

MODELOS QUE RELACIONAN LAS CARACTERÍSTICAS BIOFÍSICAS DEL TERRENO CON LA PRESENCIA DE COMBUSTIBLES FORESTALES EN LAS MONTAÑAS CENTRALES DE MÉXICO

Sofía Villers Gómez¹ Lourdes Villers Ruíz² y Jorge López Blanco³

¹Instituto de Investigaciones en Matemáticas Aplicadas y Sistemas. ²Centro de Ciencias de la Atmósfera.

³Instituto de Geografía

Universidad Nacional Autónoma de México

villers@unam.mx

RESUMEN

Investigaciones sobre la conducta del fuego valoran dentro de sus modelos las características que presentan los combustibles muertos, sin embargo, la determinación de la distribución espacial y acumulación de estos combustibles no es fácil de modelar. Este trabajo plantea la utilización métodos de regresión lineal para determinar cual o cuales de de las características biológicas y físicas del relieve en zonas de alta montaña del centro de México, tienen mayor influencia en la presencia de los combustibles forestales, y según su importancia se logró establecer una formalización matemática que la describe.

Palabras clave: Peligro de incendios, Regresión lineal, Parques Nacionales, Modelos para combustibles.

ABSTRACT

Researchers of fire behavior consider in their models different characteristics of dead fuels, however because the spatial distribution and accumulations of this fuels are related to many environmental variables, their modelling is difficult. This work present an application

Fecha de recepción: junio 2010.

Fecha de aceptación: abril 2012.

of linear regression methods to determine which biological and physical characteristics of high mountain zones in central Mexico have more influence on the fuels presence, and with this selection built a mathematical model that describe their behavior.

Key words: Fire hazard, Linear regression, National parks, Fuels models.

1. INTRODUCCIÓN

El fuego, como un proceso de disturbio para las áreas forestales del mundo, es tan viejo como la presencia misma de la vegetación (Agee, 1993). Los incendios forestales son parte de un proceso continuo y como lo muestran los estudios actuales, posiblemente su presencia y sus efectos en diversas regiones del mundo se intensificarán (Brown, 2000, Flannigan *et al.*, 2000). En México el 90% de los incendios son de tipo superficial (Cedeño, 1999).

En el centro del país, en una franja que se extiende a lo largo de 1,200 km, desde el Océano Pacífico hasta el Golfo de México, en la latitud cercana a los 19°N se encuentra la provincia geológica denominada Cinturón Volcánico Transmexicano o Eje Neovolcánico, en donde se localizan las mayores elevaciones volcánicas del País (Gómez-Tuena *et al.*, 2005). Ellas están entre los 2,500 msnm a más de 5,000 msnm, y en su mayoría han sido decretadas dentro de la categoría de Parques Nacionales, todas ellas comparten los mismos pisos bioclimáticos que corresponden a bosques templados de pinos y encinos. Anualmente estas Áreas Naturales Protegidas (ANP) reportan cientos de hectáreas incendiadas (CONAFOR, 2010).

El enfoque de este trabajo se inserta dentro del tema de la evaluación de peligros a incendios forestales en las áreas montañas del Centro de México. La evaluación de las características biofísicas del terreno relacionado con la acumulación de los combustibles vegetales muertos, sirven para modelar determinadas situaciones en cuanto a la propagación o la severidad del incendio, pudiendo evaluar la conducta y el daño potencial de estos siniestros. Estableciendo estas características se podrán delimitar las áreas con alto nivel de peligrosidad y planear acciones de combate y control más focalizadas.

Es evidente que dentro de las variables importantes para entender el comportamiento del fuego están también las atmosféricas y las de las actividades humanas. Sin embargo la adecuada caracterización de los combustibles, y la determinación de su distribución espacial, son de gran importancia para realizar la simulación del comportamiento del fuego.

Autores como Brown y Bevins (1986), han señalado que, en general, la distribución espacial de los combustibles forestales sigue un patrón preferentemente discontinuo por lo que la determinación de la distribución espacial de los combustibles forestales sigue siendo uno de los retos más difíciles a los que se han enfrentado los científicos relacionados con los incendios forestales (Flores y Omi, 2003).

El incendio potencial resultante, depende, en parte, de la cantidad del material combustible presente sobre el suelo. Actualmente se utilizan los modelos de combustibles descritos por Rothemel (1972), cuyas ideas principales han sido retomadas por Scott y Burgan (2005) para crear nuevos modelos.

Dentro de la modelación del comportamiento del fuego también se han considerado otras importantes propiedades de los combustibles, como su humedad o su compactación sobre el

terreno. Para poder ser usada la presencia de combustibles muertos como variable importante en la evaluación del comportamiento potencial del fuego, se deben considerar dichas características y su relación particular con ciertas propiedades biofísicas del terreno.

El objetivo de este trabajo es, determinar cuáles son los parámetros del relieve y los biológicos estructurales de la vegetación que tienen mayor influencia en la acumulación y distribución de los combustibles vegetales muertos, sobre el suelo, a través de la aplicación de modelos lineales, en un Parque Nacional dentro de una estructura volcánica cuaternaria del Centro de México.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

El Parque Nacional Malinche se encuentra a 130 km al este de la ciudad de México (Figura 1) y forma parte de la cadena montañosa denominada Cinturón Volcánico Transmexicano o Eje Neovolcánico (INEGI, 1981). Presenta una forma cónica con una superficie total de 46,095 ha. Los suelos son derivados de cenizas volcánicas de andesita de hornblenda, que presentan un proceso de andosolización (Castro y Siebe, 2007). Esta zona tiene un tipo de clima templado subhúmedo (García, 1973).

En esta área se establecieron sitios permanentes de muestreo dentro de la zona boscosa que se encuentra por encima de los 2,800 msnm y por debajo de la línea de bosque que se encuentra a los 4,000 msnm en donde se inventariaron los materiales combustibles y se evaluaron sus características físico-biológicas.

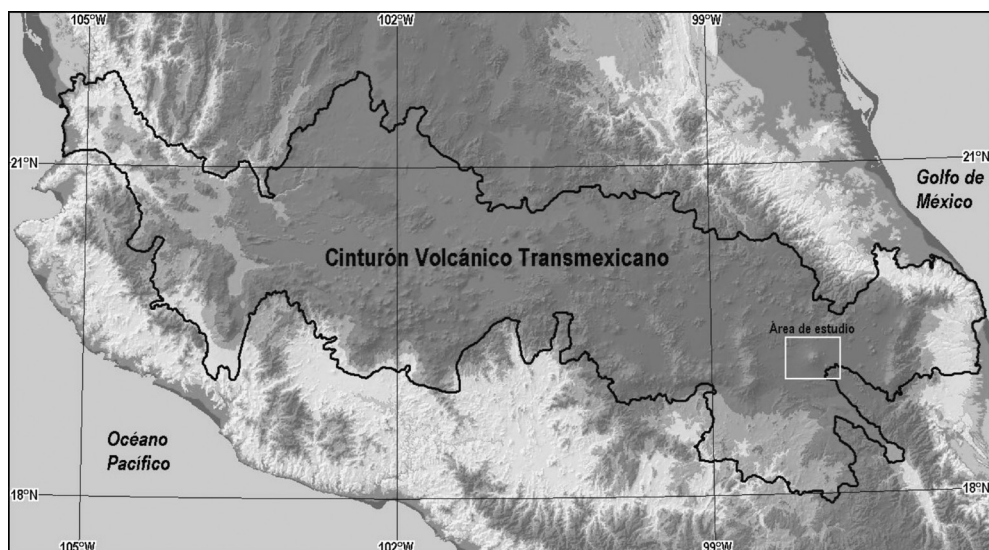


Figura 1
LOCALIZACIÓN DEL PARQUE NACIONAL MALINCHE, CENTRO DE MÉXICO

Las principales comunidades vegetales que se reconocieron, para este estudio, son aquellas cuyo representante principal es dominado *Pinus montezumae* definido aquí simplemente como bosque de pino y se desarrolla desde los 2,800 hasta los 3,550 msnm. El bosque de *Abies religiosa*, denominado oyamel, o su combinación con *Pinus montezumae*, denominado en este caso como oyamel-pino. Esta comunidad se desarrolla entre los 2,900 y 3,700 m. La asociación vegetal de *Alnus jorullensis* (aile) con *Pinus montezumae*, señalado en este estudio como las combinaciones de aile-pino o pino-aile, dependiendo del grado de importancia de uno u otro género, se localiza entre los 3,150 y los 3,700 m de altitud.

El bosque mono específico de *Pinus hartwegii*, denominado genéricamente como pino de las alturas (*Pino h*), se distribuye en el volcán por encima de los 3,400 m y hasta los 3,900 m de altitud. La comunidad vegetal de *Pinus pseudostrobus*, con la nomenclatura de *Pino2*, se presenta junto con *P. teocote* y *P. patula* se distribuye en altitudes entre los 2,600 y los 2,900 msnm.

Los sitios de muestreo fueron asignados de acuerdo a un estudio previo realizado por Peña del Valle (2003), con las siguientes consideraciones: 1) Proporción existente entre la extensión ocupada por cada comunidad vegetal con respecto al área total del parque, 2) Distribución de las comunidades vegetales dentro del parque, 3) Niveles altitudinales y características topográficas, 4) Estado de conservación de la vegetación.

Cada muestreo por sitio cubrió una superficie total de una hectárea, es decir, la suma de área de diez círculos individuales con una extensión de 0.1 ha cada uno y con una distancia de 50 m entre cada uno de los centros de los círculos. Tomando como base el punto central de cada círculo, se establecieron tres transectos de 25 m, cuya dirección azimutal del primero se determinó al azar y la dirección de los dos restantes se obtuvo sumando 120° y 240°, respectivamente, con respecto al azimut del primero (McRae, *et al.*, 1979, Schmid-Haas, *et al.*, 1993).

Para la colecta y cuantificación de los combustibles en campo, se usó la técnica de intersecciones lineales sobre los transectos, siguiendo las directrices establecidas por Brown (1974) y McRae *et al.* (1979). Se contó sólo el material leñoso que estuviera sobre la línea marcada por el transecto y se agrupó en cuatro categorías, dependiendo del diámetro del leño (según Brown y Davis, 1973 en Rodríguez, *et al.*, 2002).

Con una regla graduada se midió la profundidad de la capa de la hojarasca cada cinco metros, y a lo largo de cada transecto. Para medir el peso de la hojarasca se marcó un área de 400 cm² en el extremo de cada línea de transecto y se recogió todo el material vegetal que estuviese en esa área, en el laboratorio se tamizó, secó y pesó (McRae, *et al.*, 1979)

Se establecieron en total quince sitios (Figura 2), con diez círculos cada uno. Las mediciones de combustibles se hicieron siguiendo el procedimiento mencionado, se generaron para el peso de la hojarasca tres datos por círculo, ya que se tomó una muestra en el extremo de cada transecto y para la profundidad de la hojarasca, quince datos por círculo, que se midió a cada cinco metros.

Para caracterizar la vegetación natural se usó la composición o el índice de dominancia de árboles adultos. En cada círculo de sitio de muestreo se determinaron las especies arbóreas y se tomaron los datos de diámetro y altura, para cada árbol con diámetro a la altura de pecho (DAP) mayor de 10 cm, así como de manera separada se tomaron los mismos datos para los árboles con diámetros menores a 10 cm.

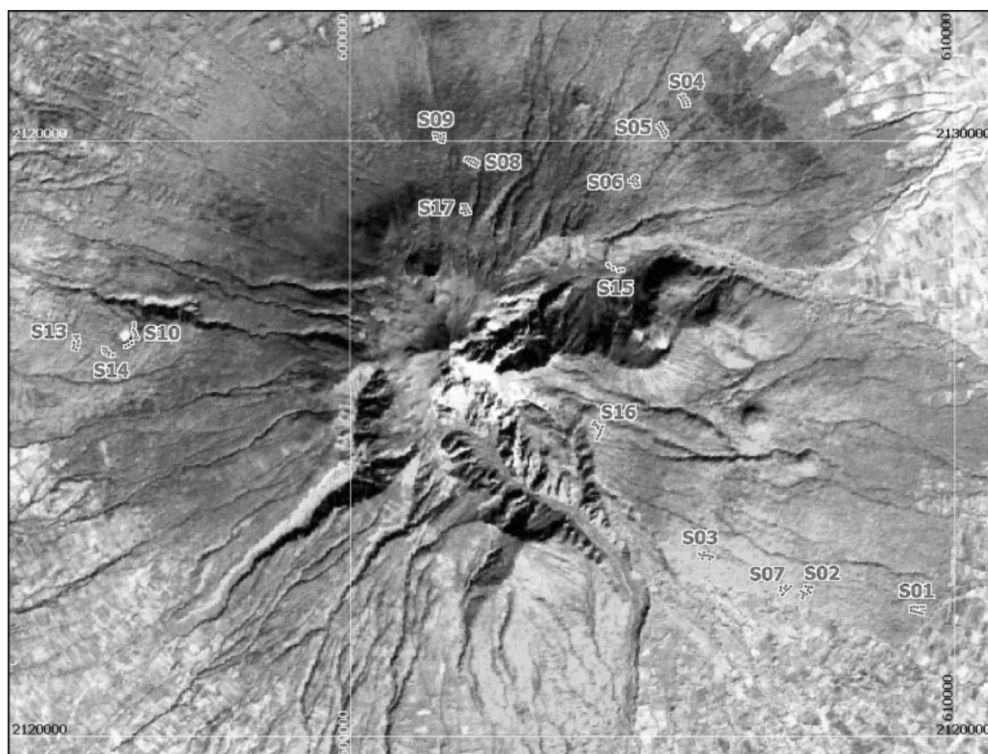


Figura 2

PARQUE NACIONAL MALINCHE. LOCALIZACIÓN DE SITIOS Y CÍRCULOS DEL MUESTREO DE LAS VARIABLES BIOFÍSICAS

La información sobre los parámetros físicos por círculo incluyó: altitud, pendiente, orientación de ladera, forma longitudinal del perfil de la ladera, forma transversal del perfil de la ladera; microtopografía del terreno y la distribución en el círculo de los combustibles sobre el suelo. Las observaciones sobre la actividad humana que se hicieron en los círculos fueron, la presencia de: caminos, brechas cortafuego, indicios de corta parcial o total de árboles, y vestigios de incendios. A partir de esta información se definieron dos tipos de variables las biofísicas y las de combustibles.

2.2. Determinación de variables por analizar

Para ajustar un modelo a través de regresión lineal se consideraron como variables independientes a las características biofísicas del terreno y como variables dependientes las mediciones relacionadas con los combustibles. El *círculo* (0.1 ha) fue la unidad de muestreo. Con la finalidad de cubrir el área de 1 ha muestreada en cada sitio se hizo una conformación grupal de 10 círculos. Tanto el sitio como el círculo se consideraron como elementos de localización e identificación del resto de las variables registradas.

A) *variables biofísicas*

Los parámetros biofísicos que se midieron en cada círculo fueron los siguientes

1. Depresiones (dos categorías, presente o ausente). Se hizo una evaluación visual se determinó la presencia o ausencia de depresiones en el terreno.
2. Cauces (dos categorías, presente o ausente). Se hizo una evaluación visual y se determinó la presencia o ausencia de cauces en el terreno.
3. Altitud (cinco categorías). Esta variable se obtuvo, con un altímetro estándar, al registrar la altitud en el centro del círculo.
4. Pendiente de la ladera (cinco categorías). Se midió el valor de la pendiente, en grados, dentro del ámbito de influencia de cada círculo. Siempre se midió en el sentido dominante de la ladera y observando desde la parte más alta hacia la más baja, razón por la cual los datos son negativos.
5. Índice de dominancia de árboles adultos (cuatro categorías). Se hizo el levantamiento de los datos contando y midiendo todos los árboles dentro del círculo. Se consideraron como árboles adultos a aquellos con diámetro a la altura de pecho (DAP) mayor a 10 cm. A partir de este dato se calculó este índice para cada círculo, el cual mide la proporción de árboles adultos respecto al total de árboles en el círculo.
6. Composición de la vegetación (siete categorías). Se consideraron todos los árboles presentes en los círculos de un sitio, y se utilizó el índice de valor de importancia (IVI) de un cierto género como el determinante de la composición vegetal. El IVI fue calculado para cada sitio y se construyó siguiendo la definición de Kent y Coker, (1992) como: Índice de valor de importancia = Densidad relativa + Dominancia relativa + Frecuencia Relativa.
7. Orientación de la ladera (ocho categorías). A partir de la determinación de la dirección dominante de la ladera y observando desde la parte más alta del círculo, se midió su orientación azimutal con graduaciones a cada grado. Esta variable se agrupó en las ocho categorías de orientación más usadas (N, S, E, W, NE, SE, SW y NW).
8. Forma del perfil Longitudinal de la ladera (tres categorías). A través de la evaluación visual del círculo se determinó la forma del perfil topográfico, las opciones fueron: plano, cóncavo y convexo.
9. Forma del perfil Transversal de la ladera (tres categorías). A través de la evaluación visual del círculo se determinó la forma del perfil topográfico, las opciones fueron: plano, cóncavo y convexo.
10. Microtopografía de la ladera (tres categorías). Haciendo una evaluación visual se caracterizó la microtopografía de cada círculo como: regular, irregular y con depresiones aisladas.
11. Distribución del combustible (tres categorías). Con una evaluación mediante estimación visual de la repartición de los combustibles dentro del círculo, se seleccionó para cada círculo una de las tres opciones: Regular, irregular o con manchones dispersos.

12. Perturbación (tres categorías). A través de las observaciones adicionales, se construyó esta variable relacionada con el impacto humano ya que se señala la presencia o ausencia de brechas cortafuegos, caminos, evidencias de fogatas, basura, y tala parcial o total de árboles.

Todas las variables independientes son categóricas por lo que para ajustar un modelo que dependa de estas variables, es necesario reestructurarlas de manera que éstas sean solamente del tipo dicotómicas, esta es una forma para poder ajustar una regresión lineal cuando se tienen variables categóricas o que no sean continuas.

El proceso para realizar esta transformación es el siguiente: se toma una variable con k categorías y de esta se generan k nuevas variables dicotómicas, de las cuales se seleccionará una como la variable nula y no se considera como variable en virtud de que es suficiente con $k-1$ variables para caracterizar las k clases, si la observación en esta variable toma el valor de la categoría m , entonces para esa observación la m -ésima nueva variable tomará el valor uno y el resto de las variables tomará el valor de cero.

A partir de lo anterior, se ejemplifica el caso de la variable pendiente de la ladera, teniendo las siguientes categorías: -75° a -26° , -26° a -17° , -17° a -11° -11° a -7° y -7° a 0° , éstas se reestructuran generando solamente cuatro variables correspondientes a las primeras cuatro categorías PEND1, PEND2, PEND3 y PEND4, la última clase que va de -7° a 0° fue la seleccionada como la variable nula, la cual se denota con PEND0, pero como se mencionó no será una variable considerada, por lo que no se le asigna ningún valor.

Por ejemplo para una observación cuya pendiente de la ladera tomara el valor de -26° a -17° , se tendría que $PEND1=0$, $PEND2=1$, $PEND3=0$ y $PEND4=0$ y para una observación cuya pendiente está en el intervalo -11° a -7° se representará como $PEND1=0$, $PEND2=0$, $PEND3=0$ y $PEND4=1$. Si el dato observado fuera una pendiente en el intervalo -7° a 0° , entonces se representaría con las variables de la siguiente forma $PEND1=0$, $PEND2=0$, $PEND3=0$ y $PEND4=0$.

Aplicando lo anterior a todas las posibilidades de las variables biofísicas tomadas en cuenta en el estudio se obtuvieron nuevas variables que son las que se utilizaron en este trabajo para ajustar los modelos de los materiales combustibles. En la Tabla 1 se presenta una relación de las variables utilizadas con las correspondientes categorías de las que fueron derivadas, así como la especificación de las categorías que fueron consideradas como nulas.

B) variables de los combustibles muertos

Las variables relacionadas con las características de los combustibles muertos fueron: 1. Peso de los combustibles, 2. Profundidad del mantillo y 3. Cantidad de material leñoso por clase diamétrica, siguiendo la clasificación de Brown (1974).

1. Peso del mantillo. Al final de la línea del transecto se colocó un cuadrado de 20 x 20 cm, con el cual se colectó todo el material que estuviese dentro, éste fue tamizado, secado y pesado. Se obtuvieron tres datos por círculo.
2. Profundidad del mantillo. Sobre cada una de las tres líneas azimutales trazadas en cada círculo se hicieron cinco mediciones de la profundidad del mantillo (partiendo desde el centro, a cada cinco metros). Con lo cual se tuvieron cinco medidas por línea, y un total de quince datos de profundidad del mantillo por círculo.

Tabla 1
DESCRIPCIÓN DE LAS VARIABLES INDEPENDIENTES UTILIZADAS PARA EL AJUSTE DE LOS MODELOS

Variable	Categoría de:	Variable	Categoría de:
	Presencia de depresiones		Orientación
DEPRES0	SI	ORIENT0	Norte
DEPRES	NO	ORIENT1	NE
	Presencia de cauces	ORIENT2	Este
CAUCE0	SI	ORIENT3	SE
CAUCE	NO	ORIENT4	Sur
	Altitud	ORIENT5	SW
ALT1	2820-3030 msnm	ORIENT6	Oeste
ALT2	3030-3100 msnm	ORIENT7	NW
ALT3	3100-3220 msnm		Perfil longitudinal de la ladera
ALT4	3220-3428 msnm	PERFLONG0	plano
ALT10	3428-3850 msnm	PERFLONG1	concavo
	Pendiente	PERFLONG2	convexo
PEND1	-75° a -26°		Perfil transversal de la ladera
PEND2	-26° a -17°	PERTRANS0	plano
PEND3	-17° a -11°	PERTRANS1	concavo
PEND4	-11° a -7°	PERTRANS2	convexo
PEND0	-7° a -3°		Microtopografía de la ladera
	Índice de dominancia de árboles adultos	MICROTOPO0	regular
INDICE1	0 a 0.25	MICROTOPO1	depresiones
INDICE2	0.25 a 0.5	MICROTOPO2	irregular
INDICE3	0.5 a 0.75		Distribución del material combustible
INDICE0	0.75 a 1	DISTCOMB0	regular
	Composición de la vegetación	DISTCOMB1	irregular
VEG1	aile-pino	DISTCOMB2	manchones dispersos
VEG2	oyamel		Perturbación
VEG3	oyamel-pino	PERTURBA1	No perturbado
VEG4	pino	PERTURBA2	Medianamente perturbado
VEG5	pino-aile	PERTURBA0	Perturbado
VEG6	pino-aile-pino2		
VEG0	pino h		

3. Cantidad de material leñoso. Todo el material leñoso que se encontró en el trayecto de las tres líneas (transectos) fue seleccionado y medido, agrupándose en cuatro categorías de acuerdo con su diámetro (0 a 0.6 cm, >0.6 a 2.5 cm, >2.5 a 7.5 cm, y mayor a 7.5 cm). Para el estudio de esta variable lo que se hizo fue generar cuatro intervalos de diámetros y se midió la frecuencia de todo el material leñoso que coincidiera con cualquiera de esos intervalos.

2.3. Modelos de regresión lineal

Para determinar una relación entre las variables biofísicas y las de combustibles se hizo uso de modelos lineales generalizados (Dobson, 1990), esto es, a partir de los datos se busca

una ecuación en donde las características biofísicas sean las variables independientes o explicativas y los combustibles vegetales sean las variables dependientes.

El proceso de buscar una ecuación puede ser complejo dependiendo de las características de las variables que se utilicen. En este caso las variables utilizadas están relacionadas con ciertas propiedades ambientales, lo cual les da la característica de ser aleatorias, con la limitación de que no se conoce su distribución. Para aplicar los modelos de regresión lineal es necesario suponer una distribución para las variables dependientes, las que se quieren explicar, es decir las de combustibles.

Por la naturaleza de las variables se asumió que el peso y la profundidad de la hojarasca provenían de una distribución normal y la cantidad de material leñoso de una distribución Poisson, ya que lo que mide es el número de leños que se encontraron en cada una de las categorías y la distribución más común utilizable para conteos es la que se conoce como Poisson.

En el procedimiento de la obtención del modelo, se utilizó el método *stepwise*, el cual partiendo de un modelo inicial (para las variables de peso y profundidad de la hojarasca fue $y=x'\beta+\varepsilon$), a través de iteraciones agregan o eliminan variables, dando como resultado el modelo con mejor ajuste.

Con este método es posible también generar interacciones entre las variables, es decir medir el efecto en la variable dependiente por la ocurrencia de más de dos variables independientes simultáneamente, a las cuales se les aplica el mismo procedimiento de iteración para determinar cuales de las interacciones afectan significativamente. Para este trabajo se consideraron interacciones de primer nivel, es decir entre solamente dos variables, no fue posible realizar más porque el número de parámetros a estimar resultaba mayor al número de observaciones colectadas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cuando se tiene un conjunto de datos que son muestra de una variable aleatoria en estudio, es de interés conocer de manera general su comportamiento, es decir, saber cuáles son los valores más frecuentes, cuál es el intervalo en el que están los valores de la variable y si tiene alguna distribución conocida, por lo que se hizo un análisis exploratorio de los datos y se obtuvieron los siguientes datos generales:

3.1. Caracterización biofísica de los sitios muestreados

Los datos muestran que en 82% de los círculos no hay presencia de depresiones y que en el 93% de los casos no hay presencia de cauces. Para las variables de altitud y pendiente los datos se distribuyen en forma uniforme en las diferentes categorías ya que de esa forma se construyeron las variables.

De la información colectada de los sitios, se muestra que en el 55% de los círculos la composición de la vegetación es de pino o pino-aile, para el caso del índice de dominancia de árboles adultos, el 40% de los círculos tiene de 75% a 100% de árboles adultos. Además no se registró ningún círculo que tuviera una orientación norte de la ladera, asimismo del total de círculos muestreados las orientaciones noreste, este, sureste, sur, suroeste, oeste y noroeste se presentan igual número de veces.

Para los perfiles de la ladera se tiene que el 85% de los círculos presentan perfil longitudinal de la ladera plano; mientras que el 69% tiene perfil transversal plano. Se observa que la microtopografía de la ladera, es irregular en el 56% de los casos y regular en el 36%, y para la variable de la distribución de los combustibles los datos muestran que es regular en un 82% de los casos.

Como en la selección de los sitios de muestreo se buscó que fueran lugares con poca perturbación humana, esta situación se refleja en las estadísticas de la variable de perturbación, en donde se observa que el 88% de los círculos son no perturbados o medianamente perturbados.

Por lo anterior fue posible suponer que los círculos presentan cierto nivel de homogeneidad en los parámetros biofísicos ya que para las variables de presencia de depresiones y de cauces, perfil longitudinal de la ladera, distribución de los combustibles y perturbación del terreno, la mayoría de los círculos muestran semejanza. Para las variables de orientación de la ladera, altitud y pendiente, hay igual número de círculos en cada una de las categorías, esto permite decir que las variables biofísicas son *bien portadas*, es decir no presentan mucha variación en cuanto a los valores que puedan tomar.

3.2. Caracterización de los combustibles muertos

Con base en la información obtenida, se puede decir que el peso seco del mantillo toma valores de 0 a 439.4 gramos (g), y el valor promedio es de 70 g, en una superficie colectada de 400 cm². Para los sitios con la misma composición vegetal, los valores promedio del peso del mantillo resultaron similares. La profundidad del mantillo tiene valores en el intervalo 0 a 32 cm, su valor promedio es de 4.4 cm. La cantidad de material leñoso de cada una de las categorías varía significativamente de sitio a sitio y más de la mitad del material está clasificado en las categorías con diámetros más pequeños (de 0 a 0.6 cm y de >0.6 a 2.5 cm), como se aprecia en la Figura 3.

Se observó que para las variables de peso y la profundidad del mantillo, el intervalo en donde toman valores los datos es muy amplio lo cual indica una gran variación en las observaciones, de hecho las mediciones para estas variables presentan diferencias grandes aún en el mismo círculo.

3.3. Establecimiento de relaciones entre variables

El método utilizado para obtener el modelo de regresión es el denominado *stepwise* el cual mediante un proceso iterativo en el que se eliminan o incluyen variables explicativas y combinaciones entre ellas, identifica aquellos factores que mejor explican la variación observada en la variable dependiente. Adicionalmente, éste método considera que la ecuación debe estar formada por el menor número de elementos. Por lo que el modelo final está conformado por la menor cantidad de variables cuya combinación es la que mejor explica los datos observados.

En el caso de profundidad del mantillo, se observó que el modelo propuesto no cumplía con uno de los supuestos necesarios para la aplicación de regresión lineal, que es el de variación constante de los errores. Para corregir lo anterior, se aplicó una transformación a

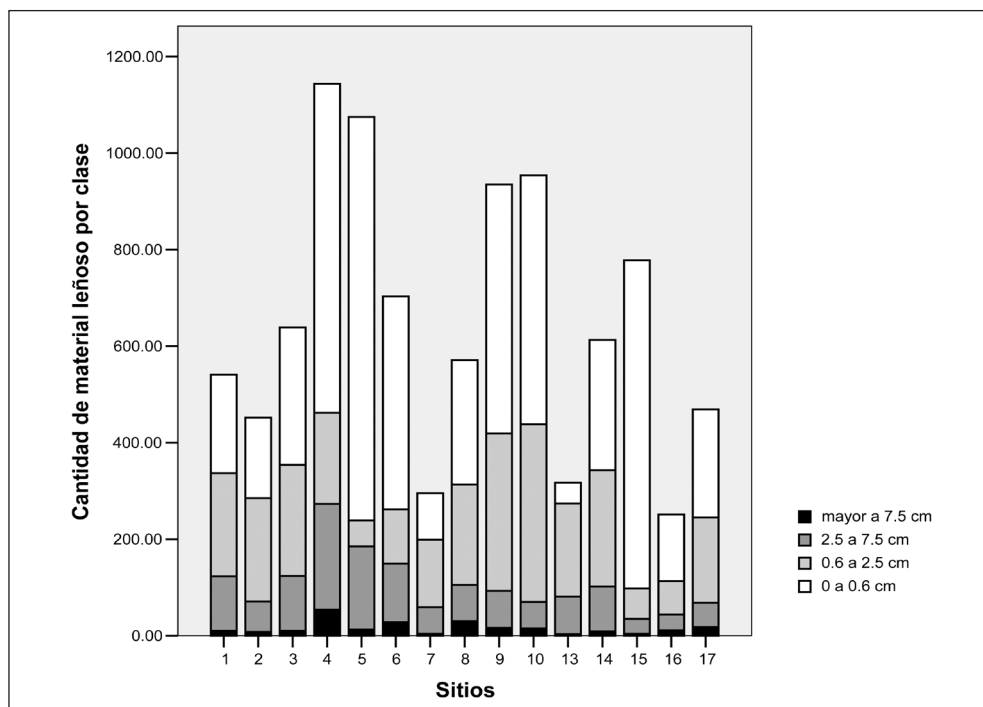


Figura 3

CANTIDAD DE MATERIAL LEÑOSO AGRUPADO EN CUATRO CLASES DIAMÉTRICAS PARA CADA UNO DE LOS SITIOS DE MUESTREO DEL PARQUE NACIONAL MALINCHE

la variable dependiente y con ella plantear un nuevo modelo el cual sí cumplió con todos los supuestos.

Como resultado del procedimiento antes mencionado se obtuvo una tabla con las variables consideradas en el modelo final y para cada una de ellas el valor estimado del parámetro y su correspondiente nivel de significancia. Con base en estos datos, se eliminaron del modelo las variables cuya estimación del parámetro fuera cero, o su nivel de significancia fuese mayor a 0.05. A partir de esta selección se estableció el algoritmo para predecir los datos de combustibles que mejor ajuste tuvieran con los datos biofísicos utilizados y con el mejor nivel de explicación posible.

3.4. Modelo para el peso del mantillo

El modelo para el peso de los combustibles, mantillo en este caso, está dado por la siguiente ecuación:

$$\log y = x'\beta + \epsilon$$

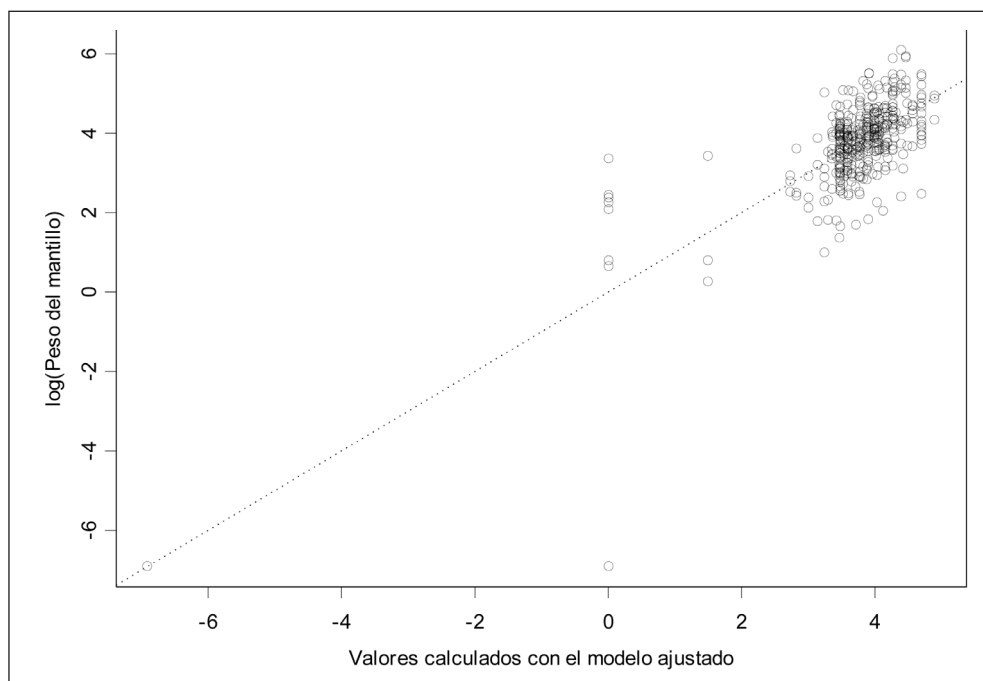


Figura 4

LOGARITMO APLICADO AL PESO DEL MANTILLO CONTRA LOS VALORES OBTENIDOS POR EL MODELO AJUSTADO A ESTA MISMA VARIABLE.

Las variables independientes en este modelo denotadas por el vector x se mencionan en la Tabla 2. En la Figura 4 se observa la gráfica de los valores reales obtenidos del muestreo, contra los valores obtenidos con el modelo propuesto, lo cual nos permite apreciar el ajuste del modelo. Las posiciones de los puntos medidos se encuentran cercanas a la recta de ajuste, con lo cual se concluye que el modelo es aceptable.

La exactitud del modelo propuesto y la proporción de la variación del peso del mantillo, explicada por las variables incluidas en el modelo, está reflejada por R^2 (coeficiente de determinación corregido) que en este caso tiene un valor de 57.6%, lo cual sugiere la existencia de otras variables o interacciones entre las variables, no consideradas en el estudio, que podrían ayudar a explicar de mejor manera la variabilidad del peso del mantillo.

Parte de la variabilidad del peso del mantillo se explica por la segunda categoría del índice de dominancia de árboles adultos (INDICE2) cuyo valor es 0.22, lo cual da evidencias de que el hecho de que en el círculo tenga un porcentaje de árboles adultos entre 25% y 50% contribuirá de manera positiva en la cantidad de mantillo que se acumule en el suelo. Existe una relación entre la proporción de árboles adultos y la cantidad de material que se desprenderá de éste, depositándose en el suelo, esto justifica la relación mencionada.

Por el modelo obtenido es posible decir que, un porcentaje de la variación de las observaciones de peso del mantillo se explica con la presencia de la forma cóncava del perfil trans-

Tabla 2
VARIABLES Y PARÁMETROS ESTIMADOS DEL MODELO PARA PESO DEL MANTILLO

Variabes	Valor del parámetro	Error Estándar	Valor t	Pr(> t)
Intersección	5.34	0.19	27.63	0.0000000
CAUCE	-1.57	0.16	-10.01	0.0000000
CAUCE PERFLONG1	-0.37	0.18	-2.13	0.0335000
CAUCE PERFLONG2	0.51	0.17	2.93	0.0036000
CAUCE PERFTRANS1	1.70	0.20	8.44	0.0000000
CAUCE PERFTRANS2	-3.11	0.27	-11.55	0.0000000
INDICE2	0.22	0.10	2.27	0.0238000
ORIENT1 PERFTRANS1	-2.58	0.61	-4.21	0.0000000
ORIENT1 PERFTRANS2	2.43	0.41	5.94	0.0000000
ORIENT2	3.45	0.99	3.49	0.0005000
ORIENT3	2.55	0.26	9.98	0.0000000
ORIENT3 PERFTRANS1	2.82	0.28	10.02	0.0000000
ORIENT4 PERFTRANS1	-2.43	0.50	-4.89	0.0000000
ORIENT4 PERFTRANS2	2.39	0.31	7.83	0.0000000
ORIENT5	-1.21	0.32	-3.72	0.0002000
ORIENT5 PERFTRANS1	-0.93	0.32	-2.93	0.0035000
ORIENT6	-1.06	0.26	-4.13	0.0000000
ORIENT6 PERFTRANS1	-1.36	0.32	-4.31	0.0000000
PERFLONG2	-0.36	0.18	-1.99	0.0474000

versal de la ladera (PERFTRANS1) presentando valores distintos según la orientación que tenga la propia ladera (ORIENT1 PERFTRANS1=-2.58, ORIENT3 PERFTRANS1=2.82, ORIENT4 PERFTRANS1=-2.43, ORIENT5 PERFTRANS1=-0.93, ORIENT6 PERFTRANS1=-1.36). La interacción entre estas dos características topográficas del terreno afecta el valor medio del peso del mantillo, de manera positiva o negativa.

Por último, la forma geométrica cóncava ó convexa del perfil longitudinal o transversal de la ladera toma relevancia en la estimación del peso del mantillo, en ausencia de cauces. Ambas variables favorecerán o no a la acumulación del mantillo en esas áreas, dependiendo de las categorías que tomen dichas variables (variables CAUCE PERFLONG1 o CAUCE PERFLONG2; CAUCE PERFTRANS1 o CAUCE PERFTRANS2, en Tabla 2).

Por el modelo obtenido es posible decir que un porcentaje de la variabilidad del peso del mantillo se explica por un porcentaje de árboles adultos entre 25 y 50%, por un perfil transversal cóncavo de la ladera para distintas orientaciones y un perfil longitudinal con ausencia de cauces que afecta de manera positiva o negativa, dependiendo de las categorías cóncava ó convexa.

3.5. El modelo para la profundidad del mantillo

Para la variable de profundidad del mantillo el modelo está dado por:

$$y^2 = x' \beta + \epsilon.$$

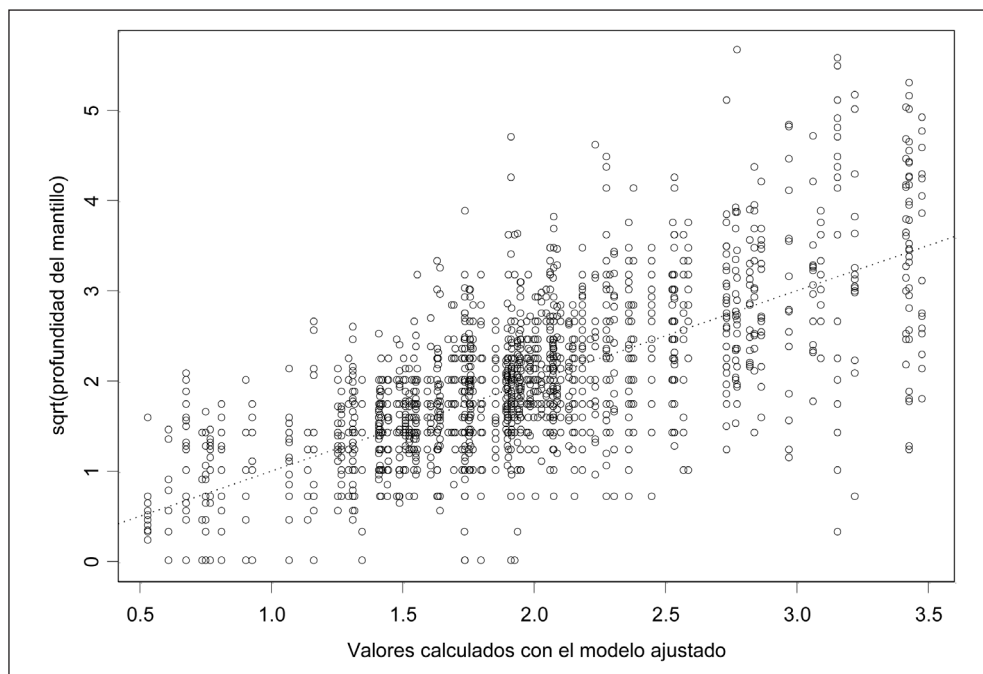


Figura 5

RAÍZ CUADRADA DE LA PROFUNDIDAD DEL MANTILLO CONTRA LOS VALORES OBTENIDOS POR EL MODELO AJUSTADO PARA ESA MISMA VARIABLE

En donde y representa la profundidad del mantillo y tiene una distribución normal. Las variables independientes en este modelo, denotadas por x y sus respectivos parámetros β son los presentados en la Tabla 3. Para verificar el ajuste del modelo a los datos se realizó la gráfica de la Figura 5 que muestra los valores calculados con el modelo ajustado contra la raíz cuadrada de los valores de profundidad del mantillo obtenidos del muestreo. El ajuste lineal propuesto es correcto para los datos medidos, por lo tanto es un modelo aceptable.

La exactitud del modelo propuesto que está reflejada por R^2 (coeficiente de determinación corregido) en este caso tiene un valor de 47.3%, lo cual sugiere la existencia de otras variables o interacciones entre las variables que no fueron consideradas en el estudio, que podrían explicar la otra parte de la variabilidad de la profundidad del mantillo.

Con base en el modelo puede decirse que la variable de profundidad de la hojarasca depende del tipo vegetación, principalmente en las asociaciones aile-pino o pino aile (VEG1 y VEG5) o bien bosques puros de Oyamel (VEG2), o mezclados con pino (VEG3), como se muestra en la Tabla 3.

El perfil transversal de la ladera, tanto cóncavo como convexo, representado en los resultados por las variables PERTRANS1 con valor 0.29 y PERTRANS2 = -0.13, ayudará a que el material se concentre o disperse según la forma geométrica del perfil del círculo, el mismo caso es para la variable de microtopografía (MICROTOPO1) el hecho de que el terreno tenga depresiones afectará en 0.3 la profundidad la hojarasca estimada.

Tabla 3
VARIABLES Y PARÁMETROS ESTIMADOS DEL MODELO PARA PROFUNDIDAD DEL MANTILLO

VARIABLES	Valor del parámetro	Error Estándar	Valor t	Pr(> t)
Intersección	1.59	0.81	1.96	0.0498000
ALTI3 ORIENT1	1.39	0.56	2.46	0.0138000
ALTI3 ORIENT3	1.78	0.53	3.34	0.0008000
ALTI3 ORIENT4	-1.87	0.38	-4.94	0.0000000
ALTI3 ORIENT5	-1.32	0.29	-4.60	0.0000000
ALTI4	-0.91	0.15	-5.97	0.0000000
CAUCE	0.65	0.18	3.67	0.0002000
CAUCE DISTCOMB1	0.57	0.17	3.44	0.0006000
CAUCE INDICE2	-0.30	0.08	-3.58	0.0004000
CAUCE PERTURBA1	-0.27	0.10	-2.69	0.0073000
DEPRES PEND3	0.72	0.24	3.01	0.0027000
DEPRES VEG4	-0.86	0.23	-3.74	0.0002000
DISTCOMB1	-0.42	0.17	-2.40	0.0167000
DISTCOMB1 PERTURBA1	0.22	0.09	2.30	0.0213000
DISTCOMB1 PERTURBA2	-0.27	0.09	-3.07	0.0022000
INDICE2	0.64	0.28	2.25	0.0244000
INDICE2 ORIENT3	0.71	0.26	2.68	0.0074000
INDICE2 ORIENT5	-1.12	0.21	-5.33	0.0000000
INDICE3 ORIENT3	-0.85	0.26	-3.25	0.0012000
MICROTOPO1	0.30	0.12	2.41	0.0160000
PEND1 INDICE2	0.50	0.25	2.01	0.0443000
PEND4	-0.54	0.25	-2.20	0.0278000
PERTRANS1	0.29	0.05	5.76	0.0000000
PERTRANS2	-0.13	0.05	-2.54	0.0111000
PERTURBA1	0.61	0.18	3.32	0.0009000
PERTURBA2	-0.20	0.09	-2.17	0.0298000
VEG1	0.85	0.30	2.84	0.0046000
VEG2	1.60	0.50	3.19	0.0015000
VEG3	-2.29	0.31	-7.48	0.0000000
VEG5	0.35	0.17	2.09	0.0369000

El índice de dominancia de árboles adultos entre 25 y 50% (INDICE2) afectará a la profundidad de la hojarasca, ya que éstos generarán mayor cantidad de material, que se acumulará sobre el suelo.

Considerando que la altitud del terreno está en la categoría de 3,100-3,220 msnm las orientaciones NE, SE, S, SW de la ladera influyen en la estimación de la profundidad de la hojarasca (variables ALTI3 ORIENT1, ALTI3 ORIENT3, ALTI3 ORIENT4 y ALTI3 ORIENT5). En la Tabla 3 se puede observar que la conjunción de la altitud señalada con las orientaciones NE y SE afectan positivamente la profundidad de la hojarasca estimada en cambio la misma altitud con orientaciones S o SW la afectan de forma negativa.

Si la distribución de los combustibles es irregular, la variable de perturbación (no perturbado o medianamente perturbado), estará relacionada con la profundidad de la hojarasca (DISTCOMB1 PERTURBA1=0.22, DISTCOMB1 PERTURBA2 =-0.27).

La ausencia de cauces en los sitios muestreados hace que otros índices tomen relevancia como son la distribución de combustibles de forma irregular (CAUCE DISTCOMB1=0.57), el índice de dominancia de árboles adultos en la categoría de 25 a 50% (CAUCE INDICE2=-0.30) y la perturbación en su categoría de no perturbado (CAUCE PERTURBA1=-0.27) afectan el valor resultante para la profundidad de la hojarasca.

Con este modelo se puede decir que las variables biofísicas que determinan la profundidad del mantillo son la asociación de vegetación latifoliada (aile) con coníferas (oyamel y pino), la forma geométrica del perfil transversal, presencia de depresiones en la microtopografía, que la altitud del terreno sea entre 3,100 y 3,220 msnm, así como presencia entre el 25 y 50% de árboles adultos.

3.6. Modelos para combustibles por clase diamétrica

Se utilizaron estándares internacionales para dividir en cuatro clases la cantidad de leños, las cuales se basan en el diámetro, estas clases son importantes para estudios sobre la intensidad y dispersión del fuego en incendios forestales (Rothermel, 1983). Por esta razón se consideró respetar las clases y a partir de los datos, ajustar un modelo para cada una de ellas.

La variable de cantidad de material leñoso es una variable de conteo, lo cual implica directamente que se debe considerar que el valor esperado de la variable de respuesta tiene distribución Poisson. Por esta razón el modelo propuesto para todos los casos de las distintas clases diamétricas de material leñoso fue:

$$E(y)=\mu=e^{\{x'\beta\}}$$

Las variables x incluidas en el modelo final y sus respectivos parámetros β , varían dependiendo de la clase diamétrica. En los parques nacionales en México se realizan ciertas actividades agrícolas y forestales que están reguladas por un Plan de Manejo consensuado con las autoridades del parque, una de las actividades permisibles para los lugareños es que se pueda extraer leña del parque para su autoconsumo. El material leñoso de mayor diámetro es el que más se retira del área del parque, por esta razón el número de elementos de material leñoso disminuye conforme aumentaba el diámetro, como se mostró en la Figura 3.

Esta situación implicó que para las clases diamétricas de 2.6 a 7.5 cm y mayores a 7.5 cm, no fue posible hacer el ajuste de una función lineal, por lo que se puede decir que si se hace uso de este modelo el error que se cometería podría ser significativo (Villers-Gómez, 2004), por esta razón aquí solamente se presentarán los modelos resultantes al ajuste de materiales leñosos, cuyas clases fueran inferiores a 2.5 cm de diámetro.

A) modelo para combustibles finos, entre 0.0 y 0.6 cm de diámetro

El modelo para cantidad de material leñoso de 0 a 0.6 cm es el ya mencionado, no hubo necesidad de realizar transformaciones, las variables independientes finales, representadas por x son las presentadas en la Tabla 4, también en esta tabla se puede observar los valores estimados para los parámetros de la ecuación. El análisis gráfico donde se muestra que el ajuste del modelo es aceptable, se presenta en la Figura 6.

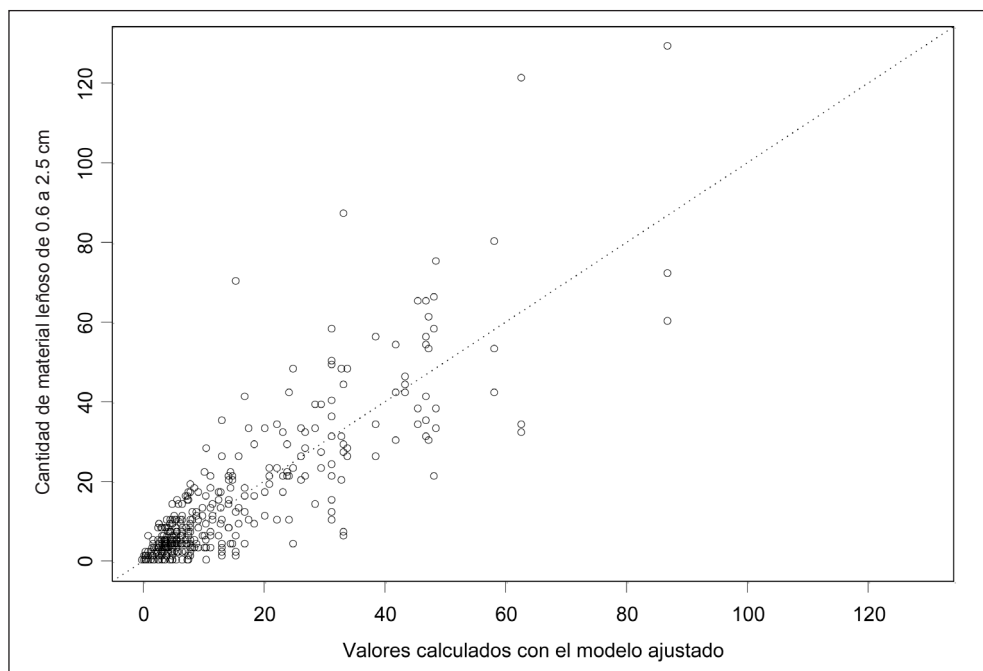


Figura 6

VALORES DE LA CANTIDAD DE COMBUSTIBLE DE 0 A 0.6 CM DE DIÁMETRO CONTRA LOS VALORES OBTENIDOS POR EL MODELO AJUSTADO A ESTA VARIABLE

Los combustibles de esta clase diamétrica, son material fino por lo que la pendiente de la ladera condicionado a ciertas altitudes influye en el comportamiento del valor promedio de su presencia. En la Tabla 4 se observan cuales son las combinaciones de pendiente-altitud que influyen y si lo hacen de forma positiva o negativa (por ejemplo ALTI1 PEND1=-11.92 y ALTI3 PEND2=1.45). Una microtopografía con depresiones (MICROTOPO1) influirá en el valor promedio de dos formas diferentes: lo disminuye si la vegetación del sitio es del tipo oyamel-pino (VEG3) cuyo valor es -5.24 y lo aumenta si la orientación es Este (ORIENT2) con valor de 2.43

B) modelo para combustibles con diámetro de 0.6 a 2.5 cm

Como se señaló, el modelo para la cantidad de material leñoso con diámetro de 0.6 a 2.5 cm, es el mismo que se indicó anteriormente para todos los combustibles. El modelo ajustado para la cantidad de material leñoso en esta clase diamétrica, está determinado por las variables y sus respectivas estimaciones de los parámetros que se muestran en la Tabla 5. Para analizar el ajuste del modelo, se graficaron los datos observados contra los valores calculados por el modelo propuesto, como se puede ver en la Figura 7. Los puntos de la gráfica se encuentran lo suficientemente cerca de la recta identidad, como para concluir que este modelo tiene un ajuste aceptable.

Tabla 4
 VARIABLES Y PARÁMETROS ESTIMADOS DEL MODELO PARA CANTIDAD DE MATERIAL LEÑOSO >0 A 0.6 CM

Variables	Valor del parámetro	Error Estándar	Valor t
ALTI1 PEND1	-11.92	5.11	-2.33
ALTI1 PEND2	6.49	2.00	3.25
ALTI1 PEND3	6.05	1.49	4.07
ALTI2 PEND1	4.63	2.26	2.04
ALTI3 ORIENT5	-3.28	0.55	-5.96
ALTI3 PEND1	7.28	2.22	3.29
ALTI3 PEND2	1.45	0.73	1.97
ALTI4 PEND1	6.78	3.13	2.17
CAUCE	0.23	0.08	3.01
DEPRES	-0.56	0.23	-2.39
DISTCOMB1	0.59	0.11	5.50
DISTCOMB2	-0.91	0.11	-8.32
INDICE1 ORIENT5	-2.36	0.52	-4.51
INDICE1 PERFTRANS1	1.25	0.22	5.67
INDICE2 PERFTRANS1	-1.53	0.30	-5.27
INDICE2 PERFTRANS2	0.62	0.25	2.52
INDICE3 PERFTRANS2	-0.84	0.28	-3.02
MICROTOPO2	-1.00	0.50	-2.00
ORIENT2 MICROTOPO1	2.43	1.05	2.32
PEND1	-4.42	2.00	-2.21
PEND1 INDICE2	3.36	1.26	2.67
PEND1 ORIENT1	2.10	0.75	2.79
PERFLONG1	1.30	0.31	4.17
PERFLONG2	-0.54	0.25	-2.19
PERFTRANS1	-0.34	0.12	-2.76
PERTURBA1	0.47	0.15	3.23
PERTURBA2	0.33	0.09	3.77
VEG3 MICROTOPO1	-5.24	1.19	-4.41

Tabla 5
 VARIABLES Y PARÁMETROS ESTIMADOS DEL MODELO PARA LA CANTIDAD DE MATERIAL LEÑOSO >0.6 A 2.5 CM

Variables	Valor del parámetro	Error Estándar	Valor t
ALTI1	-0.85	0.16	-5.36
ALTI2	-1.42	0.16	-8.83
ALTI4	0.68	0.17	4.13
CAUCE	0.39	0.10	3.77
DEPRES	0.57	0.18	3.17
DISTCOMB1	-3.39	1.55	-2.19
INDICE1 VEG2	-9.64	2.14	-4.51
INDICE1 VEG3	8.63	1.19	7.26
INDICE1 VEG4	-1.54	0.37	-4.22
INDICE3 ORIENT3	2.84	0.84	3.36
MICROTOPO1	1.30	0.47	2.75
ORIENT2 PERTURBA1	8.84	3.26	2.71
ORIENT3 PERTURBA1	-2.16	0.77	-2.81
ORIENT3 PERTURBA2	1.39	0.40	3.49
ORIENT4 PERTURBA1	1.81	0.70	2.58
PERFTRANS1 MICROTOPO1	0.95	0.47	2.03
PERTURBA2	-1.48	0.39	-3.83
VEG1 MICROTOPO1	1.49	0.34	4.33
VEG1 MICROTOPO2	-1.00	0.26	-3.84
VEG3 MICROTOPO1	-1.72	0.63	-2.72
VEG4	-7.19	3.42	-2.10
VEG4 MICROTOPO1	0.56	0.19	2.99
VEG5 MICROTOPO1	0.86	0.22	3.86
VEG6 MICROTOPO1	1.48	0.27	5.49

De acuerdo con el modelo, el valor promedio de la cantidad de material leñoso de 0.6 a 2.5 cm es afectado por la altitud del terreno, en altitudes bajas (entre 2,820 y 3,100 msnm) influye de manera negativa en la presencia de leños, en cambio en altitudes superiores a 3,220 msnm el efecto es positivo (ALTI1, ALTI2 y ALTI4). Si la distribución de los combustibles en el círculo es irregular (DISTCOMB1=-3.39) entonces el valor esperado de la cantidad de material leñoso de esta clase diamétrica menos fina disminuye (Tabla 5).

El índice de dominancia de árboles adultos en el círculo entre 0 y 25% influye en el tipo y la cantidad de combustible que se acumule en el suelo, cuando la vegetación es de coníferas (INDICE1 VEG2=-9.64, INDICE1 VEG3=8.63, INDICE1 VEG4=-1.54). El valor esperado de la cantidad de material leñoso se verá afectado por la microtopografía del terreno para los distintos tipos de vegetación que tenga el terreno, por ejemplo vegetación de aile-pino en depresiones (VEG1 MICROTOPO1=1.49).

La condición de no perturbado (PERTURBA1) aumentará el valor promedio de la cantidad de material leñoso de 0.6 a 2.5 cm cuando la orientación de la ladera es Este (ORIENT2) o Sur (ORIENT4) mientras que la condición de que la orientación sea SE (ORIENT3) afecta negativamente y positivamente, si el terreno no está perturbado (PERTURBA1) o está medianamente perturbado (PERTURBA2), respectivamente. En la Tabla 5 se observa de la siguiente manera ORIENT3 PERTURBA1=-2.16 y ORIENT3 PERTURBA2=1.39.

Condicionado con que el perfil transversal de la ladera sea cóncavo (PERTRANS1), si la microtopografía de la ladera es con depresiones (MICROTOPO1), habrá un aumento en el valor esperado de la cantidad de material leñoso para esta clase diamétrica. La variable de orientación en su categoría sureste (ORIENT3).

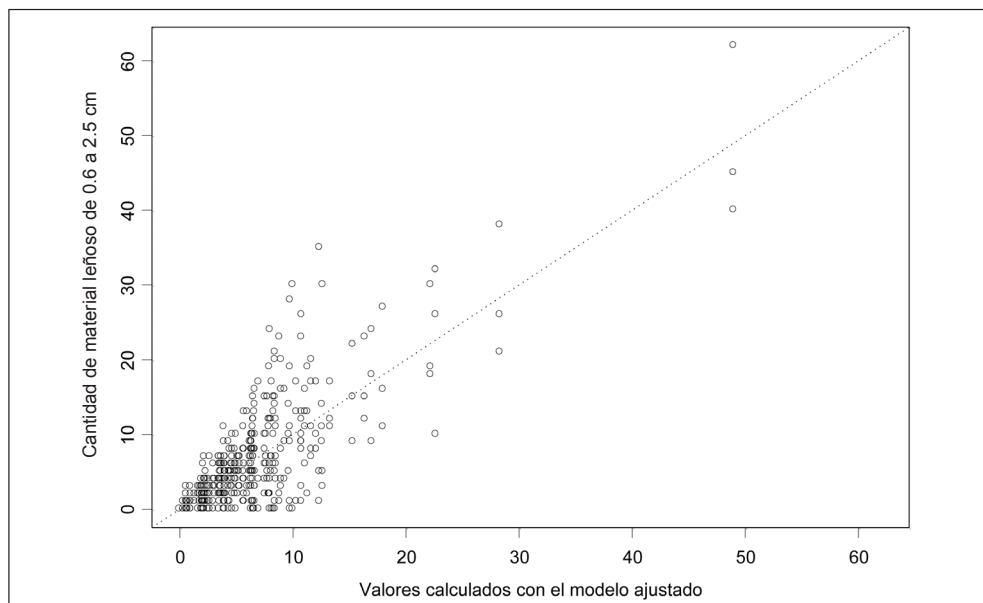


Figura 7

VALORES DE LA CANTIDAD DE COMBUSTIBLE DE 0.6 A 2.5 CM DE DIÁMETRO CONTRA LOS VALORES OBTENIDOS POR EL MODELO AJUSTADO A ESTA VARIABLE

A partir de estos modelos para combustibles por clase diamétrica, se observa que las variables físicas del terreno como altitud, pendiente y microtopografía, así como las variables biológicas como el índice de dominancia de árboles adultos, la composición de la vegetación y el grado de perturbación son determinantes para la presencia y distribución de estos combustibles.

4. CONCLUSIONES

De los datos recolectados se observa que la mayoría de los círculos no presentan depresiones ni cauces, el perfil longitudinal de la ladera es plano, la distribución de los combustibles es regular. Para las otras características biofísicas del terreno no se observó dominancia de una sola condición.

Por lo anterior y considerando que las observaciones de peso y profundidad del mantillo así como cantidad de material leñoso muestran una variación significativa de sitio a sitio, se concluye que a partir de más de cuarenta variables analizadas, la altitud, el índice de dominancia de árboles adultos, la composición de la vegetación, el perfil transversal, la microtopografía, sean las variables con mayor influencia en la acumulación y distribución de los combustibles muertos en zonas montañosas. Asimismo variables como perturbación, la orientación de la ladera, el perfil transversal y la pendiente influyeron de forma indirecta en la presencia de los combustibles al dar valores diferentes a los parámetros primarios.

A partir de los modelos obtenidos para caracterizar cada uno de los combustibles, se puede decir que el peso del mantillo está más relacionado con el porcentaje de árboles adultos, un perfil transversal cóncavo, un perfil longitudinal plano y menos relacionado con la orientación de la ladera o la composición de la vegetación.

En el caso de la profundidad del mantillo, la variabilidad de las observaciones es explicada principalmente por la presencia de asociaciones de latifoliadas y coníferas, por la altitud, entre los 3100 y 3220 metros, así como la presencia de entre 25 y 50% de árboles adultos. La profundidad del mantillo se encuentra menos asociada a la orientación de la ladera, a un perfil transversal cóncavo o convexo, o bien, a las distintas categorías de perturbación.

El modelo para la cantidad de material leñoso con diámetro de 0.0 a 0.6 cm está conformado por todas las variables independientes consideradas, sin embargo las que tienen mayor peso son altitud conjugado con pendiente, presencia de depresiones en la microtopografía relacionado con la composición de la vegetación y la orientación de la ladera. Para el caso del material leñoso con diámetro de 0.6 a 2.5 cm se observó que la presencia de altitudes bajas afecta en forma negativa la acumulación de leños de este calibre. Asimismo la presencia de esta clase de leños en el área está relacionada con un índice más bien bajo de dominancia de árboles adultos para todas las composiciones de la vegetación y con una perturbación de baja a mediana.

También es importante mencionar que, mientras mejor se tengan medidas y categorizadas las variables, la aplicación de los modelos de regresión lineal resultarán con un mejor ajuste o que al buscar otro tipo de algoritmos se podría tener un resultado más preciso.

En este estudio se pudo constatar que las características de los combustibles como son el peso y profundidad del mantillo, y cantidad de leños según sus clases diamétricas, toman valores en un rango muy amplio. Sin embargo fue posible caracterizar estos combustibles

con la presencia de ciertas características biofísicas del terreno a través de los modelos propuestos, los cuales explicaron la presencia y acumulación de los distintos materiales. De la misma manera los modelos propuestos proporcionan un ajuste aceptable y satisfacen todos los supuestos de la teoría de los modelos lineales generalizados.

Por lo anterior, estos modelos que sintetizan una gran variedad de variables biofísicas en relación a los combustibles, podrán ser considerados dentro de un sistema integrado cuyo objetivo será la determinación de áreas geográficas con alta peligrosidad de incendio.

La aplicación de estos modelos en condiciones semejantes, como son las montañas del Cinturón Volcánico Transmexicano, donde las variables de altitud, dominancia de árboles adultos, composición de la vegetación, entre otras características, se encuentran ya definidos y determinados será posible realizar las predicciones de los combustibles. Se tiene que considerar también, que para las áreas específicas con presencia de barrancos profundos, la modelación que explica la distribución espacial de los combustibles muertos, tendrá que realizarse construyendo modelos diferentes que caractericen dichas condiciones particulares del terreno.

AGRADECIMIENTOS

El segundo autor agradece el apoyo financiero recibido de la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA) de la Universidad Nacional Autónoma de México durante julio 2009-2010 para la realización de este estudio.

5. REFERENCIAS

- AGEE, J.K. (1993): Fire ecology of Pacific Northwest forests. Washington, Island Press, 493 pp.
- BROWN, J.K. (1974): Handbook for inventorying downed woody material. USDA Forest Service, Intermountain Forest Range Experimental Station, Ogden, Utah. Gen. Tech. Rep. INT-16. 24 pp.
- BROWN, J.K. (2000): Ecological principles, shifting fire regimes and management considerations. In: Wildland Fire in Ecosystems. Effects of fire on flora. USDA Forest Service Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR.42 vol. 2. 185-203.
- BROWN, J.K., BEVINS, C.D. (1986): Surface fuel loadings and predicted fire behavior for vegetation types in the northern Rocky Mountains. USDA Forest Service, Intermountain Research Station. Res. Note INT-358.
- CASTRO, R., SIEBE, C. (2007): «Late Pleistocene-Holocene stratigraphy and radiocarbon dating of La Malinche volcano, Central México». *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 162, 20–42.
- CEDEÑO, S.O. (1999): Incendios Forestales en México en 1998: Magnitud, Extensión, Combate y Control. En: Incendios forestales y agropecuarios: prevención e impacto y restauración de los ecosistemas UNAM/PUMA-IPN. 1-18.
- CONAFOR (2010): Estadística anual de incendios forestales 1970-2003 y Comparativo estadístico 1998-2009. Comisión Nacional Forestal. Coordinación general de conservación y restauración forestal. Gerencia nacional de incendios forestales, en:

- http://www.conafor.gob.mx/index.php?option=com_content&task=blogcategory&id=15&Itemid=31
- DOBSON, A. J. (1990): An Introduction to Generalized Linear Models. Chapman and Hall 174 pp.
- FLANNIGAN, M.D., STOCKS, B.J., WOTTON, B.M. (2000). «Climate change and forest fires». *The Science of the Total Environment* 262:221-229
- FLORES, J., OMI, P. (2003): «Mapping forest fuels for spatial fire behaviour simulations using geomatic strategies». *Agrociencia*, Vol. 37 (1): 65-72
- GARCÍA, E. (1973): Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de Geografía, UNAM. México. 246 p.
- GÓMEZ-TUENA, A., OROZCO-ESQUIVEL, M.T., FERRARI, L. (2005): Petrogénesis ígnea de la Faja Volcánica Transmexicana. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. Volumen conmemorativo del centenario. Temas Selectos de la Geología Mexicana. Tomo LVII, Núm. 3: 227-283 pp.
- INEGI (1981): Carta Fisiográfica escala 1:1,000,000, Cartas Tijuana, La Paz, Chihuahua, Monterrey, Guadalajara, México, Villahermosa y Mérida. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.
- KENT M., COKER P. (1992): Vegetation Description and Analysis. A Practical Approach. John Wiley & Sons. 363 pp.
- MCRAE, D.J., ALEXANDER, M.E., STOCKS, B.J. (1979): Measurement and description of fuels and fire behavior on prescribed burns. A handbook. Dep. Environ., Can. For. Serv., Sault Ste. Marie, Ontario Report 0-X-287. 44 pp.
- PEÑA DEL VALLE, A. (2003): Captura de Carbono: Un estudio en el Parque Nacional La Malinche, Tlaxcala-Puebla. Tesis de Maestría en Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM. 85 pp.
- RODRÍGUEZ D.A., RODRÍGUEZ M., FERNÁNDEZ F. (2002): Educación e Incendios Forestales. Mundi-Prensa, México, 201 p.
- ROTHERMEL, R.C. (1972): A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. USDA Forest Serv. Res. Pap. INT-115.
- ROTHERMEL, R.C. (1983): How to predict the spread and intensity of forest and range fires. Gen. Tech. Rep. INT-143. Ogden, UT. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 161 p.
- SCHMID-HAAS, P., BAUMANN, E., WERNWE, J. (1993): Forest inventories by unmarked permanent samples plots: instructions. Birmensdorf, Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research. 135 pp.
- SCOTT, J.H., BURGAN R.E. (2005): Standard Fire Behaviour Fuel Model: A Comprehensive Set for use with Rothermel's Surface Fire Spread Model. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-153.
- VILLERS-GÓMEZ, S. (2004): Modelos lineales generalizados: una aplicación a la predicción de materiales combustibles en el parque nacional La Malinche Puebla –Tlaxcala. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias, UNAM, México, 81 p.