

ESTIMACIÓN PRÁCTICA DE LA VARIABILIDAD DE LA HUMEDAD DE LOS COMBUSTIBLES BAJO DIFERENTES ECOSISTEMAS FORESTALES

PRACTICAL ESTIMATION OF THE VARIABILITY OF FUEL MOISTURE IN DIFFERENT FOREST ECOSYSTEMS

José Germán Flores Garnica¹, Laura Patricia Gómez Murillo²

RESUMEN

Para el uso de sistemas de simulación de comportamiento del fuego es necesario conocer, entre otros factores, el contenido de humedad de los combustibles forestales, ya que este influye en el precalentamiento, la ignición, la velocidad de propagación, la intensidad de la línea de fuego y en la producción de humo. Sin embargo, su cálculo es complicado, porque se deben considerar los cambios en las condiciones ambientales. Lo cual hace difícil su estimación rápida y precisa para fines operativos, o de toma de decisiones en el manejo del fuego. Por lo que el objetivo del presente trabajo fue la generación de modelos prácticos para el cálculo de los contenidos de humedad de combustibles forestales de 1-hora y de 10-horas. Estos basados en variaciones de humedad relativa y temperatura, que se monitorearon al aplicar quemas controladas en cuatro ecosistemas forestales (pino-encino, matorral-pino, pino y pastizal-pino). Los resultados sugieren que la humedad relativa es la variable que mejor estima el contenido de humedad de los combustibles ($R^2 = 0.955$ para combustibles de 1-hora y $R^2 = 0.965$ para combustibles de 10 horas). La información generada es útil para diversos propósitos, como la definición de áreas de riesgo y peligro de incendio, estimaciones del comportamiento del fuego, planeación de la implementación de quemas controladas, etc. Finalmente, se sugiere realizar estudios para evaluar las variaciones temporales del contenido de humedad de combustibles forestales.

Palabras clave: Comportamiento del fuego, incendio forestal, quema prescrita, riesgo de incendio, tiempo de retardo de combustibles, factores ambientales.

ABSTRACT

A fire behavior simulation system demands the knowledge of many factors, such as fuel moisture content, because it affects fuel preheating, fuel ignition, the speed of propagation, the intensity of the line of fire and smoke production. However, its calculus is complicated because an effective evaluation must consider changes in environmental conditions. This makes difficult a fast and precise enough for operative purposes, or for decision making in fire management. Therefore, the objective of this work was to generate practical models to calculate moisture content of 1 hour and 10 hour forest fuels. These were based on variations of relative humidity and temperature, which were monitored when prescribed burns were applied in four forest ecosystems (pine-oak, pine scrubland, pine, grass land-pine). Results suggest that relative humidity is the variable that better estimate the moisture content ($R^2 = 0.955$ for 1-hour fuels; and $R^2 = 0.965$ for 10 hours fuels). The generated information could be useful for several purposes, such as definition of fire risk areas, fire behavior estimations, prescription of burn planning, etc. Finally, it is suggested to carry on studies in order to assess temporal variations of fuels moisture content.

Key words: Fire behavior, forest fire, prescribed burn, fire risk, timelag of fuels, environmental factors.

Fecha de recepción: 10 de septiembre de 2010.

Fecha de aceptación: 15 de mayo de 2011.

¹Centro de Investigación Regional Pacífico Centro (CIRPAC), Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP).
Correo-e: flores.german@inifap.gob.mx

²Comisión Nacional Forestal

INTRODUCCIÓN

El fuego forestal es un fenómeno natural que ha estado presente, en mayor o menor grado, en casi todos los ecosistemas terrestres por millones de años (Odum, 1971; Flores, 1996; Emerson y Marinho, 1998; Rodríguez, 2000; Knight 2001; Nasi *et al.*, 2001; Covert, 2003; Jardel, 2003). En muchos casos, estos eventos producen pérdidas de recursos naturales de gran valor ecológico y económico, de recuperación difícil y en ocasiones imposible (Flores y Benavides, 1994; Nájera *et al.*, 2006). No obstante, en muchos otros los ecosistemas se benefician por la presencia de incendios, por ejemplo, fomenta la regeneración natural y la estructuración de ambientes favorables para cierta fauna (Flores y Omi, 2003). Para promover estas condiciones se recurre a dos estrategias en la implementación de quemas: 1) la experiencia del personal participante y 2) el uso de sistemas de simulación del comportamiento del fuego FARSITE [Finney, 1996], BURN [Veach *et al.*, 1994], y EMBYR [Hargrove y Gardner, 1994]). Muchos de ellos funcionan tomando como base la ecuación de propagación de incendios de superficie de Rothermel (1972), por lo que para utilizarlos es necesario tener ciertos valores de inicio, como: la velocidad del viento, temperatura, humedad relativa, cantidad y calidad de combustibles, pendiente, etc. Con dicha información se generan valores de salida como: la velocidad de propagación, altura de llama e intensidad de calor, entre otros.

Dentro de los valores de entrada, la caracterización de combustibles tiene un papel importante, por lo que se requiere conocer sus condiciones: las cargas ($Mg\ ha^{-1}$) por tipo de combustibles, proporción de combustibles, la relación volumen-superficie y el contenido de humedad. Entre las características de los combustibles, la humedad es una de las que más incide en el comportamiento del fuego (Ruiz, 2004), ya que influye en el precalentamiento y la ignición de los combustibles no quemados, la velocidad de propagación, la intensidad de la línea de fuego y la producción de humo. Por lo tanto constituye un parámetro muy importante en: a) la evaluación del peligro de incendios (Babrauskas, 2006; Weise, 2007), b) en el análisis del comportamiento del fuego y c) en el manejo de combustibles y quemas prescritas (Xianlin *et al.*, 2007).

Humedad de los combustibles

La humedad de combustible es la cantidad de agua en el follaje húmedo, en relación al mismo material cuando está seco (Danson y Bowyer 2004; Villers y Wong 2006). Para medir la humedad de los combustibles se tienen métodos directos e indirectos (Alves *et al.*, 2009). Dentro de los primeros se incluyen los medidores portátiles de conductividad eléctrica (Chatto y Tolhurst, 1997) y las varillas de medición de humedad de combustibles forestales (Haines y Frost, 1978). El empleo de

INTRODUCTION

Forest fire is a natural phenomenon that has been present, in a bigger or smaller degree, in almost all the terrestrial ecosystems for millions of years (Odum, 1971; Flores, 1996; Emerson and Marinho, 1998; Rodríguez, 2000; Knight, 2001; Nasi *et al.*, 2001; Covert, 2003; Jardel, 2003). In many cases, these events give way to the loss of natural resources of great ecological and economic value, of difficult recovery and in some times, impossible to achieve (Flores and Benavides, 1994; Nájera *et al.*, 2006).

Nevertheless, in many others, ecosystems benefit from the presence of fires, for example, it stimulates natural regeneration and the organization of favorable environments for some fauna (Flores and Omi, 2003). To promote these conditions, there are two strategies in burn implementation: 1) the personal experience of the performer and 2) the use of simulation systems of the behavior of fire FARSITE [Finney, 1996], BURN [Veach *et al.*, 1994], and EMBYR [Hargrove and Gardner, 1994]). Many of them work by taking the Rothermel (1972)'s equation for surface-fire propagation as a basis, which makes it necessary to have some initial values such as: wind speed, temperature, relative humidity, fuel amount and quality, slope, etc. With such information are produced exit values such as propagation speed, flame height and heat intensity, among others.

Among the initial values, the description of fuels plays an important, which it is necessary to know its conditions: loads ($Mg\ ha^{-1}$) by types of fuels, fuels proportion, surface-volume relation and moisture content. Among the characteristics of fuels, moisture is one of the most determinant for fuel behavior (Ruiz, 2004), since it affects pre-heating and non-burned fuel ignition, propagation speed, intensity of the line of fire and smoke production. Thus, it is a very significant parameter for: a) the assessment of fire danger (Babrauskas, 2006; Weise, 2007); b) the analysis of the behavior of fire and c) the management of fuels and prescribed burns (Xianlin *et al.*, 2007).

Fuel moisture

Fuel moisture is the amount of moist foliage in relation to the same material when it is dry (Danson and Bowyer, 2004; Villers and Wong, 2006). There are direct and indirect methods to measure fuel moisture (Alves *et al.*, 2009). In the first are included the electrical conductivity portable meters (Chatto and Tolhurst, 1997) and forest fuel moisture sticks (Haines and Frost, 1978) The use of these methods implies to count with specialized personnel and the corresponding time investment, in such a way that its use is not convenient from a practical viewpoint, since, frequently, it is necessary to determine such moisture in a simple and fast way, in a specific time and place. For example, to estimate how fire behaves during a controlled

estos métodos implica contar con personal especializado y la correspondiente inversión de tiempo. De tal manera que, su empleo no es práctico, ya que con frecuencia se necesita determinar dicha humedad en forma sencilla y rápida, en un momento y lugar específicos. Para, por ejemplo, estimar cómo se comporta el fuego durante la implementación de una quema controlada (Ruíz, 2004). Dado estas limitaciones, se hace uso de los métodos indirectos, a través de los cuales se calcula el contenido de humedad, entre ellos se pueden mencionar: la humedad relativa, temperatura, cobertura de nubes (Sepúlveda *et al.*, 2001) o incluso con la información de sensores remotos (Bowyer and Danson, 2006; Xianlin *et al.*, 2007).

Factores que afectan la humedad de los combustibles

La humedad de los combustibles muertos está controlada, exclusivamente, por factores ambientales (Carlson *et al.*, 2007), tales como: la precipitación, en forma de lluvia, nieve o niebla, los cuales humedecen de manera directa a los combustibles (Villers *et al.*, 2007). No obstante, indirectamente pueden aumentar su humedad, al incrementar la humedad relativa y la del suelo. Otro factor es la condensación del agua sobre la superficie del combustible. Finalmente, se tiene el intercambio de agua en estado de vapor entre la atmósfera y el material inflamable (Ruíz, 2004; Xianlin *et al.*, 2007). Esto último define el concepto de "tiempo de retardo", el cual 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 los combustibles sean más grandes, perderán o ganarán humedad más lentamente, es decir, tendrán un mayor tiempo de retardo. Con base en esta propiedad se clasifican según su tiempo de retardo en: 1, 10, 100 y 1000 h; cuyos grosores varían de 0 a 0.60, 0.61 a 2.50, 2.51 a 7.50 y mayores de 7.51 cm, respectivamente (Flores *et al.*, 2005).

Calcular la humedad de los combustibles en forma directa se complica, cuando se manejan grandes superficies, razón por la cual, de manera alternativa se ha usado su estimación indirecta. Sin embargo, una evaluación efectiva debe considerar los cambios en las condiciones ambientales con aspectos tiempo-espaciales específicos, que a su vez se reflejen en los contenidos de humedad de los combustibles (Verbesselt *et al.*, 2002), aunque represente un proceso complicado y, en ocasiones, lento. Principalmente, por el número de variables que se requieren para estimarla (Flores, 2001). Lo anterior hace poco operativo el uso de estas estrategias indirectas, pues se necesita que sean ágiles y sencillas, para que apoyen la toma de decisiones del personal técnico involucrado en el manejo del fuego. Al respecto, el objetivo principal del presente trabajo fue desarrollar modelos prácticos que faciliten la estimación del contenido de humedad de combustibles forestales, con base en la evaluación de dos parámetros ambientales: humedad relativa y temperatura.

burning (Ruiz, 2004). From these limitations, indirect methods are used, through which is calculated moisture content; the following can be mentioned: relative humidity, temperature, cloud cover (Sepúlveda *et al.*, 2001) or even with the information from remote sensing (Bowyer and Danson, 2006; Xianlin *et al.*, 2007).

Factors affecting fuel moisture

The moisture of dead fuels is controlled, exclusively, by environmental factors (Carlson *et al.*, 2007), such as: precipitation, in terms of rainfall, snow or fog, which directly wet fuels (Villers *et al.*, 2007). Nevertheless, they can increase moisture indirectly by raising the relative humidity and that of the soil. Another factor is water condensation over the fuel surface. Finally, there is water interchange in steam form between the atmosphere and the flammable material (Ruíz, 2004; Xianlin *et al.*, 2007). The latter defines the concept of "retardation time", which is the lapse that a fuel takes to loose or gain (by environmental humidity) two thirds of the difference between their initial content of moisture and the environment. If fuels are large, they will loose or gain moisture more slowly, that is, they will have a longer retardation time or time lag. Based upon this condition, they are classified according to their time lag in 1, 10, 100 and 1000 h, and their thickness vary from 0 to 0.60, 0.61 to 2.50, 2.51 to 7.50 and more than 7.51 cm, respectively (Flores *et al.*, 2005).

To calculate the moisture of fuels in a direct form becomes complicated, when big areas are managed, which is the reason why their indirect estimation has been used as an alternative. However, an effective assessment must consider changes in the environmental conditions with specific space-time elements, which reflect fuel moisture contents (Verbesselt *et al.*, 2002), even if it is a complex process and sometimes, slow, because of the number of variables that are required to estimate it (Flores, 2001). This makes the use of indirect strategies less efficient, since it is expected that they are agile and simple, to support the decision making of the technical personnel involved in fire management. In this regard, the main objective of the actual paper was to develop practical models that make the estimation of moisture content of forest fuels an easy task, starting from the assessment of two environmental parameters: relative humidity and temperature.

MATERIALS AND METHODS

Study area

The present work was made with information from four forest ecosystems (Table 1), located in the Northeastern part of Chihuahua State (Figure 1). The selected areas were geo-referred with a global GPS system.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El presente trabajo se desarrolló con información obtenida de cuatro ecosistemas forestales (Cuadro 1) ubicados en la parte noroeste del estado de Chihuahua (Figura 1). Las áreas seleccionadas fueron georreferidas con un sistema de geoposicionamiento global.

Cuadro 1. Tipos de vegetación y localidades donde se desarrollaron las quemas controladas en el estado de Chihuahua.
Table 1. Types of vegetation and locations where controlled burnings took place in the State of Chihuahua.

Vegetación	Municipio	Localidad	Especies
Matorral-pino	Bocoyna	Ejido San Juanito	<i>Juniperus deppeana</i> Steud, <i>Pinus arizonica</i> Engelm., <i>Pinus ayacahuite</i> Ehrenb et Schltld., <i>Pinus chihuahuana</i> Engelm., <i>Pinus herrerae</i> Martínez, <i>Pinus lumholtzii</i> Robins et Ferns, <i>Quercus</i> sp.
Pino	Bocoyna	Propiedad privada Los Álamos	<i>Juniperus deppeana</i> , <i>Pinus arizonica</i>
Pino-encino	Madera	El Largo y Anexos	<i>Juniperus deppeana</i> , <i>Pinus ayacahuite</i> , <i>Pinus chihuahuana</i> , <i>P. duranguensis</i> Martínez, <i>P. engelmannii</i> Carrière, <i>Pinus leiophylla</i> Schiede ex Schlecht. et Cham., <i>Quercus</i> sp.
Pastizal-pino	Madera	El Largo y Anexos	<i>Bouteloua gracilis</i> (Kunth.) Lag et Steud, <i>Pinus arizonica</i> .

Monitoring of the environmental conditions

The calculus of the variations in forest fuel moisture contents, as a response to environmental changes, was focused on relative humidity and on temperature, whose values were monitored when a series of controlled burnings were implemented in each of the ecosystems that were selected.

Forest fuel moisture calculation

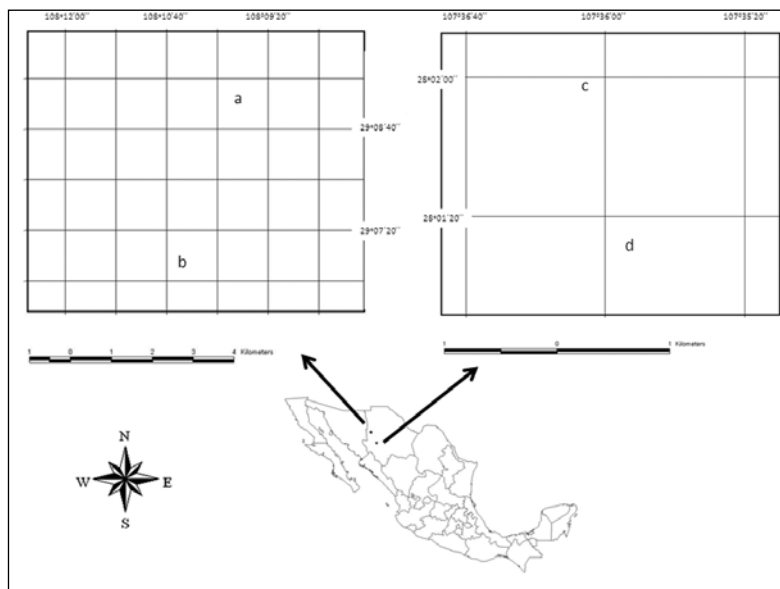


Figura 1. Ubicación de los sitios de trabajo al noroeste del estado de Chihuahua: a) pastizal-pino; b) pino-encino; c) Pino; d) matorral-pino
Figure 1. Location of the working sites at the Northeast of Chihuahua State
a) grass land-pine; b) pine-oak; c) pine; d) pine scrubland.

Monitoreo de condiciones ambientales

El cálculo de las variaciones de contenidos de humedad de combustibles forestales, en respuesta a cambios ambientales, los que fueron enfocados a la humedad relativa y la temperatura, cuyos valores se monitorean al implementar una serie de quemas controladas en cada uno de los ecosistemas señalados.

Cálculo de humedad de los combustibles forestales

En el tipo de quemas controladas que se utilizaron, la propagación del fuego estuvo condicionada, principalmente, por los combustibles pequeños (< 2.5 cm de diámetro), por lo que se estimó el contenido de humedad sólo de los combustibles de 1-hora (0-0.6 cm) y de 10-horas (0.6-2.5 cm). Dado que no se tuvieron evaluaciones, este parámetro se calculó mediante una serie de ecuaciones teóricas (Sepúlveda *et al.*, 2001). Los resultados se usaron como el valor "real" de los contenidos de humedad de los combustibles, para comparar la bondad de ajuste de los modelos prácticos que se generaron.

Estimación teórica de humedad en combustibles de 1-hora

Para determinar la humedad teórica de los combustibles de 1-hora se utilizó la siguiente fórmula (Sepúlveda *et al.*, 2001):

$$mc_1 = 1.03 EMC (\%) \quad (1)$$

Donde:

mc_1 = Retardo de 1 hora del contenido de humedad del combustible.

EMC = Contenido de humedad en equilibrio de la interfase combustible-atmósfera.

Para la estimación del EMC se requiere conocer: a) la interfase de humedad relativa del combustible - atmósfera (%) y b) la interfase de la temperatura del combustible - atmósfera (°F). La primera se representa con la letra h , mientras que la segunda con la T . De acuerdo con las variaciones del contenido de humedad de los combustibles, en relación a las variaciones de humedad relativa, se especifican tres rangos de esta última. Con sus correspondientes ecuaciones para el cálculo del contenido de humedad:

$$EMC = 0.03299 + 0.281073h - 0.000578 T \quad (2)$$

Cuando $h < 11$

$$EMC = 2.22749 + 0.160107h - 0.01478 \quad (3)$$

Cuando $11 < h < 51$

$$EMC = 21.06060 + 0.0005565h^2 - 0.00035hT - 0.483199h \quad (4)$$

Cuando $h > 51$

In the type of controlled burnings that were used, fire propagation was limited, mainly, by the small fuels (< 2.5 cm in diameter), which made the estimation of moisture content only in 1 hour (0-0.6 cm) and 10 hour (0.6-2.5 cm) fuels. Since there were no assessments, this parameter was determined through a series of theoretical equations (Sepúlveda *et al.*, 2001). The results were taken as the real value of the moisture contents of fuels, in order to compare the goodness of fit of the practical models that were produced.

Theoretical estimation of moisture of 1 hour fuels

In order to determine the theoretical moisture of 1 hour fuels, the following formula was used (Sepúlveda *et al.*, 2001):

$$mc_1 = 1.03 EMC (\%) \quad (1)$$

Where:

mc_1 = 1 hour retardation of the fuel moisture content

EMC = Equilibrium Moisture Content with the atmosphere-fuel interface.

For the estimation of the EMC it is necessary to know: a) the interface of the relative humidity of the fuel-atmosphere per cent and b) the interface of the temperature of the fuel-atmosphere (°F). The first is represented by the h letter, while the second with T . According to the variations in the fuels' moisture content in regard to the variations of relative humidity, three intervals of the latter are specified, with their equations to determine moisture content:

$$EMC = 0.03299 + 0.281073h - 0.000578 T \quad (2)$$

When $h < 11$

$$EMC = 2.22749 + 0.160107h - 0.01478 \quad (3)$$

When $11 < h < 51$

$$EMC = 21.06060 + 0.0005565h^2 - 0.00035hT - 0.483199h \quad (4)$$

When $h > 51$

One of the elements that define relative humidity is the presence of clouds, in such a way that in an area where they are absent, there will be a low relative humidity and it will be greater when they occur. Thus, based on the cloud cover of the sky, there is a series of fit factors in the fuel-atmosphere of temperature and relative humidity interface (Table 2). Since burnings were made in April, a month with a minimal cloudiness and high temperatures, the condition of clear skies for all the ecosystems was selected.

Theoretical estimation of 10 hours fuel moisture

The following formula was used (Sepúlveda *et al.*, 2001):

$$mc_{10} = 1.28 EMC \quad (5)$$

Uno de los elementos que definen la humedad relativa es la presencia de nubes. De tal manera que en un área donde están ausentes se tendrá una baja humedad relativa y ésta será mayor con la ocurrencia de ellas. Así, con base en la cobertura del cielo por nubes existe una serie de factores de ajuste en la interfase combustible-atmósfera de temperatura y humedad relativa (Cuadro 2). Dado que las quemas se realizaron en abril, mes caracterizado por una nubosidad mínima y elevadas temperaturas, se eligió la condición de cielos claros para todos los ecosistemas.

Cuadro 2. Factores de ajuste por cobertura del cielo, para la interfase combustible-atmósfera de temperatura y humedad relativa (basado en Sepúlveda *et al.*, 2001).

Table 2. Fit factors for sky cover, for the fuel-atmosphere temperature and relative humidity (based on Sepúlveda *et al.*, 2001).

	Fracción de la cobertura de cielo : condición de cielo			
	0.0-0.1 Claros	0.1-0.5 Nubes dispersas	0.6-0.9 Medio nublado	0.9-1.0 Nublado
Temperatura (°F) Bulbo seco ADICIONA	25	19	12	5
Humedad relativa (%) MULTIPLICA	0.75	0.83	0.91	1.0

Estimación teórica de humedad en combustibles de 10-horas

Se utilizó la siguiente fórmula (Sepúlveda *et al.*, 2001):

$$mc_{10} = 1.28 EMC \tag{5}$$

Donde:

mc_{10} = Retardo de 10 horas del contenido de humedad del combustible

EMC = Contenido de humedad en equilibrio de la interfase combustible- atmósfera. El cálculo es igual al utilizado en la estimación del contenido de humedad de los combustibles de 1 hora (Ecuaciones 2, 3, y 4).

RESULTADOS

Contenido teórico de humedad de combustibles

El Cuadro 3 muestra las variaciones en la temperatura y la humedad relativa en cada una de las condiciones en que se monitorearon. Así mismo se presentan los valores teóricos de los porcentajes de humedad tanto de los combustibles de 1 hora, como de los combustibles de 10 horas.

Where:

mc_{10} = 10 hour lag of fuel moisture content

EMC = Equilibrium Moisture Content with the atmosphere-fuel interface. Its calculus is the same as that used for the estimation of fuel moisture content of 1 hour (Equations 2, 3 and 4).

RESULTS

Theoretical fuel moisture content

Table 3 shows the variations in the variations of temperature and relative humidity in each of the conditions in which they were monitored. Also, they show the theoretical values of moisture per cent from the 1 hour fuels, as well as from the 10 hour fuels.

In Table 3 is observed that the highest temperature was recorded in the pine ecosystem. However, the sequence of previous temperatures belongs to the minimal of all the studied environments. It is worth noting that the pine association was a young forest, with a uniform crown cover and minimal light infiltration which favored that the first records of temperature were low. About pine scrubland, basically the highest temperature values were obtained. On the other hand, even when there were few sampling points, the grass land-pine lot showed less variability in temperature and relative humidity. The latter had a low correlation with temperature ($R^2 = 0.556$), even in the best model (polynomial).

Practical estimation of 1 hour fuel moisture

The relative humidity of the parameter in which was determined the greatest correlation with 1 hour fuel moisture content (Table 4), and whose linear model revealed a higher correlation coefficient (0.955), which is very similar to the multivariate model

Cuadro 3. Valores del monitoreo ambiental y valores teóricos de contenido de humedad en combustibles de 1 hora y combustibles de 10 horas.

Table 3. Values of environmental monitoring and theoretical moisture content values of 1 hour fuels and for 10 hour fuels.

Condición	Hora	HR	T	1 H	10 H
Pino - encino	07:15	86	4	12	15
	07:33	86	6	12	15
	07:38	60	7	10	12
	07:55	62	8	10	13
	08:17	62	8	10	13
	08:20	52	8	10	12
	08:48	62	10	10	12
	08:55	56	15	10	12
Matorral - pino	07:24	72	8	11	13
	07:55	66	10	10	13
	08:20	60	13	10	12
	09:00	72	14	10	13
	09:20	72	15	10	13
	09:40	62	15	10	12
Pino	07:15	100	0	15	19
	07:35	100	2	15	19
	07:52	100	5	15	18
	08:25	30	8	5	6
	08:50	30	10	5	6
	09:20	18	16	3	4
	09:45	20	16	3	4
Pastizal - pino	06:50	100	0	14	20
	07:10	100	3	14	19
	07:45	80	5	12	14

HR = humedad relativa (%); T = temperatura (C°); 1H = 1 hora; 10H = 10 horas
 HR = relative humidity (%); T = temperature (Co); 1H = 1 hour; 10H = 10 hour.

En el Cuadro 3 se observa que la temperatura más alta se registró en el ecosistema de pino. Sin embargo, la secuencia de las temperaturas anteriores corresponde a las mínimas en todos los ambientes estudiados. Cabe señalar que el pinar fue un bosque joven, con una cobertura de copa uniforme e infiltración mínima de luz, lo cual favoreció que las primeras lecturas de temperatura fueran bajas. En cuanto al ecosistema de matorral con pino, se obtuvieron básicamente los valores de temperatura más grandes. Por otra parte, aún cuando se muestrearon pocos puntos, la parcela de pastizal-pino mostró menos variabilidad en temperatura y humedad relativa. Esta última tuvo una baja correlación con la temperatura ($R^2 = 0.556$), aún en el mejor modelo generado (polinómico).

(0.9552), that considers relative humidity and temperature. Nevertheless, for practical endings it is advisable to use the first one (Figure 2), with the relative humidity as the independent variable. On the other hand, the correlation of temperature with the 1 hour fuel moisture content was low, with a 0.53 as maximum R^2 (polynomial model).

In Figure 3 is shown the tendency of the relation of the in regard to the combination of the independent variables of temperature and relative humidity. It is clear the great influence the latter has.

Estimación práctica de humedad de combustibles de 1 hora

La humedad relativa fue el parámetro en el que se determinó la mayor correlación con el contenido de humedad de los combustibles de 1 hora (Cuadro 4), y cuyo el modelo lineal resultó con el coeficiente de correlación (0.955) superior, el cual fue muy similar al modelo multivariado (0.9552), que contempla a la humedad relativa y a la temperatura. No obstante, para fines prácticos es recomendable usar el primero (Figura 2), con la humedad relativa como variable independiente. Por otra parte, la correlación de la temperatura con el contenido de humedad de combustibles de 1 hora fue baja, con una R² máxima de 0.53 (modelo polinómico).

Practical estimation of 10 hour fuel moisture

The highest correlation with the 10 hour fuel moisture content was determined with relative humidity (Table 5), and the linear model with the highest correlation coefficient (0.965), even slightly better than the multivariate model (0.9552), that considers relative humidity and temperature. For practical purposes it is advisable to use the linear model (Figure 2), with relative humidity as the independent variable. On the other hand, the correlation of temperature with the 10 hour fuel moisture content was low, with a 0.578 as maximum R² (polynomial model).

Cuadro 4. Modelos para estimar el contenido de humedad en combustibles forestales de 1 hora.
Table 4. Models to estimate 1 hour fuel moisture content.

Variable	Modelo	Fórmula	R ²
Temperatura	Lineal	$1H = -0.494T + 14.49$	0.519
	Polinomio	$1H = 0.014T^2 - 0.734T + 15.18$	0.53
Humedad relativa	Lineal	$1H = 0.133HR + 1.312$	0.955
	Exponencial	$1H = 3.097e^{0.016HR}$	0.864
Multivariable	Lineal	$1H = 1.5942 + 0.1312HR + 0.154T$	0.9552

T = Temperatura; 1H = Porcentaje de humedad en combustibles de 1 hora; HR = Humedad Relativa.
T = Temperature; 1H = 1 hour fuel moisture per cent; HR = Relative Humidity.

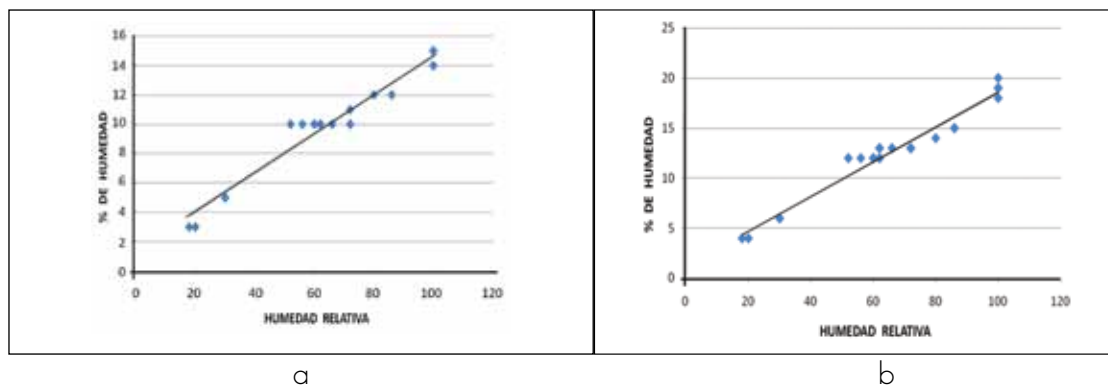


Figura 2. Tendencia de la relación entre la humedad relativa con la humedad de combustibles de 1 hora (a) y 10 horas (b).

Figure 2. Tendency observed in the relation between relative humidity with 1 hour (a) and 10 hour (b) fuel moisture.

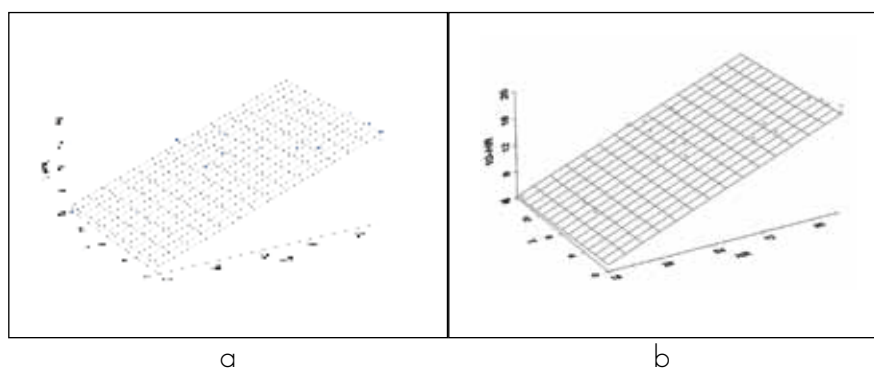


Figura 3. Tendencia de la relación entre el contenido de humedad de combustibles de 1 hora (a) y 10 horas (b) con la humedad relativa (HR) y la temperatura (T).
 Figure 3. Tendency of the relation between the 1 hour fuel moisture content (a) and 10 hour (b) with relative humidity (HR) and temperature (T).

En la Figura 3 se indica la tendencia de la relación del contenido de humedad de los combustibles de 1 hora, con respecto a la combinación de las variables independientes de temperatura y humedad relativa. Es clara la mayor influencia de esta última.

In Figure 3 is shown the tendency of the relation of the 10 hour fuel moisture content in regard to the combination of the independent variables of temperature and relative humidity, where, as in the 1 hour fuels, it is clear the great influence the latter has.

Estimación práctica de humedad de combustibles de 10 horas

Analysis of the prediction of moisture content

La mayor correlación con el contenido humedad de los combustibles de 10 horas se determinó con la humedad relativa (Cuadro 5), y el modelo lineal con el coeficiente superior de correlación (0.965), incluso es ligeramente mejor que el modelo multivariado (0.9552), que incluye a la humedad relativa y a la temperatura.

Once the models which achieved the best estimation of forest fuels moisture content were selected, an analysis of the resulting predictions was made. It is important to notice that in both cases (1 h and 10 h) the only independent variable was relative humidity. Table 6 gathers the results of the use of such models, as well as the corresponding residuals. The residual

Cuadro 5. Modelos para estimar el contenido de humedad en combustibles forestales de 10 horas.
 Table 5. Models to estimate 10 hour fuel moisture content.

Variable	Modelo	Fórmula	R ²
Temperatura	Lineal	$10 H = -0.662 T + 18.56$	0.546
	Exponencial	$10 H = 19.73 e^{0.005T}$	0.429
	Polinómico	$10 H = 0.033T^2 - 1.22 T + 20.18$	0.578
Humedad relativo	Lineal	$10 H = 0.175 HR + 1.113$	0.965
	Exponencial	$10 H = 3.806 e^{0.017HR}$	0.900
	Logarítmico	$10 H = 8.838 \ln (HR) - 23.47$	0.922
Multivariable	Lineal	$10 H = 1.9688 + 0.1688 HR + 0.0468 T$	0.9552

T = Temperatura; 10 HR = Porcentaje de humedad en combustibles de 10 horas; HR = Humedad Relativa.
 T = Temperature; 10 H = 10 hour fuel moisture per cent; HR = Relative Humidity.

En la práctica es recomendable usar el modelo lineal (Figura 2), con la humedad relativa como variable independiente. Por otra parte, la correlación de la temperatura con el contenido de humedad de combustibles de 10 horas fue baja, con una R² máxima de 0.578 (modelo polinómico).

standard deviation was of 0.675 and of 0.925 for 1 hour and 10 hours, respectively, which implies that the residual variation is rather low and assures a good estimate of fuel moisture content.

En la Figura 3 se señala la tendencia de la relación del contenido de humedad de los combustibles de 10 horas, en relación a la combinación de las variables independientes de temperatura y humedad relativa. Donde, al igual que en el caso de los combustibles de 1 hora, es clara la mayor influencia de esta última.

Análisis de la predicción de contenidos de humedad

Una vez que se seleccionaron los modelos que mejor estimaron el contenido de humedad de los combustibles forestales, se hizo un análisis de las predicciones resultantes. Es importante remarcar que en ambos casos (1 h y 10 h) la única variable independiente fue la humedad relativa. El Cuadro 6 resume los resultados de aplicar los modelos, así como los residuales correspondientes. La desviación típica de residuales tuvo un valor de 0.675 y de 0.925 para combustibles de 1 hora y 10 horas, respectivamente. Lo cual implica que la variación de los residuales es relativamente baja y asegura una buena estimación del contenido de humedad de los combustibles.

In order to make a comparison between the moisture content predictions and the two types of fuels, the variation coefficients were determined. Results indicate that the best prediction belong to the 1 hour fuels, with 6.59, while for the 4.

Residual Analysis

The residual standard error was determined as indicator of the fulfillment of the conditions to apply correlation techniques as well as the goodness of fit for the estimations of fuel moisture content. For the 1 hour fuels, this value was 0.7383, while for the 10 hour fuels, it was 0.8483. This means that in both types, the dispersion of residuals was low.

The normality test in the residual distribution is shown in Figure 4, in which it can be seen that they gather (or fit) along the Residual line, or quantiles of the standard normal; thus, it can be concluded that residuals, for 1 hour and 10 hour fuels, have a rather normal distribution.

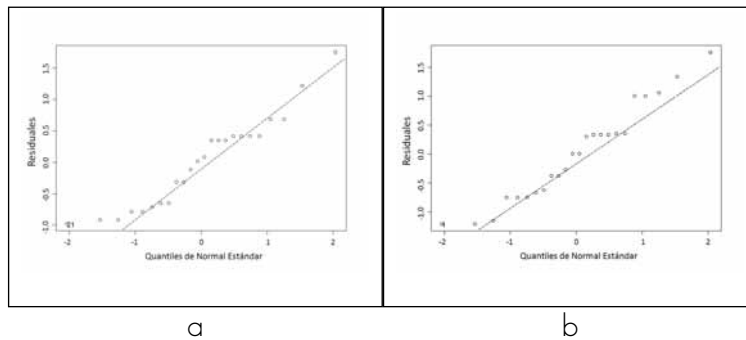


Figura 4. Graficas tipo QQ que muestran el ajuste a una distribución normal de los residuales de la estimación del contenido de humedad de combustibles de 1 hora (a) y 10 horas (b).

Figure 4. Graphics of the QQ type that show the normal distribution fitting of the residuals of the estimation of the 1 hour (a) and 10 hour (b) fuels moisture content.

Cuadro 6. Valores estimados de las predicciones de contenidos de humedad de los combustibles en relación a la humedad relativa (HR).
 Table 6. Estimated values of the predictions of fuel moisture content in regard to relative humidity (HR).

HR	1 Hora			10 Horas		
	Observado	Estimado	Residual	Observado	Estimado	Residual
86	12	12.75	-0.75	15	16.163	-1.163
86	12	12.75	-0.75	15	16.163	-1.163
60	10	9.292	0.708	12	11.613	0.387
62	10	9.558	0.442	13	11.963	1.037
62	10	9.558	0.442	13	11.963	1.037
52	10	8.228	1.772	12	10.213	1.787
62	10	9.558	0.442	12	11.963	0.037
56	10	8.76	1.24	12	10.913	1.087
72	11	10.888	0.112	13	13.713	-0.713
66	10	10.09	-0.09	13	12.663	0.337
60	10	9.292	0.708	12	11.613	0.387
72	10	10.888	-0.888	13	13.713	-0.713
72	10	10.888	-0.888	13	13.713	-0.713
62	10	9.558	0.442	12	11.963	0.037
100	15	14.612	0.388	19	18.613	0.387
100	15	14.612	0.388	19	18.613	0.387
100	15	14.612	0.388	18	18.613	-0.613
30	5	5.302	-0.302	6	6.363	-0.363
30	5	5.302	-0.302	6	6.363	-0.363
18	3	3.706	-0.706	4	4.263	-0.263
20	3	3.972	-0.972	4	4.613	-0.613
100	14	14.612	-0.612	20	18.613	1.387
100	14	14.612	-0.612	19	18.613	0.387
80	12	11.952	0.048	14	15.113	-1.113
Promedio	67	10.223	0.027	12.875	12.838	0.037

CONCLUSIONS

Para hacer una comparación entre las predicciones de los contenidos de humedad, y los dos tipos de combustibles, se calcularon los coeficientes de variación correspondientes. Los resultados indican que las mejores predicciones corresponden a los combustibles de 1 hora, con 6.59, en tanto que para los combustibles de 10 horas se obtuvo un coeficiente de 7.18. Sin embargo, se considera que el ajuste de los modelos, en ambos casos, es bueno.

The understanding of such a complex phenomenon as forest fires implies to know a series of parameters linked to them. Some of them, for example, are fuels, topography, environmental variables, etc. In addition, the information of each of these parameters must be as precise as possible, which demands a definition of probed processes that tend to standardize. In this way, it must be clear that the statement that is described in this paper, considers fuel moisture as a relevant within the set

Análisis de residuales

Se determinó el error estándar de residuales como indicador del cumplimiento de las condiciones de aplicación de las técnicas de correlación, así como de la bondad del ajuste de las estimaciones de contenido de humedad para combustibles. El valor para los combustibles de 1 hora es de 0.7383; mientras que el error estándar de residuales para combustibles de 10 horas es de 0.8483. Lo anterior indica que en los dos tipos la dispersión de los residuales resultó baja.

El análisis de la normalidad en la distribución de los residuales se presenta en la Figura 4, en ella se aprecia que se agrupan (ajustan) a lo largo de la recta *Residuales = Quantiles de Normal Estándar*, por lo que puede concluirse que los residuales, tanto para combustibles de 1-hora como de 10-horas, tienen una distribución aproximadamente normal.

CONCLUSIONES

El entendimiento de un fenómeno tan complejo como son los incendios forestales implica conocer una serie de parámetros asociados a los mismos. Dentro de estos se tienen, por ejemplo combustibles: topografía, variables ambientales, etc. Además se requiere que la información de cada uno de esos parámetros sea lo más precisa posible. Para lo cual deben definirse procesos probados, que tiendan a estandarizarse. De esta forma debe entenderse que el planteamiento, que se presenta en este trabajo, considera la humedad de combustibles como una parte relevante dentro del conjunto de parámetros que definen el comportamiento del fuego. Sin embargo, es importante el contar con estrategias alternativas para hacer evaluaciones del contenido de humedad que sean prácticas. Tal es el caso de los modelos generados en el presente estudio, que se basan solo en la humedad relativa. Esto permitirá el uso de dicho parámetro en actividades operativas, tanto de prevención, como de combate de incendios forestales. No obstante, debe señalarse que los resultados consignados deben tomarse como una primera aproximación, por lo que su uso deberá, si es necesario, establecer si los modelos sobreestiman, o subestiman los contenidos de humedad de los combustibles. Además, sus resultados se restringen a las condiciones ambientales prevalecientes en los sitios donde se obtuvieron los datos analizados. Por lo que se sugiere aumentar el número de observaciones y tomar en cuenta otras condiciones ambientales, incluso otros parámetros como: la cobertura de dosel, la densidad de arbolado, mezcla de especies, etc. La metodología propuesta podrá usarse para obtener otros modelos. 🍂

of parameters that define the behavior of fire. However, it is important to count on optional strategies to make assessment of moisture content that are practical. Such is the case of the models generated in the actual study, which are based only on relative humidity. This will make it possible to use such a parameter in operational activities, preventive as well as forest-fire combat. Nevertheless, it must be underlined that the results here described must be taken as a first approach, which, if ever used, must find if models over or under estimate fuel moisture contents. Also, their results are restricted to the environmental conditions that prevail in the places from which the analyzed data were taken. Thus, it is suggested to increase the number of observations and take into account additional environmental conditions, even parameters such as: canopy cover, tree density, species mixture, etc. This methodology might be used to formulate more models. 🍂

End of the English version

REFERENCIAS

- Alves M., V., A. C. Batista, R. V. Soares., M. Octaviano and M. Marchetti. 2009. Fuel Moisture Sampling and modeling in *Pinus elliotti Engelm.* Plantations based on weather conditions in Paraná-Brazil. I- Forest, The Italian Society of Silviculture and Forest Ecology 2:99-103.
- Babrauskas, V. 2006. Effective heat of combustion for flaming combustion of conifers. *Canadian Journal of Forestry Research*. 36: 659-663.
- Bowyer P. and Danson, F. 2006. Sensitivity of spectral reflectance to variation in live fuel moisture content at leaf and canopy level. *Remote Sensing of Environment, Centre for Environmental Systems Research* 92: 297-308
- Carlson, J., L. Bradshaw, R. Nelson, R. Bensch, and R. Jabrzemski. 2007. Application of the Nelson Model to four timelag fuel classes using Oklahoma field observations: model evaluation and comparison with National Fire Danger System algorithms. *International Journal of Wildland Fire* 16:204-216.
- Chatto, K. and K. Tolhurst. 1997. The development and testing of the Wiltronics T-H Fine fuel moisture meter. Department of Natural Resources and Environment, Creswick Research Station. Research Report. No. 46. Creswick, Victoria. Australian. 44 p.
- Covert, K. A. 2003. Hairy woodpecker winter ecology following wildfire: effects of burn severity and age. Masters dissertation. Northern Arizona University. <http://www.rms.nau.edu/publications/Covert-Bratland%20Thesis/Covert-Bratland%20Thesis.pdf>. (septiembre de 2006).
- Danson, F. and P. Bowyer. 2004. Estimating live fuel moisture content from remotely sensed reflectance. *Remote Sensing of Environment, Centre for Environmental Systems Research* 92: 309-321.
- Emerson, M. V. and J. Marinho. 1998. Pre and Post Fire habitat utilization by rodents of Cerrado from Central Brazil. *Biotropica* 30 (3): 491-496
- Finney, M. A. 1996. FARSITE. Fire Area Simulator. User's guide and technical documentation. Systems for Environmental Management. Version 2.0. Missoula, MT. USA. 116 p.
- Flores G., J. G. y D. Benavides S., de J. 1994. Efecto de las quemaduras prescritas sobre algunas características del suelo en un rodal de pino. *Revista Terra* 12 (4): 393-400.
- Flores G., J. G. 1996. Impacto ambiental de los incendios forestales. INIFAP. Pacífico- Centro. Publicación Especial no. 1. Guadalajara, Jalisco. México 21 p.
- Flores G., J. G. 2001. Modeling the spatial variability of forest fuel arrays. Ph. D. Dissertation. Dept of Forest Sciences. Colorado State University. Fort Collins, CO. USA. 184 p.

- Flores G., J. G. y P. Omi. 2003. Mapeo de combustibles forestales para simulaciones del comportamiento espacial del fuego utilizando estrategias de geomática. *Agrociencia* 37 (1): 65-72.
- Flores G., J. G., Moreno D. A. y D. Benavides S., de J. 2005. Simulación Espacial de dispersión del fuego en función de la carga de combustible y pendiente. *Ciencia Forestal en México* 30 (97): 7-28.
- Haines, D. and J. Frost. 1978. Weathering effects on fuel moisture sticks: corrections and recommendations. United States Forest Service, Research paper NC 154. St. Paul, MN, USA. 7 p.
- Hargrove, W. W. 1994. Using EMBYR, a large-scale probabilistic fire model, to re-create the Yellowstone Forest Lake fire. *Environmental Research News*, <http://research.esd.ornl.gov/EMBYR/embyr.html>. (julio de 2009).
- Jardel P., E. 2003. Reseña del Seminario sobre Manejo del fuego y Restauración de bosques. Laboratorio de Manejo Forestal, Departamento de Ecología y Recursos Naturales-IMECBIO, Centro Universitario de la Costa Sur. Universidad de Guadalajara <http://www.fire.unifreiburg.de/GlobalNetworks/MesoAmerica/Manantlan%20seminario%20manejo%20fuego.pdf>. (septiembre de 2010).
- Knight, D. 2001. WILDFIRE! Yellowstone National Park fires show natural cycle at work. <http://www.findarticles.com/p/articles/mim0FRO/is4134/ai79573242>. (septiembre de 2006).
- Nájera D., A., J. C. Cal y Mayor T. y M. P. Ramos R. 2006. Uso del fuego en el manejo de combustibles forestales en la sierra de Zapalinamé, Coah. In: Memoria del IV Simposio Internacional sobre Manejo Sostenible de los Recursos Forestales. 19-22 de abril. Versión digital. Universidad de Pinar del Río. Pinar del Río, Cuba. http://www.fire.uni-freiburg.de/GlobalNetworks/Caribbean/SIMFOR%202006/Najera_mx.pdf. (enero de 2007).
- Nasi R., R. Dennon, E. Meijaard, G. Applegate y P. Moore. 2001. Los incendios forestales y la diversidad biológica. *Unasylva*, no. 209. FAO - Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. <http://www.fao.org/docrep/004/y3582s/y3582s08.htm#PQ0> (octubre de 2006).
- Odum, E. P. 1971. *Ecología*. 3ª. ed. Interamericana, México, D.F. México. 569 p.
- Rodríguez T., D. A. 2000. Propuesta de manejo del fuego. In: Rodríguez-T., D. A., A. Rodríguez M., S. F. Fernández y S. J. Pyne. *Educación e Incendios Forestales*. Mundi Prensa. México, D. F. México. pp. 189-194.
- Rothermel, R. C. 1972. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. Research Paper INT-115, United States Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden, UT. USA. 42 p. <http://www.fs.fed.us/rm/pubsint/intp115.pdf>. (agosto de 2010).
- Ruiz G., A. D. 2004. La predicción de la humedad en los restos forestales combustibles; aplicación a masas arboladas en Galicia. Tesis Doctoral. Departamento de Silvopascicultura. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España. 440 p.
- Sepúlveda B., J. L., R. Meza, W. R. Zuñiga C., G. Solis G., M. Olguín E. 2001. SIG para determinar riesgo de incendios forestales en el noroeste de México. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Centro de Investigación Regional del Noreste. Campo Experimental Costa de Ensenada. Publicación Técnica No. 1. 37 p.
- Veach, M. S., P. D. Coddington and G. C. Fox. 1994. BURN: A simulation of forest fire propagation. In: Project Report for the Northeast Parallel Architectures Center. Research Experiences for Undergraduates (NPAC-REU) Program. Universidad de Syracuse. New York, NY. USA. 8 p.
- Verbesselt, J., S. Fleck and P. Coppin. 2002. Estimation of fuel moisture content towards Fire Risk Assessment: A review. *Forest Fire Research and Wildlife Fire Safety*, Universidad Católica de Lovaina en Bélgica. Viegas. Millpress, Rotherdam, Holanda. 11 p.
- Villers R., M. de L y J. C. Wong G. 2007. Evaluación de combustibles y su disponibilidad en Incendios Forestales: un estudio en el Parque Nacional La Malinche. *Investigaciones Geográficas*, Boletín del Instituto de Geografía UNAM. 62: 87-103.
- Weise, D. R. 2007. Determination of equilibrium moisture content for several fine fuels in Hawaii. Forest Service, Pacific Southwest Research Station. Riverside California, Utah. EUA. 144 p.
- Xianlin, Q. Z. L., Y. Pang, J. L. Casanova and A. Calle. 2007. Method on live fuel moisture content estimation using AATSR Data. Versión digital. Simposio Dragon 2007. http://earth.esa.int/dragon/symp2007/participants/285/pres_285_xianlinqin.pdf. (septiembre de 2009).



Javier Nava Vega (2007). San Nicolas Totolapan, Delegación Magdalena Contreras, D.F.