

El Cambio Climático y los Incendios Forestales¹

William J. de Groot², Michael D. Flannigan³, y Brian J. Stocks⁴

Resumen

Los regímenes de incendios forestales son impulsados principalmente por el clima/tiempo atmosférico, los combustibles y las personas. Todos estos factores son dinámicos y sus interacciones variables crean un mosaico de regímenes de incendios alrededor del mundo. El cambio climático tendrá un impacto sustancial sobre los regímenes de incendios futuros en muchas regiones del orbe. Las investigaciones actuales sugieren un aumento general en superficie afectada y ocurrencia de incendios, pero hay una gran variabilidad global. Estudios recientes del tiempo atmosférico futuro para los incendios a nivel global bajo diferentes escenarios de cambio climático utilizando varios Modelos de Circulación General son revisados. Se encontró un aumento generalizado en la severidad del tiempo atmosférico para los incendios futuros en casi todo el orbe, con un aumento en la duración de la temporada de incendios ocurriendo en muchas regiones, especialmente en las latitudes del norte. En la región del bosque boreal, la cual representa alrededor de un tercio de la cubierta forestal mundial, el aumento de la superficie afectada en los últimos cuatro decenios se ha vinculado a temperaturas más altas como resultado del cambio climático inducido por el hombre. Se proyecta que esta tendencia en la región boreal continúe conforme la severidad del tiempo atmosférico para los incendios y la intensidad del fuego aumentarán bruscamente hasta 4-5 veces los valores máximos actuales a finales del siglo. Muchas organizaciones nacionales de manejo del fuego ya operan en un nivel muy alto de eficiencia, y hay un margen muy estrecho entre el éxito y el fracaso de la supresión. Bajo un clima futuro más cálido y más seco, las agencias de manejo del fuego serán desafiadas por las condiciones de tiempo atmosférico para los incendios que podrían presionar la capacidad actual de la

¹ Una versión abreviada de este trabajo se presentó en el Cuarto Simposio Internacional sobre Políticas, Planificación y Economía de Incendios Forestales: Cambio Climático e Incendios Forestales; noviembre 5-11 de 2012; Ciudad de México, México.

² Natural Resources Canada – Canadian Forest Service, 1219 Queen Street East, Sault Ste. Marie, ON Canada P6B6H6 bill.degroot@nrcan.gc.ca

³ University of Alberta, Dept. of Renewable Resources, 713A General Services Building, Edmonton, AB Canada T6G 2H1 mike.flannigan@ualberta.ca

⁴ B.J. Stocks Wildfire Investigations Ltd., 128 Chambers Ave., Sault Ste. Marie, ON Canada P6A 4V4 brianstocks@sympatico.ca

supresión más allá del punto de quiebre, resultando en un incremento sustancial en incendios de gran magnitud.

Palabras clave: Escenarios de cambio climático del IPCC, intensidad del fuego, manejo del fuego, modelos de circulación general, severidad del tiempo atmosférico para los incendios

Introducción

Los incendios forestales afectan 330-431 M de hectáreas de vegetación global cada año (Giglio y otros 2010). Alrededor del 86% de los incendios forestales ocurren en praderas tropicales y sabanas, y el 11% en bosques (Mouillot y Field 2005). Hay evidencia de carbón que los incendios del orbe han aumentado desde el último máximo glacial alrededor de hace 21,000 años, con mayor heterogeneidad espacial durante los últimos 12,000 años (Power y otros 2008). Durante el último milenio, el régimen global de los incendios globales parece haber sido fuertemente impulsado por la precipitación, y cambió a un régimen impulsado antropogénicamente durante la Revolución Industrial (Pechony y Shindell 2010). En las últimas décadas, existe evidencia de una mayor superficie afectada y la creciente severidad de los incendios en muchas regiones diferentes del mundo (Pyne 2001, FAO 2007, Bowman 2009). Existen diversas razones para los aumentos regionales en la actividad de los incendios forestales, pero los factores principales son los combustibles, el clima-tiempo atmosférico, los agentes de ignición, y las personas (Flannigan y otros 2005, 2009b). En el futuro, se espera que los regímenes de incendios sean impulsados por la temperatura (Gillett y otros 2004, Pechony y Shindell 2010), con condiciones más cálidas y temporadas de incendios más largas conduciendo a una mayor área afectada y ocurrencia de incendios (Flannigan y otros 2009b). Sin embargo, una revisión de los trabajos de investigación globales mostró resultados mixtos para la severidad y la intensidad del fuego (Flannigan y otros 2009a). En la región del bosque boreal, la cual representa alrededor de un tercio de la cubierta forestal mundial, los registros de los incendios documentan mayor actividad de incendios en las últimas décadas (Stocks y otros 2003, Kasischke y Turetsky 2006) debido al aumento de temperatura (Westerling y otros 2006). Bajo los escenarios actuales de cambio climático, se espera que el aumento de la temperatura sea mayor en latitudes septentrionales (IPCC 2007). Por esa razón, se espera que la región de los bosques boreales experimente los incrementos en la actividad de incendios forestales más tempranos y mayores bajo el cambio climático futuro. El propósito de este trabajo es resumir las investigaciones recientes sobre los futuros regímenes de incendios globales, los impactos resultantes sobre el comportamiento del fuego en los bosques boreales circumpolares y las implicaciones para el manejo de incendios.

Regímenes futuros de incendios del orbe

En un estudio reciente de futuros incendios forestales globales (Flannigan y otros 2013), la influencia potencial del cambio climático sobre la duración y la severidad de la temporada de incendios fue examinada comparando tres Modelos de Circulación General (MCG) y tres posibles escenarios de emisiones (nueve combinaciones de escenarios de emisiones MCG). Los modelos utilizados en el estudio fueron: 1) el CGCM3.1 del *Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis*, 2) el HadCM3 del *Hadley Centre for Climate Prediction* en el Reino Unido, y 3) el IPSL-CM4 de Francia. Los modelos fueron seleccionados para proporcionar una gama de condiciones esperadas de calentamiento futuro. Hay cuatro argumentos de escenarios de emisiones (A1, A2, B1 y B2) que establecen una dirección definida de desarrollo mundial hacia finales de este siglo (IPCC 2000). El estudio de Flannigan y otros (2013) utilizó los siguientes tres escenarios: A1B, representando un mundo de crecimiento económico muy rápido con la población mundial alcanzando un máximo a mediados de siglo, rápido desarrollo de tecnología eficiente y un uso equilibrado de las fuentes combustibles fósiles y no fósiles; A2, representando un mundo de crecimiento aumentado de la población, lento desarrollo económico y lento cambio tecnológico (escenario del negocio como es usual); y B1, representando la misma población que A1, pero más rápido cambio en la estructura económica, y dirigiéndose hacia las tecnologías del servicio y de la información.

Los escenarios de emisiones MCG se utilizaron para calcular las condiciones de tiempo atmosférico para los incendios durante el próximo siglo. Los datos de tiempo atmosférico para los incendios (temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, precipitación de 24 horas) se utilizaron para calcular los valores diarios de los componentes del Sistema del Índice de Tiempo Atmosférico para los Incendios Forestales Canadiense (ITAIF) (Van Wagner 1987). La duración de la temporada de incendios se calculó utilizando un enfoque de temperatura, con el inicio de la temporada de incendios definida como tres días consecutivos de 9° C o mayor, y el fin de la temporada de incendios por tres días consecutivos de 2° C o inferior. La severidad del fuego se calculó utilizando la Clasificación de Severidad Diaria (CSD), la cual representa la creciente dificultad de control en tanto un incendio crece (Van Wagner 1970) y es una simple función de potencia del componente del Índice del Tiempo Atmosférico para los Incendios del sistema ITAIF. En el estudio de Flannigan y otros (2013), los cambios en la severidad de los incendios se midieron utilizando la Clasificación de la Severidad Acumulativa (CSA), que fue la suma de los valores CSD durante la temporada de incendios dividido por la duración de la temporada de incendios. De esta manera, la CSA fue una versión reducida de la duración estacional de la CSD. Los cambios en la futura duración de la temporada de

incendios y la CSA se resumieron por década como anomalías del periodo 1971-2000 (los resultados sólo se presentaron para mediados y finales de siglo).

Las Figuras 1 y 2 del estudio de Flannigan y otros (2013) muestran ejemplos de CSA para el modelo HadCM3 y el escenario A2 para 2041-2050 y para 2091-2100. Estos ejemplos (Figuras 1 y 2) son representativos de todos los MCG y los mapas de los escenarios que muestran un aumento significativo a nivel mundial en CSA, especialmente en el hemisferio norte. Con estos aumentos, esperamos mayor superficie afectada, mayor ocurrencia de incendios y mayor intensidad de fuego que resultarán en temporadas de incendios más graves y mayor dificultad de control de incendios.

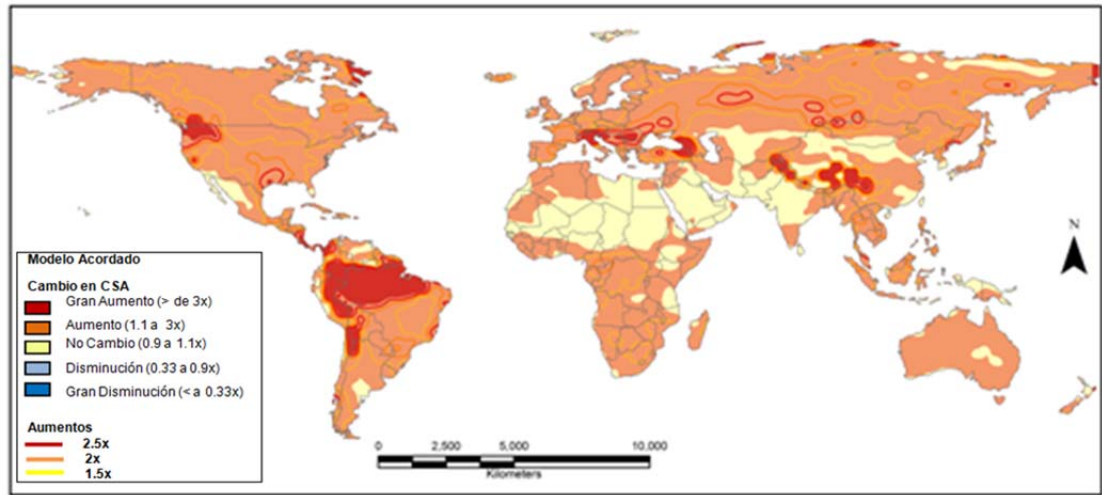


Figura 1—Las anomalías de la Clasificación de la Severidad Acumulativa para el escenario HadCM3 A2 para 2041-2050 en relación con el período base 1971-2000.

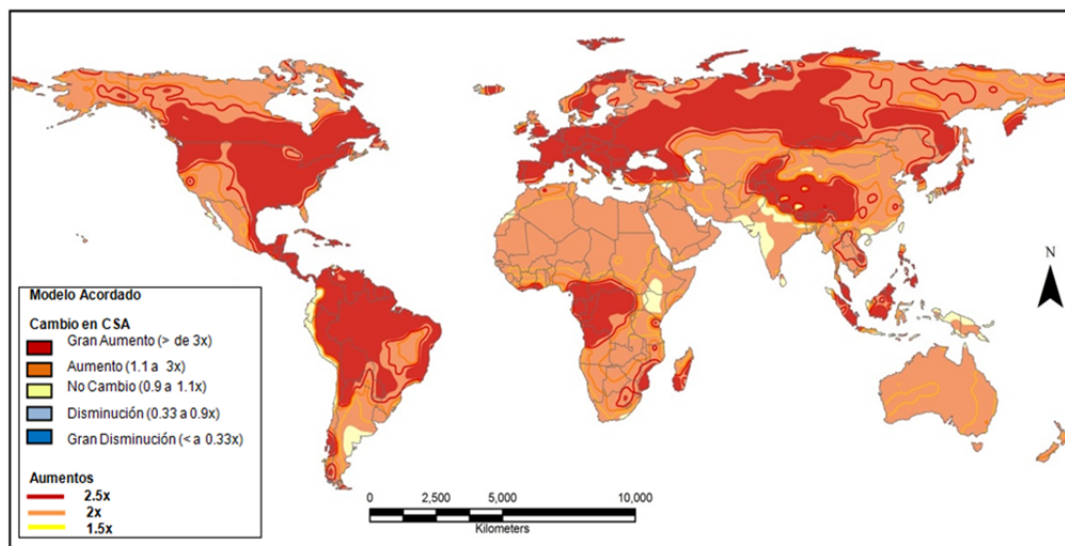


Figura 2—Las anomalías de la Clasificación de la Severidad Acumulativa para el escenario HadCM3 A2 para 2091-2100 en relación con el período base 1971-2000.

Regímenes futuros de incendios boreales

Hay varios estudios que indican una tendencia creciente en la superficie afectada en toda la zona boreal de América del Norte durante las últimas décadas (Podur y otros 2002, Kasischke y Turetsky 2006), que está estrechamente alineada con una tendencia al aumento de la temperatura, y es un resultado de cambio climático inducido por el hombre (Gillett y otros 2004). Una tendencia alcista de la temperatura se espera que continúe en las latitudes septentrionales en tanto el cambio climático avanza. Los regímenes de los incendios de los bosques boreales del norte circumpolar están cambiando rápidamente y continuarán haciéndolo, y puede servir como un indicador temprano de un posible cambio en otros regímenes de incendios globales. El bosque boreal cubre 1.35 billones de ha, representando alrededor de un tercio de la cubierta forestal mundial (Brandt 2009, FAO 2001). Hay un promedio de 9 millones de ha (entre 4 y 18 millones de ha) afectadas anualmente en la región del bosque boreal (Giglio y otros 2010). Un cambio en los regímenes de incendios boreales puede tener un impacto sustancial sobre los gases atmosféricos de efecto invernadero debido a que la zona boreal es la fuente del 9% ($182 \text{ Tg C año}^{-1}$) de las emisiones de carbono de los incendios forestales a nivel mundial (van der Werf y otros 2010).

Más del 70% del bosque boreal se encuentra en Eurasia, y el resto en América del Norte. Aunque el bosque boreal está representado principalmente por *Pinus*, *Picea*, *Larix*, *Abies*, *Populus* y *Betula* spp. a lo largo de toda la región boscosa, hay una clara diferencia en los regímenes de incendios continentales. Esta dicotomía en

los regímenes de incendios se debe en gran parte a diferencias en la composición forestal y la morfología de las especies de árboles, y la influencia de dichas características en el régimen de incendios. La principal diferencia entre los dos continentes es que el bosque boreal de América del Norte está dominado por *Picea* y *Abies* (44% del área) y *Pinus* (22%), que tienen follaje altamente inflamable y, ya sea un hábito de baja ramificación (*Picea*, *Abies*) o una relativamente baja altura de la base de la copa viva (*Pinus*) que promueven los incendios de copa. En el norte de Asia, el bosque boreal está dominado por *Larix* (30%), que tiene follaje con alto contenido de humedad, y especies de crecimiento relativamente alto de *Pinus* (28%), que tienen mayor altura en la base de la copa viva; ambos factores reducen sustancialmente la ocurrencia de los incendios de copas en el norte de Asia.

Un estudio reciente de modelación comparando los regímenes de incendios boreales en el oeste de Canadá y Siberia central (de Groot y otros 2012a) indica que hay muchos más grandes incendios (> 200 ha) que se producen en el norte de Asia que en América del Norte. Por lo tanto, hay una tasa mucho más elevada de superficie afectada al año, y un intervalo medio de retorno del fuego más bajo en el norte de Asia (1.89 M de hectáreas por 100 millones de hectáreas de tierras forestales; IMRF = 53 años) que en el oeste de América del Norte (0.56 M de hectáreas por 100 M de hectáreas de tierras forestales; IMRF = 180 años). Sin embargo, el tamaño medio de incendios de magnitud en el oeste de América del Norte (5930 ha) es mucho mayor que en el norte de Asia (1312 ha). La mayoría de los incendios en los bosques boreales de América del Norte se producen como incendios de copa (57%), lo que parece estar limitada por la cantidad total de la cubierta de coníferas (63% del área de estudio de de Groot y otros 2012a). En el norte de Asia, sólo el 6% de los incendios de gran magnitud se produjeron como incendios de copa en el área del estudio de de Groot y otros (2012A), debido a que dos terceras partes del área de estudio están cubiertas por tipos de combustibles sin copas (*Betula*, *Larix*, *Populus*) y mayores alturas medias de la base de copa viva para las especies susceptibles al fuego de la copa (*Pinus sibirica*, *Pinus sylvestris*). Como resultado, los regímenes de incendios norteamericanos están típicamente dominados por esporádicos incendios de copa con rápida propagación y muy alta intensidad, y los regímenes de incendios del norte de Asia se caracterizan por los incendios de superficie relativamente frecuente y de intensidad moderada a alta. Aunque hay una mayor tasa de emisiones de carbono (t/ha) en los incendios boreales de América del Norte debido en parte a un mayor consumo de combustibles de copa, hay un total de emisiones de carbono mucho más elevadas de los incendios forestales en el Asia boreal (128 Tg C año⁻¹, frente a 54 Tg C año⁻¹ en América del Norte), debido a una tasa anual mucho más alta de área afectada y una mayor área de bosque total.

Un estudio de seguimiento realizado por de Groot y otros (2012b) examinó el impacto del cambio climático en estos regímenes de incendios boreales circumpolares. Futuros regímenes de incendios boreales se simularon con los MCG de CGCM3.1, HadCM3 e IPSL-CM4 y los escenarios A1B, A2 y B1, utilizando los mismos procedimientos que Flannigan y otros (2013). Los datos resultantes del tiempo atmosférico para los incendios y los parámetros del sistema ICIF se utilizaron en el Modelo Canadiense de los Efectos del Fuego (CanFIRE, de Groot 2006, 2010) para simular el comportamiento de los incendios esperado en el futuro y las emisiones de carbono. Los resultados mostraron que la severidad del tiempo atmosférico para los incendios se incrementó en toda la región boreal circumpolar, y que el CSD y las intensidades del fuego a favor del viento también incrementaron, aunque las condiciones fueron un poco más extremas en América del Norte. Todos estos parámetros indican que habrá una mayor dificultad en el control de los futuros incendios forestales a través del bosque boreal. Los tres MCG mostraron un acuerdo general en las tendencias a largo plazo de la creciente severidad del tiempo atmosférico para los incendios y la actividad del comportamiento del fuego, pero los modelos Hadley e IPSL en particular indican condiciones de quema que superan por mucho a las condiciones actuales. A finales del siglo 21, todas las combinaciones de MCG y escenarios indicaron que el promedio mensual de las intensidades del fuego a favor del viento superará la capacidad de supresión de los aviones apaga fuegos en la mayoría de los meses de la temporada de incendios (abril a septiembre) en toda la región boreal; los modelos IPSL y Hadley indican que este umbral de supresión será superado en todos los meses de abril a octubre. Los resultados del estudio de de Groot y otros (2012b), junto con la creciente duración de la temporada de incendios en la región boreal encontrada por Flannigan y otros (2013) y otros estudios que sugieren que la superficie afectada anual podría incrementarse 2–5.5 veces en Norteamérica boreal (Flannigan y otros 2005, Balshi y otros, 2009) y creciente actividad de incendios en Rusia (Dixon y Krankina 1993, Stocks y otros 1998), indican que habrá una enorme y creciente demanda en el manejo del fuego en el futuro, independientemente del escenario de cambio climático.

El cambio climático y el manejo del fuego

Los modelos actuales de cambio climático coinciden en que habrá mayor severidad del tiempo atmosférico para los incendios en el futuro. Se prevé que ambos la ocurrencia y la severidad de los incendios aumenten, dando lugar a incendios mayores y más superficie afectada, lo cual plantea serias dudas sobre la capacidad de los organismos del manejo de incendios para mitigar efectivamente los impactos futuros de los incendios. Las agencias de manejo de fuego en la actualidad operan

con un margen muy estrecho entre el éxito y el fracaso durante la supresión de los incendios, y un clima más cálido y seco se traduciría en más incendios escapando a los esfuerzos iniciales de supresión y volviéndose grandes (Stocks 1993). Además, dada a la competencia entre demandas fiscales, sería poco probable que los gobiernos proporcionaran los aumentos financieros para mantener los niveles actuales de eficacia.

En un estudio realizado en la región boreal, McAlpine (1998) sugirió que la mayor frecuencia de los años de sequía y fenómenos climáticos extremos, en combinación con temporadas de incendios más largas, aumentaría la actividad de incendios y superficie afectada en Ontario, Canadá. Minimizar los aumentos en la superficie afectada asociados al cambio climático requerirá aumentos significativos de los gastos de manejo del fuego. Estudios de simulación utilizando el sistema de ataque inicial de Ontario (McAlpine y Hirsch 1998) mostraron que la reducción del número de incendios escapados de los niveles actuales requeriría una gran inversión en recursos adicionales, y que los aumentos incrementales en los recursos para suprimir los incendios resultan en ganancias decrecientes en el éxito del ataque inicial. Wotton y Stocks (2006) utilizaron el sistema de simulación de ataque inicial de Ontario en combinación con escenarios de ocurrencia de incendios esperados y el tiempo atmosférico para los incendios para mostrar que una duplicación de los niveles actuales de recursos sería necesaria para cumplir con un incremento modesto de 15% en la carga de fuego (que se basa en el número de incendios y la dificultad de control). Más recientemente, Podur y Wotton (2010) ampliaron este trabajo, combinando escenarios derivados de MCG del futuro tiempo atmosférico para los incendios con un modelo del crecimiento del fuego y de supresión en Ontario. Los resultados indicaron aumentos de entre 2 a 5 veces en superficie afectada durante el próximo siglo, impulsados por un tiempo atmosférico de incendios más frecuente conducente a incendios de gran magnitud y un número cada vez mayor de los incendios que escapan al ataque inicial. El desarrollo reciente de la Estrategia Canadiense de los Incendios Forestales (ECIF), aprobada por el gobierno federal y de las provincias y territorios (CCFM 2005), es en respuesta directa al creciente consenso que las cuestiones de los incendios forestales y de la salud de los bosques impulsados por el cambio climático, junto con la disminución de capacidad de manejo del fuego y una expansión de la interfaz urbano-forestal, se combinarán para crear efectos de fuego sin precedentes a través de Canadá en un futuro próximo. Bajo este escenario, mantener los niveles actuales de éxito de la protección contra los incendios será económica y físicamente imposible, así como ecológicamente indeseable. Un nuevo acoplamiento con el fuego, en el que éste asume su papel natural en más del paisaje canadiense, parece un probable resultado de esta confluencia de factores.

Los incrementos sustanciales en la CSA pronosticados a nivel mundial a través de los escenarios de cambio climático para finales de este siglo son verdaderamente notables para los gerentes de distrito contra incendios forestales. Aumentos de hasta 300% en la CSA, sobre todo en la región circumpolar del norte, plantearán exigencias sin precedentes en los medios de extinción de incendios. Parte del aumento de la CSA se debe a temporadas de incendios más largas (alrededor de 20-30 días); sin embargo la CSD en los días bajos e incluso moderados (los días más frecuentes en la temporada de incendios) es bastante pequeña en relación a los valores de CSD en días altos y extremos, y por lo tanto la gran mayoría del aumento es debido al aumento en la intensidad potencial del fuego y la dificultad de control posterior. La acción de extinción de incendios a menudo falla durante los incendios de copa de alta intensidad (Stocks y otros 2004), y los escenarios de cambio climático de este estudio indican que este tipo de comportamiento del fuego se producirá con mayor frecuencia en el futuro. Muchos países del mundo operan organizaciones de manejo de fuego altamente eficientes que tienen una alta tasa de éxito del control del fuego. Sin embargo, el cambio climático podría causar un aumento desproporcionado de los incendios incontrolados debido a que muchas organizaciones del manejo del fuego ya operan cerca de una eficiencia óptima, por lo que cualquier incremento en la dificultad del control del fuego forzaría a muchos más incendios más allá de un umbral de capacidad de supresión (cf Flannigan y otros 2009b, Podur y Wotton 2010). Tal vez ya estamos experimentando lo que está por venir con los recientes incendios catastróficos en Australia en 2009 y 2012, Rusia en 2010 y en los EE.UU. en 2011 y 2012. El aumento de los incendios forestales en el paisaje en el futuro obligará a las agencias de manejo de fuego a re-evaluar la política y la estrategia. Todas las áreas forestales no pueden ser protegidas contra los incendios, y muchas áreas de alto valor que se manejan con una política de exclusión del fuego se verán amenazadas por los incendios forestales.

Referencias

- Balshi, M.S., McGuire, A.D., Duffy, P., Flannigan, M., Walsh, J., Melillo, J. 2009.** Assessing the response of area burned to changing climate in western boreal North America using a Multivariate Adaptive Regression Splines (MARS) approach. *Global Change Biology* 15, 578-600.
- Bowman, D.M.J.S., Balch, J.K., Artaxo, P., Bond, W.J., Carlson, J.M., Cochrane, M.A., D'Antonio, C.M., DeFries, R.S., Doyle, J.C., Harrison, S.P., Johnston, F.H., Keeley, J.E., Krawchuk, M.A., Kull, C.A., Marston, J.B., Moritz, M.A., Prentice, I.C., Roos, C.I., Scott, A.C., Swetnam, T.W., van der Werf, G.R., Pyne, S.J. 2009.** Fire in the Earth System. *Science* 324, 481-484.
- Brandt, J.P. 2009.** The extent of the North American boreal zone. *Environmental Reviews* 17: 101-161.

- [CCFM] **Canadian Council of Forest Ministers. 2005.** Canadian wildland fire strategy: a vision for an innovative and integrated approach to managing the risks. A report to the Canadian Council of Forest Ministers, prepared by the Canadian Wildland Fire Strategy Assistant Deputy Ministers Task Group. Can. For. Serv., North. For. Cent. Edmonton, AB. (http://www.ccfm.org/pdf/Vision_E_web.pdf)
- de Groot, W.J. 2006.** Modeling Canadian wildland fire carbon emissions with the Boreal Fire Effects (BORFIRE) model. In: Viegas, D.X. (Ed.), 5th International Conference on Forest Fire Research. Elsevier, Figueira da Foz, Portugal.
- de Groot, W.J. 2010.** Modeling fire effects: Integrating fire behavior and fire ecology. In, 6th International Conference on Forest Fire Research. ADAI/CEIF University of Coimbra, Coimbra, Portugal.
- de Groot, W.J., Cantin, A.S., Flannigan, M.D., Soja, A.J., Gowman, L.M., Newbery, A. 2012.** A comparison of Canadian and Russian boreal forest fire regimes. *Forest Ecology and Management*, in press.
- de Groot, W.J., Flannigan, M.D., Cantin, A.S. 2012.** Climate change impacts on future boreal fire regimes *Forest Ecology and Management*, in press.
- Dixon, R.K., Krankina, O.N. 1993.** Forest fires in Russia: carbon dioxide emissions to the atmosphere. *Canadian Journal of Forest Research* 23, 700-705.
- FAO. 2001.** Global forest resources assessment 2000: Main report. In. United Nations, Food and Agriculture Organization, Rome, Italy.
- FAO. 2007.** Fire management - global assessment 2006. In. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome, p. 135.
- Flannigan, M., Logan, K., Amiro, B., Skinner, W., Stocks, B. 2005.** Future area burned in Canada. *Climatic Change* 72, 1-16.
- Flannigan, M.D., Cantin, A.S., de Groot, W.J., Wotton, B., M., Newbery, A., Gowman, L.M. 2013.** Global wildland fire season severity in the 21st century. *Forest Ecology and Management*, in press.
- Flannigan, M.D., Krawchuk, M.A., de Groot, W.J., Wotton, B.M., Gowman, L.M. 2009a.** Implications of changing climate for global wildland fire. *International Journal of Wildland Fire* 18, 483-507.
- Flannigan, M.D., Stocks, B.J., Turetsky, M.R., Wotton, B.M. 2009b.** Impacts of climate change on fire activity and fire management in the circumboreal forest. *Global Change Biology* 15, 549-560.
- Giglio, L., Randerson, J.T., Van der Werf, G.R., Kasibhatla, P.S., Collatz, G.J., Morton, D.C., DeFries, R.S. 2010.** Assessing variability and long-term trends in burned area by merging multiple satellite fire products. *Biogeosciences* 7, 1171-1186.
- Gillett, N.P., Weaver, A.J., Zwiers, F.W., Flannigan, M.D. 2004.** Detecting the effect of climate change on Canadian forest fires. *Geophysical Research Letters* 31, L18211.18211-L18211.18214.
- IPCC. 2000.** Emissions Scenarios. Cambridge University Press, Cambridge.
- IPCC. 2007.** Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.)]. In. IPCC, Geneva, Switzerland, p. 104.
- Kasischke, E.S., Turetsky, M.R. 2006.** Recent changes in the fire regime across the North American boreal region-Spatial and temporal patterns of burning across Canada and Alaska. *Geophysical Research Letters* 33, L09703.

- McAlpine, R.S. 1998.** The impact of climate change on forest fires and forest fire management in Ontario. Pp. 15-18 *in* The Impacts of Climate Change on Ontario's Forests. Ont. Min. Nat. Resour., Ont. For. Res. Inst., Sault Ste. Marie, ON. For. Res. Info. Pap. No. 143.
- McAlpine R.S. and Hirsch K.G. 1998.** LEOPARDS—Level of Protection Analysis Software. *For. Chron.* 75: 615-621.
- Mouillot, F., Field, C.B. 2005.** Fire history and the global carbon budget: a 1° × 1° fire history reconstruction for the 20th century. *Global Change Biology* 11, 398-420.
- Pechony, O., Shindell D.T. 2010.** Driving forces of global wildfires over the past millennium and the forthcoming century *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107, 19167-19170.
- Podur, J., Wotton B.M. 2010.** Will climate change overwhelm fire management capacity? *Ecol. Model.* 221, 1301-1309.
- Power, M., Marlon, J., Ortiz, N., Bartlein, P., Harrison, S., Mayle, F., Ballouche, A., Bradshaw, R., Carcaillet, C., Cordova, C., Mooney, S., Moreno, P., Prentice, I., Thonicke, K., Tinner, W., Whitlock, C., Zhang, Y., Zhao, Y., Ali, A., Anderson, R., Beer, R., Behling, H., Briles, C., Brown, K., Brunelle, A., Bush, M., Camill, P., Chu, G., Clark, J., Colombaroli, D., Connor, S., Daniau, A.L., Daniels, M., Dodson, J., Doughty, E., Edwards, M., Finsinger, W., Foster, D., Frechette, J., Gaillard, M.J., Gavin, D., Gobet, E., Haberle, S., Hallett, D., Higuera, P., Hope, G., Horn, S., Inoue, J., Kaltenrieder, P., Kennedy, L., Kong, Z., Larsen, C., Long, C., Lynch, J., Lynch, E., McGlone, M., Meeks, S., Mensing, S., Meyer, G., Minckley, T., Mohr, J., Nelson, D., New, J., Newnham, R., Noti, R., Oswald, W., Pierce, J., Richard, P., Rowe, C., Sanchez Goni, M., Shuman, B., Takahara, H., Toney, J., Turney, C., Urrego-Sanchez, D., Umbanhowar, C., Vandergoes, M., Vanniere, B., Vescovi, E., Walsh, M., Wang, X., Williams, N., Wilmshurst, J., Zhang, J. 2008.** Changes in fire regimes since the Last Glacial Maximum: an assessment based on a global synthesis and analysis of charcoal data. *Climate Dynamics* 30, 887-907.
- Pyne, S.J. 2001.** *Fire: A Brief History.* University of Washington Press, Seattle.
- Stocks, B.J. 1993.** *For. Chron.* 69(3), 290-293.
- Stocks, B.J., Fosberg, M.A., Lynham, T.J., Mearns, L., Wotton, B.M., Yang, Q., Jin, J.-Z., Lawrence, K., Hartley, G.R., Mason, J.A., McKenney, D.W. 1998.** Climate change and forest fire potential in Russian and Canadian boreal forests. *Climatic Change* 38, 1-13.
- Stocks, B.J., Mason, J.A., Todd, J.B., Bosch, E.M., Wotton, B.M., Amiro, B.D., Flannigan, M.D., Hirsch, K.G., Logan, K.A., Martell, D.L., Skinner, W.R. 2003.** Large forest fires in Canada, 1959 - 1997. *Journal of Geophysical Research* 108, 8149.
- Stocks, B.J., Alexander, M.E., Lanoville, R.A. 2004.** Overview of the International Crown Fire Modelling Experiment (ICFME). *Can. J. For. Res.* 34, 1543-1547.
- van der Werf, G.R., Randerson, J.T., Giglio, L., Collatz, G.J., Mu, M., Kasibhatla, P.S., Morton, D.C., DeFries, R.S., Jin, Y., van Leeuwen, T.T. 2010.** Global fire emissions and the contribution of deforestation, savanna, forest, agricultural, and peat fires (1997–2009). *Atmos. Chem. Phys.* 10, 11707-11735.
- Van Wagner, C.E. 1970.** Conversion of Williams severity rating for use with the fire weather index. In. *Can. Dep. Fisheries and For., Petawawa Forest Expt. Stn., Petawawa, Ontario.*

- Van Wagner, C.E. 1987.** Development and structure of the Canadian forest fire weather index system. In. Canadian Forest Service, Ottawa, Canada.
- Westerling, A.L., Hidalgo, H.G., Cayan, D.R., Swetnam T.W. 2006.** Warming and earlier spring increase western US forest wildfire activity. *Science* 313, 940-943.
- Wotton, B.M., Stocks, B.J. 2006.** Fire management in Canada: vulnerability and risk trends. In: **Hirsch, K., Fuglem, P.** (Eds.), *Canadian Wildland Fire Strategy: Background Synthesis, Analysis, and Perspectives*. Canadian Council of Forest Ministers. Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Northern Forestry Centre, Edmonton, Alberta, pp. 49-55.