

IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LOS REGÍMENES DE TEMPERATURA DEL SUELO EN MÉXICO

Jesús David GÓMEZ DÍAZ¹, Alejandro Ismael MONTERROSO RIVAS¹, Lizeth Margarita LECHUGA GAYOSSO¹, Patricia RUÍZ GARCÍA¹, Cecilia CONDE ÁLVAREZ²

¹*Departamento de Suelos. Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México.*
²*Centro de Ciencias de la Atmosfera. Universidad Nacional Autónoma de México.*

**dgomez@correo.chapingo.mx, aimrivas@correo.chapingo.mx,
liz_260291@hotmail.com, cometapat18@hotmail.com, conde@unam.mx**

RESUMEN

En este estudio se analizó el régimen de temperatura actual estimado con datos de 1970-2000 de los suelos de México y el impacto del cambio climático para las RCPs 4.5 y 8.5 W/m² en los escenarios de tiempo de corto (2015-2039) y mediano plazo (2045-2069) con los Modelos GFDL, HADGEM y MPI. Los regímenes de temperatura del suelo más fríos con temperatura media anual <8°C (*Gelic, Cryic y Frigid*) representan solo el 0.04% de la superficie del país, mientras que el régimen con temperaturas ≥8°C y <15°C (*Mesic e Isomesic*) representan el 6.47%. El 47% de la superficie tiene temperatura media anual ≥15°C y <22°C (*Thermic e Isothermic*) y el 45% tienen una temperatura media anual ≥22°C (*Hyperthermic e Isohyperthermic*). Los cambios de la superficie de los regímenes de temperatura del suelo estimados con el modelo GFDL presenta las menores variaciones comparado con las condiciones actuales, con un aumento ligero en la superficie de los regímenes de temperatura media anual ≥ 22°C en el escenario a mediano plazo y mayor forzamiento radiativo. En el modelo HADGEM se estiman los mayores cambios con aumentos considerables en la superficie de los regímenes con temperatura media anual ≥ 22°C, con mayor impacto en el RCP de 8.5 y en el escenario a mediano plazo. En el modelo MPI se estima una variación intermedia entre los otros dos modelos, también con mayor incremento de la superficie de los regímenes con temperaturas altas en el RCP de mayor forzamiento radiativo y en el escenario a mediano plazo.

Palabras clave: Temperatura del suelo, calentamiento global, oscilación térmica, vulnerabilidad.

ABSTRACT

In this study, the current temperature regime of Mexican soils estimated with data from 1970 to 2000 and the impact of climate change for the RCPs 4.5 and 8.5 W/m² were analyzed for the short (2015-2039) and medium term (2045-2069) time scenarios and with the GFDL, HADGEM and MPI models. The colder soil temperature regimes with mean annual soil temperature <8°C (*Gelic, Cryic and Frigid*) represent only 0.04%, while the regime with temperatures ≥8°C and <15°C (*Mesic and Isomesic*)

represent 6.47%. 47% of the country surface has an annual average temperature $\geq 15^{\circ}\text{C}$ and $< 22^{\circ}\text{C}$ (*Thermic and Isothermic*) and 45% have an annual average temperature $\geq 22^{\circ}\text{C}$ (*Hyperthermic and Isohyperthermic*). The changes in the surface of the soil temperature regimes estimated with the GFDL model shows the smallest variations compared to the current conditions, with a slight increase in the surface of the average annual temperature regimes $\geq 22^{\circ}\text{C}$ in the medium-term scenario and greater radiative forcing. In the HADGEM model, the largest changes are estimated with considerable increases in the surface of the regimes with an annual mean temperature $\geq 22^{\circ}\text{C}$, with a greater impact on the RCP of 8.5 in the medium-term scenario. In the MPI model, an intermediate variation is estimated between the other two models, also with a greater increase in the surface of the regimes with high temperatures in the RCP with higher radiative forcing and in the medium-term scenario.

Key words: Soil temperature, global warming, thermal oscillation, vulnerability.

1. INTRODUCCIÓN

El suelo es uno de los recursos del medio natural más valiosos y está integrado a las funciones de todos los ecosistemas terrestres y en la producción de alimentos y fibras. Es crucial como el sustrato para la producción primaria en el planeta, proporcionando agua, nutrientes, aire y la base física para el crecimiento de las plantas, influyendo así directamente en la cadena alimentaria (Lynch y Schepers, 2008). Todos los procesos de este sistema dependen en gran medida de sus propiedades físicas y químicas, de la temperatura, la disponibilidad de agua y, especialmente de las actividades biológicas, que determinan las características de los suelos y sus funciones para las sociedades humanas y el medio ambiente (Zhang y Nearing, 2005). Estas funciones están gravemente amenazadas por el cambio climático. La producción total de biomasa puede verse severamente afectada sobre todo si se incrementa el déficit hídrico derivado de un aumento en la evapotranspiración con el aumento de la temperatura, y además si se da una disminución en la precipitación. Así mismo por la disminución de la materia orgánica del suelo que generaría un deterioro en varias de las propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo (Paustian et al., 2016).

El cambio climático influye fuertemente en los procesos que ocurren en el suelo y por consecuencia en sus principales funciones. La producción total de biomasa puede verse severamente afectada en caso de menor precipitación y posiblemente también bajo una mayor precipitación, porque se puede incrementar la lixiviación de nutrientes del suelo (Blum, 2005).

No se puede dar una respuesta general a la pregunta en qué dirección e intensidad el cambio climático influirá en los eco-servicios del suelo a escala local o regional. Estos cambios deben ser analizados en detalle en los diferentes suelos y eco-regiones del planeta, dependiendo de los cambios climáticos prevalecientes en estos ambientes. Esto significa que deben hacerse estudios del impacto del cambio climático global a nivel local y regional y en particular a los diferentes componentes del medio natural y a la capacidad productiva de las tierras, considerando cada una de sus propiedades (Blum, 2005).

La temperatura y la humedad del suelo son factores importantes que afectan la descomposición de la materia orgánica del suelo, el ciclo hidrológico y el crecimiento de las plantas (Jury y Horton, 2004; Euskirchen et al., 2006). Sin embargo, no son comunes los estudios sobre las variaciones en la temperatura y humedad del suelo en los estudios de impacto del cambio climático, así como en los efectos asociados en los ecosistemas y en las actividades humanas. Se reportan solo algunos estudios sobre la dinámica temporal y espacial de la temperatura y de la humedad del suelo, asociado a que los datos de estos parámetros no son fácilmente obtenidos (Song et al., 2013; Hao et al., 2014).

Para fines prácticos el régimen de temperatura de los suelos hace referencia a la temperatura media anual medida a una profundidad de 50 cm o a un contacto con una capa consolidada que no permite el paso de las raíces, lo que ocurra primero (Soil Survey Staff, 2014). La falta de medidas de la temperatura del suelo en campo supone una dificultad grande para su aplicación por lo que suele deducirse a partir de los datos de temperatura del aire (Van Wambeke, 2000).

En este estudio se determinaron los regímenes de temperatura actual de los suelos de México y el impacto del cambio climático en estos para las Trayectorias de Concentración Representativas (RCPs) 4.5 y 8.5 W/m² para los escenarios de tiempo a corto (2015-2039) y mediano (2040-2069) plazo con los Modelos Generales de Circulación Atmosférica GFDL (Dunne et al., 2012, 2013), HADGEM (Hewitt, et al., 2011) y MPI (Stevens, et al., 2013).

2. MÉTODOS

El trabajo se dividió en dos partes, primero en determinar la temperatura del suelo a partir de la temperatura media mensual del aire con la base de datos de las 594 995 Áreas de influencia Climática (AIC) elaboradas por Gomez et al., (2011) a escala 1: 250 000. con lo que se definieron los regímenes de temperatura del suelo de acuerdo a los criterios del Soil Survey Staff (2014) y aplicando los conceptos del Modelo Newhall actualizados por Van Wambeke (2000). Segundo, en estimar las razones de cambio de la temperatura media mensual del aire para los escenarios de cambio climático estimados con los modelos GFDL, HADGEM y MPI para los RCP 4.5 y 8.5 W/m², con los escenarios de tiempo de corto (2015-2039) y mediano plazo (2045-2069) para el país y aplicarlas a las bases de datos promedio de las AIC y posteriormente determinar los regímenes de temperatura del suelo para estos escenarios de cambio climático.

3. RESULTADOS

Del total de la superficie del país (196,437,500 ha) el 92% tiene régimen de temperatura de los suelos con valores iguales o mayores a 15°C de temperatura media anual (Tabla I). De estos, en el 47% la temperatura media anual del suelo es igual o mayor a 15°C pero menor de 22°C (*Thermic* e *Isothermic*) y solo el 3.3% tienen una oscilación entre la temperatura media de verano y la media de invierno menor a 6°C (*Isothermic*). El 45% de los suelos del país tienen una temperatura media anual igual o mayor a 22°C (*Hyperthermic* e *Isohyperthermic*), y de estos solo el 4% tienen una

oscilación entre la temperatura media de verano y la media de invierno menor a 6°C (*Isohyperthermic*). En la figura 1 se muestra la distribución de los diferentes grupos de regímenes de temperatura del suelo en México. Las regiones del país con regímenes de temperatura *Isothermic* e *Isohyperthermic* se concentran principalmente en las zonas húmedas y de menor latitud del país. Los regímenes de temperatura del suelo más fríos (*Gelic*, *Cryic* y *Frigid*) están asociados a las áreas de mayor altura del Eje Neovolcánico Transversal en donde el régimen *Gelic* corresponde a las áreas que estaban cubiertas con glaciares en las cumbres más altas del país. El régimen de temperatura *Mesic* (6.47%) corresponde a las áreas altas de las zonas montañosas del país, con una mayor superficie en la Sierra Madre Occidental, la Sierra de San Pedro Mártir en la Península de Baja California, la parte norte del Eje Neovolcánico Transversal y las montañas más altas de la Sierra Madre Oriental. El *Isomésico* (1.27%) está en la parte sur del Eje Neovolcánico Transversal y una pequeña porción en la Sierra Madre de Chiapas.

Regímenes de temperatura del suelo	Temperatura media anual del suelo	Diferencia de temperatura entre verano e invierno	Superficie (miles de ha)	Porcentaje de la superficie del país
Gelic	$\leq 0^{\circ}\text{C}$	-	2.2	0.00
Cryic	$>0^{\circ}\text{C}$ y $<8^{\circ}\text{C}$	$< 6^{\circ}\text{C}$	84.6	0.04
Frigid		$\geq 6^{\circ}\text{C}$	46.3	0.02
Mesic	$\geq 8^{\circ}\text{C}$ y $< 15^{\circ}\text{C}$	$\geq 6^{\circ}\text{C}$	12703.6	6.47
Isomesic		$< 6^{\circ}\text{C}$	2485.6	1.27
Thermic	$\geq 15^{\circ}\text{C}$ y $< 22^{\circ}\text{C}$	$\geq 6^{\circ}\text{C}$	87166.5	44.37
Isothermic		$< 6^{\circ}\text{C}$	6590.3	3.35
Hyperthermic	≥ 22	$\geq 6^{\circ}\text{C}$	79 599.5	40.52
Isohyperthermic		$< 6^{\circ}\text{C}$	7759.0	3.96

Tabla 1: Superficie en miles de hectáreas de los regímenes de temperatura actuales de los suelos en México. Fuente: elaboración propia

En la Figura 2 se muestran las gráficas con las superficies de los diferentes regímenes de temperatura del suelo para el escenario a corto plazo (2015 – 2039) y en la Figura 3 para el escenario a mediano plazo (2045 – 2069).

La variación de la superficie de los regímenes de temperatura del suelo estimados con el modelo GFDL en los dos RCP en el escenario de tiempo a corto plazo presenta variaciones mínimas, y para el mediano plazo se prevé que disminuya la superficie de los regímenes de temperatura con temperatura media anual menor de 22°C, con desplazamientos a los regímenes de mayor temperatura, por lo que se estima un incremento en la superficie del régimen *Hyperthermic* en mayor proporción en el RCP de mayor forzamiento radiativo.

En el modelo HADGEM es donde se estima mayor reducción de los regímenes de temperatura más frescos y aumentos considerables en la superficie de los regímenes con temperatura media anual igual o mayor a 22°C. El impacto es mayor en el RCP de mayor forzamiento radiativo y aumenta en el escenario a mediano plazo.

La variación de la superficie de los regímenes de temperatura del suelo para el modelo MPI es intermedia entre los otros dos modelos, en donde se destaca un mayor incremento de la superficie con regímenes de temperatura *Isothermic* e *Isohyperthermic*, lo que indica una menor oscilación anual de la temperatura del suelo, en donde también es evidente la diferencia entre los dos RCP, presentándose mayores incrementos de la superficie de los regímenes con temperaturas altas en el RCP de mayor forzamiento radiativo así como también en el escenario a mediano plazo.

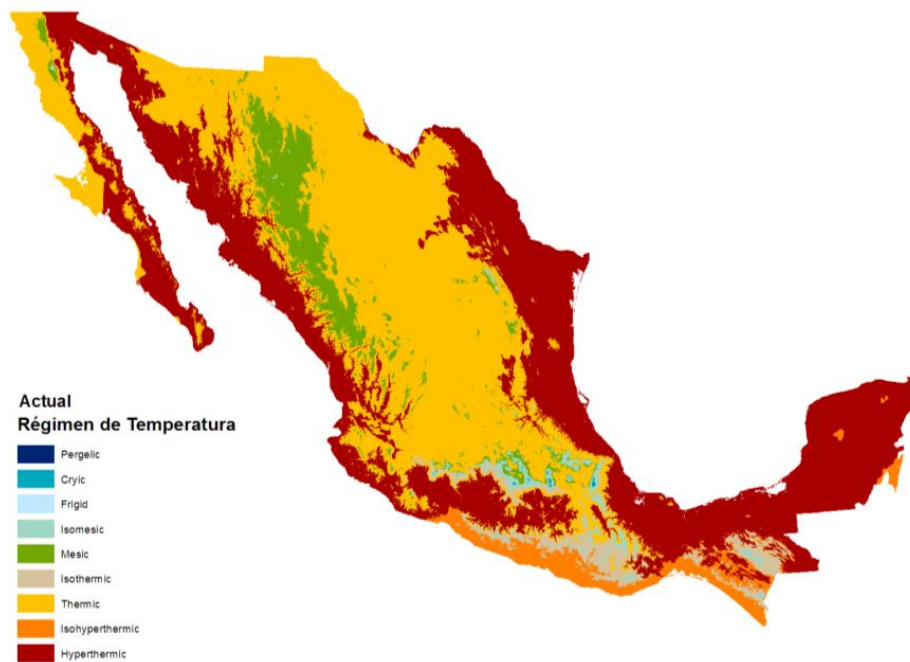


Fig. 1: Distribución del régimen de temperatura actual de los suelos de México.

Fuente: elaboración propia

4. DISCUSIÓN

Se estima con cierto grado de confianza de que la temperatura de los suelos se incrementará en el futuro como consecuencia del calentamiento global, sin embargo, las proyecciones de cómo cambiarán los patrones de precipitación y el contenido de humedad de los suelos tienen mayor incertidumbre, en algunas áreas los suelos serán más húmedos y en otras más secos (Smith, 2012). El incremento de la temperatura de los suelos puede favorecer algunos grupos funcionales de plantas sobre otros, así como cambios en la composición de especies en las comunidades naturales (Wardle, 2002). El calentamiento del suelo tendrá sinergias con otros cambios ambientales, incluyendo el enriquecimiento de CO₂, cambios en la precipitación, deposición de Nitrógeno (Pritchard y Amthor, 2005), sin embargo, es claro que el incremento de la temperatura del suelo afectará a las raíces y los procesos asociados a estas, como son el crecimiento radicular, su descomposición y de otros residuos vegetales, las

actividades de los organismos del suelo, esto al cambiar el rango de temperatura en que se desarrollan (Pritchard, 2011). Las plantas que crecen en temperaturas subóptimas a sus requerimientos probablemente tendrán mejores condiciones para su desarrollo, sin embargo, las plantas que están en condiciones de temperaturas supraóptimas, se verán afectadas adversamente (McMichael y Burke, 1998).

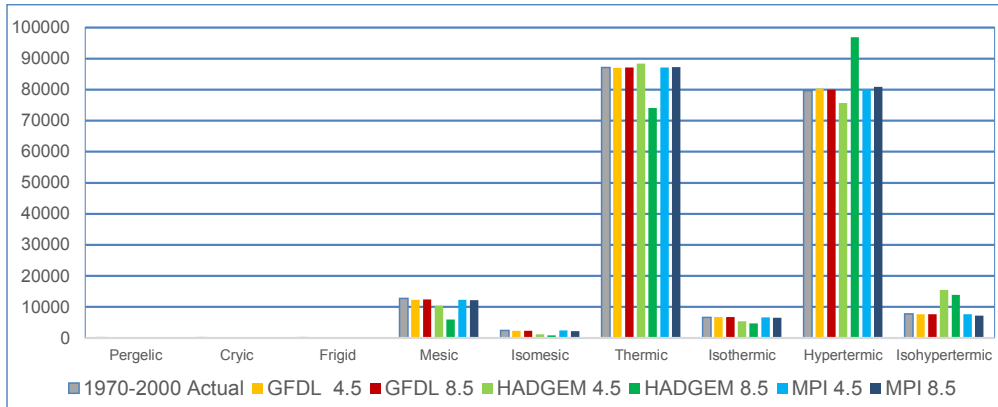


Fig. 2: Superficie en miles de hectáreas de los regímenes de temperatura actual de los suelos de México y a corto plazo (2015-2039) estimados con los modelos GFDL, HADGEM y MPI para los RCP de 4.5 y 8.5 W/m². Fuente: elaboración propia

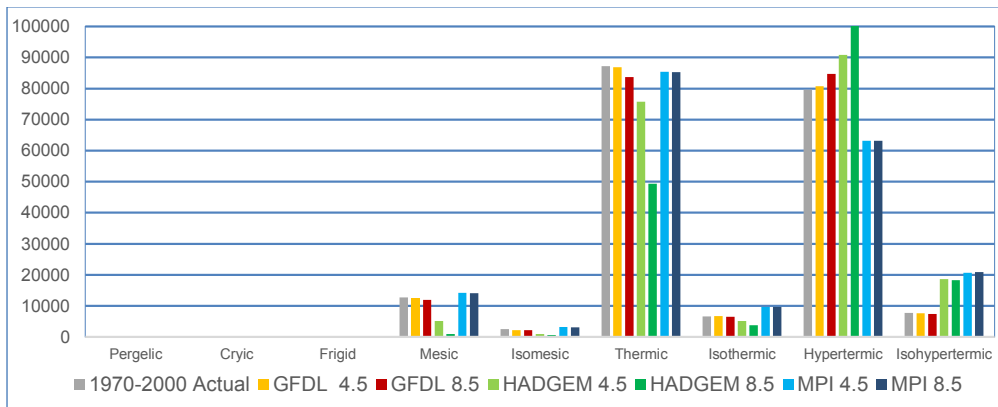


Fig. 3: Superficie en miles de hectáreas de los regímenes de temperatura actual de los suelos de México y a mediano plazo (2045-2069) estimados con los modelos GFDL, HADGEM y MPI para los RCP de 4.5 y 8.5 W/m². Fuente: elaboración propia

El calentamiento del suelo usualmente estimulará la actividad microbiana, las tasas de nitrificación, la mineralización del Fósforo y del Nitrógeno y la respiración total de los organismos del suelo (Andresen et al., 2010). La adaptación de la comunidad

microbiana del suelo puede derivar en cambios en la composición de los organismos del suelo y de toda la cadena alimenticia del suelo, con cambios en las condiciones en las que prosperan ciertas plantas (Balser et al., 2006). La descomposición de la materia orgánica se acelera al aumentar la temperatura del suelo si es que hay humedad disponible, por lo que pueden transferirse cantidades significativas del Carbono del suelo a la atmósfera, causando una retroalimentación que aumentará el calentamiento global (van der Putten, 2009)

En muchas regiones el incremento de las temperaturas traerá asociadas sequías más severas y frecuentes, lo que tendrá efectos adversos significativos sobre las comunidades vegetales y rendimientos en los cultivos, así como cambios en los patrones estacionales de desarrollo (Childress et al. 2015). Incrementos de las temperaturas puede acelerar el crecimiento de los cultivos, lo que puede hacerlos más vulnerables a déficit de humedad en las etapas más sensibles y por lo tanto una reducción en los rendimientos, asimismo, muchos cultivos se verán afectados si la temperatura excede su rango de adaptación, y como consecuencia se tendrá un decline en la producción (U.S. EPA 2013). El incremento en la temperatura aumentará las necesidades de agua de muchas plantas, y de no haber un incremento en la precipitación o la posibilidad de aplicar riego, afectará sustancialmente el desarrollo de estas, así como incrementará la vulnerabilidad a ataques de plagas y enfermedades (Udall, 2013), también, algunos cultivos bajo riego pueden ser sensibles al incremento de la temperatura y se reducirían los rendimientos (Islam et al., 2012).

Mientras los cultivos pueden responder positivamente a mayores concentraciones de CO₂, los impactos asociados al incremento de la temperatura y a patrones de precipitación alterados, así como a la posible mayor frecuencia de eventos extremos como sequías o inundaciones, aumentarán los riesgos de disminuir la producción en muchas regiones del mundo, particularmente en países en vías de desarrollo, asociado a la falta de capital para establecer medidas de adaptación (Tubiello y Fischer, 2007). El conocer los cambios en la temperatura del suelo, en conjunto con otras presiones asociadas al cambio climático en las próximas décadas, permitirá diseñar estrategias de adaptación y mitigación para minimizar en lo posible los impactos negativos del cambio del clima en las actividades humanas y en los ecosistemas.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Chapingo, particularmente al Centro de Investigación de Recursos Naturales y Medio Ambiente por el apoyo financiero y logístico para la realización del Proyecto “Impacto del cambio climático en el régimen de temperatura de los suelos de México”, del cual forma parte este trabajo.

REFERENCIAS

Andresen, L.C., A. Michelsen, S. Jonasson, et al., 2010. Plant nutrient mobilization in temperature heathlands responds to elevated CO₂, temperature, and drought. *Plant and Soil* 328, 381-396.

- Balsler, T.C., D.K. McMahon, D. Bart et al. 2006. Bridging the gap between micro and macro scale perspectives on the role of microbial communities in global change ecology. *Plant and Soil* 289, 59-70
- Blum, W.E.H. 2005. Soil and climate change. 2005. *J. Soils & Sediments* 5 (2), 67-68. DOI: <http://dx.doi.org/10.0165/jss2005.02.006>.
- Childress, A., E. Kelly, and W. Travis. 2015. Chapter 6—Agriculture Sector. In *Colorado Climate Change Vulnerability Study*, edited by Eric Gordon and Dennis Ojima. University of Colorado, Boulder, CO and Colorado State University, Fort Collins, CO.
- Dunne, J.P. and coauthors. 2012. GFDL's ESM2 global coupled climate-carbon Earth System Models. Part II: Carbon system formulation and baseline simulation characteristics. *J. Climate*, 25, 6646-6665.
- Dunne, J.P. and coauthors. 2013. GFDL's ESM2 global coupled climate-carbon Earth System Models. Part I: Physical formulation and baseline simulation characteristics. *J. Climate*, 26, 2247-2267.
- Euskirchen, E.S., A.D. McGuire, D.W. Kicklighter, Q. Zhuang, J.S. Clein, R.J. Dargaville, D.G. Dye, J.S. Kimball, K.C. McDonald, J.M. Melillo, V.E. Romanovsky, and N.V. Smith. 2006. Importance of recent shifts in soil thermal dynamics on growing season length, productivity, and carbon sequestration in terrestrial high-latitude ecosystems. *Glob. Chang. Biol.*, 12, 731-750
- Gómez-Díaz, J., A. Monterroso-Rivas, J. Tinoco-Rueda, M. Toledo-Medrano, C. Conde-Alvarez, and C. Gay-García. 2011. Assessing current and potential patterns of 16 forest species driven by climate change scenarios in México. *Atmósfera*, 24(1), 31-52.
- Hao, G., Q. Zhuang, J. Pan, Z. Jin, X. Zhu, and S. Liu. 2014. Soil thermal dynamics of terrestrial ecosystems of the conterminous United States from 1948 to 2008: an analysis with a process-based soil physical model and AmeriFlux data. *Clim. Chang.*, 126 (1), 135-150
<http://dx.doi.org.etechnicyt.idm.oclc.org/10.1007/s10584-014-1196-y>
- Hewitt, H.T., and coauthors. 2011. Design and implementation of the infrastructure of HadGEM3: the next-generation Met Office climate modelling system *Geosci. Model Dev.*, 4, 223-253
- Islam, A., L.R. Ahuja, Ma, L. Garcia, A.S. Saseendran, and T.J. Trout. 2012. Modeling the impacts of climate change on irrigated corn production in the Central Great Plains. *Agricultural Water Management* 110, 94-108.
- Jury, W.A. and R. Horton. 2004. *Soil Physics*. (sixth ed.) John Wiley, Hoboken, NJ, USA (370 pp.)
- Lynch, J.M. and J.S. Schepers. 2007. Soil, climate change and the OECD. *Waste Management* 28: 673-677.
- McMichael B.L. and J.J. Burke. 1998. Soil temperature and root growth. *HortScience* 33, 947-51.
- Paustian, K., J. Lehmann, S. Ogle, D. Reay, P. Robertson, and P. Smith. 2016. Climate-smart soils. *Nature* 532, 49-57. Doi:10.1038/nature17174.
- Pritchard, S.G. 2011. Soil organisms and global climate change. *Plant Pathology* 60, 82-99. Doi: 10.1111/j.1365-3059.2010.02405.x

- Pritchard, S.G., and J.S. Amthor. 2005. *Crops and Environmental Change*. Binghamton, NY, USA: Haworth Press.
- Smith, P. 2012. Soil and Climate change. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 4, 539-544
- Soil Survey Staff. 2014. *Keys to Soil Taxonomy*. 12 edition. United States Department of Agriculture, Natural Resources and Conservation Services.
- Song, Y.T., D.W. Zhou, H.X. Zhang, G.D. Li, Y.H. Jin, Q. Li. 2013. Effects of vegetation height and density on soil temperature variations. *Ecology*, 58, 907–912
- Stevens, B., et al. 2013. Atmospheric component of the MPI-M Earth system model: ECHAM6, *J. Adv. Model. Earth Syst.*, 5, 146–172, doi:10.1002/jame.20015
- Tubiello, F.N., and G. Fischer. 2007. Reducing climate change impacts on agriculture: Global and regional effects of mitigation, 2000-2080. *Technological Forecasting & Social Change* 74, 1030-1056.
- Udall, B. 2013. “Water: Impacts, Risks, and Adaptation.” In *Assessment of Climate Change in the Southwest United States: A Report Prepared for the National Climate Assessment*, edited by G. Garfin, A. Jardine, R. Merideth, M. Black, and S. LeRoy, 197–217. A report by the Southwest Climate Alliance. Washington, DC: Island Press.
- U.S. EPA. 2013. *Climate Impacts on Agriculture and Food Supply*.
- van der Putten, W.H. 2009. A multitrophic perspective on functioning and evolution of facilitation in plant communities. *Journal of Ecology* 97, 1131–1138.
- Van Wambeke, A. R. 2000. *The Newhall Simulation Model for estimating soil moisture & temperature regimes*. Department of Crop and Soil Sciences. Cornell University, Ithaca, NY.
- Wardle, D.A. 2002. *Communities and Ecosystems: Linking the Aboveground and Belowground Components*. Princeton, NJ, USA: Princeton University Press.
- Zhang, X.C. and M.A. Nearing. 2005. Impact of climate change on soil erosion, runoff, and wheat productivity in Central Oklahoma. *Catena*, 61, 185-195. <http://doi:10.1016/j.catena.2005.03.009>