

# Evaluación de la concentración de carbono y estimación del potencial de emisiones GEI en combustibles forestales

Assessment of carbon concentration and estimation of the potential for GHG emissions in forest fuels

**José Germán Flores Garnica\***

Campo Experimental Centro-Altos de Jalisco. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Guadalajara, Jalisco, México.

**Ana Graciela Flores Rodríguez**

Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, Departamento de Producción Forestal, Universidad de Guadalajara, Zapopan, Jalisco, México.

**Esteban Gottfried-Burguett**

Universidad Autónoma de Guadalajara. Zapopan, Jalisco, México.

\*Autor para correspondencia: flores.german@inifap.gob.mx

## Resumen

El estudio del fenómeno de calentamiento global lleva implícito una problemática particular, ya que para hacer estimaciones confiables de las bondades de las estrategias de mitigación, se requiere generar datos específicos; tales como la valoración de la concentración de carbono en la vegetación. Por otra parte, los incendios forestales liberan emisiones de GEI, como el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ) y monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ). No obstante, la magnitud de estos impactos depende de varios factores, como: la carga de combustibles, tipo de vegetación, porcentaje humedad, etc. De acuerdo a lo anterior, se presentan dos perspectivas sobre la relación combustibles forestales y carbono: a) un análisis comparativo del porcentaje de carbono contenido en combustibles muertos de tres ecosistemas forestales (pino, pino-encino y encino); y b) de las variaciones espaciales de emisiones de gases de efecto invernadero a partir de las camas de combustibles. Las concentraciones de carbono fueron 53.92, 54.6 y 53.57% para los ecosistemas de encino, pino-encino y pino, respectivamente. Por tipo de combustible, los combustibles firmes de 1000 horas presentaron la mayor concentración, por otro lado, la hojarasca representó la menor concentración. En cuanto a las emisiones, los resultados indican que el dióxido de carbono (con 5% de humedad de los combustibles) tuvo un rango de emisiones entre 150 y 400 t/ha. Mientras que el  $\text{CH}_4$  vario en promedio entre 0.3 a 4.5 t/ha y el  $\text{CO}$  tuvo un rango principalmente entre 2 y 8 t/ha. La información generada apoyará a las estimaciones de emisiones y almacenamiento de carbono en los ecosistemas forestales de México, dentro de la estrategia de MRV (Medición, Reporte y Verificación).

**Palabras clave:** Incendios forestales, ecorregiones, gases efecto invernadero.

## Abstract

The study of the phenomenon of global warming implies a particular problem, since to make reliable estimates of the benefits of mitigation strategies, it is necessary to generate specific data; such as the valuation of the carbon contents in the vegetation. On the other hand, forest fires release GHG emissions, such as carbon dioxide ( $\text{CO}_2$ ), methane ( $\text{CH}_4$ ) and carbon monoxide ( $\text{CO}$ ). However, the magnitude of these impacts depends on several factors, such as the load of fuels, type of vegetation, humidity percentage, etc. According to the above, two perspectives on the relationship between forest fuels and carbon are presented: a) a comparative analysis of the percentage of carbon contained in dead fuels from three forest ecosystems (pine, pine-oak and oak); and b) spatial variations in greenhouse gas emissions from fuel beds. The carbon concentrations were 53.92, 54.6 and 53.57% for the oak, pine-oak and pine ecosystems, respectively. By type of fuel, firm fuels of 1000 hours had the highest concentration; on the other hand, litter represented the lowest concentration. Regarding emissions, the results indicate that carbon dioxide (with 5% humidity of the fuels) had a range of emissions between 150 and 400 t/ha. While  $\text{CH}_4$  varied on average between 0.3 to 4.5 t/ha and  $\text{CO}$  had a range mainly between 2 and 8 t/ha. The information generated will support the estimates of carbon emissions and storage in the forest ecosystems of Mexico, within the MRV strategy (Measurement, Reporting and Verification).

**Keywords:** Forest fires; ecoregions; greenhouse effect gases.

## Introducción

Para estimar el potencial de carbono emitido por la vegetación, a través de la deforestación o incendios forestales, se han desarrollado bases de datos y programas que han sido muy utilizados en reportes internacionales y de muy diversos niveles. Estas incluyen las del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 1995), que, si bien han sido útiles en la planeación de estrategias de mitigación, en ocasiones no son del todo aplicables y/o confiables (Contreras *et al.*, 2003). Esto, porque son resultado de estimaciones que estandarizan la complejidad de todos los ecosistemas, mismos que además, varían a través del tiempo (Bravo *et al.*, 2002). Si a esto se le suman factores como los cambios en el clima o en factores socioculturales, la incertidumbre en las estimaciones llega a ser alta. No obstante, actualmente se realizan estimaciones de las emisiones de carbono usando valores estándar, que en muchas ocasiones se han obtenidos bajo condiciones ambientales muy distintas a las del lugar donde se pretende realizar la estimación (Reisinger *et al.*, 2011). Esto, ha implicado, como se ha mencionado, que la incertidumbre reportada en diversos trabajos, incluyendo los científicos, sea significativamente elevada. Por esta razón, es necesario generar información que permita sustituir los valores reportados en las opciones de cálculo comúnmente utilizadas, como la del IPCC (1995). Por otra parte, los incendios forestales liberan emisiones de gases en el ambiente, tales como el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) (Yokelson *et al.*, 2007), que es considerado el principal gas que contribuye al efecto invernadero, con cerca del 50% de calentamiento global (Pardos, 2010). De manera que, la magnitud de estos impactos depende de varios factores que condicionan la ocurrencia de incendios y su comportamiento, como: la carga de combustibles, tipo de vegetación, porcentaje humedad, etc. (Sandberg *et al.*, 2001; Chandler *et al.*, 1983). De acuerdo a lo anterior, se presentan dos perspectivas sobre la relación combustibles forestales y carbono: a) un análisis comparativo del porcentaje de carbono contenido en combustibles muertos de tres ecosistemas forestales (pino, pino-encino y encino); y b) de las variaciones espaciales de emisiones de gases de efecto invernadero a par-

tir de las camas de combustibles.

## Materiales y métodos

### Concentración de carbono

Primeramente se estimó la carga de combustible de tres ecosistemas forestales (pino, pino-encino y encino), que se ubican dentro del Área de Protección de Flora y Fauna (APFF) Sierra de Quila, Jalisco, México. Esto se hizo con base 12 sitios, usando la metodología de intersecciones planares de Brown (1982), en la que se contabiliza la frecuencia de intersección de piezas leñosas a lo largo de un transecto estadísticamente ajustado. También se realizó un muestreo de combustibles forestales finos (hojarasca y capa de fermentación). El diseño del sitio de muestreo que se usó corresponde a un área circular de 0.1 ha, con tres subsitios circulares orientados al Norte,  $120^\circ$  y  $240^\circ$  respectivamente (Figura 1). El radio de estos círculos está definido por tres transectos de 7 m orientados con los mismos puntos: Norte,  $120^\circ$  y  $240^\circ$ . Cada uno de estos transectos tiene marcas a los 3.5 y 7 m. Que se usan para para el conteo de intersecciones de cada uno de los tipos de combustibles (Cuadro 1). Los tipos de combustible se agrupan según el tiempo de retardo, que es el lapso en que un combustible tarda en perder o ganar (por condiciones de humedad ambiental) dos tercios de la diferencia entre su contenido inicial de humedad y la del ambiente. Conforme el combustible es más grande, perderá o ganará humedad lentamente; es decir, tendrá mayor tiempo de retardo (Villers, 2006).

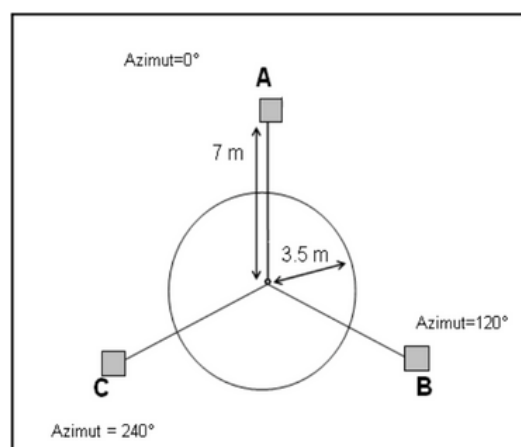


Figura 1. Esquema con el diseño del sitio de muestreo de combustibles forestales, mostrando la longitud y orientación de los transectos en cada sitio.

Cuadro 1. Agrupación de combustibles por su diámetro en tiempo de retardo (Adaptado de Rodríguez *et al.*, 2002).

Clase	Tamaño	Ejemplo
1 hora	<0.6 cm	Ramillas
10 horas	0.61-2.5 cm	Ramillas, ramas.
100 horas	2.51-7.6 cm	Ramas
1000 horas	>7.61 cm	Troncos

Las muestra de hojarasca y capa de fermentación fueron colectadas en el extremo de cada transecto, donde se coloca un cuadro de 30 x 30 cm, y se toma todo el material combustible. El cual se pone en bolsas de plástico para ser procesadas en laboratorio. Esto es, las muestras son secadas hasta peso seco constante y pesadas.

Las cargas de cada tipo de combustibles (tn/ha) fueron estimadas a través del programa SICCO (Sistema de Cálculo de Combustibles Forestales). El cual fue desarrollado por personal del INIFAP. Finalmente, se evaluó en laboratorio la concentración de carbono, nitrógeno y humedad en cada uno de los tipos de combustibles. Para lo cual se usó un determinador simultáneo de N<sub>2</sub>/ Proteína, Carbono, Hidrógeno y Azufre (marca LECO® TruSpec CHNS), para lo cual se coloca una micromuestra pesada en el autocargador para pasar al horno de combustión, con la cual se convierte el carbono en CO<sub>2</sub>, el hidrógeno en H<sub>2</sub>O, el nitrógeno en N<sub>2</sub> y el azufre en SO<sub>2</sub>. Posteriormente se usan detectores de IR (infrarrojo) para la detección simultánea de carbono, hidrógeno y azufre.

### Emisiones de carbono

La investigación se llevó a cabo considerando todos los ecosistemas forestales del Estado de Jalisco, México, localizado entre los paralelos 18° 55' 00" a 22° 45' 00" LN y 105° 42' 00" a 101° 28' 00" LO. El estado de Jalisco cuenta con 78.588 km que representa el 4% del total de la superficie del país.

Para estimar las emisiones de gases de efecto invernadero se utilizó el programa Fuel and Fire Tools (FFT), el cual se basa en la determinación de camas de combustibles. Este programa lo que requiere es, primeramente la clasificaron, y ubicación de ecorregiones (Olson *et al.*, 2001; Bailey, 1995) que corresponden al estado de Jalisco, para esto se usaron las ecorregiones clasificadas por INEGI (2008). Se relacionaron las

ecorregiones de acuerdo a las similitudes entre vegetación y clima principalmente. Después se seleccionaron las camas de combustibles que corresponden a cada ecorregión de Jalisco. Una vez determinadas las emisiones de GEI (Mg/ha), se generaron los mapas temáticos correspondientes, que ilustran su variación espacial. Para esto se usó como técnica de interpolación la "distancia inversa ponderada" (Flores, 2001).

**Selección de camas de combustibles.** Para la selección de las camas de combustibles, primeramente, se debieron obtener las ecorregiones de Bailey (1995) que caracterizaban similitudes con las ecorregiones de Jalisco. Cada ecorregión en el software FFT, proporciona una lista de las camas de combustibles prediseñadas. Para la selección de estas camas se observaron las características de cada una, debido a que algunas se relacionan con los tipos de vegetación de Jalisco, sin embargo, otras camas de combustibles a pesar de tener similitud con el clima presentaban especies endémicas de Estados Unidos, y/o especies que no se encuentran en México. En este último caso, la selección de las camas se realizó mediante las similitudes de composición florística.

**Homologación de camas de combustibles con los tipos de vegetación.** Para esto, se seleccionaron las ecorregiones (previamente homologadas) para el Estado de Jalisco aplicables para el estudio. Considerando que cada ecorregión del FFT cuenta con una serie de camas de combustibles, se seleccionaron aquellas que, por nombre, o por las características del tipo de vegetación se podrían asimilar a una cama de combustible en Jalisco. Una vez seleccionadas las camas de combustibles del FFT más adecuadas se utilizó el buscador de imágenes de Google y Google Earth para obtener una visión de los tipos de vegetación a lo largo del Estado de Jalisco. Las imágenes se agruparon para representar las camas de combustibles seleccionadas previamente, y se compiló la información en un documento descriptivo de Excel (Figura 2).









CAMA DE COMBUSTIBLE DEL FFT		ECORREGIÓN		TIPO DE VEGETACIÓN
California live oak - blue oak woodland		continente caliente		Bosque de encino Jalisco
Sugar pine - Douglas fir - oak forest		Continente calido		Bosque de pino Jalisco
Tobosa grama grassland		pradera		Pastizal, Ojuelos Jalisco
Arizona white - gray - Emory oak woodland		Continente caliente		Sierra de Tequila, Tequila, Jalisco

Figura 2. Homologación entre las camas de combustibles del FFT con los tipos de vegetación del Estado de Jalisco.

Con base a esta información se logró respaldar más la selección de las camas de combustible que mejor se adaptan a las características del Estado de Jalisco, por lo que se prosiguió con la estimación de emisiones de gases de efecto invernadero (GEIs) utilizando el FFT.

**Estimación de emisiones.** Para la estimación de emisiones de GEIs primeramente fue importante determinar con qué cama de combustible de la lista de camas de combustibles prediseñadas del software FFT se trabajaría. Como fue mencionado, el FFT permite la selección de camas de combustibles previamente diseñadas, así como la edición de las mismas o la generación de nuevas camas de combustibles. También se señaló antes que en este trabajo se utilizaron las camas de combustibles diseñadas por el FFT, siempre que tuvieran características similares en composición a lo que podría ser una cama de combustibles del Estado de Jalisco.

## Resultados y discusión

### Concentración de carbono

Los resultados indican que las mayores concentraciones de carbono se encuentran en los

combustibles de 1000 horas firmes (Cuadro 2). Mientras que la hojarasca presentó, en general los menores valores. Las concentraciones de carbono fueron de 53.92, 54.6 y 53.57% para ecosistemas de encino, pino-encino y pino, respectivamente. Estas cifras difieren de las concentraciones de carbono en masa arbórea viva, los cuales oscilan, en general, para coníferas en valores entre 45 y 50% (Flores *et al.*, 2017). Esto implica que la concentración de carbono en materia muerta (necromasa) son más elevadas que en biomasa. En referencia a los promedios de la concentración de carbono, en el caso del ecosistema de encino, aunque los valores de los combustibles de 1, 10 y 100 horas son muy similares, resalta la alta varianza que presentaron los combustibles de 10 horas (5.1959). Una situación semejante ocurre en el ecosistema de pino-encino, pero ahora en relación a los combustibles de 100, cuya varianza fue de 4.0206. Sin embargo, la mayor varianza se presentó, en este ecosistema, en referencia a los combustibles de 1000 horas podridos. Que, en general, resultó ser la mayor varianza comparando todos los tipos de combustibles y ecosistemas.

Cuadro 2. Concentración de carbono en porcentaje para cada ecosistemas por tipo de combustible (ver Cuadro 1): H= Hojarasca; F= Fermentación.

Vegetación	Muestra	1 hr	10 hr	100 hr	1000 hr podridos	H	F
Encino	1	50.91	49.15	49.73	53.31	49.79	52.77
Encino	2	51.58	51.59	50.15	54.04	49.98	53.43
Encino	3	52.38	54.70	50.37	57.06	51.87	52.50
Encino	4	51.65	51.49	50.63	55.19	49.72	52.19
<b>Media</b>		<b>51.63</b>	<b>0.35</b>	<b>51.73</b>	<b>50.22</b>	<b>54.90</b>	<b>50.34</b>
				<b>5.1959</b>	<b>0.1446</b>	<b>2.6684</b>	<b>1.0563</b>
						<b>52.72</b>	<b>0.27</b>
Pino-encino	1	50.22	53.83	51.59	52.87	50.05	49.69
Pino-encino	2	52.01	51.08	52.77	59.43	49.71	49.80
Pino-encino	3	51.51	51.10	54.36	60.37	49.50	50.69
Pino-encino	4	50.45	52.15	56.21	59.62	48.83	53.45
<b>Media</b>		<b>51.05</b>	<b>0.72</b>	<b>52.04</b>	<b>53.74</b>	<b>58.07</b>	<b>49.52</b>
				<b>1.6794</b>	<b>4.0206</b>	<b>12.1862</b>	<b>0.2654</b>
						<b>3.0705</b>	
Pino	1	53.51	53.45	51.32	52.73	50.19	49.47
Pino	2	52.63	55.46	51.18	56.01	49.86	47.49
Pino	3	51.90	53.12	50.61	56.46	49.79	47.14
Pino	4	52.74	54.46	51.56	53.53	49.97	46.21
<b>Media</b>		<b>52.69</b>	<b>0.434</b>	<b>54.12</b>	<b>51.17</b>	<b>54.68</b>	<b>49.95</b>
				<b>1.1134</b>	<b>0.1617</b>	<b>3.3612</b>	<b>0.0294</b>
						<b>1.8785</b>	

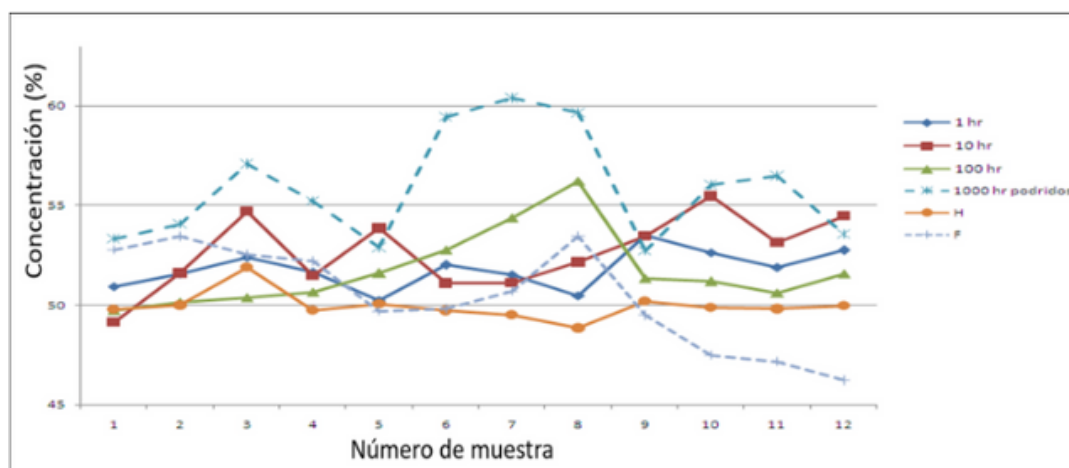


Figura 3. Variaciones en la concentración de carbono en relación a diferentes tipos de combustibles forestales.



La Figura 3 permite apreciar que los combustibles de mayores dimensiones (más de 7.5 en diámetro), y en condición podrida, resultaron con las mayores concentraciones de carbono. Mientras que el material combustible de 10 horas presentó los segundos valores más altos. Por otro lado, la hojarasca presentó las concentraciones de carbono más bajas.

### Estimación de emisiones

De acuerdo a la homologación de ecorregiones propuesta por INEGI (2008) en la que se sustituyeron las ecorregiones, se generó la cartografía temática de las ecorregiones de Jalisco (Bailey, 1995): pradera, continente caliente, continente cálido, estepa subtropical, estepa templada y sabana. Con base a las características de los ecosistemas, topografía, tipo de vegetación, clima, se definieron las 15 camas de combustibles que correspondieron a las ecorregiones en Jalisco (Figura 4).

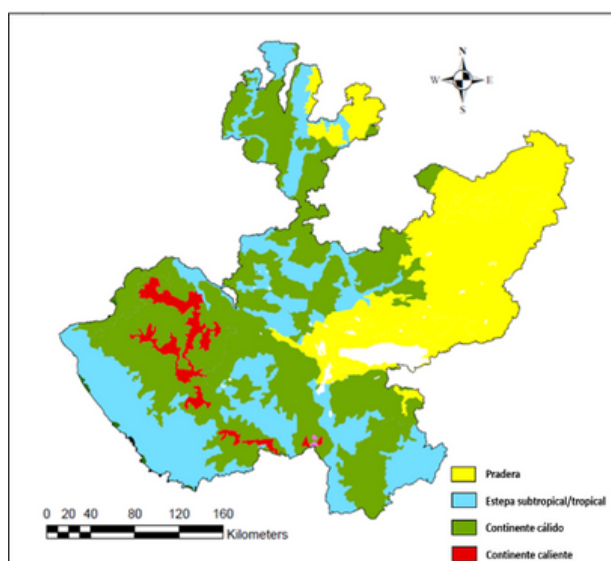


Figura 4. Ecorregiones para el Estado de Jalisco basado en la clasificación de ecorregiones de Bailey.

**Estimación de emisiones de gases de efecto invernadero.** De acuerdo con los cálculos de emisiones de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  y  $\text{CO}$  (Cuadro 1), se observa que estas varían en relación a las ecorregiones. Específicamente, el  $\text{CO}_2$ , es el gas que se encuentra en mayor cantidad en las camas de combustibles, y el  $\text{CO}$  el de menor presencia. La ecorregión de sabana presenta altas emisiones de GEI, lo cual se debe a la cantidad de materia orgánica

presente. En los ecosistemas como los bosques de coníferas, encinos y mixtos también generan altas cantidades de GEI. Sin embargo, ecorregiones como pradera y estepa subtropical son las que presentan menores emisiones, a pesar de que la pradera cubre gran parte del estado de Jalisco.

Mediante el procedimiento anterior, se obtuvieron los valores de emisiones de GEIs para cada cama de combustible de acuerdo a los porcentajes de humedad, los cuales fueron transferidos a un documento de Excel en el que se integró una tabla con la ecorregión a la que pertenece, la cama de combustible, los porcentajes de humedad para cada cama de combustible y los valores de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  y  $\text{CO}$  respectivamente. Como anteriormente fue mencionado, para algunas ecorregiones se contó con más de una cama de combustible, por lo que en estos casos se optó por obtener la media de todas las camas de combustibles que pertenecían a la ecorregión. Cabe mencionar que todos los resultados de las emisiones están en unidades t/ha, como se muestra en el cuadro 3.

El análisis de la Figura 5 muestra el dióxido de carbono con 5% de humedad y un rango de emisiones entre 0 y 1500 t/ha. En este mismo mapa se presentan las ecorregiones de Pradera y Estepa subtropical con un rango de emisiones entre 0 y 50 t/ha. En este caso se evidencia la menor cantidad de emisiones debido a los tipos de vegetación presentes, como vegetación arbustiva y pastizales. No obstante, las ecorregiones de Continente cálido y Continente caliente presentan un rango de emisiones entre 50 y 150 t/ha de  $\text{CO}_2$ , lo cual refleja que son áreas de sumideros de carbono más representativas. Cabe mencionar que dentro de estas ecorregiones se destacaron áreas que presentan emisiones de 150 y 400 t/ha de  $\text{CO}_2$ .

La figura 5, muestra el comportamiento de las emisiones de metano ( $\text{CH}_4$ ) de acuerdo a los niveles de NDVI en el estado de Jalisco. En este mapa se aprecian diferencias en el comportamiento de las emisiones, pero también algunas similitudes comparando con los mapas de  $\text{CO}_2$ . En el mapa de emisiones de  $\text{CH}_4$ , el rango de emisiones va de 0 a 4.5 t/ha, sin embargo, la ecorregión de pradera, a diferencia del mapa de  $\text{CO}_2$  donde no existen emisiones, presenta un rango de 0 a 0.1 ton/ha de  $\text{CH}_4$ , a pesar de que hay ciertas áreas que presentan cero emisiones. Otras áreas que muestran cambios

Cuadro 3. Valores de la estimación de emisiones de GEIs, de acuerdo al porcentaje de humedad para cada cama de combustible.

ECORREGION	Cama de combustible	Porcentaje Humedad	CO2			CH4			CO					
			Total Mg/ha	5%	15%	20%	Total Mg/ha	5%	15%	20%	Total Mg/ha	5%	15%	20%
Continente cálido	7. Douglas-fir-sugar pine-tanoak forest	5	118.446	79.36	76.96	75.63	0.40	0.23	0.22	0.21	8.13	4.79	4.61	4.52
		15	114.069				0.38				7.76			
		20	111.696				0.37				7.55			
	22. Mature lodgepole pine forest	5	71.486				0.20				4.19			
		15	69.917				0.19				4.09			
		20	68.904				0.19				4.03			
	12. Red fir-mountain hemlock-lodgepole pine-	5	95.184				0.32				6.54			
		15	90.144				0.30				6.14			
		20	87.503				0.29				5.93			
	26. Interior ponderosa pine-limber pine forest	5	43.356				0.11				2.46			
		15	39.671				0.10				2.18			
		20	37.825				0.09				2.04			
	39. Sugar pine - Douglas fir - oak forest	5	50.685				0.10				2.35			
		15	49.836				0.10				2.29			
		20	49.325				0.10				2.26			
	146. Mature jack pine forest	5	68.260				0.20				4.23			
		15	67.498				0.20				4.19			
		20	66.963				0.20				4.16			
120. Oak pine / mountain laurel forest	5	100.841	0.23	5.12										
	15	100.108	0.23	5.07										
	20	99.688	0.23	5.04										
53. Pacific ponderosa pine forest	5	86.605	0.25	5.34										
	15	84.473	0.25	5.20										
	20	83.157	0.24	5.12										
Sabana	272. Mangrove Forest	5	535.768	535.77	534.81	534.34	3.25	3.25	3.24	3.24	60.86	60.86	60.76	60.71
		15	534.810				3.24				60.76			
		20	534.336				3.24				60.71			
Continente caliente	36. California live oak - blue oak woodland	5	27.399	21.65	21.32	21.12	0.08	0.06	0.05	0.05	1.54	1.09	1.07	1.05
		15	26.857				0.08				1.49			
		20	26.550				0.08				1.46			
	43. Arizona white - gray - Emory oak woodland	5	15.903				0.03				0.65			
		15	15.782				0.03				0.64			
		20	15.698				0.03				0.64			
Estepa Templada	44. Scrub oak chaparral shrubland	5	41.522	41.52	41.52	0.05	0.05	0.05	0.05	1.56	1.56	1.56	1.56	
		15	41.522			0.05				1.56				
		20	41.522			0.05				1.56				
Estepa Subtropical	49. Creosote bush shrubland	5	2.071	2.07	2.07	2.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08	0.08	0.08	0.08
		15	2.071				0.00				0.08			
		20	2.071				0.00				0.08			
Pradera	213. Wheatgrass - cheatgrass grassland	5	0.661	1.14	1.14	1.14	0.04	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01
		15	0.661				0.04				0.01			
		20	0.661				0.04				0.01			
	236. Tobosa grama grassland	5	0.475				0.00				0.02			
		15	0.475				0.00				0.02			
		20	0.475				0.00				0.02			

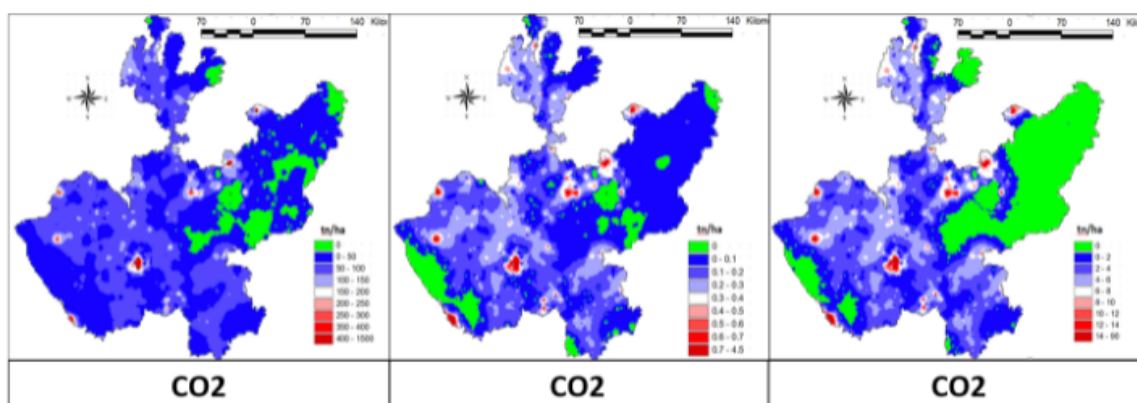


Figura 5. Variación espacial de las de emisiones de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y CO debido a la quema de camas de combustibles en ecosistemas forestales del estado de Jalisco.

se ubican en el Este del Jalisco, las cuales pertenecen a la ecorregión de estepa subtropical, donde principalmente existe vegetación de selvas medianas y bajas, así como pequeñas áreas de manglar. Estas áreas al igual que la ecorregión de pradera, presentan bajas emisiones de  $\text{CH}_4$  en comparación a otras ecorregiones. Finalmente, se aprecian de nuevo las zonas con mayores emisiones de metano al igual que en los mapas de  $\text{CO}_2$ , presentando rangos entre 0.3 a 4.5 t/ha.

**Monóxido de carbono (CO).** En relación a las emisiones de CO, existe una mayor diferencia entre el 5% de humedad con respecto a 20% de humedad. Por ejemplo, en la figura 5, que corresponde al 5% de humedad, se observa un rango de emisiones de 0 a 90 t/ha. La mayor concentración de CO se centra en las ecorregiones de continente caliente y continente cálido, donde el rango de emisiones es de 4 - 12 ton/ha. Sin embargo, en algunas áreas de las ecorregiones de estepa subtropical se presentan volúmenes similares de emisiones, de un rango entre 2 - 8 toneladas de CO. La ecorregión de pradera presenta cero emisiones, lo cual es muy similar a los resultados de emisiones de  $\text{CO}_2$  y  $\text{CH}_4$ . Cabe resaltar que en los mapas de CO las zonas de mayor generación de emisiones nuevamente coinciden con las zonas de los mapas de  $\text{CO}_2$  y  $\text{CH}_4$

## Conclusiones

Los resultados indican que existen diferencias en la concentración de carbono de los ecosistemas forestales analizados (pino, pino-encino y encino). Por otra parte, fue posible determinar la variación espacial de emisiones de gases de efecto invernadero a partir de las camas de combustibles que se derivan de estos ecosistemas. Con base a lo anterior, la información generada apoyará a estimar la capacidad de almacenamiento de carbono en los ecosistemas forestales, lo que ayudará a reducir el nivel de incertidumbre en las estimaciones de emisiones de carbono, lo cual, a su vez, se tendera a que esta información sea comparable y compatible entre diferentes regiones. En cuanto a la estimación de emisiones, la homologación de las ecorregiones puede tener ciertas variaciones dependiendo de las fuentes de información, aunque

se usaron los tipos de vegetación. En cuanto a la distribución espacial del potencial de las emisiones de GEI, la cartografía fue constante en cuanto a la ubicación de las áreas de mayor potencial de emisiones. La metodología usada en este trabajo, debe considerarse como una primera propuesta para le estimación de emisiones de GEI, por lo que se hace necesario complementarla con las investigaciones para definir, por ejemplo, ecorregiones, camas de combustibles, concentraciones de carbono.



**Literatura citada**

- Bailey, Robert G. 1995. Description of the ecoregions of the United States. 2d ed. rev. and expanded (1st ed. 1980). Misc. Publ. No. 1391, Washington, DC: USDA Forest Service. 108 p.
- Bravo A., Sánchez A.H., Jaimes P.P., Saavedra, M. I. 2002. Impact of wildfires on the air quality of Mexico City. 1992-1999. *Environmental Pollution* 117: 243-253.
- Brown, J.K., D. Oberheu, R. y M. Johnston C. 1982. Handbook for inventorying surface fuels and biomass in the interior West. USDA, Forest Service General Technical Report INT-129. 48 p.
- Chandler, C., Cheney, P., Thomas, P., Trabaud, L., and Whilliams, D. 1983. Fire in the forestry. Forest fire behavior and effects. Vol. I. John Wiley & Sons, Inc. USA. 450 p.
- Contreras M. J., Rodríguez T. D. A., Hernández, A. R., Rodríguez, J.S. 2003. Gases del humo de incendios en bosques de *Pinus hartwegii*. *Agrociencia* 37: 309-316.
- Flores G., J. G. 2001. Modeling the spatial variability of forest fuels arrays. Tesis Doctorado. Department of Forest Sciences. Colorado State University. Fort Collins, CO. USA. 184 p.
- Flores G., J.G., Wong G., J.C., Paz P., F. 2017. Camas de combustibles forestales y carbono en México. *Madera y Bosque*, Vol. 24: 1-15.
- INEGI. 2008. Ecorregiones terrestres de México. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Instituto Nacional de Ecología. [http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadata/gis/ecort08gw.xml?\\_xsl=/db/metadata/xsl/fgdc\\_html.xsl&\\_indent=no](http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadata/gis/ecort08gw.xml?_xsl=/db/metadata/xsl/fgdc_html.xsl&_indent=no).
- Intergovernmental panel on climate change (IPCC). 1995. IPCC Second Assessment Report. 63 p.
- Olson, D., Dinerstein, E., Wikramanayake, E.D., Burgess, N.D., Powell, G.V.N., Underwood, E.C., D'amico, J.A., Itouca, I., Strand, H.E., Morrison, J.C., Louckson, C.J., Allnutt, T.F., Ricketts, T.H., Kura Y., Lamoreux, J.F., Wettengel, W., Hedao, P. and Kassem, K.R. 2001. Terrestrial Ecorregions of the World: A New Map of Life on Earth. *BioScience* 51: 933-938.
- Pardos J.A., 2010. Los ecosistemas forestales y el secuestro de carbono ante el calentamiento global. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria Ministerio de Ciencia e Innovación (INIA). 253 p. Disponible en: [http://www.inia.es/gcontrec/pub/60587OT\\_LI\\_BRO\\_WEB\\_1277883079734.pdf](http://www.inia.es/gcontrec/pub/60587OT_LI_BRO_WEB_1277883079734.pdf)
- Reisinger A.; M Meinshausen y M. Manning. 2011. Future changes in global warming potentials under representative concentration pathways. *Environmental Research Letters*. 8pp. doi:10.1088/1748-9326/6/2/024020.
- Rodríguez T., D. A.; Rodríguez A., M.; Fernández S., F. y Pyne, S. J. 2002. Educación e incendios forestales. 2a ed. MundiPrensa. México, D. F. 201 p.
- Sandberg, D.V., Cushon, G.H., Ottmar, R.D. 2001. Characterizing fuels in the 21st century. *Int. J. Wildland Fire* 10: 381-387.
- Villers R., M. de L. 2006. Incendios Forestales. *Ciencias*. Núm. 081. Universidad Nacional Autónoma de México, México D. F, 60-66.
- Yokelson, R. J., Urbanski, S. P., Atlas, E. L., Toohey, D. W., Alvarado, E. C., Crounse, J. D., Wennberg, P. O., Fisher, M. E., Wold, C. E., Campos, T. L., Adachi, K., Buseck, P. R., Hao, W. M., 2007. Emissions from forest fires near Mexico City. *Atmos. Chem. Phys.* 7, 5569- 5584, doi:10.5194/acp-7-5569-2007.