducido por gases de invernadero, y efectos locales producidos por la urbanización, como lo es la isla urbana de calor, está teniendo un gran impacto en las ciudades: los huracanes y las inundaciones han destruido infraestructura urbana, el aumento del nivel del mar ha alterado los mercados de bienes raíces, las ondas de calor han producido cortes de energía y se ha puesto en peligro la vida de las personas (Rosenzweig et al., 2011; McCarthy et al., 2010).

En ese contexto, una primera prioridad para las ciudades de México es comprender mejor los riesgos del cambio climático a escala global, por el uso intensivo de energía basado en recursos fósiles, y local, ocasionado por el cambio de cobertura de suelo con la consecuente modificación en el balance de energía de la atmósfera baja.

Así, con el objetivo de que los gobiernos locales tengan evidencia para la toma de decisiones, en este trabajo se realizan escenarios de cambio climático para 16 ciudades de México, mediante el SDSM. Estas localidades han tenido un desarrollo poblacional y socioeconómico importante en las últimas décadas, pero al carecer de un plan ordenado de crecimiento territorial, han mostrado en múltiples ocasiones su vulnerabilidad frente a eventos climáticos que han perturbado su armonía social. Es importante mencionar que la comprensión de los riesgos del cambio climático, a escala local, es clave para la formulación de una planeación urbana efectiva que reduzca los riesgos relacionados con este problema.

2. DATOS

Los datos que se usan en el proceso de downscaling provienen de varias fuentes, que son las que se describen a continuación.

Información climática (predictandos). Para cada ciudad seleccionada (tabla 1), series de datos diarios de temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación, fueron extraídas de la base de datos del Servicio Meteorológico Mexicano de su base digital llamada Extractor Rápido de Información Climatológica V 2.0. El período de datos, aun cuando existen sitios con periodos de información más extensa, se seleccionó el de 1981-2010 con el propósito de tener congruencia comparativa en los escenarios futuros. Las ciudades se eligieron en base a su geografía, clima, alta tendencia del crecimiento poblacional y desarrollo superficial, y su vulnerabilidad a eventos meteorológicos y climáticos.

Variables atmosféricas de gran escala (predictores). Los predictores que se usan durante la calibración y proceso de validación de cada variable climática, se obtuvieron del conjunto de reanálisis del Centro Nacional de Predicción Ambiental (NCEP, por sus siglas en inglés) de Estados Unidos, mientras que los datos modelados, del Modelo Global del Clima de cuarta generación, el CanESM2, desarrollado por el Centro Canadiense de Análisis y Modelación del Clima (CCCma por sus siglas en inglés). Dicho modelo representa la contribución Canadiense al Quinto Reporte de Evaluación del IPCC en el Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados Fase 5 (CMIP5, por sus siglas en inglés). Los predictores fueron

extraídos para el punto de rejilla más cercana a la estación climática de cada ciudad seleccionada desde la página <http://ccds-dscc.ec.gc.ca>

Ciudad	ID EC ⁺	Ubicación		
		Latitud (°N)	Longitud (°W)	Altitud (msnm)
Aguascalientes	1030	21.8955	102.3086	1888
Mexicali	2033	32.6633	115.4677	3
Tijuana	2038	32.4469	116.9077	120
Tuxtla Gutiérrez	7165	16.7500	93.1333	570
Úrsula Coapa, CDMX*	9014	19.3033	99.1480	2256
Gran Canal, CDMX*	9029	19.4766	99.0913	2239
Milpa Alta, CDMX*	9032	19.1905	99.0219	2420
León	11095	21.1361	101.6933	1828
Guadalajara	14066	20.6763	103.3461	1550
Aculco, ZMVM**	15002	20.1000	99.8200	2490
Toluca, ZMVM**	15126	19.2911	99.7141	2726
Chapingo, ZMVM**	15170	19.4847	98.8863	2250
Monterrey	19049	25.6825	100.2669	495
Puebla	21035	19.0125	98.1930	2122
Tlaxcala	29030	19.3238	98.2466	2230
Veracruz	30192	19.1425	96.1113	16

*CDMX se refiere a la Ciudad de México (anteriormente Distrito Federal)

**ZMVM se refiere a la Zona Metropolitana del Valle de México

Tabla 1: Ciudades, estaciones climáticas (EC) con ID (según Servicio Meteorológico Mexicano) y coordenadas geográficas. Fuente: elaboración propia

3. MÉTODOS

El modelo para realizar los escenarios climáticos es el Modelo de Downscaling Estadístico (SDSM, por sus siglas en inglés) y se obtuvo del sitio www.sds.org.uk. El SDSM es una combinación de un generador estocástico de tiempo y un método de función de transferencia que facilita la evaluación de los impactos regionales del calentamiento global al permitir que las propiedades de la atmósfera a gran escala se utilicen para predecir las condiciones atmosféricas locales. Así, mediante técnicas estadísticas y la componente dinámica de la atmósfera, se pueden simular secuencias de datos climáticos diarios para períodos actuales y futuros, mediante la estimación de parámetros estadísticos de series de datos observados (Wilby et al, 2002).

Las variables predictoras, obtenidas de NCEP, describen la circulación atmosférica, espesor, estabilidad atmosférica y contenido de humedad a varios niveles (cerca de la superficie, 850 hPa y 500 hPa) usando observaciones asimiladas de estaciones climáticas, sondeos atmosféricos y de satélite entre 1948 y 2014. El SDSM está

diseñado para ser utilizado en cinco pasos secuenciales (Wilby y Dawson, 2013), y que por su importancia son descritos a continuación.

1) Selección de variables predictoras. Este proceso es crucial para la generación de escenarios de downscaling confiables; el SDSM provee herramientas cuantitativas para elegir un conjunto adecuado de predictores, pero el conocimiento climático local es gran apoyo para su elección. Las relaciones de predictor-predictando se analizan con porcentajes mensuales de varianza explicada y coeficientes de correlación. Para este estudio las variables predictoras más adecuadas fueron las alturas geopotenciales de 500 hPa y 850 hPa, humedad específica en superficie y a los niveles de 500 hPa y 850 hPa, presión atmosférica al nivel medio del mar, velocidad zonal en superficie y a 500 hPa, y velocidad meridional en superficie.

2) Calibración del modelo. Involucra el establecimiento de modelos de regresión entre predictores seleccionados y predictandos (variables climáticas en superficie). Se realiza una simulación mediante la técnica de validación cruzada con dos submuestras. Para este estudio se usó la primera mitad de cada serie de datos (1981-1995) de temperatura y precipitación. Un porcentaje de varianza explicada y un valor de error estándar reporta la calidad de la calibración, que se maximiza con los parámetros de corrección del sesgo medio y de inflación de la varianza. El proceso de simulación es condicional para la precipitación, ya que la cantidad está condicionada por la ocurrencia de un día húmedo.

3) Validación del modelo. Con los modelos de regresión calibrados se realizó para la segunda mitad de los datos (1996-2010), la simulación de series de temperatura y precipitación; la comparación de las medias y varianzas de los datos mensuales, observados y simulados, fueron realizadas mediante las pruebas t y F, con el 95% de confianza. La componente estocástica del SDSM permite realizar 100 simulaciones en este proceso; para este estudio se realizaron 20 simulaciones, y se eligió la media de ese conjunto (ensemble) de simulaciones para la construcción de escenarios.

4) Generación de escenarios futuros (usando predictores del modelo climático). Con los modelos validados se generaron para cada variable climática y ciudad seleccionada, escenarios climáticos con dos Rutas de Concentración Representativa (RCP), de 2.6 y 8.5 W/m². Los escenarios RCP contienen emisiones, concentraciones, cambio de uso del suelo y cambio en variables ambientales y bio-geoquímicas para el siglo XXI. La premisa es que cualquier ruta de forzamiento radiativo puede resultar de un diverso rango de escenarios de desarrollo socioeconómico y tecnológico. Los escenarios generados de temperaturas máximas, temperaturas mínimas y precipitación en las distintas ciudades elegidas (tabla 1), se construyeron para los horizontes temporales 2006-2037, 2038-2069 y 2070-2100, a los cuales se les llama escenarios de los 2020s, 2050s y 2080s, respectivamente.

5) Análisis de salidas (usando un rango de diagnósticos climáticos). Posterior a la generación de escenarios climáticos, se realizó un análisis comparativo, tanto con el escenario base, como entre forzamientos radiativos.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Un punto importante a resaltar, en este resumen de resultados, es que los cambios representan la diferencia entre valores futuros simulados y valores de referencia

simulados. En otras palabras, los cambios no representan la diferencia entre una salida del modelo y los valores de las normales climáticas observadas (o de referencia), sino la diferencia entre las dos salidas del modelo, de ahí la importancia que la calibración del modelo haya sido realizado con una precisión adecuada (Koukidis y Berg, 2009). Los cambios para horizontes específicos de tiempo sobre el que una variable es promediada se comparó al período de referencia promedio 1981-2010. Como se mencionó anteriormente, los escenarios son calculados para los horizontes temporales 2020's (2006-2037), 2050's (2038-2069), y 2080's (2070-2100).

En términos generales el patrón mensual observado, obtenido a partir de mediciones diarias, de la temperatura máxima media (\overline{Tmax}), temperatura mínima media (\overline{Tmin}) y precipitación media (P), de las diversas ciudades analizadas, fue bien reproducido por el SDSM, en base a los resultados de la etapa de validación, lo que dio confianza para su utilización en la generación de escenarios climáticos.

En las tablas 2 y 3 se resumen los cambios en diferentes horizontes temporales con las RCP 2.6 y 8.5 W/m², respecto al período base, de la \overline{Tmax} , \overline{Tmin} y P, respectivamente. En esas tablas la simbología utilizada significa: SC, sin cambio, **signo negativo (-)**, decremento, **signo positivo (+)**, incremento.

Ciudad	RCP26 (2.6 W/m ²)			RCP85 (8.5 W/m ²)		
	2020	2050	2080	2020	2050	2080
Aguascalientes	-/-	-/-	+/+	-/SC	-/-	+/+
Mexicali	+/-	-/-	+/+	SC/SC	-/SC	+/+
Tijuana	SC/SC	-/-	+/+	-/-	-/-	+/+
Tuxtla Gutierrez	SC/SC	+/SC	+/+	SC/SC	+/+	+/+
Úrsula Coapa, CDMX	+/SC	-/SC	+/+	SC/SC	-/+	+/+
Gran Canal, CDMX	SC/SC	-/-	+/SC	SC/SC	SC/+	+/+
Milpa Alta, CDMX	SC/SC	-/-	SC/+	SC/SC	-/+	-/+
León	SC/SC	+/-	SC/+	SC/SC	+/-	+/+
Guadalajara	SC/-	+/+	+/+	SC/-	+/+	+/+
Aculco, ZMVM	-/-	-/-	SC/+	-/-	-/-	+/+
Toluca, ZMVM	+/SC	-/SC	-/-	+/+	-/+	-/+
Chapingo, ZMVM	SC/SC	+/+	+/+	+/SC	+/+	+/+
Monterrey	SC/+	-/+	+/+	+/SC	+/+	+/+
Puebla	SC/SC	+/-	+/+	SC/SC	+/+	+/+
Tlaxcala	SC/SC	+/+	+/+	+/+	+/+	+/+
Veracruz	SC/SC	+/+	+/SC	SC/SC	+/+	+/SC

Tabla 2: Cambios de $\overline{Tmax}/\overline{Tmin}$ en diferentes horizontes temporales para ciudades seleccionadas de México con RCP 2.6 y 8.5 W/m². CDMX significa Ciudad de México y ZMVM Zona Metropolitana del Valle de México. Fuente: elaboración propia

En los resultados de $\overline{Tmax}/\overline{Tmin}$ presentados en la tabla 2, se observa que para los 2020s, hay varias ciudades que no presentan cambios con ambos RCPs; pero con el RCP85, dos de las 16 ciudades, proyectan incrementos, entre ellas, Toluca y Tlaxcala.

Para la \overline{Tmax} de los 2050s, con ambos forzamientos radiativos, a excepción de Gran Canal, ubicado en la Ciudad de México, que no presenta cambio, todas las demás presentan decrementos o incrementos. Para fines de siglo (escenario de los 2080), con el RCP26, doce ciudades/regiones de las 16 analizadas presentan incremento, la ciudad de Toluca un decremento (sostenido a partir de los 2050), y tres de ellas sin cambio (Milpa Alta, Aculco y León). Con el RCP85, catorce de las 16 ciudades/regiones presentan incremento, y solo dos de ellas decremento (Milpa Alta y Toluca, que también presentan ese comportamiento en los 2050).

El incremento anual cuantificado, no mostrado en la tabla 2, de la \overline{Tmax} es en general pequeño, el valor más alto es de 1.1°C para la ciudad de Aguascalientes, y el más bajo es de 0.2°C, para Aculco en la Zona Metropolitana del Valle de México.

Respecto a la \overline{Tmin} se observa que para los 2020s, con ambos RCPs, De las 16 ciudades/regiones analizadas hay once que no presentan cambio, cuatro de ellas presentan decremento con el RCP26, y tres con el RCP85; con ambos forzamientos se repiten las ciudades de Aculco y Guadalajara, agregándose Aguascalientes, Mexicali y Tijuana. Para fines de siglo (2080s), con el RCP26 y RCP85, trece y quince de ellas presentan incrementos, respectivamente. La única ciudad que no presenta cambio es la de Veracruz.

El incremento anual para la \overline{Tmin} es pequeño; el mayor incremento, para el escenario 2080 y RCP85 es para la ciudad de Monterrey con 1.2°C, siguiéndole las ciudades de Mexicali y Aculco, con incremento de alrededor de 1°C.

Estacionalmente, los incrementos o decrementos, no mostrados y solo descritos brevemente, son mayores que a nivel anual. Por ejemplo, para la ciudad de Mexicali la \overline{Tmax} para los 2050s, con el RCP26, se incrementa 1.1°C en la primavera, pero disminuye 2.9°C en el otoño; respecto a la \overline{Tmin} en el verano, también para Mexicali, con el RCP85 y RCP26, hacia fines de siglo, se incrementaría 2.4°C y 1.4°C, respectivamente.

Para la ciudad de Tijuana, con el RCP85 y escenario 2080, la \overline{Tmin} se incrementaría 1.1°C en el verano. Para Úrsula Coapa, en la primavera y otoño se proyectan incrementos para los 2080 en la \overline{Tmax} con el RCP85, de 1.6°C y 1.5°C, respectivamente. Para Milpa Alta, también para la primavera y otoño, con el RCP85 y hacia fines de siglo, la \overline{Tmax} , se incrementaría alrededor de 1.4°C.

En Aculco, para la primavera y verano, con el RCP85 y escenario 2080, la \overline{Tmin} incrementaría en ambas estaciones aproximadamente 1.4°C. Para la ciudad de Guadalajara en la primavera de los 2050, la \overline{Tmin} se incrementaría 1.4°C con el RCP26, y 1.6°C, con el RCP85.

Caso importante de comentar es la ciudad de Monterrey ya que la \overline{Tmax} para los 2050 en la estación de otoño, tendría un decremento de 5°C con el RCP26, y de 4°C con el RCP85, que es una situación que se revierte a fines de siglo para volver a tener nuevamente en forma aproximada los valores del escenario base. En cuanto a la \overline{Tmin} , también para Monterrey, escenario 2050, con el RCP26 se proyecta un incremento para la primavera de 4.3°C, y con el RCP85 de 5°C.

En el caso de la ciudad de Tlaxcala, el principal cambio estacional sucede en la primavera, con el escenario temporal de los 2050, tanto para \overline{Tmax} , como para \overline{Tmin} , y con ambos forzamientos radiativos (RCP26 y RCP85), teniendo incrementos proyectados entre 1.6°C y 1.9°C.

En la tabla 3 se presentan los cambios, respecto al escenario base, de la precipitación media anual (P).

Ciudad	RCP26 (2.6 W/m ²)			RCP85 (8.5 W/m ²)		
	2020	2050	2080	2020	2050	2080
Aguascalientes	-	-	+	SC	-	+
Mexicali	-	-	+	SC	SC	+
Tijuana	SC	-	+	-	-	+
Tuxtla Gutiérrez	SC	SC	+	SC	+	+
Úrsula Coapa, CDMX	SC	+	+	SC	+	+
Gran Canal, CDMX	SC	-	SC	SC	+	+
Milpa Alta, CDMX	SC	-	+	SC	+	+
León	SC	-	+	SC	-	+
Guadalajara	-	+	+	-	+	+
Aculco, ZMVM	-	-	+	-	+	+
Toluca, ZMVM	SC	SC	-	+	+	+
Chapingo, ZMVM	SC	+	+	SC	+	+
Monterrey	+	+	+	SC	+	+
Puebla	SC	-	+	SC	+	+
Tlaxcala	SC	+	+	+	+	+
Veracruz	SC	+	SC	SC	+	SC

Tabla 3: Cambios de la precipitación media anual en diferentes horizontes de tiempo para ciudades seleccionadas de México con RCP 2.5 y 8.6 W/m². CDMX significa Ciudad de México y ZMVM Zona Metropolitana del Valle de México.

Fuente: elaboración propia

Se observa de la tabla 3 que para los 2020s, hay 11 ciudades/regiones que no presentan cambios con ambos RCPs, de las cuales hay coincidencia en ocho de ellas; para ese mismo horizonte temporal (2020s) con el RCP26, sólo la ciudad de Monterrey presentaría incrementos, mientras que con el RCP85, dos de las 16 ciudades/regiones (Toluca y Tlaxcala), proyectan incrementos. Las ciudades que presentan decremento con el RCP85 son Aculco y Guadalajara, agregando a Aguascalientes y Mexicali con el RCP26.

Para los 2050s, con ambos forzamientos radiativos, a excepción de Mexicali (con el RCP85), y Tuxtla Gutiérrez y Toluca, (con el RCP26) que no presentan cambios, todas las demás presentan decrementos o incrementos. Para fines de siglo (escenario de los 2080), con el RCP26, once ciudades/regiones de las 16 analizadas presentan incremento, la ciudad de Toluca un decremento, y dos de ellas sin cambio (Gran Canal y Veracruz). Con el RCP85, quince de las 16 ciudades/regiones presentan incremento, y solo una de ellas no presenta cambio (Veracruz), que también presenta ese comportamiento con el RCP26.

En general, los incrementos o decrementos en los escenarios climáticos analizados de la precipitación en las diferentes ciudades no son grandes, respecto al escenario base

de cada una de ellas; el valor más alto es el de Monterrey, que con un decremento de 73 mm representa el 9% del período base, mientras que el mayor incremento es para la ciudad de Aguascalientes, que con 36.7 mm representa el 7% del escenario base, siguiéndole Tuxtla Gutiérrez, que con 38.2 mm representa el 4% del escenario base.

A nivel estacional, las de primavera y verano son las que resaltan más, a excepción de las ciudades de Mexicali y Tijuana, cuyo régimen de lluvias es en invierno. La ciudad de Puebla, p.e., con un decremento de 50 mm en el verano hacia fines de siglo, contabiliza un 10% menor respecto a su período base. Algunas otras ciudades como Monterrey, Guadalajara, Milpa Alta en la CDMX y Chapingo en la ZMVM, también proyectan decrementos estacionales, sobre todo en el verano. Otras ciudades, como Tlaxcala y Úrsula Coapa en CDMX, hacia fines de siglo, y Monterrey en el escenario de los 2050, incrementarían ligeramente su precipitación en la primavera.

Es importante mencionar que los escenarios climáticos obtenidos para diversas ciudades mexicanas, con la incertidumbre que representa utilizar un solo modelo para su realización, han modificado, y ampliado su cobertura superficial, con materiales propios de la urbanización, por lo que el efecto de la isla de calor urbana está presente en varias de ellas (Jáuregui, 2005; García-Cueto et al., 2007), y que en algunos casos ya exceden los valores de temperatura mínima anual obtenida. Así que en el futuro se propone, además de otros modelos de downscaling, para comparar lo encontrado en esta investigación, adicionar el calentamiento urbano.

4. CONCLUSIONES

Mediante la aplicación del SDSM a varias ciudades de México se encontró, utilizando las proyecciones del MCG CanESM2, que la tendencia hacia temperaturas más altas es muy clara hacia fines del siglo XXI, principalmente con la RCP de 8.5 W/m²; a nivel estacional los incrementos térmicos, en algunas ciudades, son más notables que a nivel anual. La precipitación, con su variabilidad espacial característica, hacia fines de siglo presenta incrementos porcentuales de 4 a 9%, respecto del escenario base, en la mayoría de las ciudades; estacionalmente se encuentran decrementos, como el caso de algunas ciudades del centro del país con valores máximos del 10%. Es importante mencionar que el efecto de la isla de calor urbano no ha sido tomado en cuenta en este análisis, y que en algunos casos podría tener un efecto cuantitativo mayor que lo mostrado en los escenarios climáticos presentados. A pesar de lo anterior, el SDSM es una técnica cuyos resultados, en conjunto con otros estudios que lo complementen, tal como el de tendencias climáticas e índices y extremos climáticos, deberían ser utilizados en la toma de decisiones de mitigación y adaptación al cambio climático en las ciudades.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue posible gracias al financiamiento del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología bajo la tutela de proyecto CB 2011-167595 apoyado en la convocatoria de Ciencia Básica.

REFERENCIAS

- GARCÍA-CUETO, OR; JÁUREGUI, E; TOUDERT, D; TEJEDA, A. 2007. Detection of the urban heat island in Mexicali, B.C., México and its relationship with land use. *Atmósfera* 20, 111-135.
- GRIMM, NB; FAETH, SH; GOLUBIEWSKY, NE; REDMAN, CL; WU, J; BAI, X; BRIGGS, JM, 2008. Global Change and the ecology of cities. *Science* 319 (5864), 756-760. DOI: 10.1126/science.1150195
- JÁUREGUI, E. 2005. Possible impact of urbanization on the thermal climate of some large cities in México. *Atmósfera* 18, 4, 249-252.
- HASHMI, MZ; SHAMSELDIN, AD; MELVILLE, BW. 2009. Statistical downscaling of precipitation: state-of-the-art and application of Bayesian multi-model approach for uncertainty assessment. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 6, 6535-6579.
- KOUKIDIS, EN and BERG, AA. 2010. Sensitivity of the Statistical Downscaling Model (SDSM) to reanalysis products. *Atmosphere-Ocean* 47, 1-18.
- MAHMOOD, R. and BABEL, MS. 2013. Evaluation of SDSM developed by annual and monthly sub-models for downscaling temperature and precipitation in the Jhelum Basin, Pakistan and India. *Theor. Appl. Climatol.*, 113, 27-44, doi: 10.1007/s00704-012-0765-0.
- MCCARTHY, MP; BEST, MJ; BETTS, RA. 2010. Climate change in cities due to global warming and urban effects. *Geophysical. Res. Letters*, 37, 5 pp.
- MEARNS, LO; GIORGI, F; WHETTON, P; PABÓN, D; HULME, M; LAL, M. 2003. Guidelines for use of climate scenarios developed from regional climate experiments. Data Distribution Centre for IPCC, Hamburg and New York. 38 pp.
- ROSENZWEIG, C; SOLECKI, WD; HAMMER, SA; MEHROTRA S. 2011. Urban climate change in context. In *Climate Change and Cities: First Assessment Report of the Urban Climate Change Research Network*. C. Rosenzweig, WD Solecki, SA Hammer and S Mehrotra Eds. Cambridge University Press, pp. 31.
- SHUKLA, R, KHARE, D, DEO, R. 2015. Statistical downscaling of climate change scenarios of rainfall and temperature over Indira Sagar command area in Madhya Pradesh India. *IEEE 14th International Conference on Machine Learning and Applications*, 313-317 pp. DOI 10.1109/ICMLA.2015.75
- SINGH, D, JAIN, SK, GUPTA RD. 2015. Statistical downscaling and projection of future temperature and precipitation change in middle catchment of Sutlej River Basin, India. *J. Earth Sys. Sci.* 124, No. 4, 843-860.
- VON STORCH, H; LANGENBER, H; FESER, F. 2000. A spectral nudging technique for dynamical downscaling purposes. *Mon. Wea. Rev.* 128, 3664-3673.
- WILBY, RL; DAWSON, CW; DAWSON, EM. 2002. SDSM-A decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. *Environ. Modelling. & Software*, 17, 147-159.
- WILBY, RL and DAWSON, CW. 2013. The statistical downscaling model: Insights from one decade of application; *Int. J. Climatol.*, 33, 1707-1719, doi: 10.1002/joc.3544.