

PROCEDIMIENTO DE VALIDACIÓN PARA EL SIMULADOR DE EXPANSIÓN DE INCENDIOS FORESTALES DEL SISTEMA KITRAL

MIGUEL CASTILLO; GUILLERMO JULIO; PATRICIO PEDERNERA
Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Chile

RESUMEN

Anualmente, en nuestro país la ocurrencia y propagación de incendios forestales ocasionan pérdidas cercanas a los US\$ 40 millones, sin contar los perjuicios ecológicos y sociales los cuales se estiman que sobrepasarían los 300 millones. Para enfrentar esta problemática, el Proyecto FONDEFI-13, con la participación de la Universidad de Chile, INTEC - Chile y el Instituto Forestal como instituciones ejecutoras, elaboró un sistema denominado Sistema KITRAL, con el propósito de elevar la eficiencia en el manejo del fuego sobre la base del análisis de las condiciones que afectan la ocurrencia, propagación y daños que provocan los incendios forestales.

Transcurridos ya tres años desde la operación oficial del sistema, su confiabilidad ha quedado demostrada mediante un estudio estadístico de validación para los pronósticos otorgados por el módulo de simulación de incendios forestales, tomando como fuente en información las experiencias realizadas en terreno, en particular en el transcurso de la temporada de verano 1996/97 por parte del Programa de Manejo del Fuego de CONAF VIII Región. En tal sentido, el simulador del sistema entregó reportes e información muy fiable, una vez comparada con los incendios que realmente se produjeron. En particular, las diferencias más importantes se producen en incendios de un tamaño inferior a 0,5 hectáreas; a su vez, para incendios de tamaño superior a 5 hectáreas, los niveles de similitud fluctuaron entre 85 y 94 %, lo cual representa un alto grado de exactitud. Estos resultados dejan de manifiesto la enorme utilidad de esta herramienta para la evaluación de los efectos mismos que puedan generarse a futuro, de la operación de dispositivos para la evaluación y la elección de opciones como soporte en la toma de decisiones para el combate.

SUMMARY

Annually, in our country the occurrence and propagation of forest fires cause losses near to 40 million dollars, with no regard to the ecological and social damage, which is estimated to be over 300 millions. To face this problem, the Project FONDEFI-13, with the participation of the University of Chile, INTEC - Chile and the Forest Institute as executing institutions, elaborated a system able to assist in decision making process denominated Sistema KITRAL, with the purpose of elevating the efficiency in the handling of the fire on the base of the analysis of the conditions that affect the occurrence, propagation and damages that cause the forest fires.

After three years of operation, the system has shown to be reliable, based on a validation analysis for the predictions of the module of simulation of forest fires, which has taking into account field work, in the program of Forest Fire Management of the National Forest Service (CONAF) during the summer season 1996-1997.

In this respect, the system brought about very accurate predictions compared with real forest fires records. In particular, the most significant differences are found in fires of less than 0,5 ha. In forest fires greather than 5 ha the level of simmilitude ranged from 85 and 94%, which represents a high level of accuracy. These results showed the outstanding utility of this tool for the assesment of the impact future coming events, and to assist in decision making processes in fire fighting.

1. INTRODUCCIÓN

En general, un factor determinante en la eficiencia de un simulador de incendios es el manejo de las variables que conforman su diseño funcional, de modo que los resultados generados por el modelo se ajusten a la realidad, a base de una validación adecuada de dichos resultados. La validación puede entenderse como un procedimiento matemático dirigido a verificar la confiabilidad de una inferencia efectuada desde el modelo teórico sobre el sistema real. De este modo, valores como la velocidad de propagación lineal en un modelo de combustible afectado por el fuego, el contenido de humedad de la vegetación fina y muerta, la pendiente, dirección e intensidad del viento, constituyen información de entrada esencial para el funcionamiento del modelo y la entrega de resultados.

2. METODOLOGÍA

Con la información obtenida de terreno, dos escenarios fueron definidos para efectuar la validación. Un escenario *real*, usando herramientas SIG (Arc/Info Ws, Roots) y un escenario *simulado* utilizando el simulador de expansión de incendios del Sistema KITRAL. Las condiciones atmosféricas fueron recreadas mediante la generación de pronósticos otorgada por un módulo de apoyo al sistema, llamado Simulador de Campos de Vientos.

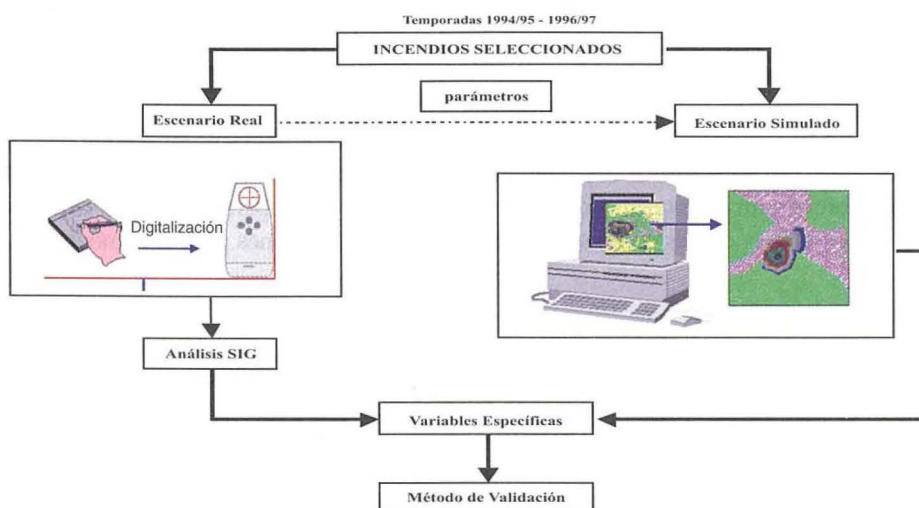


Figura 1: Definición de escenarios para la validación.

Una vez definidas las variables resultado a procesar, se estableció una secuencia de pasos para efectuar el análisis e interpretación de los resultados. Dado que se contaba con 16 variables para establecer las comparaciones, se definió un esquema de dos pasos: el primero, un análisis individual de similitud para cada variable, a fin de identificar, en cada caso, la existencia de diferencias significativas entre cada conjunto de datos. El segundo paso, correspondió a un análisis de conjunto para todas las variables, para determinar un porcentaje de similitud en las estimaciones del simulador, en términos del tamaño y forma que adquiere el modelo de propagación.

Para la definición de un esquema de validación, fue necesario definir las variables que serían analizadas al momento de efectuar las comparaciones. Al respecto, investigaciones publicadas por Anderson (1983), Albiní (1976), Ball *et al* (1990), Brown y Davis (1973), Forestry Canada (1992), Rothermel (1983) y Van Wagner (1969), señalan que el Frente Principal de Avance del Fuego, la Sección Posterior o Cola del incendio, la Razón Largo/Ancho, la Superficie y Perímetro afectados son los parámetros más empleados para caracterizar geoméricamente el tamaño y forma del modelo de propagación de un incendio forestal. Sobre la base de estos antecedentes, se definió un conjunto de variables resultado para efectuar la validación. La información a procesar contempló, además de los parámetros antes mencionados, las distancias en ocho rumbos principales de propagación, y la orientación del frente principal de avance del fuego. Las variables definidas para la validación en las predicciones del simulador de incendios respecto a los resultados reales se presentan en la tabla 1.

TABLA 1. DEFINICIÓN DE VARIABLES DE MEDICIÓN
CORRESPONDIENTES A LOS INCENDIOS EVALUADOS

Descripción	Unidad
Superficie Quemada (SQ)	ha
Perímetro Quemado (PQ)	m
Incremento de Superficie Quemada (IS)	ha/min
Incremento de Perímetro Quemado (IP)	m/min
Distancias Origen-Cabeza (DOCB), Origen-Cola (DOCL)	m
Razón Largo-Ancho (RLA)	—
Distancias en ocho Rumbos de Propagación (Origen-N,S, E, W, NE, NW, SE, SW)	m
Orientación de la Cabeza o Frente Principal de Avance (ORCB)	grados

Sobre la base de la fórmula de Velocidad de Propagación Lineal del Fuego propuesta en el Sistema KITRAL, es posible determinar el tiempo de propagación del fuego a partir de un punto de la zona inicialmente quemada (foco) hacia cualquiera de las celdas vecinas. El paso clave de la simulación consiste en determinar cuál de las celdas fronterizas será la más próxima en quemarse, transformándose en interna; lo anterior permitirá determinar en qué momento el fuego proveniente de esta celda alcanzará a sus vecinas que aún no se queman. Este esquema permite ampliar la zona de simulación en cotas de igual tiempo en cualquiera de los 8 rumbos de avance. La extracción de información procedente de cada nivel base permite alimentar la fórmula de propagación, dando como resultado una figura que representa la expansión del incendio hacia los pixeles vecinos (figuras 2, 3 y 4).

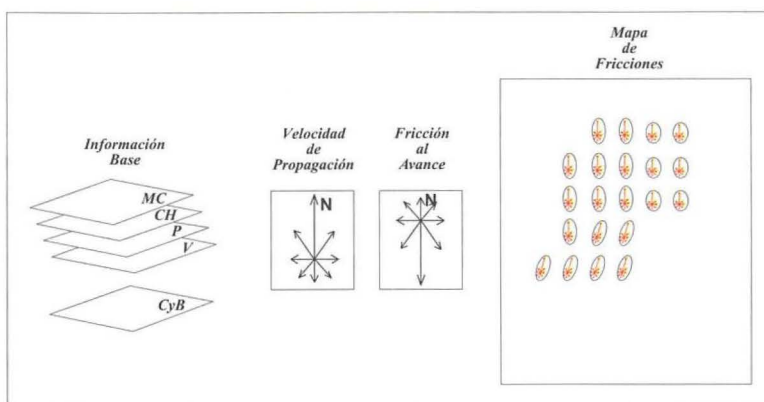


Figura 2: Información base y mapa de fricciones al avance del fuego.

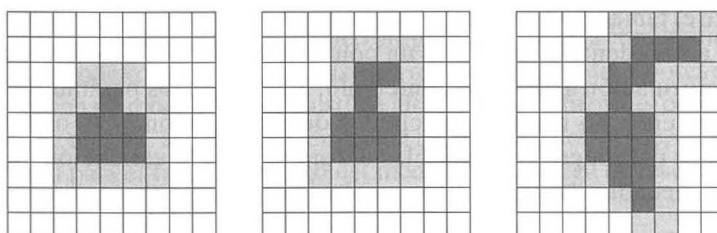


Figura 3: Ampliación de la zona afectada (de izquierda a derecha). En cotas de tiempo representadas aquí por distintas tonalidades de gris.

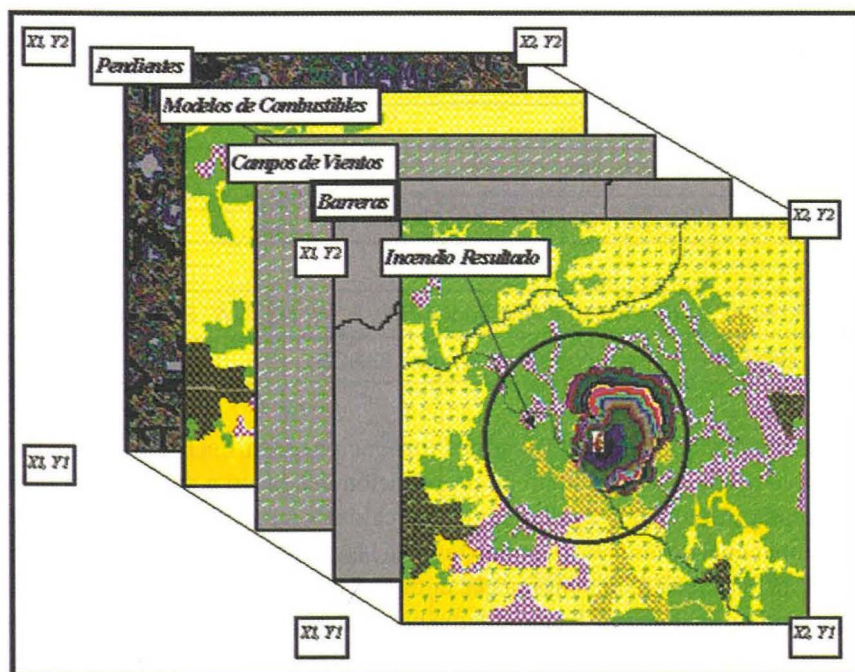


Figura 4: Representación ráster de la propagación del fuego. Sistema Kitral.

2.1. ANÁLISIS INDIVIDUAL

Se aplicó el método paramétrico de Comparación de Medias Pareadas para contrastar si existen diferencias significativas entre los resultados reales y simulados, mediante el planteamiento de la hipótesis bilateral de igualdad o desigualdad de medias $H_0: \mu_r - \mu_s = \mu_y = 0 / H_1: \mu_r \neq \mu_s; \mu_y \neq 0$; donde μ_r y μ_s son las medias reales y simuladas respectivamente, de las para cada variable resultado, con un nivel de significancia α del 5%. Las diferencias absolutas que puedan presentarse en la comparación de medias, para la variable *Orientación del Frente Principal de Avance o Cabeza del Incendio* (ORCB), pueden ocasionar interpretaciones estadísticas erróneas respecto a la similitud del rumbo principal de avance, especialmente en situaciones en que se presentan diferencias de uno o más rumbos cardinales. Por tal razón, fue necesario definir para esta variable una medida no paramétrica de asociación empleando rangos para cada rumbo de propagación, agrupando los valores al rumbo más cercano expresado en grados sexagesimales. La medida a definir está dada por el *Coefficiente de Correlación de Rangos de Spearman*, denotado por r_s . En este caso, se emplean los rangos para medir el grado de asociación lineal dado por el intervalo $-1 \leq r_s \leq 1$. Para la aplicación de la prueba se asignaron valores ordinales a cada rumbo de propagación real y simulado, partiendo del rumbo norte con valor 1, y en el sentido de los punteros del reloj (azimut), hasta el rumbo NW con valor ordinal de 8. Para las restantes variables resultado se aplicó un procedimiento no paramétrico, que fuera comparable con el método paramétrico de comparación de medias. Para efectos de contrastar las diferencias positivas y negativas de cada par, así como también la magnitud de las diferencias presentes en cada par de valores, se aplicó la Prueba de Rangos y Signos de Wilcoxon, la cual considera estos dos aspectos, obteniéndose un buen balance en los resultados, a diferencia de otros métodos no paramétricos que sólo consideran las diferencias en magnitud de las observaciones.

2.2. ANÁLISIS DE CONJUNTO. MÉTODO MULTIVARIADO

El comportamiento del fuego en un incendio forestal es el resultado de la interacción de un conjunto de variables y factores que lo caracterizan. Para efectos de comparaciones se evaluó el desempeño de la fórmula de Propagación Lineal del Fuego (basada en la interrelación de los factores *Modelo de Combustible*, *Contenido de Humedad de Partículas Finas*, *Velocidad del Viento* y *Pendiente*), como así también su aplicación en la definición del modelo espacial de expansión del incendio (en ocho rumbos divergentes y tiempos de acceso desde un punto afectado por el fuego hacia pixeles vecinos).

Dada la naturaleza del problema, se optó por determinar el grado de similitud tomando dos aspectos claramente diferenciables: la expresión del comportamiento del fuego en los parámetros *tamaño* y *forma* de un incendio forestal, ambos resultado de la interacción del conjunto de variables y factores que determinan el comportamiento del fuego. Para tal efecto se aplicó el Método de las Componentes Principales. Este es uno de los métodos de análisis multivariado más difundidos, que permite la estructuración de un conjunto de datos obtenidos de una población cuya distribución de probabilidades no necesita ser conocida. Este método se aplicó al conjunto de datos, tomando ambos escenarios: los resultados generados de los incendios reales y los obtenidos por el simulador KITRAL para los mismos incendios evaluados. Como se señalaba anteriormente, para establecer una comparación multivariada entre ambos escenarios, se analizó qué variables y en qué magnitud se expresan en los conceptos de tamaño y forma de un incendio forestal, a modo de establecer estadísticamente si existen similitudes entre ambos escenarios.

El tamaño del incendio puede asumirse como crecimiento, representado en n variables de medición. De este modo, al haber incremento de alguna variable, aumenta el tamaño. A su vez, la forma que el modelo de propagación adquiere puede ser interpretada como el resultado de la propagación del fuego en distintos rumbos de avance. Así por ejemplo, una observación pareada que describe la superficie real y simulada de un incendio puede arrojar valores similares, pero la forma resultante del incendio puede ser muy distinta. Las variables utilizadas para este análisis fueron las mismas que las utilizadas para la comparación de medias y test no paramétrico.

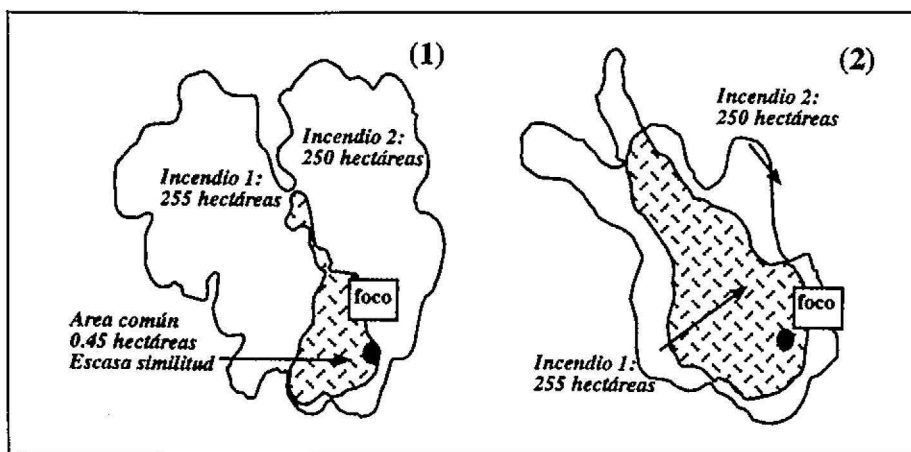


Figura 5: Dos incendios aparentemente muy similares en tamaño, pero con frentes de avance (1) y formas (2) de frentes.

3. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

3.1. ANÁLISIS INDIVIDUAL.

Comparando medias pareadas para cada variable resultado, y la prueba de rangos y signos de Wilcoxon, se determinó que para las variables correspondientes a incrementos de superficie, distancias origen-cabeza y origen-cola, razón largo-ancho, y distancias desde el origen a los rumbos sur, este, oeste, sureste y suroeste, no existen diferencias estadísticamente significativas. Sí las hay para las variables de superficie y perímetro quemado, y las distancias desde el origen a los rumbos norte y noroeste. A su vez, el coeficiente de correlación de rangos de spearman, el cual considera los empates entre observaciones pareadas, fue aplicado a la variable orientación del frente principal de avance o cabeza del incendio. Los resultados presentaron una fuerte concordancia entre los valores reales y simulados. Si se considera la no existencia de empates entre las observaciones, el valor del coeficiente aumenta a 0,89 (89% de similitud).

Las diferencias encontradas para las variables de Superficie Quemada (SQ), Perímetro Quemado (PQ), Distancias Origen-Norte (N) y Origen-Noroeste (NW) se deben principalmente al bajo tamaño de la muestra y el tamaño reducido de los incendios analizados, si se considera que en superficies pequeñas, la representación espacial del modelo de propagación puede presentar grandes diferencias, principalmente por irregularidades en la topografía, que muchas veces la información digital contenida en las bases de datos del KITRAL no puede detectarlas por la resolución de los niveles de información, los cuales están organizados en celdas de 25*25

metros. Se planteó complementar los resultados aquí expuestos mediante la aplicación de un método estadístico que permitiera una interpretación de las variables en su conjunto.

3.2. ANÁLISIS DE CONJUNTO

3.2.1. Método de los Componentes Principales

Se calcularon los estadígrafos básicos del conjunto de datos. Posteriormente se determinaron las matrices de covarianzas (definidas como S) utilizando los datos originales. De la matriz de covarianza real, indica que los valores de las varianzas que representan distancias, en especial los referidos a las variables IP, PQ, DOCB, DONE y L son mucho mayores que para las otras variables, lo cual se debe fundamentalmente a que sus magnitudes absolutas son también mayores. Lo mismo ocurre al analizar los datos de la matriz simulada. En ambos casos, las covarianzas asumen valores del mismo orden de magnitud que las varianzas, lo que indica una dependencia entre las variables. En la matriz real, el primer componente absorbe el 89.69% de la variabilidad total, mientras que para la matriz obtenida de KITRAL, este valor para el primer componente asciende a un 94.36% de la variación total del conjunto de datos.

Adicionalmente a la determinación de los valores propios, se calcularon los vectores y coeficientes de correlación de las nuevas variables con las originales mediante la resolución de un sistema de ecuaciones y efectuando una transformación lineal para cada uno de los valores propios antes calculados. En el caso real, se observa que el primer vector propio, que contiene los coeficientes de la combinación lineal que dará origen al primer componente principal, exhibe los mayores valores para las variables de perímetro PQ, su incremento IP, las distancias del frente DOCB, largo L y propagación noreste DONE (0.7830, 0.3978, 0.2786, 0.2463 y 0.2456 respectivamente), con una casi nula contribución de las otras variables. Nótese que, a excepción de la variable de orientación del frente de la cabeza ORCB, todos los vectores propios son positivos. Esto indica que la primera combinación lineal refleja el *tamaño* que adquiere un incendio forestal, en términos de longitud total del perímetro afectado a un tiempo t o de control y, en menor magnitud, por el incremento de perímetro en tiempos iguales de propagación. En forma decreciente, las variables DOCB, L y DONE aportan información a la expresión del primer componente. A su vez, los vectores propios para el primer componente simulado expresan de igual forma el concepto de tamaño, es decir, con participación decreciente para las variables PQ e IP, seguidas en importancia por L y DOCB. Ello evidencia la correspondencia en la expresión de esta característica en ambas situaciones, para el 1^{er} componente principal. En las observaciones reales se observa una correspondencia entre el 2° componente principal y la variable de largo del incendio L, seguida en orden de expresión por el perímetro PQ (0.5109 y 0.5070), mientras que las observaciones simuladas presentan como máxima correspondencia las variables de distancias DONW y DON (-0.4906 y -0.4650 respectivamente). Los vectores propios que conforman este 2° componente, y los restantes quince componentes presentan, en ambos casos, valores positivos y negativos. Para incendios de tamaño similar, pueden presentarse diferencias muy importantes en las varianzas de los datos originales, lo que explica variaciones en ambos sentidos para la característica definida como forma.

componentes NE, N y NW. A su vez, en el primer componente simulado se observa la similitud en la magnitud de DOW y ORCB, expresando esta combinación lineal, las características de propagación mencionadas en el caso real. En todas las combinaciones lineales, las variables que poseen signo negativo indican que al aumentar la magnitud de ellas disminuirá el valor del componente que las contiene. Tal es el caso de los valores negativos encontrados en las variables de distancias DOCL, DOW, DOSW y en la orientación del frente de avance ORCB. Los incendios con valores más altos para el segundo componente principal serán aquellos que presenten un tamaño inferior al promedio, con propagación preferentemente suroeste, sur y oeste, una porción posterior o cola del incendio claramente diferenciada del frente principal de avance, y con longitud y ancho poco distinguibles entre sí. Los vectores de la matriz simulada por KITRAL indican una similitud en el comportamiento de las variables DOCL, DOS y DOSW, incorporándose DOSW entre las que aportan mayor información a este segundo componente principal. Valores negativos acompañan al resto de las variables, lo cual indica que la expresión de este segundo componente es similar a la situación real, pues los valores más altos estarán representados por incendios catalogados como pequeños, respecto al promedio real observado (valores de IS, SQ, IP y PQ negativos) con propagación suroeste, sur y este, una porción posterior claramente definida, con longitud y ancho poco distinguibles entre sí.

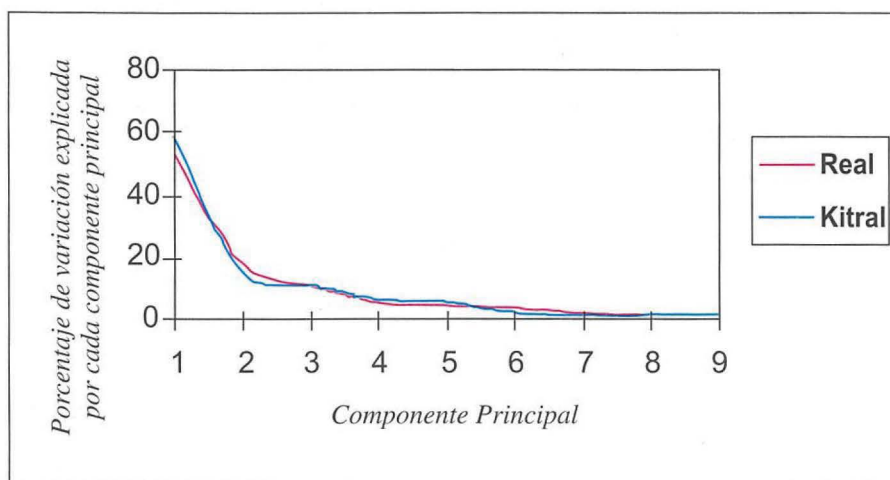
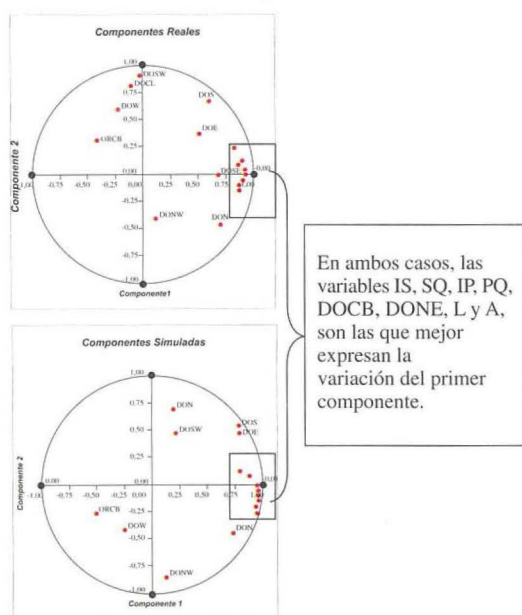


Figura 6: Variación explicada por cada componente.

La expresión de tamaño en términos de IS, SQ, IP y PQ se expresa preferentemente en el primer componente, del mismo modo que el frente principal de avance. La similitud para las variables de distancia va siendo decreciente a partir de la tercera combinación lineal. Al observar los valores ligados al tercer y cuarto componente, las proporciones de varianza explicada son similares en ambos casos (10.93% real y 10.99% simulado), pero la similitud en la expresión del tamaño y forma va disminuyendo al presentarse valores positivos y negativos muy distintos entre cada par de observaciones. De todos modos, se optó por graficar estos resultados en un par de ejes ortogonales para así compararlos con los resultados obtenidos en los dos primeros componentes. Si se consideran los dos primeros componentes principales, puede concluirse que las estimaciones realizadas por el simulador de expansión de incendios del KITRAL, en términos de la fórmula de

velocidad de propagación, indican una alta similitud para incendios de tamaño superior al promedio, disminuyendo esta característica cuando los valores de perímetros y superficies son menores. A su vez, la forma que presenta el modelo de propagación en rumbos divergentes presenta mejores estimaciones para distancias noreste y norte, además del largo y ancho del contorno final de propagación; a su vez, a medida que los incendios alcanzan un menor tamaño, la similitud para esta característica disminuye, siendo más certeras las estimaciones para las distancias DOCL, DOS y DOSW. A partir del tercer componente los resultados en las estimaciones tienden a ser variables, no presentándose una clara similitud en los resultados. En todos los casos se está operando con valores estandarizados de los datos, donde cada variable tiene una media cero y varianza 1. Puede graficarse la correlación de cada variable original con los dos primeros componentes principales. Para ello se extrae la raíz cuadrada de los valores de las proporciones de variación a partir de las matrices de correlación real y simulada, respetando el signo de los vectores propios. La correlación para el tercer y cuarto componente también son presentadas gráficamente para observar las diferencias respecto a los dos primeros componentes. En la figura 3 se han graficado en un par de ejes ortogonales, cada uno de los cuales representando un componente principal. En ambos casos, el círculo de radio unitario, trazado con centro en el origen del par de coordenadas, permite identificar las variables cuya correlación con los componentes sea mayor (se acercan al círculo). Aquellas variables que se agrupan cerca del centro serán las que menos se correlacionan con los componentes principales. Como la proporción de la variación de cada variable explicada en los dos primeros componentes principales es la suma de sus correlaciones al cuadrado, las variables mejor explicadas se ubicarán cerca del círculo y las menos explicadas, cerca del origen de coordenadas. Estas correlaciones son graficadas de a pares (dos componentes sucesivos en cada caso), para cada variable resultado, resultando gráficamente lo siguiente:



Nótese en esta figura, en los puntos azules sin leyenda, cómo se agrupan las variables resultado reales, y la similitud espacial que éstas tienen al compararlas con el diagrama simulado. En ambos casos, las variables que mejor explican los dos primeros componentes principales se agrupan más al contorno derecho del círculo unitario.

Figura 7: Correlación de las variables originales con los dos primeros componentes principales, casos real y simulado de la propagación del fuego.

De las matrices de vectores propios a partir de la matriz *S*, se muestra que en las restantes 16 combinaciones lineales está la presencia de la expresión *forma*, al haber coeficientes positivos y negativos en ambos escenarios. Así por ejemplo, en el tercer componente real existe una correspondencia para las distancias norte DON y cola DOCL, con valores de -0.4435 y 0.4290 expresando la variación en la forma, mientras que el incremento IP y el largo L (-0.6320 y 0.3436), ambos simulados, tienen mayor presencia en la expresión de esta característica.

Similar situación se refleja cuando se examinan los valores de correlación entre las variables y los componentes principales a partir de la proporción de la variación explicada por cada componente utilizando la matriz *S*. En las observaciones reales, el 97.18% de la variación total del perímetro PQ queda explicada por el primer componente, con un 2,78% para el segundo. Esto significa que si se consideran los dos primeros componentes principales para esta variable, se habrá explicado el 99.96% de la variación de PQ. A su vez, los resultados simulados indican que tomando las dos primeras combinaciones lineales se explica el 99.91% de la variación (99.47% para el 1°, y 0.44% para el 2°). Se aprecia la correspondencia entre los resultados reales y simulados en términos del aporte de las variables en los cinco primeros componentes principales. En ambas situaciones, el aporte de información que otorga la 8ª y 9ª combinación lineal será muy pequeño (tabla 2), siendo nulo en los restantes componentes.

TABLA 2. DIFERENCIAS EN LA VARIACIÓN EXPLICADA (%) PARA LA TOTALIDAD DE LOS COMPONENTES PRINCIPALES

Variable Resultado	Primeros 7 Componentes		Restantes 10 Componentes	
	Real	Simulado	Real	Simulado
Incremento de Superficie (IS)	99,49	96,56	0,51	3,04
Superficie Quemada (SQ)	99,70	96,31	0,30	3,61
Incremento de Perímetro (IP)	99,97	99,99	0,03	0,01
Perímetro Quemado (PQ)	99,99	100,00	0,01	0,00
Distancia Origen-Cabeza (DOCB)	99,96	99,97	0,04	0,03
Distancia Origen-Cola (DOCL)	98,74	99,03	1,26	0,97
Distancia Origen-Norte (DON)	99,80	100,00	0,20	0,00
Distancia Origen-Sur (DOS)	99,71	98,36	0,21	1,64
Distancia Origen-Este (DOE)	98,05	99,43	1,95	0,57
Distancia Origen-Oeste (DOW)	98,86	98,18	1,14	1,82
Distancia Origen-Noreste (DONE)	99,93	99,97	0,07	0,03
Distancia Origen-Noroeste (DONW)	99,44	99,53	0,56	0,47
Distancia Origen-Sureste (DOSE)	92,83	99,45	7,17	0,55
Distancia Origen-Suroeste (DOSW)	93,63	96,29	6,37	3,71
Largo (L)	99,98	100,00	0,02	0,00
Ancho (A)	89,58	95,73	10,42	4,27
Orientación de la Cabeza (ORCB)	76,51	86,04	23,49	13,96

La máxima proporción de varianza explicada para los valores del primer vector propio en el primer componente principal, queda reflejada en ambas situaciones al comparar estos valores con los obtenidos a partir del segundo componente.

Con el fin de otorgar a cada variable el mismo orden de importancia, excluyendo el efecto de la magnitud de las varianzas en la interpretación de los resultados, se estandarizaron los valores a partir de la matriz de covarianza, generándose una nueva matriz llamada Matriz de Correlación, en donde cada variable posee varianza unitaria. En la situación real, el primer componente sintetiza el 53.99% de la variación explicada, y el primero más el segundo alcanzan en 71.89%. Es necesario considerar hasta tres componentes para obtener el 82.83% de la variación y hasta el quinto para obtener el 93%. Similar situación se aprecia en los resultados obtenidos de la simulación, donde el primer componente sintetiza el 59.42%, alcanzando una proporción superior al 90% en el quinto componente. En ambos casos, la proporción total se alcanza en el noveno componente principal.

Al decidir cuántos componentes reales y simulados se mantienen, fue necesario examinar cuántos de ellos eran necesarios incluir para que el porcentaje de variación explicada fuera satisfactorio. Si se examinan las proporciones absolutas reales y simuladas, los cinco primeros componentes sintetizan porcentajes similares de varianza total (93.26% real y 97.24% simulado), los siguientes cuatro lo hacen con valores de 6.73% real y 2.75% simulado, siendo los restantes ocho componentes nulos en cuanto a aporte en variación explicada, lo cual indica que, sin perder información, la dimensión del problema puede reducirse de diecisiete a nueve componentes, en ambos casos, siendo posible contener más del 90% de toda la información en sólo cinco componentes principales. Un criterio para seleccionar el número de componentes consiste en incluir sólo aquellos cuyos valores propios sean superiores al promedio (Siegel, 1956). Si se utiliza la matriz de correlación, se incluirán los componentes cuyos valores propios sean mayores que 1 (1 es el promedio de todos los valores propios). Otro criterio, sugerido por Anderson (1958), tiende, a través de un método gráfico, incluir un alto número de componentes.

Aplicando el primer criterio de selección de componentes principales, se utilizarían los tres primeros, reales, cuyos valores fueron mayores que el promedio, es decir, superiores a 1. En los valores propios simulados los cuatro primeros componentes superaron este promedio. A su vez, el método gráfico de Anderson representado para este estudio indicaron que en ambos escenarios (real y simulado), se puede considerar la selección hasta el tercer componente, a fin de alcanzar el 82.83% de la varianza explicada en las observaciones reales, y un 85.96% en las observaciones simuladas por el Sistema KITRAL (figura 6).

Para adoptar una decisión definitiva al respecto, fue necesario examinar los vectores propios y las correlaciones entre las variables originales y los componentes principales. Los coeficientes obtenidos del KITRAL indican la similitud respecto a los vectores reales, en los valores más altos para las variables de incrementos IS e IP, superficie SQ, perímetro PQ, distancia DONE, largo L y ancho A. Los valores más elevados para el primer componente real estarán asociados a incendios con tamaño superior al promedio, con un frente de avance claramente diferenciado de los ocho rumbos de propagación, una pequeña sección posterior o "cola" del incendio, escasa longitud de propagación hacia los rumbos W y SW, lo cual es lógico si se verifica que en la práctica los vientos dominantes de la zona en la cual se tomaron los datos meteorológicos tienen un predominio de las

Por lo anterior, la fórmula de propagación de KITRAL tiende a otorgar resultados altamente similares para el crecimiento del incendio y el tamaño final que éste adquiere, ambos rasgos reflejados en el primer componente principal. La similitud en la forma para este primer componente queda expresada en las variables DOCB, DONE, L y A, con una menor contribución en la expresión de esta característica para las variables DON, DOS y DOSE. A su vez, el segundo componente expresa la variación en la forma, principalmente en orden decreciente, por las variables DOCL, DOS, DOE y DOSW, asociado a incendios de menor tamaño y escasa propagación norte y noreste. Para el tercer y cuarto componente no se aprecia una clara similitud en las correlaciones, por lo cual la certeza en las estimaciones tienden a disminuir cuando se trata de incendios de tamaño pequeño. Como ya se conoce qué variables son las que se expresan con mayor similitud en el tamaño y forma del incendio, será necesario determinar el porcentaje de similitud en las estimaciones en su conjunto, considerando rangos de superficie. Un método propuesto para este efecto es la asignación de puntajes para cada variable resultado según un criterio establecido. El desarrollo de este método se presenta en la siguiente sección.

3.2.2. Método de Asignación de Rangos y Puntajes

Sobre la base del análisis multivariado, se pudo determinar que las predicciones varían considerablemente entre el primer y segundo componente principal, y que dicha similitud responde a incendios con categorías de perímetro y superficie mayores que el promedio observado, con formas preferentemente orientadas hacia los rumbos norte, noreste, sur y sureste. A su vez, las variables que definen la distancia de propagación en distintos rumbos de avance, para el segundo componente, expresan la forma mediante una clara porción posterior o cola del incendio, al igual que la sección de propagación sur. Este segundo componente expresará, además, una escasa longitud de propagación norte, a diferencia de lo expresado en el primer componente.

Mediante la aplicación del método de asignación de rangos y puntajes a los datos originales, fue posible establecer porcentajes de similitud para cada grupo de variables. Al respecto, en la estimación de similitud de cada parámetro se ocuparon los antecedentes obtenidos de los 10 incendios antes mencionados, más una base de datos de 47 superficies reales obtenidas durante la temporada 96/97 en la Octava Región, y durante la operación del Sistema KITRAL instalado para la Corporación Nacional Forestal en la Central de Operaciones Integrada, ubicada en Carriel Sur, Concepción.

El promedio general en superficie afectada para 57 incendios reales evaluados fue de 31,69 hectáreas, con una desviación de 105,73 hectáreas. Este alto valor de dispersión respecto a la media, (3.3 veces superior al promedio), se debió a que el mínimo valor observado corresponde a 0.01 hectáreas, alcanzando a un máximo de 500 hectáreas. Por tal razón, para poder agrupar los valores en categorías de superficie, se ordenaron en forma ascendente y se dividieron en 5 rangos claramente distinguibles entre sí, cuidando que la desviación de cada rango fuera menor que el promedio del rango (tabla 3). De este modo, fue posible ordenar los incendios de acuerdo a la magnitud de la superficie afectada, siendo posible visualizar con más detalle la variación en la similitud de las estimaciones.

TABLA 3. DEFINICIÓN DE RANGOS DE SUPERFICIES PARA LOS 57 INCENDIOS EVALUADOS

	Rangos de Superficies, expresados en hectáreas					
	0.05-0.50	0.51-2.00	2.01-5.00	5.01-20.00	20.01-60.00	60.01-500.00
Frecuencia	15	26	5	4	3	4
Promedio	0.25	1.11	2.44	7.28	37.33	404.75
Desv. Estándar	0.22	0.53	0.54	1.30	20.03	87.07

De los seis rangos definidos se obtuvieron porcentajes de similitud variable, que fueron calculados como el promedio de las observaciones correspondientes a cada rango. Los resultados finales de esta clasificación se muestran en la siguiente tabla:

TABLA 4. RESULTADOS DE LA CLASIFICACIÓN POR TAMAÑO DE INCENDIOS PARA EL PARÁMETRO DE SUPERFICIE QUEMADA

Rango (ha)	Nº de Incendios	Sup. promedio	% Similitud
0.01 - 0.50	15	0.22	36.67
0.51 - 2.00	26	0.99	58.65
2.01 - 5.00	5	2.23	77.00
5.01 - 20.00	4	7.28	85.00
20.01 - 60.00	3	37.33	86.67
> 60.00	4	404.75	93.75

Gráficamente, los porcentajes promedio de similitud para cada rango de superficie se exponen en la siguiente figura:

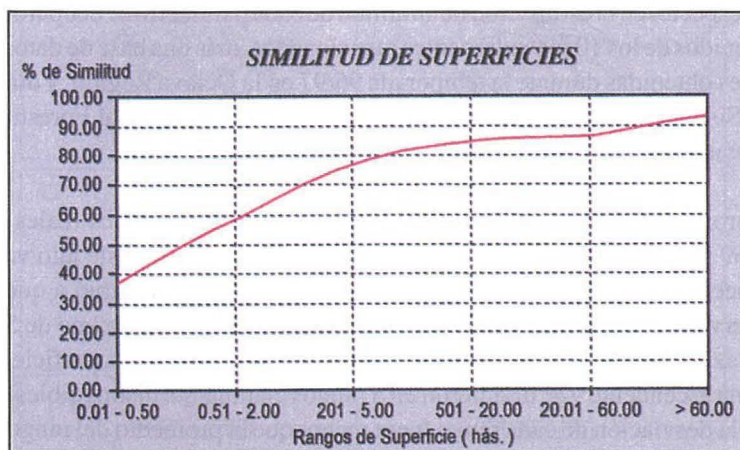


Figura 10: Resultado de las estimaciones de superficie para un número de 57 incendios forestales reales, clasificados en cinco categorías de tamaño.

En el gráfico anterior, a medida que la superficie afectada real aumenta, las estimaciones tienden a ser mejores, sobrepasando el 90% para la última categoría.

Los promedios de superficies correspondientes a cada rango se ajustaron a distintos modelos estadísticos, resultando que el comportamiento de las predicciones se aproxima mejor a un modelo de tipo racional, con un coeficiente de correlación de 0.9958. Por lo cual, el indicador se traduce en el siguiente modelo:

$$y = \frac{17,3838 + 143,1243x}{1 + 1,5983x - 0,00018x^2}$$

Donde x representa el promedio de superficie real de cada rango, e y , el indicador del porcentaje de similitud en las estimaciones obtenidas por el KITRAL, para cada rango.

Por antecedentes preliminares derivados del diseño de la fórmula de Velocidad de Propagación Lineal, se sabe que, de los cuatro factores que componen dicha fórmula, el que presenta una mayor sensibilidad en los resultados del modelo de propagación, en términos de los valores de las variables de entrada, es el Factor de Propagación derivado del Contenido de Humedad de la Vegetación Fina y Muerta. Este factor representa el contenido de humedad de partículas con grosores inferiores a 2,5 centímetros. El contenido de humedad de estas partículas depende esencialmente del efecto de la temperatura y la humedad relativa existentes en el ambiente en que se encuentran (Julio, 1994). A su vez, KITRAL cuenta con una fórmula que permite ingresar los datos referentes a la Humedad Relativa del Aire y la Temperatura del Aire, que son reportados directamente por las estaciones meteorológicas.

Se detectó que, sobre la base de corridas sucesivas del simulador de incendios, y en los casos particulares antes mencionados, al variar en 1 o más puntos el valor correspondiente a la humedad relativa del aire, las sobreestimaciones de superficies que se generan en pastizales son considerables, principalmente debido a que en el grupo pastizales, en particular los modelos denotados por PCH1, PCH2 y PCH3, se presentan los valores más altos de Factor de Velocidad de Propagación Lineal derivado de los Modelos de Combustibles. Por tal razón, se efectuaron correcciones en el planteamiento de las fórmulas del simulador de expansión. No se efectuaron nuevos ajustes al factor que caracteriza los modelos de combustibles, pues los valores que lo componen, han sido el resultado de diversos trabajos de investigación, y por lo tanto, están correctamente establecidos. En consecuencia, las correcciones fueron orientadas a las constantes que acompañan a las ecuaciones que definen el Factor Contenido de Humedad de la Vegetación Fina y Muerta, en particular las referentes a F_{ch} y CH , las que se describen a continuación:

TABLA 5. CORRECCIÓN EN LAS FÓRMULAS DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DE LA VEGETACIÓN FINA Y MUERTA*.

Formulación inicial	Nueva formulación
$Fch = \frac{389,1624 + 14,3x + 0,02x^2}{3,559 + 1,6615x + 2,62392x^2}$	$Fch = \frac{349,162 + 13,25x + 0,2x^2}{3,559 + 1,6615x + 2,62392x^2}$
$x = -2,97374 + 0,262(HR) - 0,00982(T)$	$x = -0,54437 + 0,195(HR) - 0,02505(T)$

* Correcciones efectuadas por el señor Guillermo Julio, autor de la fórmula de Velocidad de Propagación del Fuego.

En cada caso, x representa el contenido de humedad de la vegetación fina (partículas con diámetros inferiores a 2,5 centímetros) en porcentaje, y Fch , el respectivo factor de propagación. HR es la humedad relativa del aire, en porcentaje, y T es la temperatura del aire, en grados Celsius.

Una vez efectuadas las correcciones antes mencionadas, se procedió a simular nuevamente los incendios en los cuales se disponía de información completa respecto a los valores de las variables de entrada, en particular los referidos a la posición del foco, condiciones ambientales y tiempo de simulación. Los resultados obtenidos después de los cambios evidenciaron mejorías en las estimaciones para los incendios de mayor tamaño.

Con los ajustes antes mencionados, las estimaciones de similitud evidenciaron un pequeño aumento, para los rangos de 2.01 a 5 hectáreas (de 77% a 78%) y 5.01 a 20 hectáreas (de 85% a 86.25%), en los casos en que fue posible volver a simular un incendio real con las condiciones iniciales. Cabe señalar que en los casos que se evidenciaron diferencias mayores a 3.3 veces el tamaño real del incendio, las estimaciones obtenidas una vez efectuadas las correcciones no alcanzaron a disminuir a un valor en que la escala de puntajes definida para este parámetro represente una similitud mayor al 0%. No obstante, las correcciones realizadas en las ecuaciones de propagación otorgaron un notorio aumento en las estimaciones respecto a los resultados iniciales, sin las correcciones. Un ejemplo de lo anterior, se presenta en la siguiente tabla:

TABLA 6. EJEMPLOS QUE DEMUESTRAN EL AUMENTO EN LA SIMILITUD DE LAS ESTIMACIONES DE SUPERFICIE UNA VEZ EFECTUADAS LAS CORRECCIONES

Incendio	Superficie Real, en hectáreas	Superficie Simulada por el KITRAL, en hectáreas, sin corregir	Superficie Simulada por el KITRAL, en hectáreas, una vez corregido
21	0.24	2.24	2.01
36	0.07	0.28	0.21
41	0.02	0.15	0.12
44	1.30	5.76	4.89
53	2.00	43.00	11.72
54	0.50	17.44	12.16
55	1.50	5.52	5.02

En síntesis, las estimaciones en la simulación de expansión de incendios forestales dieron como resultado un porcentaje creciente de similitud a medida que el tamaño del incendio es mayor, en términos de superficie afectada. Sobre la base del análisis multivariado, las variables resultado consideradas para establecer las comparaciones presentan diferentes comportamientos en términos de la exactitud de las estimaciones a medida que la simulación representa espacialmente el modelo de propagación. Se señalaba que, reduciendo la colinealidad de algunas variables y reduciendo la dimensión del problema, ciertas variables expresaban mejor el tamaño, mientras que la forma era representada por otro conjunto de variables, bajo otro tipo de incendios. En síntesis, la primera combinación lineal expresa el tamaño de un incendio forestal, para rangos de superficie mayor que el promedio observado (2,26 hectáreas). Este valor se aproxima al promedio general que define el rango de 2,01 - 5,00 hectáreas para el cual se establece un porcentaje de similitud de un 77%. Es decir, en el proceso de simulación de incendios reales, los modelos de propagación que superan, a un tiempo objetivo de simulación, las 2,5 hectáreas afectadas, presentan estimaciones de tamaño en términos de superficie que superan el 75%. A su vez, a partir del rango 2,01 - 5,00 hectáreas, estas estimaciones van asociadas a una mejor expresión del tamaño, representado esencialmente por las variables IS, SQ, IP, PQ, y en la forma del modelo de propagación, expresada por las variables DOCB, L y A, todas ellas representadas en el primer componente principal, con máxima varianza y no colineal con las restantes combinaciones lineales. Finalmente, tamaños inferiores a 2,5 hectáreas estarán asociados a mejores estimaciones en la forma del incendio, expresada en orden decreciente de similitud por las variables DOCL, DOS, DOE y DOSW.

CONCLUSIONES

- Comparaciones a nivel individual demostraron en el 93% de los casos, la no existencia de diferencias estadísticamente significativas, lo cual fue corroborado por los resultados de las pruebas no paramétricas y por los altos porcentajes de similitud obtenidos del análisis de conjunto.
- El método multivariado de los Componentes Principales permitió establecer el comportamiento estadístico de las variables en la expresión del tamaño y forma del incendio. El tratamiento de las variables en su conjunto logró obtener una interpretación global de las respuestas del simulador frente a incendios reales, verificándose la alta similitud en los resultados respecto al análisis individual para cada variable.
- En términos globales, las respuestas proporcionadas por el simulador de expansión de incendios otorgaron un alto nivel de confiabilidad, especialmente en siniestros de gran magnitud. Este resultado era esperable de obtener, si se considera que, en incendios forestales de estas características, las diferencias observadas entre las variables tienden a compensarse.
- En términos específicos, las mayores diferencias en las estimaciones se concentran en rangos de superficie inferiores a 5 hectáreas, principalmente por el nivel de resolución que otorga la información digital del KITRAL, basado en interpolaciones para niveles de representación menores a 25 metros, y por la baja magnitud que presentan las variables resultado en incendios pequeños.
- Lo anterior queda claramente reflejado al analizar 57 incendios, tomando, entre otras, como principal variable de comparación, la superficie quemada (SQ). En este punto se estableció que en incendios

de magnitud superior a 5 hectáreas reales afectadas, se obtienen porcentajes de similitud que aumentan a medida que la superficie real afectada es mayor, alcanzando un máximo cercano al 94% para incendios de tamaño superior a 60 hectáreas.

- Del análisis multivariado se desprende que las variaciones en el tamaño y forma de un siniestro van asociadas a cambios en la expresión de las variables que caracterizan el modelo de propagación. Es así que, a medida que el tamaño del siniestro aumenta, las variables más incidentes en la expresión de esta característica corresponden a los incrementos y valores totales de perímetro y superficie, mientras que la forma queda mejor representada en las variables de distancias con orientación noreste y la correspondiente al frente principal de avance o cabeza del incendio, como así, también, en la longitud y ancho total del contorno de propagación.

BIBLIOGRAFÍA

- ANDERSON, H.E. 1983. *Predicting Wind-Driven Wild Land Fire Size and Shape*. USDA Forest Service, RES. Pap. INT-305, Ogden.
- ALBINI, F. 1976. *Estimating Wildfire Behavior and Effects*. USDA Forest Service. Gen.Techn.Rep. INT-30, Ogden. 92p.
- BALL, G.; GUERTIN, P.; VASCONCELOS, M. 1990. FIREMAP: A Dynamic Modeling System. Int. Conf. Forest Fire Research. Coimbra. 12p.
- BROWN, A.; DAVIS, K. 1973. *Forest Fire. Control and Use*. Second Edition, Mc.Graw-Hill, N.York. 686p.
- FORESTRY CANADA. 1992. *Sistema Canadiense de Predicción del Comportamiento del Fuego*. Northwest Region-Forestry Centre, Alberta. 153p.
- JULIO, G. 1994. Apuntes del curso: *Control de Incendios Forestales*. Universidad de Chile. Depto. Manejo Recursos Forestales. 329p.
- ROTHERMEL, R. 1983. *How to Predict the Spread and Intensity of Forest and Range Fires*. USDA Forest Service. Gen.Techn.Rep. INT-143, Ogden. 161p.
- SIEGEL, S. 1956. *Nonparametric Statistics for the Behavioral Sciences*. New York: McGraw-Hill. 127p.
- VAN WAGNER, C. 1969. A simple fire growth model. *For. Chron.* 45 (2): 103-104.