

## **2. LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE CAUSADA POR LOS INCENDIOS DE VEGETACIÓN Y LA SALUD**

### **2.1 INTRODUCCIÓN**

#### **2.1.1 OCURRENCIA MUNDIAL DE INCENDIOS: ESTADÍSTICAS, INCENDIOS RECIENTES DE GRAN MAGNITUD Y PÉRDIDAS DEBIDAS A ESTOS.**

Solo para un número limitado de naciones y regiones se dispone de datos estadísticos confiables sobre la ocurrencia de incendios en zonas silvestres, áreas devastadas y pérdidas. Dentro del hemisferio norte, los datos más completos sobre incendios forestales se recopilan y publican periódicamente para los Estados Miembros de la Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (CEPE). Este conjunto de datos incluye a todos los países de Europa occidental y oriental, de la ex Unión Soviética, Estados Unidos y Canadá. La última serie de datos incluye el periodo 1994-1996 (CEPE/FAO, 1998). Sin embargo, esta información está restringida a incendios forestales; por lo tanto, no incluye la quema prescrita en sistemas de agricultura y pastoreo, que también son una fuente importante de humo.

Algunos países que están fuera de esta región reportan estadísticas de incendios en las páginas de noticias internacionales sobre incendios forestales. Estos datos estadísticos se actualizan en el Global Fire Monitoring Center (GFMC), establecido recientemente en Friburgo, Alemania, en el marco de la primera fase de un inventario mundial de incendios forestales (GFMC, 1999a).

Se ha desarrollado un conjunto global de datos sobre incendios a partir de incendios activos detectados por el sensor de un radiómetro avanzado de muy alta resolución (RAMAR) de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) de los Estados Unidos. Este conjunto de datos proporciona la distribución temporal y espacial de los incendios forestales a lo largo del año. Sin embargo, no brinda una base de datos cuantitativa en función del área devastada, la materia vegetal quemada y las emisiones de gases y partículas generadas. Los sensores espaciales se han usado en un gran número de estudios de casos para determinar las superficies terrestres afectadas y las emisiones producidas por incendios. Así, se dispone de herramientas potenciales para efectuar un inventario cuantitativo de los efectos de los incendios a través de sensores espaciales.

La siguiente información se toma parcialmente de la base de datos del GFMC, el reporte "Fire and Related Environmental Hazards" del Programa de Alerta Temprana del Decenio Internacional de las Naciones Unidas para la Reducción de Desastres Naturales (DIRDN) (Goldammer, 1997) y del estudio preliminar sobre las "Public Policies Affecting Forest Fires, Europe and Temperate-Boreal Asia", de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) (Goldammer, 1999).

## **Principales formas de vegetación afectadas por incendios:**

Los incendios destructivos (incendios no controlados) son comunes en todas las zonas con vegetación. Son causados principalmente por la negligencia y a menudo están asociados con la expansión del fuego usado para el aprovechamiento de terrenos. Los siguientes tipos de quema de vegetación generan humos, que pueden afectar la salud pública:

- incendios destructivos (no controlados) en los bosques;
- quema de pastos tropicales, matorrales y sabanas con árboles;
- conversión de bosques y matorrales en plantaciones, sistemas agrícolas y de pastoreo;
- quema de residuos agrícolas, control de arbustos y maleza en tierras de cultivo y pastoreo. y
- quema prescrita en silvicultura.

### *Incendios destructivos (no controlados) en bosques:*

En los bosques boreales y templados del norte, se producen regularmente incendios destructivos durante los veranos secos. En América del Norte y Euroasia, se queman entre 5 y 20 millones de hectáreas anualmente. En latitudes altas menos pobladas, las fuentes de ignición están dominadas por los rayos, mientras que en las regiones más pobladas, los seres humanos se convierten en la causa dominante. En la región del Mediterráneo, se quema un promedio de 0,6 millones de hectáreas de bosques y otros tipos de terrenos anualmente.

Por lo general, los bosques tropicales ecuatoriales son demasiado húmedos para permitir la propagación de incendios destructivos. Sin embargo, las sequías extremas asociadas con la explotación forestal crean periódicamente condiciones de inflamabilidad, disponibilidad de combustible y propagación de incendios. Estos sucesos ocurren regularmente en bosques del sudeste asiático tropical. Están relacionados con fluctuaciones climáticas cíclicas causadas por la oscilación climática del sur asociada con el fenómeno de El Niño (El Niño-Southern Oscillation) (ENSO). A continuación se presentan algunos ejemplos de incendios de gran escala (catastróficos). Las mayores áreas afectadas por incendios destructivos en bosques tropicales son los biomas forestales estacionales (bosques caducos y semicaducos, a veces también denominados bosques del "monzón"). Aquí, los incendios se producen en intervalos de 1 a 3 años. Los bosques coníferos tropicales submontañosos (bosques de pino) también están sujetos a incendios regulares.

### *Quema de pastos tropicales, matorrales y sabanas con árboles:*

Las sabanas tropicales cubren un área de cerca de 2.300 a 2.600 millones de hectáreas en el mundo. Generalmente, constan de una capa más o menos continua de pasto con árboles y arbustos esparcidos. Existen numerosos tipos de transición entre sabanas y bosques abiertos. Los combustibles superficiales en estos ecosistemas están dominados por pastos y hojas que caen durante la estación seca y periódicamente se queman en intervalos que pueden variar de 1 a cuatro años. La frecuencia de los incendios se ha incrementado en algunas regiones como resultado de una mayor población y un uso más intensivo de los terrenos de pastoreo. El área de las sabanas potencialmente sujetas a incendios cada año es de varios cientos de millones de hectáreas. Como resultado, la quema de sabanas libera cerca de tres veces más emisiones de gas y partículas a la

atmósfera que la quema por deforestación. Se calcula que más de 3.000 millones de toneladas métricas de materia vegetal se queman cada año en las sabanas tropicales.

#### *Conversión de bosques y matorrales a plantaciones, sistemas agrícolas y de pastoreo:*

En los trópicos existen dos tipos comunes de tala forestal para uso agrícola: los cultivos rotativos y la remoción permanente de bosques. En la agricultura con cultivos rotativos, practicada %s de millones de personas en el mundo, las áreas taladas se usan para la agricultura durante algunos años hasta que los rendimientos disminuyen y luego son abandonadas y se rozan nuevas áreas. Las áreas antiguas retornan a la vegetación de bosques. El acortamiento de los ciclos de cultivos rotativos generalmente observado, está asociado con el deterioro de los lugares. Este hecho hace que esta técnica tradicional de uso del terreno sea una de las causas principales de la deforestación tropical a escala global. La remoción permanente de bosques se realiza a fin de convertirlos en tierras de pastoreo o cultivo. En ambos casos, la roza y la quema siguen inicialmente el mismo patrón: los árboles son talados al final de la estación húmeda. Después de la extracción de árboles comercializables y utilizables, se deja que la vegetación se seque durante cierto tiempo para obtener una quema más eficiente.

La conversión de bosques primarios o secundarios en tierras de cultivo y pastoreo permanentes, e incluso en plantaciones de árboles, se ve impulsada por poblaciones humanas en expansión que requieren alimentos y espacios adicionales, pero también por programas de repoblamiento en gran escala y por la especulación de tierras. La cantidad neta de biomasa de la planta, que se combustiona durante el proceso de roza, está en el intervalo de 1 a 2 mil millones de toneladas métricas.

#### *Quema de residuos agrícolas, control de arbustos y maleza en tierras de cultivo y pastoreo:*

Durante la quema, se elimina una cantidad sustancial de residuos agrícolas, por ejemplo, paja y tallos. La magnitud de esta práctica es sumamente difícil de cuantificar debido a su naturaleza dispersa. No existen estadísticas disponibles, principalmente porque esta acción no involucra material de valor económico directo. Se ha calculado que anualmente se queman entre 800 y 1.200 millones de toneladas métricas de residuos agrícolas, lo que hace que esta práctica sea una fuente importante de contaminación atmosférica, principalmente en los trópicos. Por tradición, los incendios también son una práctica común para controlar la intrusión de arbustos y maleza en tierras de pastoreo y cultivo.

#### *Quema prescrita en silvicultura:*

Los incendios prescritos son una herramienta de manejo forestal comúnmente usada, en particular en América del Norte y Australia. Sirven para reducir la acumulación de plantas secas, que es una de las causas principales de los incendios destructivos. También se usan para eliminar el exceso de arbustos en la vegetación, ya que estos compiten con los árboles de los cultivos por los nutrientes. En América del Norte, cerca de 2 millones de hectáreas se queman anualmente debido a incendios prescritos. Cifras de Australia indican que entre 40 y 130 millones de hectáreas se queman anualmente.

La quema prescrita para estabilizar las reforestaciones tropicales de pinos y eucaliptos está cobrando interés. Debido a las cargas más livianas de combustible asociadas con la quema en el subsuelo, la cantidad de materia vegetal consumida por hectárea es relativamente pequeña.

### **Estacionalidad en el uso de fuego para liberar terrenos e incendios destructivos:**

En la bibliografía, a menudo se menciona la "temporada de quema" y se asume que prácticamente ninguna combustión ocurre fuera de estos periodos. En verdad, una gran proporción de quema de bosques y sabanas se realiza durante la estación seca; por consiguiente, esta práctica es sumamente intensiva en el hemisferio norte de noviembre a marzo y en el hemisferio sur de junio a setiembre. Sin embargo, la experiencia en países tropicales muestra que la quema puede observarse dondequiera cuando hay suficiente material vegetal seco. Esto se aplica no solo al fuego utilizado en la cocina y para la calefacción, sino también a quemas de residuos agrícolas y del jardín y a la de áreas ubicadas alrededor de las viviendas para controlar insectos, malezas, serpientes, etc. y, a menudo a quemas realizadas sólo por el placer de observar las llamas y el humo. Al final de la estación lluviosa, muchos agricultores esperan que las áreas rozadas se sequen lo suficiente para quemarse. Esto conduce a un brote de incendios a finales de mayo y principios de junio en la parte del Brasil correspondiente al hemisferio sur. Por lo general, las quemas de roza forestal en gran escala se inician al final de la estación seca para tener obtener combustible más seco y una mejor eficiencia de combustión (que se definirá más adelante).

### **Incendios recientes de gran magnitud y pérdidas relacionadas con ellos**

Solo ocasionalmente se dispone de informes detallados con datos finales sobre pérdidas causadas por los incendios forestales y las otras zonas de vegetación (incendios en zonas silvestres), que aborden los efectos en la salud humana. La razón principal de la falta de datos confiables es que la mayoría de beneficios y pérdidas por incendios producidos en zonas silvestres incluyen valores intangibles que no pueden estimarse por su uso o valor comercial, como la biodiversidad, el funcionamiento de ecosistemas, la erosión, etc. En algunos casos, se han calculado valores comerciales como las pérdidas de ingresos por la actividad maderera y turística.

- Los grandes incendios destructivos producidos en Borneo durante la sequía por la oscilación climática del sur asociada con El Niño de 1982 a 1983 consumieron más de 5 millones de hectáreas de bosque y tierras agrícolas. La pérdida de valores madereros sumó cerca de 8,3 mil millones de dólares y el total de valores madereros y no madereros, incluidos los costos de rehabilitación, fue de \$9,075 mil millones.
- La primera evaluación de los daños causados por los incendios de 1997 y 1998 en Indonesia sobre 4 a 5 millones de ha fue la siguiente: \$4,5 mil millones (daños en la salud de corto plazo; pérdidas en la producción industrial, el turismo, el transporte aéreo, terrestre y marítimo; disminución de la pesca; costos de control de incendios; pérdidas de productos agrícolas y madera y de beneficios forestales directos e indirectos; EEPSEA, 1998). La evaluación más reciente de las imágenes obtenidas por vía satélite revela que en las islas indonesias de Sumatra y Kalimantan (Borneo) cerca de 9 millones de hectáreas de vegetación se consumieron durante 1997 y 1998.

- Los incendios producidos en México durante el episodio de 1998 obligaron al gobierno local a interrumpir la producción industrial para reducir la contaminación adicional mientras se mantuvo el *smog* generado por los episodios. Las pérdidas diarias en la producción se estimaron en \$8 millones.
- El Miércoles de Ceniza de Australia de 1983:
  - mortalidad humana: 75;
  - viviendas quemadas: 2.539, y
  - ganado doméstico devastado: casi 300.000.
- Incendios extensos en bosques y sabanas en Costa de Marfil, 1982 y 1983:
  - mortalidad humana: > 100;
  - superficie terrestre arrasada: 12 millones de hectáreas;
  - plantaciones de café consumidos: 40.000 hectáreas, y
  - plantaciones de cacao consumidas: 60.000 hectáreas.
- Incendios forestales en el Nordeste de China durante la sequía de 1987:
  - mortalidad humana: 221;
  - bosques devastados: 1,3 millones de hectáreas;
  - personas que perdieron sus viviendas: 50.000, y
  - mortalidad humana total durante 1950 a 1990 (en toda China): 4.123.
- Incendios en la Unión Soviética durante la sequía de 1987:
  - bosques devastados: 14,5 millones de hectáreas.
- Incendios en los bosques y las estepas de Mongolia (1996-1997):
  - área afectada en 1996: 10,7 millones de hectáreas;
  - mortalidad humana: 25;
  - animales domésticos devastados: 7.000;
  - establos o casas incendiadas: 576/210;
  - evaluación de daños: \$2 mil millones, y
  - área afectada en 1997: 12,4 millones de hectáreas
- Parque Nacional de Yellowstone (Estados Unidos) 1988:
  - costos de supresión: \$160 millones, y
  - pérdidas en ingresos turísticos entre 1988 y 1990: \$60 millones.

### **Impacto del humo generado por los incendios en la salud humana**

La contaminación proveniente del humo generado por incendios en zonas silvestres ocasionalmente crea situaciones que afectan la salud pública y la economía local. En diversos incendios se han reportado muertes causadas en la población en general por altas concentraciones de monóxido de carbono solo o en combinación con otros contaminantes; por ejemplo, los incendios forestales en China en 1987. Los estudios epidemiológicos indican una asociación entre niveles de contaminantes del aire (especialmente, contaminación del aire con partículas) producidos por incendios en zonas silvestres y una variedad de efectos adversos en la salud, incluido el incremento de la mortalidad.

El uso del fuego en la conversión forestal y otras formas de roza, así como la propagación de incendios destructivos a partir de estas actividades, son muy comunes en países tropicales. Durante los años ochenta y noventa, la mayoría de problemas de contaminación se observaron en la cuenca amazónica y en el sudeste asiático. Los episodios graves de *smog* recientes en el sudeste asiático ocurrieron en 1991, 1994 y 1997, cuando los incendios generados por la roza y la expansión de incendios destructivos en Indonesia y países vecinos crearon una capa de *smog* en toda la región que duró varias semanas. En 1994, las plumas de humo generadas por los incendios producidos en Sumatra (Indonesia) redujeron el promedio diario de visibilidad horizontal mínima en Singapur a menos de 2 km; a finales de setiembre de 1994, descendió hasta 500 metros. Al mismo tiempo, la visibilidad en Malasia descendió a 1 km en algunas partes del país. En 1997, el humo proveniente de los incendios incrementó los niveles de contaminación del aire con partículas durante varios meses en muchas áreas (proceso que se inició a finales de julio de 1997), con un episodio grave que ocurrió durante la mayor parte de setiembre. Durante este periodo, los niveles de partículas en algunas áreas fueron 15 veces superiores a los niveles normales. Por ejemplo, en la ciudad de Kuching (provincia de Sarawak, Malasia), se registró una concentración promedio de  $MP_{10}$  de 24 horas (masa de partículas con diámetros aerodinámicos menores que 10 micrómetros) de  $930 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . El gobierno estuvo a punto de evacuar a 300.000 habitantes de la ciudad (Brauer y Hisham-Hashim, 1998).

En las mismas regiones, el humo producido por incendios causó una interrupción del tránsito aéreo local e internacional. En 1982 a 1983, 1991, 1994 y 1997 a 1998, los episodios de *smog* en el sudeste asiático ocasionaron el cierre de aeropuertos y la interrupción del tránsito marino; por ejemplo, en el estrecho de Malaca y a lo largo de la costa y los ríos de Borneo. A finales de 1997, se produjeron diversos accidentes marinos y aéreos relacionados con el humo. La pérdida de una aeronave y 234 vidas humanas durante setiembre de 1997 en Sumatra se atribuyó parcialmente a problemas en el tránsito aéreo por episodios de *smog*.

Los incendios destructivos producidos en vegetación contaminada con elementos radiactivos conducen a una redistribución no controlada de radionucleidos; por ejemplo, radionucleidos de larga vida como el cesio ( $^{137}\text{Cs}$ ), el estroncio ( $^{90}\text{Sr}$ ) y el plutonio ( $^{239}\text{Pu}$ ). En las regiones más contaminadas de Ucrania, Belarús y la Federación Rusa (regiones de Kiev, Zhitomir, Rovno, Gomel, Mogilev y Bryansk), los bosques predominantes son de pinos jóvenes, de edad media y de pino duro, que pueden generar peligro de incendios. En 1992, se produjeron incendios destructivos graves en la región de Gomel (Belarús) y se propagaron hasta alcanzar los 30 km de radio de la planta de energía de Chernobyl. Las investigaciones revelan que en 1990, la mayoría de radionucleidos  $^{137}\text{Cs}$  estaban concentrados en la basura de los bosques y la capa mineral superior del suelo. En los incendios de 1992, los radionucleidos se elevaron hacia la atmósfera. Dentro de la zona de 30 km, el nivel de cesio radiactivo en aerosoles aumentó 10 veces. Para mayor información sobre la resuspensión de material radiactivo proveniente de incendios forestales, véase el amplio análisis de Dusha-Gudym (1996).

### **Humo generado por la quema doméstica de combustibles biológicos**

Se debe mencionar la quema doméstica de combustibles biológicos ya que su contribución a la contaminación del aire ambiental a menudo se mezcla con las emisiones provenientes de incendios destructivos y de incendios causados por el uso del terreno, especialmente en países en desarrollo.

Los combustibles biológicos ► madera, carbón vegetal y residuos agrícolas► son una fuente importante de energía en el mundo en desarrollo. Por ejemplo, en África occidental, el combustible de madera representa entre 60 y 90 % de la energía consumida. Los países en desarrollo donde la proporción de biomasa es menor (alrededor de 60%) son los productores de petróleo, los que tienen alto potencial hidroeléctrico o estabilidad económica. La producción de carbón vegetal para uso doméstico e industrial también se ha convertido en una opción atractiva para el uso directo de madera como combustible. A diferencia de los incendios de vegetación de quema abierta que a menudo se restringen a varios meses durante la temporada seca, la quema doméstica de combustibles biológicos se realiza durante todo el año. Un análisis mundial preliminar muestra que el carbono liberado en la fuente como CO<sub>2</sub> y CO mediante la quema de biomasa doméstica es de 1,6 mil millones de toneladas métricas (Ludwig y otros, 1999).

## **2.1.2 LA EVALUACIÓN DE PELIGROS COMO BASE DEL ANÁLISIS DE RIESGOS**

Los sistemas de alerta temprana para el control de incendios y humos requieren información de varios niveles para ser aplicados a escala local, regional y mundial. La información sobre las condiciones actuales del clima y la sequedad de la vegetación es el punto de partida de toda evaluación predictiva. A partir de esta información, se inicia la evaluación del riesgo de incendios destructivos y se puede pronosticar el comportamiento de los incendios en curso y sus efectos. Los pronósticos de incendios de largo y corto alcance permiten evaluar el riesgo y la gravedad de los incendios dentro del periodo de predicción. Las tecnologías avanzadas que utilizan sensores remotos permiten pronosticar incendios en relación con el clima y evaluar la sequedad de la vegetación en áreas amplias (desde el ámbito local hasta el mundial), con una economía y una exactitud que no pueden lograrse mediante la recolección en el terreno y la difusión de información. Los sistemas de sensores remotos también tienen la capacidad de detectar nuevos incendios destructivos, monitorear incendios destructivos activos y, junto con pronósticos del clima relacionados con los incendios, sirven como herramientas, de alerta temprana para incendios destructivos extremos (PNUMA, 1999).

### **Clasificación de peligros de incendios (evaluación de riesgos de incendios)**

Las autoridades responsables del control de incendios han creado sistemas de clasificación de los peligros de incendios para advertir sobre la ocurrencia y desarrollo de incendios destructivos extremos. Los factores que predisponen a un lugar específico para sufrir la amenaza extrema de un incendio destructivo cambian con el tiempo medido en décadas, años, meses, días y horas. El concepto de “peligro de incendio” incluye factores tangibles e intangibles, procesos físicos y riesgos. Por definición:

*"Peligro de incendio" es un término general usado para expresar la evaluación de los factores constantes y variables que afectan el inicio, propagación, intensidad y dificultad de control de los incendios y el impacto que estos tienen.*

Los sistemas de clasificación de peligros de incendios generan índices cualitativos y/o cuantitativos sobre el potencial del fuego que se pueden usar como guías en diversas actividades; incluida la

alerta temprana de las amenazas de incendio. En todo el mundo se han desarrollado diferentes sistemas de complejidad variable que reflejan la gravedad del riesgo de incendios y la necesidad de controlarlos.

Si bien un índice único sobre el peligro de incendios puede ser útil para detectar signos anticipados de la actividad de incendios destructivos en áreas amplias, es imposible transmitir una imagen completa del peligro diario de incendio a partir de este único dato. Por ello, es necesario descomponer la clasificación de peligros de incendio en sus componentes principales para apreciar dónde encajan los factores individuales. Estos se clasifican en tres categorías de alerta temprana de precursores de incendios:

- cambios en la carga de combustible;
- cambios en la disponibilidad de combustible, y
- cambios en las variables climáticas que influyen en la propagación e intensidad del fuego.

Los detalles sobre estos sistemas de alerta temprana se presentan en los documentos base de estas guías.

### **Uso de datos satélite como ayuda para evaluar el potencial de incendios**

La cantidad de vegetación viva y su contenido de humedad tienen un efecto importante en la propagación y la gravedad de los incendios destructivos. La observación directa del verdor de la vegetación es esencial para cualquier sistema de alerta temprana. Hoy en día, la evaluación de la humedad de la vegetación viva depende de diversos métodos de muestreo manual. Si bien estas mediciones son muy exactas, son difíciles de obtener en áreas amplias. Por ello, no llegan a representar los cambios en los patrones de verdor y humedad de la vegetación a lo largo de la región.

Los satélites meteorológicos actuales de órbita polar brindan información sobre el verdor y otros parámetros necesarios para el control y evaluación del impacto de los incendios, con cobertura global diaria y resolución espacial. Esto se logra a través de radiómetros de escaneo de ángulos amplios con imágenes instantáneas de los campos; por ejemplo, el RAMAR de la NOAA, que mide la radiación reflejada y emitida en canales múltiples como el visible, el casi-infrarrojo, el medio-infrarrojo y el termal. Debido a su disponibilidad, resolución espacial, características espectrales y bajo costo, el RAMAR se ha convertido en el conjunto de datos de satélite más ampliamente usado para la detección y monitoreo regional de incendios. Actualmente, los datos del RAMAR se usan para el análisis de la vegetación y en la detección y caracterización de incendios de llamas activas, plumas de humo y huellas de incendio en el terreno.

Desde 1989 se ha investigado la utilidad del índice normalizado de vegetación (INV) para monitorear los cambios estacionales en la cantidad y humedad de la vegetación viva. Los datos diarios del RAMAR se combinan en imágenes semanales de las que se borra la mayoría de nubes y otros efectos similares. El centro de datos de los Sistemas de Observación de Recursos Terrestres (EROS) de la US Ecological Survey (USGS, 1999a) produce una imagen del INV de los Estados Unidos. Estas imágenes semanales se procesan más adelante, en relación con el potencial de

incendios en nuevas imágenes que son interpretadas con mayor facilidad por los encargados del control de incendios. Se puede acceder a estas imágenes por Internet.

### **2.1.3 PRONÓSTICOS DEL CLIMA EN RELACIÓN CON LOS INCENDIOS**

Se requieren mejores pronósticos del clima en relación con los incendios en una variedad de escalas de tiempo y espacio. En escalas amplias, los pronósticos exactos del clima en relación con los incendios se pueden aprovechar en la planificación de largo plazo para la asignación de recursos escasos. En escalas pequeñas, estos pronósticos se pueden usar en la alerta, presentación y planificación del despliegue del equipo de supresión de incendios. En escalas aún más pequeñas, los pronósticos pueden ser útiles en la lucha contra incendios y para determinar los periodos óptimos para realizar incendios prescritos en bosques y tierras agrícolas.

Los pronósticos mundiales y regionales del clima en relación con los incendios y la precipitación actualmente están disponibles en el sitio *web* del Experimental Climate Prediction Center (ECPC) del Scripps Institute of Oceanography (ECPC, 1999). También están en proceso pronósticos experimentales mundiales y regionales para otras regiones. Se están extrayendo variables adicionales de la superficie terrestre, tales como nieve, suelo y humedad de la vegetación y pronto se proporcionarán como parte de los pronósticos. Estas variables adicionales se requieren para transformar los índices del clima en relación con los incendios en índices de peligros de incendios, que toman en cuenta el estrés de la vegetación.

## **2.2 CARACTERIZACIÓN DE LAS FUENTES: PROCESOS DE EMISIÓN Y POSTEMISIÓN**

### **2.2.1 INTRODUCCIÓN**

La quema de biomasa contribuye de manera importante a la contaminación del aire con partículas y gases tóxicos y de invernadero en todo el mundo. En muchos casos, esto resulta en una exposición humana a altos niveles de diversos contaminantes del aire, pero a diferencia de algunas fuentes producidas por el hombre, dicha quema está mal cuantificada. La naturaleza de la quema de biomasa es tal que la combustión no se completa y, como resultado, se emite un gran número de contaminantes. Los contaminantes del aire (o sus precursores) que a menudo tienen mayor conexión con las exposiciones de la población en general son el material particulado (MP), los óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), el dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ), y el monóxido de carbono (CO). Por ejemplo, las emisiones de compuestos basados en azufre y nitrógeno dependen de la eficiencia del proceso de combustión y, la composición química de la vegetación quemada.

Después de la emisión y durante el transporte, las emisiones de la combustión experimentan procesos de transformación que generan cambios fisicoquímicos en los compuestos. Si bien la exposición a la mayoría de contaminantes del aire puede tener efectos potencialmente

perjudiciales en la salud, pruebas científicas recientes indican que las partículas transportadas por el aire, especialmente las muy pequeñas (con diámetros aerodinámicos menores de 2,5  $\mu\text{m}$ ), podrían tener efectos mayores. Estas partículas tienen mayor probabilidad de sedimentarse en las partes más profundas de las vías respiratorias humanas, donde pueden tener una serie de efectos debido a su naturaleza física, química, toxicológica o carcinógena. La importancia relativa del daño que producen estas partículas en la salud humana y su abundancia relativa en las emisiones son razones por las cuales reciben mayor atención que otros contaminantes cuando se considera la exposición a plumas de humo provenientes de la quema de biomasa. Estimados razonables de la exposición a otros compuestos pueden obtenerse de razones de compuestos tóxicos de aire en relación con CO, CH<sub>4</sub> y MP<sub>2,5</sub> (masa de partículas con diámetros menores a 2,5 micrómetros) a partir de la caracterización de uno o dos compuestos. Desde luego, esto presupone que las emisiones provienen de la quema de biomasa o que la contribución de la quema de biomasa puede ser desagregada. En general, los enfoques integrales estandarizados para tratar los riesgos potenciales de las emisiones de incendios de biomasa para la salud pública deben incluir:

- (a) caracterización de la magnitud y composición de las emisiones y su transformación durante el transporte;
- (b) cuantificación de las concentraciones resultantes de los contaminantes del aire tóxico en el aire de áreas pobladas;
- (c) evaluación de los posibles escenarios de exposición para las poblaciones afectadas (en interiores y exteriores), y
- (d) Evaluación de los riesgos causados por estas exposiciones para la salud.

## **2.2.2 FACTORES QUE AFECTAN LA COMBUSTIÓN INCOMPLETA**

La eficiencia de combustión se define como la razón de carbono liberado como CO<sub>2</sub>. Para fines prácticos, la eficiencia de combustión modificada se define como la razón de carbono liberado como CO<sub>2</sub> dividido entre la suma de CO<sub>2</sub> y CO. Al dividir la cantidad de CO liberado entre el CO<sub>2</sub> liberado se obtiene una medida aproximada de la eficiencia de combustión. Las razones del CO en relación con el CO<sub>2</sub> varían de aproximadamente 0,04 para la combustión con llama a más de 0,25 para la combustión sin llama. La combustión sin llama se limita a situaciones donde el combustible es consumido por procesos que no generan llama, y por lo general, son de muy baja intensidad. Produce altas emisiones de material particulado, CO y otros compuestos de la combustión incompleta. Las propiedades del combustible pueden afectar en gran medida la cantidad de combustión sin llama y la mezcla global de emisiones. Por ejemplo, en ecosistemas de sabanas, 90% de la vegetación podría ser consumida por la combustión con llama. Esto sería muy diferente de un incendio de vegetación como turba, troncos podridos o residuos de madera, donde 90% se consume a través de la combustión sin llama. Se debe observar que la combustión de turba puede generar más de 17 toneladas/ha-cm métrico consumido, que se traducen en hasta 1,5 toneladas métricas de CO/ha-cm de profundidad de turba consumida por un incendio (según la densidad de la biomasa).

### 2.2.3 CONTAMINANTES GENERADOS POR LA COMBUSTIÓN

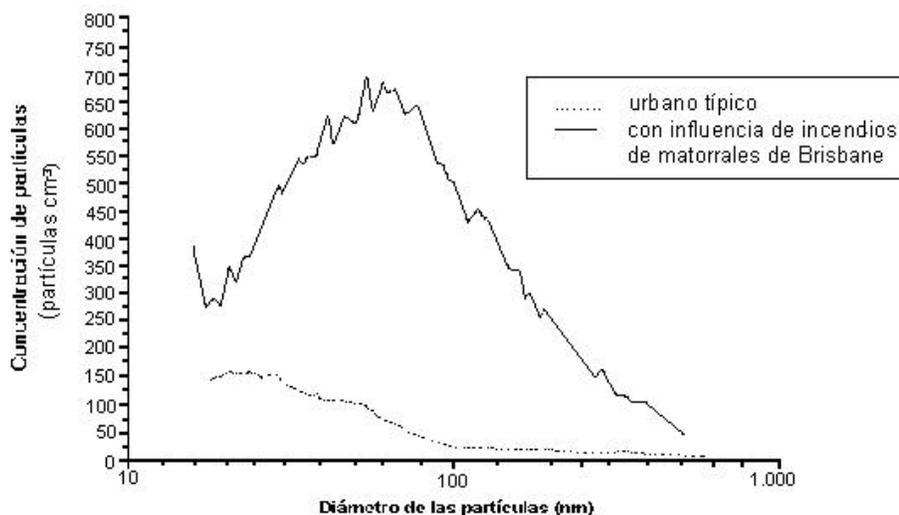
En el estudio del humo y sus efectos en la salud de los bomberos que actúan contra incendios destructivos, Ward y sus colaboradores discutieron varias emisiones de la combustión y establecieron clases de estas emisiones (Ward y otros, 1989). Estas sustancias se clasifican del siguiente modo:

1. material particulado (MP),
2. hidrocarburos aromáticos polinucleares (HAP),
3. monóxido de carbono (CO),
4. aldehídos,
5. ácidos orgánicos,
6. compuestos orgánicos volátiles (COV) y semivolátiles ,
7. compuestos basados en nitrógeno y azufre,
8. radicales libres,
9. ozono y oxidantes fotoquímicos,
10. fracciones inorgánicas de las partículas.

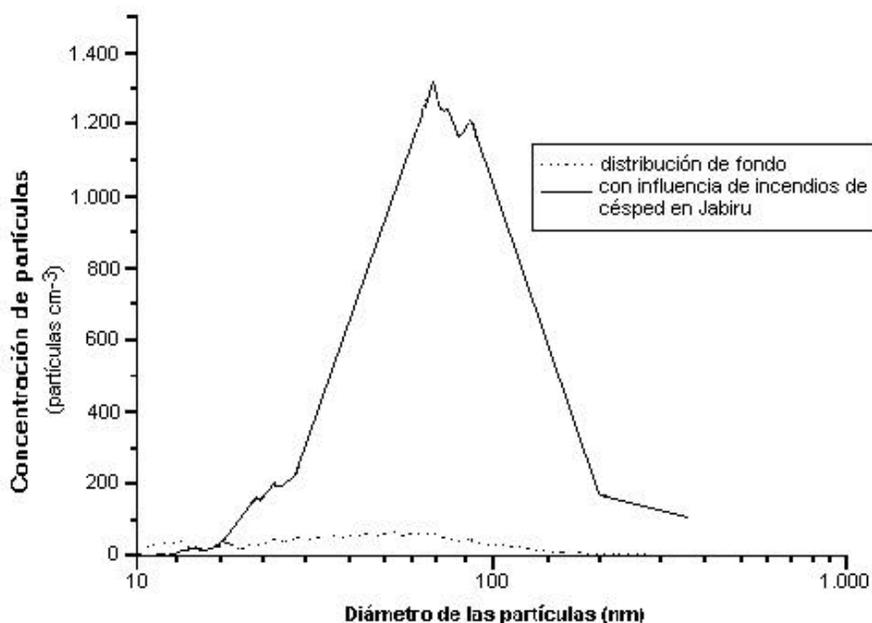
1) **El material particulado** de incendios destructivos es altamente visible, afecta la calidad del aire y tiene un efecto potencialmente considerable en la salud humana. Los incendios forestales producen gran cantidad de partículas con resistencias en la fuente que, en algunos incendios de grandes proporciones exceden 0,6 toneladas métricas por segundo (Wade y Ward, 1973). En función del número, la mayoría de partículas emitidas por la quema de biomasa son ultrafinas, y solo una pequeña fracción está en el intervalo de tamaño más grande (figura 2.2.3-1a, 1b; Morawska y otros [1998]; Morawska y Thomas [1999]). Lo mismo sucede en emisiones de cualquier otra fuente de combustión. Las partículas ultrafinas se definen como aquellas con un diámetro inferior a 0,1 micrómetro. Las partículas finas son las más pequeñas que 2,5 micrómetros y las gruesas, las más grandes que 2,5 micrómetros. Las partículas ultrafinas se aglomeran rápidamente para formar partículas finas.

La masa de partículas de la quema de biomasa puede separarse en dos modalidades: partículas finas con un diámetro promedio de 0,3 micrómetros que por lo general, se producen durante la combustión del material orgánico y partículas gruesas con un diámetro medio mayor de 10 micrómetros. La investigación, tanto a partir de muestras en el terreno (Ward y Hardy, 1989) como del aire, presenta la distribución bimodal con una fracción pequeña de la masa total (menos de 10 %) entre 2 y 10 micrómetros (Radke y otros, 1990). Los datos disponibles indican que la mayoría de material particulado producido por la quema de combustibles fósiles o de la biomasa se encuentra en partículas de menos de 2,5 micrómetros de diámetro aerodinámico (EPA, 1998a). Las partículas finas representan entre 90 y 100% del material particulado. La combustión sin llama libera partículas más finas que la combustión con llama.

**Figura 1a. Distribución de las partículas según su tamaño en el centro de la ciudad de Brisbane a 20 km a sotavento de un incendio de matorrales y distribución de partícula típica en Brisbane sin influencia de incendios de matorrales**



**Figura 1b. Distribución de las partículas según su tamaño en Jabiru a 200 m a sotavento de un incendio de césped y distribución de partículas de fondo sin influencia de incendios de césped**



**Figura 2.2.3.-1a, 1b (Morawska y Thomas (1999))**

Las partículas finas constan de 60 a 70% de carbono orgánico (Ward y Hardy, 1989). Generalmente, otro 2 a 15% es carbono gráfico y el resto es material de ceniza inorgánica (Ward y Core, 1984). Muchos compuestos carcinógenos conocidos están contenidos en la fracción de carbono orgánico y se sabe que las partículas llevan elementos traza absorbidos, elementos tóxicos condensados y radicales posiblemente libres.

Para el tema de la exposición pública, las partículas finas son de interés prioritario. La investigación reciente (resumida en EPA, 1998a; Wilson y Spengler, 1996) ha encontrado pruebas de incrementos pequeños pero significativos en la mortalidad debido a la exposición a bajos niveles de MP<sub>10</sub>. Se ha encontrado una mayor correlación para MP<sub>2,5</sub> que para MP<sub>10</sub> entre salud y material particulado transportado por el aire (Dockery y otros, 1993). Debido a que la mayoría del número y la masa de material particulado generado por la quema de biomasa está en el intervalo de partículas finas (por debajo de 2,5 micrómetros), se requiere medir la fracción MP<sub>2,5</sub> para poder caracterizar mejor el riesgo para la salud.

**Los hidrocarburos aromáticos polinucleares (HAP)** son una clase de compuestos contenidos en la fracción orgánica del material particulado fino. Algunos de los compuestos de HAP asociados con las partículas son carcinógenos. Recientemente, la OPS (1998a) publicó una compilación de efectos de HAP no heterocíclicos seleccionados en la salud (1998a). Los HAP considerados incluyeron acenafteno, acenaftileno, antraceno, benzo[a]pireno, benz[a]antraceno, dibenz[a,h]antraceno, fluoranteno, naftaleno, fenantreno y pireno. El HAP más estudiado es el benzo[a]pireno B[a]P, una sustancia fisiológicamente activa que puede contribuir al desarrollo de cáncer en células humanas. A pesar de la presencia conocida de sustancias carcinógenas en las partículas producidas por la combustión de la biomasa, los datos disponibles no indican un mayor riesgo de cáncer incluso con niveles muy altos de exposición. Estas pruebas incluyen estudios de exposición de largo plazo a altos niveles de humo procedente de la biomasa utilizada en la cocina doméstica en países en desarrollo. Aún más, si bien el humo de la biomasa es claramente mutagénico, lo es en un grado mucho menor que los gases emitidos por los escapes de vehículos automotores, sobre una base de masa equivalente (Brauer, 1998). Los compuestos de HAP observados en el humo de incendios prescritos para la reducción de troncos (residuos de madera) y la quema de hojas de pino en laboratorios incluyen las siguientes especies (Ward y otros, 1989; McMahan y Tsoukalas, 1978; DeAngelis y otros, 1980): antraceno, antantreno-dibenzopireno, benz[a]antraceno, 1,2-Benzantraceno, benzo(a)fluoranteno, benzo(a)pireno, benzo(e)pireno, benzo(b/j/k)orantenos, benzofluoranteno, benzo(ghi)fluoranteno, benzo[ghi]perileno, criseno, metilantracenos, dibenzantracenos-dibenzfenantrenos, fluoranteno, indenopireno, fenantreno, perileno, pireno.

Para propósitos comparativos, se recogió un conjunto de muestras de aire ambiental en Sumatra, Indonesia del 4 al 8 de noviembre de 1997 (Pinto y otros, 1998a). Este conjunto de datos dispersos indica que las concentraciones de HAP podrían ser mayores que las registradas para la reducción de troncos y humos provenientes de la quema de hojas de pino por un factor de 2 a 5. No todos los compuestos enumerados tienen igual carcinogenicidad. Se han desarrollado más datos para B[a]P que para otros compuestos de HAP en el caso del humo proveniente de incendios en zonas silvestres. Ward y otros (1989) encontraron que los factores de emisión para B[a]P se incrementaron proporcionalmente a la densidad de vegetación viva que cubre las

unidades de incendio prescritas. Esto no se ha comprobado para otros ecosistemas con vegetación viva afectados por combustiones con llama.

Los compuestos de HAP se sintetizan a partir de fragmentos de carbono en grandes estructuras moleculares en ambientes con bajo contenido de oxígeno, como ocurre dentro de la llama, en la región rica en combustible. Si la temperatura no es adecuada para que los compuestos se descompongan al salir de la llama, se liberan a la atmósfera y se condensan o se adsorben en la superficie de las partículas. Se sabe que muchos sistemas de combustión producen compuestos de HAP y la quema de combustibles forestales es considerada como una de estas fuentes. Poco se conoce acerca de las condiciones de combustión en incendios destructivos, pero experimentos recientes indican que las emisiones no difieren mucho de los incendios prescritos cuando las condiciones de quema son similares. Las pruebas indican que en los incendios secundarios de baja intensidad, la razón de benzo[a]pireno en relación con las partículas es mayor 20 veces que en los incendios grandes (McMahon y Tsoukalas, 1978). Para estufas de madera, se estableció una relación entre la tasa de quema y la emisión de HAP. De manera específica, a medida que se incrementó la tasa de quema, disminuyeron las emisiones orgánicas totales, pero aumentó la proporción de HAP. De Angelis y otros (1980) encontraron que la tasa de emisión de HAP era más alta en un intervalo de temperatura de 500 a 800 °C. Esto sería compatible con los resultados de incendios secundarios de baja intensidad de McMahon y Tsoukalas (1978).

El **monóxido de carbono** es un gas tóxico incoloro e inodoro producido por la combustión incompleta de combustibles de la biomasa, y es menos abundante que el CO<sub>2</sub> y el vapor de agua. La carboxihemoglobina se crea en la sangre de los seres humanos en respuesta a la exposición a CO, que reemplaza la capacidad de los eritrocitos para transportar oxígeno. Por lo general 3 a 4 horas de exposición a concentraciones de CO de 35 ppm generan un nivel de 5% de carboxihemoglobina, que puede generar signos de desorientación o fatiga en las personas.

El CO se produce en mayor abundancia a partir de la combustión sin llama de los combustibles forestales. Inmediatamente después de que cesa la combustión con llama, se generan niveles máximos de CO. Estos fenómenos coinciden con actividades de supresión, especialmente cuando se usan métodos de ataque directo. A medida que ceden las llamas, se libera CO en la tasa más alta y por lo general, se mantiene en esta tasa durante los primeros minutos del periodo de cese. Para incendios en condiciones intensas de sequía, la combustión sin llama puede ser autosostenida y consumirse en la tierra vegetal, y en algunos casos, en el suelo, cuyo componente orgánico constituye más de 30% del total. Se pueden producir grandes cantidades de humo en condiciones graves, que a veces se mantienen durante días y semanas.

**Aldehídos.** Ciertos aldehídos son compuestos extremadamente irritantes para las mucosas del cuerpo humano. Algunos, como el formaldehído, son potencialmente carcinógenos y, en combinación con otras sustancias irritantes, pueden incrementar el riesgo carcinógeno de la exposición. El formaldehído es uno de los compuestos que se produce en mayor abundancia y es liberado de manera proporcional a muchos de los demás compuestos de la combustión incompleta. En el cuerpo humano, el formaldehído se transforma rápidamente en ácido fórmico, que se elimina muy lentamente. La capacidad de las células segregadoras en los pulmones para absorber las bacterias extrañas disminuye a través de la exposición a compuestos de aldehídos, que pueden acentuar las infecciones del aparato respiratorio.

La acroleína, otro aldehído, también se emite durante la combustión incompleta de combustibles forestales. En el humo producido por los cigarrillos, la acroleína es cerca de 10 veces más abundante que el formaldehído. Según Dost (1986), las concentraciones de acroleína pueden ser tan altas como 0,23 a 23 mg/m<sup>3</sup> cerca de los incendios y pueden incrementar el carácter irritante del humo cerca de las líneas de incendio. Los niveles umbral de acroleína que causan irritación y efectos en la salud son 0,07 mg/m<sup>3</sup> para la percepción de olor, 0,13 mg/m<sup>3</sup> para la irritación de los ojos, 0,3 mg/m<sup>3</sup> para la irritación nasal y ocular y 0,7 mg/m<sup>3</sup> para la tasa de respiración disminuida (OMS, 1991). En estudios realizados con animales, se observó que la función de las vías respiratorias y los efectos histopatológicos son de 0,5 a 0,8 mg/m<sup>3</sup> (exposición continua, OMS, 1991). Los aldehídos han sido difíciles de cuantificar para incendios forestales y aún existen muchos temas que deben aclararse. La investigación reciente de Reinhardt (1994) indica que la acroleína se produce proporcionalmente al formaldehído. Por otro lado, Yokelson y otros (1996), a través de una técnica analítica muy directa, no fueron capaces de identificar la acroleína en una concentración tan alta como aquella reportada por Reinhardt (1994) y su presencia fue mucho menos abundante que el formaldehído.

Los **ácidos orgánicos** se emiten durante la quema de combustibles de la biomasa. Yokelson y otros (1997) y McKenzie y otros (1995) han hecho progresos significativos al caracterizar algunas de las emisiones de ácidos orgánicos entre los que se incluyeron el ácido acético y el fórmico, y encontraron razones molares de CO de  $7,4 \pm 6,2$  y  $1,5 \pm 1,5$ , respectivamente. A partir de razones molares de diferentes compuestos de aire tóxico en relación con el CO, McKenzie y otros (1995) reportaron posibles niveles de exposición que estuvieron muy por debajo de los valores promedio ponderados en el tiempo (TWA) basados en una exposición pico sufrida por bomberos, de 54 ppm (Reinhardt, 1994). Se debe señalar que no se han determinado los efectos sinérgicos de estos y otros compuestos.

**Compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles.** Muchos de los compuestos presentes en el humo contienen presiones de vapor significativas a temperaturas ambiente. Algunos se dividen entre la fase gaseosa y líquida o sólida a temperatura ambiente; por ejemplo, el benceno, el naftaleno y el tolueno. Se sabe que los incendios producen una variedad de estos compuestos, pero no se los ha caracterizado en su totalidad. Los compuestos de fenol son importantes ya que son irritantes muy fuertes y son producidos en abundancia a partir de la oxidación parcial de combustibles de la celulosa. Otros compuestos de HAP de bajo peso molecular están contenidos en la clase de compuestos semivolátiles. Debido a la volatilidad y, en algunos casos, reactividad de estos compuestos, se requieren protocolos especiales de muestreo, que incluyan la adsorción de carbono vegetal, de polímeros porosos y el muestreo integral de aire. Estos compuestos presentan dificultades para el muestreo y se requieren métodos sustitutivos para correlacionar las exposiciones de los componentes más volátiles con los semivolátiles. A menudo, se producen gases de metano y monóxido de carbono de manera proporcional a otros compuestos de la combustión incompleta y pueden servir como indicadores de su abundancia.

Los **compuestos basados en nitrógeno y azufre** se producen, como su nombre lo indica, a partir de la combustión de la vegetación que contiene nitrógeno y azufre, respectivamente. La combustión sin llama produce compuestos reducidos de nitrógeno tales como NH<sub>3</sub>, mientras que la combustión con llama produce óxidos de nitrógeno. Si bien es posible que las llamas alcancen temperaturas donde el nitrógeno molecular se puede disociar en la atmósfera, esto no es muy

común y se cree que ocurre solo en la mayoría de incendios destructivos de gran intensidad. Las investigaciones realizadas por Yokelson y otros (1996) y Lobert y otros (1991) han demostrado la relación que existe entre la eficiencia de combustión y la descarga de amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) y compuestos oxidados de la combustión. Encontraron que a medida que la liberación de CO se incrementa en relación con el  $\text{CO}_2$ , la emisión de  $\text{NH}_3$  aumenta en relación con el  $\text{NO}_x$ . Se cree que la liberación de disulfuro de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}_2$ ) en relación con el  $\text{SO}_2$  sigue una relación similar. Se debe recalcar que los compuestos basados en nitrógeno y azufre se producen proporcionalmente al contenido de estos elementos en la vegetación afectada por los incendios y como una función de la eficiencia de combustión para el incendio.

Los **radicales libres** se producen en abundancia a través de la quema de combustibles forestales. La pregunta es durante cuánto tiempo persisten estos materiales en la atmósfera y cuál es su reactividad cuando entran en contacto con los tejidos humanos. La mayoría de grupos de radicales libres experimentan una condensación durante los pocos segundos que toma la mezcla de gases en salir de la llama, lo cual debería de reducir la toxicidad global del humo. Sin embargo, algunos radicales libres persisten hasta 20 minutos después de la formación lo que puede ser preocupante en el caso de personas expuestas a aerosoles en los alrededores de los incendios. Aún no se sabe cuánto material orgánico permanece en estado de radical libre reactivo.

Cerca de los incendios, no se esperarían concentraciones de **ozono** suficientemente altas para generar preocupación. El ozono se forma a través de un proceso fotoquímico cerca de la parte superior de las plumas de humo bajo condiciones elevadas de luz solar. En general, lo hace en situaciones donde el humo queda atrapado en los valles o bajo inversiones de la temperatura de la atmósfera, o ambos. El personal que controla incendios y trabaja en zonas elevadas se puede encontrar ante altos niveles de ozono. Cualquier esfuerzo por caracterizar la exposición de las personas al humo debe dar cuenta de la exposición potencial al ozono del personal que trabaja en elevaciones cerca de la parte superior de la capa de mezcla de la atmósfera.

#### **2.2.4 TRANSFORMACIÓN DE LOS PRODUCTOS DE LA COMBUSTIÓN DURANTE EL TRANSPORTE**

Una vez formada, la mezcla altamente dinámica de compuestos de la combustión es transportada lejos de su punto de emisión. La composición química, las características físicas y la concentración de estos compuestos en el aire cambian durante el transporte. El tiempo de permanencia de los compuestos de la combustión en el aire depende de la naturaleza de los procesos experimentados y varía desde segundos o minutos hasta días o semanas.

Los aerosoles se forman a partir de emisiones primarias (generalmente sólidos) o secundarias (líquidos). Las partículas más grandes (con un diámetro aerodinámico de un micrómetro o más) son producidas principalmente a partir de procesos primarios, incluidos los mecánicos, y son removidas de la atmósfera a través de la sedimentación gravitacional. Por ejemplo, a 20 km de distancia de un incendio de grandes proporciones, la concentración de partículas inferiores a un micrómetro se eleva significativamente, pero no se incrementan las partículas más grandes, lo cual indica que las partículas han sido removidas de la pluma durante su transporte (Morawska y otros, 1998). Las

partículas más pequeñas se transforman en partículas más grandes principalmente por coagulación y condensación, y se eliminan a través de la coagulación o remoción dentro de la nube durante la precipitación. La distribución del tamaño de las partículas varía durante el transporte: pasan de la modalidad de nucleación (con un tamaño que varía de nanómetros a décimas de nanómetros) a la acumulación (con un tamaño generalmente inferior a un micrómetro), mientras que las partículas más gruesas son eliminadas del aire mediante el proceso de precipitación. Los cambios son más rápidos inmediatamente después de la generación de partículas y más lentos a medida que disminuye la concentración de estas, ya sea por dilución o transformación. Los tiempos de permanencia de las partículas en el aire varían significativamente. Para las partículas muy grandes, este lapso puede ser cuestión de minutos mientras que las más pequeñas que un micrómetro pueden permanecer varias semanas, según las condiciones meteorológicas. En la troposfera, estas partículas pueden permanecer incluso años (Subcommittee on Airborne Particles, 1979). La distribución del tamaño de las partículas es importante para evaluar el riesgo para la salud, ya que las más pequeñas tienen mayor probabilidad de sedimentarse en las partes más profundas del sistema respiratorio.

La estabilidad de los compuestos químicos emitidos a la atmósfera por incendios de vegetación es muy variada. Para muchas especies, el factor principal de control de los cambios ocurridos luego de su formación es la transformación o destrucción del radical OH (hidroxilo). Si bien los hidrocarburos que no contienen metano, como los alquenos C<sub>2</sub>-C<sub>4</sub>, se pierden luego de unas horas debido a la reacción con los radicales OH, la pérdida de C<sub>2</sub>-C<sub>4</sub> ocurre durante días o semanas. La estabilidad del monóxido de carbono en la atmósfera es de aproximadamente 2 a 3 meses mientras que el CH<sub>4</sub> dura 10 años. Luego de varias horas, los óxidos de nitrógeno se convierten en HNO<sub>3</sub>. La oxidación fotoquímica de las especies mencionadas (de gran interés para la salud humana) produce una serie de compuestos (por ejemplo, formaldehídos, HCHO). El HCHO tiene una estabilidad atmosférica de alrededor de una hora. Los tiempos de residencia de los gases emitidos en las plumas de humo provenientes de los incendios forestales se pueden calcular a partir de otros estudios. Por lo general, las tasas de transformación o destrucción se miden en experimentos de laboratorio. DeMore y otros (1997) presentan algunos ejemplos de estos experimentos. El cuadro 2.2.4-1 muestra los tiempos típicos de residencia para densidades de 10<sup>6</sup>cm<sup>-3</sup> de OH en la troposfera inferior, los cuales son apropiados para incendios de vegetación. Los tiempos de residencia de los hidrocarburos pueden variar desde muy cortos ► es decir, unos días► hasta muy largos, ► por ejemplo, 7,3 años para el metano► .

**Cuadro 2.2.4-1 Tiempos típicos de residencia para especies moleculares emitidas durante incendios forestales**

Especie	Tiempo de residencia (años)	Referencia
CH <sub>4</sub>	7,3	Miller y otros (1998)
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	0,04	Ehhalt y otros (1998)
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0,19	Colman y otros (1998)
CH <sub>3</sub> Cl	1,26	Colman y otros (1998)
CO	0,25	Colman y otros (1998)
NO	0,035	Koike y otros (1996)
O <sub>3</sub>	0,044	Davis y otros (1996)
Aerosoles	0,02	Baker y otros (1979)

El ozono se produce a sotavento de los incendios de vegetación durante varias horas a través de la acción de la fotólisis sobre los hidrocarburos y  $\text{No}_x$  ( $\text{NO} + \text{NO}_2$ ), siempre que se cuente con la radiación ultravioleta necesaria para iniciar las reacciones de oxidación. En plumas densas de humo, el ozono se produciría de manera más rápida en las capas superiores de la pluma. La formación de ozono en la troposfera por este tipo de incendios en zonas tropicales ha sido estudiada con gran detalle durante la primera serie intercontinental de experimentos sobre incendios en el marco de los componentes del Southern Tropical Atlantic Regional Experiment (STARE). Estos componentes son el Transport of Atmospheric Chemistry Experiment – África (TRACE-A) y la Southern Africa Fire-Atmosphere Research Initiative (SAFARI). Esta última forma parte de la investigación sobre incendios del Biomass Burning Experiment (BIBEX) del International Geosphere-Biosphere Programme (IGBP), proyecto principal de la International Global Atmospheric Chemistry (IGAC) (Helas y otros, 1995; Lindesay y otros, 1996; Singh y otros, 1996; van Wilgen y otros, 1997; GFMC, 1999b).

Las plumas de los incendios de vegetación pueden viajar a 500 y 1.000 kilómetros o más durante varios días (Browell y otros, 1996). Por ejemplo, con velocidades del viento de  $4 \text{ ms}^{-1}$ , una pluma viajaría hasta 480 km durante cinco días. Por supuesto, las plumas pueden viajar más de cinco días. Durante una misión de la NASA en el Pacífico Sur, a finales de 1996, se encontraron plumas de aproximadamente 20 días (Blake y otros, 1999). De esta manera, algunas especies moleculares serían relativamente invariables mientras que otras reducirían significativamente sus concentraciones.

## **2.2.5 RAZONES DE EMISIÓN QUE DEBEN USARSE PARA CONTAMINANTES CRITERIOS**

*Razones de los contaminantes tóxicos del aire en relación con el CO, CH<sub>4</sub> y MP<sub>2,5</sub>.*

Al efectuar una evaluación de riesgos y establecer la importancia relativa de los diferentes compuestos para la salud humana, se requiere un método para estimar los niveles de exposición basados en la medición del CO y MP. Muchos de los compuestos tratados son difíciles de medir, lo que hace que el muestreo del espacio de respiración o del aire sea prácticamente imposible para la mayoría de compuestos tóxicos. Sin embargo, se ha probado que la correlación de la concentración de compuestos tóxicos del aire con las de CO, CH<sub>4</sub> y MP<sub>2,5</sub> es un método efectivo para calcular la emisión de varios compuestos (Ward y otros, 1993; McKenzie y otros, 1995; Yokelson y otros, 1997). El cuadro 2.2.5-1 presenta algunas razones.

**Cuadro 2.2.5-1 Razones molares de contaminantes tóxicos del aire en relación con el CO (x 10<sup>-3</sup>), promediadas para diversos combustibles**

Compuesto	Razón	Compuesto	Razón	Compuesto	Razón
Metano	104,8	Etano	6,7	1,3 butadieno	1,10
Amoniaco	26,0	HCN	4,0	m-/p-xileno	0,43
Formaldehído	17,3	Benceno	2,13	Fenol	0,32
Ácido fórmico	15,2	Tolueno	1,79	o-xileno	0,24

Si se usa este método, es importante realizar cálculos seguros o usar información muy precisa para la fase de combustión producida por el humo en cuestión. Por ejemplo, las razones de B[a]P en relación con el CO o MP para diferentes tipos de combustibles muestran una diferencia significativa entre la combustión con llama (F), sin llama primaria (S1) y sin llama secundaria (S2) (véase el cuadro 2.2.5-2). Existe una diferencia de casi un orden de magnitud entre las razones de emisión de B[a]P en relación con el CO entre las combustiones con y sin llama. Una razón de emisión ponderada promedio se puede calcular a partir del porcentaje de combustible consumido en la fase de combustión que genera las emisiones. Esto es posible si se asume, por ejemplo, que las emisiones a lo largo de la línea de fuego constan de 10% de vegetación consumida durante la fase con llama, 70% para la primera fase sin llama y 20% para la fase final sin llama. El cuadro 2.2.5-2 ilustra estos resultados.

**Cuadro 2.2.5-2 Aplicación de datos para incendios prescritos en el noroeste del Pacífico. Las razones se pueden multiplicar por la concentración de CO para calcular la exposición a B[a]P o MP. Si solo la exposición a MP está disponible, se pueden calcular el CO y el B[a]P, junto con otros contaminantes tóxicos del aire presentados en el cuadro 2.2.5-1**

Fase de combustión	CO [ppm]	MP [µg/m <sup>3</sup> ]	B[a]P [µg/m <sup>3</sup> ]	B[a]P/CO [µg/m <sup>3</sup> /ppm]	B[a]P/MP [10 <sup>-6</sup> ]	MP/CO [µg/m <sup>3</sup> /ppm]
F	140	15.740	0,1284	0,0009	8,2	112,4
S1	113	8.391	0,1608	0,0038	42,8	74,3
S2	26	1.214	0,1024	0,0067	126,4	46,7
Ponderado	98	7.690	0,1459	0,0040	56,1	78,2

Por otro lado, las emisiones generadas por la combustión con llama por lo general están acompañadas de una emisión significativa de calor, que transporta las emisiones a alturas mayores mediante fuerzas de convección que actúan sobre la pluma de humo. La mayoría de emisiones cerca de la superficie se puede producir por combustión sin llama. Se recomienda usar las razones de emisión de combustión sin llama para evaluar la exposición, excepto cuando la combustión con llama consume entre 75 y 80% o más de combustible.

## **2.2.6 NIVELES DE EXPOSICIÓN DURANTE LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE**

Los regímenes de exposición varían considerablemente según los diferentes tipos de incendios de vegetación. Los documentos base publicados aparte contienen ejemplos de incendios de gran expansión.

## **2.2.7 RESUMEN**

La quema de biomasa contribuye de manera importante a la presencia de contaminantes tóxicos, material particulado y gases de invernadero en todo el mundo. En muchos casos, esta quema genera una exposición humana a altos niveles de diversos contaminantes, pero a diferencia de algunas fuentes generadas por el hombre, no ha sido cuantificada apropiadamente. Si bien la exposición a la mayoría de contaminantes del aire puede tener efectos potencialmente negativos en la salud, la evidencia científica reciente indica que las partículas muy pequeñas pueden tener los efectos más graves. Debido a que el mayor número y masa del material particulado generado por la quema de biomasa se encuentra en el intervalo de partículas finas, se debe medir la fracción de MP<sub>2,5</sub> para caracterizar mejor los riesgos para la salud.

Si bien las transformaciones que ocurren durante el transporte del humo a sotavento no son muy claras, se sabe que tienen un efecto significativo en la composición del humo en los lugares de exposición. Las razones entre los compuestos tóxicos del aire y el CO, el CH<sub>4</sub> y el MP<sub>2,5</sub> brindan cálculos razonables de la exposición para varios compuestos, a partir de la caracterización de uno o dos de estos.

## **2.3 MONITOREO EN EL TERRENO**

### **2.3.1 OBJETIVOS**

El monitoreo de la calidad del aire en el terreno debe cumplir los siguientes objetivos:

- Brindar información para:
  - alertas de salud pública,
  - toma de decisiones y puesta en marcha de medidas preventivas.
- Brindar datos para:
  - Ingresar datos en los modelos, verificar y desarrollar modelos,
  - estudios en la salud humana a fin de evaluar los efectos de la neblina y humos.

### 2.3.2 ANTECEDENTES

El monitoreo de la calidad del aire en el terreno es importante para pronosticar episodios de neblina y responder a las emergencias. Se debe medir especialmente el  $MP_{2.5}$  ya que se cree que esta fracción fina, que predomina en el humo y la neblina es responsable de los efectos observados en la salud. Sin embargo, si no se puede estimar el  $MP_{2.5}$ , se debe medir el  $MP_{10}$  o el total de partículas suspendidas (TPS). Si no se mide el MP, se puede usar la visibilidad como un indicador de la concentración de partículas en el ambiente.

Las mediciones realizadas en Singapur y Malasia durante el episodio de humo y neblina de 1997 indicaron que los niveles de  $MP_{10}$  fueron, de lejos, los más elevados de todos los contaminantes ( $O_3$ ,  $NO_x$ ,  $SO_2$ ,  $CO$ ,  $MP_{10}$ ) comparados con los valores de fondo normales. Sin embargo, durante episodios de neblina, las mediciones de contaminantes adicionales tales como  $O_3$ ,  $NO_x$ ,  $SO_2$ ,  $CO$ , aldehídos y PHA permiten una evaluación más completa de los riesgos para la salud debido a la exposición a la neblina. Este procedimiento está en conformidad con una publicación previa de la OMS sobre evaluación de riesgos para la salud durante episodios de *smog* (OMS, 1992b).

### 2.3.3 CONSIDERACIONES SOBRE DISEÑO DE REDES

Una red de monitoreo de humos y neblina debería comenzar por estaciones meteorológicas y de monitoreo de la contaminación del aire a escala local. Cuando estas estaciones se conectan a una red, se puede determinar el estado de humos y neblina en el ámbito regional. Si ya existe una red meteorológica o de monitoreo de la contaminación del aire, se deben identificar y designar los lugares que mejor cumplan las condiciones mencionadas más adelante como puntos especiales de monitoreo de la neblina. De ser necesario, estas estaciones deben estar equipadas con instrumentos adicionales de monitoreo. Las especificaciones mínimas deben incluir mediciones continuas de material particulado, parámetros meteorológicos y radiación solar. Si la pluma se encuentra por encima de la capa de mezcla y no se pueden detectar niveles de contaminación en el terreno, se puede usar un radiómetro solar para detectar la pluma mientras avanza por encima, a través de la reducción de la radiación solar.

Para examinar los efectos de los contaminantes del aire emitidos por fuentes distantes en una población, se debe localizar uno o más monitores en los lugares que resultarán afectados por las emisiones, antes de que estas se trasladen a áreas más pobladas. Estos sitios experimentales se pueden identificar según las rutas de transporte más probables en las áreas propensas a incendios. De esta manera, las contribuciones de las fuentes urbanas de contaminación del aire podrían, en principio, separarse de las provenientes de fuentes distantes. Los datos obtenidos en estos sitios se pueden usar para efectuar estudios en la salud de poblaciones rurales. Además, el monitoreo en sitios no afectados por el transporte de contaminantes de largo alcance o por altos niveles de contaminación local puede servir de control.

Los factores adicionales que se deben considerar en el diseño de redes de monitoreo incluyen los objetivos del programa, la cobertura espacial y temporal, y especificaciones de rendimiento tales como la precisión y exactitud de los aparatos usados. Otros objetivos incluyen la respuesta

temporal, la ubicación de los monitores individuales e información detallada sobre el sitio, el manejo de los datos y el desarrollo de un plan de aseguramiento y control de calidad.

Antes de elaborar un diseño detallado de redes, se deben tratar los siguientes aspectos:

- revisión de las actividades de monitoreo meteorológico y calidad del aire en áreas propensas a incendios y neblinas;
- identificación de sitios apropiados para el monitoreo del humos y neblinas, así como su incorporación en una red especial de monitoreo;
- mejoramiento de las redes de monitoreo existentes para medir las cantidades de humos y neblina, e
- identificación de las instituciones responsables de la medición y registro de la contaminación del aire.

Un plan de aseguramiento y control de calidad es esencial para garantizar el uso más confiable posible de los resultados del monitoreo (PNUMA/OMS, 1994a). Por ejemplo, los elementos de los planes de aseguramiento de la calidad de la EPA (EPA, 1998b) incluyen la identificación de los objetivos del programa de monitoreo, la capacitación del personal, métodos de muestreo y manejo de muestras. Asimismo, se deben considerar los métodos estándar de calibración así como las calibraciones entre las redes (PNUMA/OMS, 1994b). Los planes de aseguramiento de la calidad de la EPA también están relacionados con normas de calibración, con la frecuencia de calibración de los dispositivos de monitoreo, el rendimiento externo y las auditorías del sistema (EPA, 1998b). En este contexto, los datos importantes incluyen criterios de aceptación, manejo, archivo, revisión y evaluación, así como la adaptación de los datos reportados a los requerimientos del usuario.

### **2.3.4 MÉTODOS E INSTRUMENTOS PARA EL MONITOREO DE AEROSOLES**

Los principales métodos para monitorear el MP<sub>2,5</sub> y el MP<sub>10</sub> incluyen la recolección de depósitos de aerosoles en sustratos de filtro cada 24 horas. Los filtros se pesan antes y después del muestreo, y luego se equilibran bajo condiciones definidas de temperatura y humedad relativa (20 y 40 °C, respectivamente). Debido a la extensión de los tiempos de muestreo y equilibrio, los datos obtenidos a través de métodos de filtro no pueden reportarse al público o usarse como medidas para proteger la salud pública. Sin embargo, existen dos métodos automatizados que pueden medir las concentraciones de MP cada hora y en tiempo casi real. Estos métodos han sido designados por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) como equivalentes, a partir de la comparación de su rendimiento con los métodos de filtración. Se trata del colector de muestras de medición beta (*beta gauge sampler*) (Wedding y Weigand, 1993) y la tapered element oscillating microbalance (TEOM) (Patashnik y Rupprecht, 1991). Los datos recolectados a través de estos métodos se usan, por ejemplo, para calcular el índice estándar de contaminación (valores del IEC en áreas metropolitanas pobladas de Estados Unidos con más de 200.000 habitantes). Estos métodos automatizados representan técnicas factibles de muestreo para operar un sistema efectivo de alerta (PNUMA/OMS, 1994c).

Ambos métodos automatizados están sujetos a artefactos que resultan del calentamiento de la entrada a temperaturas que oscilan entre 30 y 50 °C (para evitar interferencias debido a la condensación de la humedad). El calor tiende a eliminar los compuestos semivolátiles tales como el nitrato de amonio y algunos compuestos orgánicos. Por lo tanto, la magnitud de error en la medición de la masa depende de la composición de las partículas que conforman la muestra, lo que, a su vez, depende de la naturaleza de las fuentes de MP. En estas circunstancias, estos métodos pueden subestimar la concentración de la masa real de MP en el ambiente, a menos que se realicen calibraciones específicas del lugar contra mediciones gravimétricas. Por ello, se debe tener cautela antes de atribuir una exactitud cuantitativa a los valores obtenidos y asociados con el IEC.

Otros compuestos con efectos menos pronunciados en la salud como SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO y O<sub>3</sub>, también deben medirse cuando sea posible. Los métodos de monitoreo pasivo y activo para medir estos compuestos se describen en PNUMA/OMS (1994d).

#### *Visibilidad, humedad relativa, precipitación, y velocidad y dirección del viento*

Debido a que la visibilidad es una función de la concentración de aerosol, se puede usar como indicador de la concentración de partículas. Sin embargo, la humedad relativa y la precipitación se deben considerar simultáneamente, ya que influyen en la visibilidad.

La velocidad y la dirección del viento son importantes, ya que determinan el desarrollo temporal y espacial de los niveles de contaminación con neblina y humos en el ámbito regional. Los procedimientos de medición de parámetros meteorológicos se presentan en la guía de la OMM (OMM – N°. 8).

#### *Radiación solar*

Los radiómetros solares miden la intensidad de la radiación solar que llega al instrumento. Bajo condiciones de humo y neblina, la cantidad de radiación disminuye. Además de ser un indicador de humos y neblina, la cantidad de radiación que llega al terreno es importante para el ecosistema. Por ejemplo, una reducción de la radiación UV puede conducir al crecimiento excesivo de ciertos microorganismos, incluidos aquellos que causan enfermedades. Las mediciones de la radiación solar y UV se deben realizar continuamente en varios sitios.

### **2.3.5 RECOLECCIÓN, PROCESAMIENTO Y DIVULGACIÓN DE DATOS**

La calidad del aire es muy variable durante el día debido a factores meteorológicos. Asimismo, cuando la neblina es transportada hacia un área urbana, los niveles de MP se acumulan rápidamente. Por estas razones, la recolección y el procesamiento de datos se deben realizar cada hora. Una vez que se han recolectado los datos sobre calidad del aire de las estaciones de monitoreo, estos se deben procesar y convertir a un formato que pueda ser usado por los encargados de tomar decisiones. Los datos son más útiles cuando están en formato electrónico y existe un programa de AC y CC para su transmisión, archivo y validación. Luego de su procesamiento, los datos pueden diseminarse al centro de datos de la institución gubernamental responsable de tomar medidas preventivas. Finalmente, pueden ser enviados a la prensa o transmitidos al público.

### 2.3.6 RECOMENDACIONES

- El monitoreo de la calidad del aire se debe realizar regularmente en las principales áreas urbanas y pobladas que puedan resultar afectadas por la quema de biomasa. Además, se deben instalar estaciones en áreas rurales para obtener información sobre las concentraciones de fondo.
- Se deben revisar las redes de monitoreo existentes e identificar los mejores sitios para el monitoreo de episodios de humo y neblina. Se debe considerar el establecimiento de estaciones adicionales de monitoreo en áreas no cubiertas por las redes. La localización de los sitios se debe determinar de acuerdo con las guías existentes (por ejemplo, EPA, 1987; PNUMA/OMS, 1994a).
- Se debe promover la participación en actividades internacionales tales como el Programa de Vigilancia Global de la Atmósfera (OMM, GAW Report No. 113) y el Sistema de Información sobre la Gestión de la Calidad del Aire, AMIS (OMS, 1998b) a fin de maximizar la utilidad de los datos recolectados por las diferentes redes de monitoreo.
- Se debe identificar a la institución ► y, específicamente, al personal► responsable de implementar el programa y manejo de datos.
- Las instituciones locales deben dar prioridad a la continuidad del programa.
- En la medición de compuestos, se deben hacer esfuerzos por separar la contribución de la quema de la biomasa de otras fuentes.
- El monitoreo de la masa de aerosol ( $MP_{2.5}$ ,  $MP_{10}$ ), visibilidad, parámetros meteorológicos, profundidad óptica y radiación solar tienen prioridad.
- En los sitios seleccionados, se deben medir las cantidades de sustancias químicas clave tales como  $CO$ ,  $O_3$ ,  $NO_x$ ,  $SO_2$ ,  $CO_2$ , aldehídos y otros contaminantes traza.
- Se deben establecer protocolos uniformes de muestreo, incluidos procedimientos de reporte y resolución temporal. El establecimiento de procedimientos de aseguramiento y control de calidad (AC y CC) para el programa de medición es esencial para obtener resultados confiables y reproducibles.
- Se deben establecer bases de datos nacionales y regionales para usar datos antes, durante y después de los episodios de humo y neblina. Estos datos se pueden usar, por ejemplo, en estudios epidemiológicos, en la planificación ante episodios futuros y en estudios de modelos de transporte.
- Se debe promover el intercambio de datos validados.
- Se deben armonizar los distintos índices de contaminación del aire usados en las alertas regionales de humo y neblina.
- Los datos provenientes de estas iniciativas deben estar disponibles para proyectos colaterales sobre ambiente urbano, inventarios de emisiones, precipitación ácida, cambio climático y estudios sobre nubes.

## 2.4 MONITOREO ESPACIAL Y RIESGOS DE INCENDIOS

### 2.4.1 CAPACIDAD ACTUAL

#### *Susceptibilidad a los incendios:*

La susceptibilidad a los incendios se puede derivar de muchas fuentes de información. Entre ellas, están las imágenes obtenidas diariamente durante la tarde por el sensor del RAMAR a bordo de los satélites meteorológicos de las series de la NOAA. Estos giran alrededor de la Tierra en órbita, a una distancia cercana a los 840 km y tienen una resolución de cerca de 1,1 km. Al menos dos de estos satélites se han mantenido operativos simultáneamente durante los últimos 25 años; esta misma configuración se prevé en el futuro.

Una cantidad conocida como el "índice normalizado de vegetación" (INV) se deriva a partir de imágenes del RAMAR; se usan mosaicos compuestos con datos de 15 días para monitorear la vegetación. Existen diferentes métodos para generar valores del INV, de acuerdo con cuántos canales del RAMAR se usen y cómo se combinen. Estos valores son útiles principalmente para regiones con una estación o un ciclo fenológico marcadamente seco y con un fuerte estrés de vegetación. El índice de riesgo de susceptibilidad a los incendios se obtiene al comparar los valores del INV de la vegetación estresada y normal. Australia, Brasil, Canadá y Estados Unidos usan estas técnicas para la evaluación de riesgos de incendios.

La NOAA prepara valores de INV para superficies terrestres del planeta; la NASA también genera bases de datos de INV. El European Space Agency (ESA), en el monitoreo del grupo de vegetación tropical, Ispra, Italia (MVT, 1998), y muchas instituciones regionales de pronóstico del clima a través de sensores remotos también generan valores de INV. Actualmente, las estaciones receptoras del RAMAR cuestan menos de US\$10.000, y se reciben imágenes sin costo alguno de los satélites, lo cual hace que el uso de esta tecnología resulte atractivo. La aplicación de INV a regiones tropicales mejoraría en gran medida la capacidad para identificar regiones y áreas con vegetación propensas a incendios.

En 1998, el National Space Development Agency of Japan (NASDA) lanzó el satélite para la Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) (NASDA, 1998). Los datos de este satélite, combinados con sistemas de medición de la lluvia, pueden usarse para evaluar la densidad de la precipitación y, a partir de ésta, la sensibilidad a los incendios debido a sequías. Si bien los datos relativos a las lluvias están disponibles, aún existe la necesidad de desarrollar una estrategia para determinar la susceptibilidad a los incendios a partir de estos datos.

#### *Monitoreo de incendios:*

Actualmente, se usan cuatro tipos de satélites para detectar incendios, aunque ninguno ha sido diseñado ni está acondicionado para este propósito. No obstante, la información proveniente de estos satélites es valiosa en regiones donde el monitoreo o control de incendios regionales es deficiente.

Las imágenes del RAMAR en la banda media-infrarroja (3,7  $\mu\text{m}$ ) son particularmente sensibles a temperaturas de incendios en general y han sido usadas con éxito en muchos países (Setzer y Malingreau, 1996). La validación en el campo de los datos sobre detección de incendios del RAMAR en África, la Amazonía (Brasil), Australia, Europa y el sudeste asiático, que ha sido publicada corrobora la alta efectividad de esta técnica. Por ejemplo, Brasil tiene un programa de detección de incendios que ha venido operando en tiempo real durante 15 años, con resultados asombrosos. La NASA Goddard Space Flight Center (SFC, 1998) y el Joint Research Center (MVT 1998) realizaron pruebas con emisiones de fuego en distintos lugares del mundo durante varios meses. Se pueden usar por lo menos cuatro imágenes por día en cualquier lugar, y si bien la resolución de dichas imágenes es cercana a 1,1 km, se detectarán frentes de incendio de más de 30 m si no existen nubes de agua en la línea de visión del satélite. Algunas secciones de las imágenes tomadas durante las captaciones de la tarde presentarán señales falsas debido al calentamiento de suelo (rocas, arena) para algunas regiones en temporadas específicas.

La aplicación de datos al control de incendios y al monitoreo de riesgos por la quema de biomasa requiere un procesamiento en tiempo real de las imágenes del RAMAR. Esto se puede hacer o bien en el campo o bien en puntos ubicados hasta 2.000 km, donde la comunicación con el personal en el campo sea posible. Como en el caso del índice de vegetación, la recepción de imágenes del RAMAR es relativamente simple y de bajo costo.

La detección de incendios con satélites meteorológicos geoestacionarios a 36.000 km de distancia (tales como GOES) aún está en la fase experimental en la Universidad de Wisconsin, Estados Unidos, y en el National Institute of Space Missions en Brasil (UW, 1999; INPE, 1999; INPE-CPTEC, 1999); solo se ha reportado un caso de validación. La resolución en el terreno de la banda media-infrarroja a 4  $\mu\text{m}$  que detecta los incendios es de 4 km y por ello, solo se pueden detectar los frentes más grandes. Sin embargo, la resolución temporal de 30 minutos hace que este sea un recurso único y obligatorio para el monitoreo de incendios. Las imágenes geoestacionarias se reciben en tiempo real por muchos centros climatológicos y universidades de todo el mundo, con estaciones que requieren decodificadores individuales. Los costos son de aproximadamente \$150.000.

La Agencia Espacial Europea (ESA) opera el radiómetro de escaneo infrarrojo a lo largo de una trayectoria (REALT) (along track infrared scanning radiometer, ATSR) a bordo del satélite de radar ERS-2 (satélite de detección a distancia de la ESA), que también ha sido usado para detectar incendios (ESA, 1999). El sensor es similar al RAMAR, pero su banda media-infrarroja tiene un límite de saturación inferior que obstaculiza su uso durante el día. Otra limitación importante es que el mismo sitio se visualiza solo una vez cada tres días, lo cual es demasiado en muchos episodios de incendio. Las observaciones directas de las señales de satélite requieren grandes inversiones de dinero y personal técnico capacitado.

Las imágenes de satélites militares del Defense Meteorological Satellite Program (DMSP) de los Estados Unidos también se han usado para monitorear incendios en todo el mundo (DMSP, 1999). En ese caso, solo se aplican imágenes nocturnas ya que el sensor es sensible a la luz y no al calor. Las noches con luna excluyen el uso de imágenes. La recepción y procesamiento de datos está restringido y solo se hace a solicitud especial a través de DMSP. Solo se ha notificado

un caso de validación en el campo para incendios de vegetación y la confusión de incendios con luces aisladas e inconstantes genera aún polémica.

Los sistemas de análisis que combinan datos sobre incendios provenientes de satélites del RAMAR con bases de datos cartográficos, meteorológicos y de imágenes obtenidas por satélites de alta resolución (Landsat, SPOT, Radarsat) también se han implementado en sistemas de información geográfica para su uso en tiempo casi real (USGS, 1999b; Walker, 1996; MIDAS, 1997a; MIDAS, 1997b; CSA/NASA, 1997; CSA 1999a). Un ejemplo importante en este caso es el esfuerzo de "Proarco" de Brasil para la Amazonía Meridional (IBAMA, 1999). Las decisiones logísticas, las estrategias de control de incendios y las guías para los encargados de elaborar políticas han facilitado el acceso a este sistema.

#### *Detección de emisiones:*

El sensor del RAMAR no fue diseñado para monitorear aerosoles. Sin embargo, se han desarrollado y validado técnicas para medir la carga total de aerosol en la columna a partir de observaciones del RAMAR para la quema de biomasa en el Brasil (Kaufman y otros, 1990). A partir del recuento del número de incendios y la carga de aerosol en  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$  realizado por RAMAR, los autores estimaron la emisión total de partículas de humo de un grupo de incendios bien identificados y calcularon la tasa de emisión de partículas de humo por incendio.

Este procedimiento no puede aplicarse en todos los casos. Requiere que el humo sea transportado por el viento en una dirección determinada desde el incendio (lo cual requiere una velocidad del viento de al menos 3-5 m/s) sobre una superficie oscura como agua o vegetación. Las concentraciones derivadas son de toda la columna vertical y no en el nivel del terreno. Sin embargo, en la mayoría de episodios de humos de largo alcance, se desarrolla un sistema meteorológico de alta presión se desarrolla con una fuerte inversión de la cubierta y humo bien mezclado debajo de esta. Por ende, la concentración en la superficie debe estar bien relacionada con la concentración en la columna vertical. La razón entre ambas dependerá de la altura de la inversión, que puede variar regional y estacionalmente. Se requieren estudios regionales sobre la razón entre la concentración en la columna y la concentración en la superficie para establecer dicha razón.

Si bien se ha demostrado la aplicabilidad del método del RAMAR, actualmente no existe ninguna aplicación operativa de este. El método debe aplicarse manualmente en cada caso. Para implementarlo, los datos provenientes del satélite tienen que ser recibidos por una estación receptora local y se debe contar con el software necesario para analizarlos e interpretarlos. Integrados con información meteorológica, los datos del satélite se pueden usar para generar una estadística del número de incendios y derivar la concentración de aerosol en la columna y, conjugados con la velocidad del viento, para inferir la tasa de emisión del humo generado por los incendios. Debido a que los datos del RAMAR para estudios de aerosol están disponibles solo una vez al día, se debe estudiar el ciclo diurno de incendios y humo a través de datos procedentes de satélites geoestacionarios (GOES o METEOSAT). La Universidad de Wisconsin ha hecho una demostración del uso de GOES (Prins y otros, 1996, 1998). Cresswell (1996) proporciona información sobre METEOSAT.

En algunos casos, quizá no esté claro si el humo proviene de los incendios de vegetación o si se trata de aerosoles de la contaminación urbana. Para distinguir entre ambos, se puede usar una combinación de datos del RAMAR y del Tropospheric Ozone Monitoring Satellite (TOMS). TOMS es sensible a la absorción de aerosol de la radiación solar ultravioleta dispersa en la atmósfera. Debido a que la dispersión se desarrolla en toda la columna atmosférica, las partículas de aerosoles absorbentes ubicadas en la parte superior de la atmósfera tendrán una radiación ultravioleta más dispersa para absorber y su efecto sobre la señal del TOMS será más fuerte. Por lo tanto, TOMS no es sensible a los aerosoles de la contaminación urbana, incluidas las partículas de sulfato (en el tramo inferior a 1,5 km), y el valor del índice de aerosoles del TOMS depende de la altura estimada del aerosol. El RAMAR mide la luz esparcida por las partículas de aerosol y, por ende, mide el humo y la contaminación urbana. Sin embargo, debido a que las partículas de sulfato no absorben la radiación solar, los datos del TOMS y del RAMAR permiten distinguir el humo y la contaminación urbana.

Los datos del RAMAR y del TOMS no pueden usarse para calcular la distribución de tamaños de aerosoles, si bien ambos son sensibles principalmente a aerosoles submicrómetros.

Los datos del TOMS están diseñados para monitorear el ozono troposférico a través de un método muy similar al descrito para monitorear aerosoles. Aquí también se debe hacer una suposición sobre la distribución vertical del ozono. La exactitud de los resultados depende en gran medida de esta suposición.

## **2.4.2 PERSPECTIVAS PARA LOS PRÓXIMOS DOS AÑOS**

### *Susceptibilidad a los incendios:*

Brasil, Canadá, China, Europa e India están proyectando el lanzamiento de nuevos satélites y sensores remotos para los próximos dos años en el marco de la cooperación multinacional. Los datos que aporten estos satélites deben de incrementar la resolución espacial, radiométrica y temporal de valores que indiquen estrés de vegetación y riesgo de incendios. Por ende, se espera mejorar la predicción de riesgos de incendios, siguiendo el mismo patrón científico desarrollado por el trabajo pionero del RAMAR.

A través de los nuevos satélites, el tiempo requerido para recolectar datos suficientes sobre la cubierta de vegetación de casi todo el planeta puede reducirse de 15 a 10 días (sin considerar la cubierta de nubes o condiciones de imágenes deficientes) con una resolución en el terreno de unos pocos cientos de metros. Las instituciones que actualmente proporcionan datos de estrés de vegetación derivados de satélites están preparando los algoritmos necesarios y procesando datos futuros. Según los usuarios, solo se debe mejorar la capacidad para recibir nuevos datos por Internet.

Los nuevos satélites y sensores también proporcionarán cálculos de áreas quemadas e información para evaluar el impacto de los incendios en ambientes terrestres y atmosféricos. Actualmente, grupos de Brasil (INPE) y Europa (JRC, Ispra) están realizando algunos esfuerzos, con datos del RAMAR. La NASA (Goddard SFC) está promoviendo el uso de datos de 250 m de

resolución a través del espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada (ERIRM) (moderate resolution imaging spectro-radiometer, MODIS) en el satélite TERRA (anteriormente EOS-AM1) (SBRS, 1997; NASA, 1999a).

También se espera un cambio significativo en la integración de datos provenientes de sensores remotos y del monitoreo en el terreno, para que incluyan tipos y estrés de vegetación, variables meteorológicas y climáticas, topografía, tipos y humedad del suelo, etc. Se están desarrollando poderosos sistemas de información geográfica (SIG) que deben estar disponibles para la evaluación, manejo y control de riesgos de incendios. Se requieren técnicos capacitados para operar y obtener resultados útiles a partir de estos medios complejos.

#### *Monitoreo de incendios:*

En los próximos dos años, se planea lanzar dos satélites con sensores apropiados para la detección de incendios, lo cual abre nuevas posibilidades en este campo.

TERRA/EOS-AM1, programado para agosto de 1999, con una vida esperada de seis años, producirá imágenes similares a las del RAMAR en términos de cobertura (cerca de 2.200 km) y de resolución en el terreno (cerca de 1 km). Sin embargo, sus 36 canales tienen un límite de temperatura de saturación mucho mayor en las bandas termales y mejorarán en gran medida las capacidades actuales del RAMAR (Kaufman y otros, 1998). Se estimará la energía de radiación, relacionada con la temperatura, y el tamaño del incendio, y se eliminará la confusión causada por los rayos del sol o los suelos expuestos, que ocasionalmente deterioran fragmentos de las imágenes del RAMAR. Sin embargo, se debe considerar una limitación: las captaciones de AM1 ocurrirán cerca de las 10.30 y las 22.30 y, por consiguiente, perderán la mayoría de incendios de corta duración originados por el hombre, que se inician a principios de la tarde, en el punto máximo del ciclo diario de temperatura.

El Centro Aeroespacial de Alemania (DLR) está construyendo un satélite piloto denominado BIRD, diseñado para detectar incendios en tiempo real. Será lanzado en el 2000 y su vida esperada es de cerca de dos años. Una cámara ancha en el satélite identificará incendios y una cámara estrecha se concentrará en incendios específicos. El acceso a los datos será libre y requerirá receptores y estaciones especiales. Los detalles sobre la modalidad de operación de este satélite están disponibles en el DLR (1999).

#### *Detección de emisiones:*

La detección de emisiones será similar a las disponibles actualmente con el RAMAR, pero, además, será posible usar datos del ERIRM y del espectrorradiómetro de imágenes de ángulos múltiples (ERIAM) (multi-angle imaging spectro-radiometer, MISR) (SBRS, 1997; LPC, 1999). La detección de incendios y aerosoles mejorará de diversas maneras:

- (a) El ERIRM no solo medirá los incendios con una resolución de 1 km sino que también indicará el valor de la energía de radiación emitida por estos. La energía es una medida de la fuerza del incendio o la tasa de consumo de la biomasa por el fuego.

- (b) El ERIRM y el ERIAM están diseñados específicamente para monitorear el aerosol. Los datos que arrojen se usarán directamente para derivar la concentración diaria de aerosoles con una resolución de 10 a 20 km. Los datos de incendios y aerosoles se generarán y archivarán diariamente en una base global en un plazo de 48 horas desde la adquisición de los datos. Es posible que durante el primer año después del lanzamiento, solo una fracción (20 a 40%) de datos esté disponible.

Los datos del ERIRM con imágenes captadas sobre el océano se pueden usar para calcular la razón entre la concentración bajo la modalidad del tamaño correspondiente al micrómetro y la modalidad del submicrómetro. La concentración de la masa en cada una de ellos se derivará habitualmente de datos del ERIRM y se archivará.

El ERIRM tendrá una capacidad directa y de gran alcance. Se recomienda adquirir estaciones receptoras locales y el software de análisis de la NASA para producir datos locales y en tiempo real sobre la ocurrencia de incendios y emisión de aerosoles.

Como en el caso del RAMAR y del TOMS, el ERIRM y el TOMS pueden usarse para distinguir entre humo y contaminación urbana.

EOS-AM1 también incluirá un instrumento canadiense para la medición de la contaminación en la troposfera (MCT), que servirá para medir la concentración de CO en los tres intervalos de altitud de la atmósfera, así como la concentración total en la columna de CH<sub>4</sub>. Los intervalos son los siguientes: de 0 a 3 km, de 3 a 6 km y de más de 6 km. Como en el caso de los datos sobre aerosoles, esta información se puede usar para derivar la tasa de emisión de CO y CH<sub>4</sub> de los incendios. La MCT no tendrá una capacidad directa de gran alcance. Los datos sobre CO y CH<sub>4</sub> podrán obtenerse de los archivos de la NASA hasta 48 después de la adquisición (CSA, 1999b).

### **2.4.3 PERSPECTIVAS DE LARGO PLAZO**

A finales del 2000 o inicios del 2001, la NASA planea lanzar el segundo satélite de EOS (EOS-PM1) que tendrá una órbita vespertina con observación a las 13.30, hora local. También tendrá a bordo el instrumento del ERIRM con la misma capacidad que el instrumento utilizado en AM1. Ello permitirá una observación diaria adicional y más oportuna del humo y los incendios.

El Centro Aeroespacial de Alemania (DLR) y la Agencia Aeroespacial Europea (ESA) están trabajando en un segundo satélite de detección de incendios, FOCUS (DLR, 1997), una versión mejorada del BIRD. El Sistema Innovador de Sensores Infrarrojos (Innovative Infrared Sensor System) del DLR, FOCUS, será lanzado por la International Space Station (ISS, NASA, 1999b) y contendrá lo siguiente:

- un sensor infrarrojo prospectivo de imágenes con enlace directo a un procesador a bordo dedicado a la búsqueda, detección y selección autónoma de “manchas” calientes en tiempo casi real, y
- una combinación de espectrómetro IR de alta resolución con sensor de imágenes IR

para la detección remota de emisiones de gases producidas por eventos de alta temperatura. Los datos permiten estimar la eficiencia de quema y los factores de emisión de los incendios ocurridos en áreas con vegetación, así como las emisiones de gas volcánico. FOCUS ha sido seleccionado por la ESA como uno de cinco “grupos” europeos que serán lanzados durante el 2003–2005; y ahora está en su fase A.

También existen planes para lanzar un satélite geoestacionario avanzado con una capacidad de detección de incendios de 1 km de resolución, lo cual permitiría detectar incendios cada 30 minutos durante el día y la noche. Este será el detector máximo de incendios a través de sensores remotos, pero aún se deben resolver algunas limitaciones técnicas.

En el 2001, la NASA también planea enviar al espacio el primer satélite de órbita polar con un sistema *lidar* –el Geoscience Laser Altimeter System, GLAS (NASA, 1998)–. Las unidades *lidar* incluyen un rayo láser y un sistema de recepción y detección que puede perfilar la distribución vertical del humo y la altura de la inversión de la cubierta. Si bien ERIRM y GLAS no estarán en la misma órbita, sus datos combinados permitirán estimar mejor la concentración del aerosol del humo en el terreno.

#### **2.4.4 RECOMENDACIONES PARA LA IMPLEMENTACIÓN**

##### *Coordinación para monitorear incendios:*

Los datos provenientes del satélite están disponibles para monitorear incendios y aerosoles del humo. Los sensores de satélites adicionales estarán disponibles en un plazo de 1 a 2 años. Se recomienda establecer un centro experto en el monitoreo de incendios y humos. El centro deberá conocer la tecnología y el software disponible para analizar datos obtenidos del satélite. Sería responsable de supervisar los cálculos regionales de incendios y la validación regional de los análisis de humos y emisiones a partir de los datos de satélite. El centro puede estructurarse de igual manera que el centro de monitoreo de FIREGLOBE (GFMC, 1999a). Debe desarrollar nuevas estrategias para la detección de incendios y humos, e informar a los organismos internacionales de las necesidades de esta labor. También integraría la información obtenida en el terreno con los datos provenientes de satélites y aeronaves. Trabajaría con centros regionales (descritos más adelante) para divulgar la información y capacitaría a técnicos en torno al manejo de incendios y al nuevo software correspondiente.

El desarrollo y establecimiento de una escala para calificar la gravedad de los incendios es otro paso importante que está pendiente. Un indicador como este podría combinar los datos provenientes del satélite sobre el número de incendios activos por unidad de área, el tamaño de las áreas quemadas y la energía liberada por los incendios con la extensión de las nubes de humo y la concentración de contaminantes en estas. El conocimiento científico y técnico actual permite definir estos indicadores.

También se recomienda el desarrollo de un sistema espacial de monitoreo de incendios que incluya satélites de detección y un equipo portátil de recepción en tiempo real para proporcionar información sobre la ubicación de los incendios activos, el humo y los gases traza emitidos. Las

mediciones deben representar el ciclo diurno. La información generada por este sistema debería proporcionarse a los países y localidades afectadas en tiempo casi real, de una manera sencilla y de bajo costo; si fuera posible, directamente desde el satélite a los usuarios locales.

#### *Centros regionales de acción contra incendios:*

A escala regional, existe la necesidad de crear centros de acción para casos de incendios. Estos centros recibirán datos regionales provenientes del satélite en sus propias estaciones receptoras y las integrarán con información meteorológica e información sobre monitoreo aéreo y terrestre. Los centros usarán los datos para monitorear el desarrollo de incendios y humos, y predecir la propagación de estos últimos. Estos centros son necesarios ya que la quema de biomasa varía de acuerdo con la región y la recepción directa de datos entregados por el satélite es esencial para la operación en tiempo real. Los centros de la OMM o representantes de este organismo con capacidad meteorológica y satelital, ya existentes, son candidatos naturales para convertirse en centros regionales de acción para casos de incendios.

#### *Disponibilidad de datos:*

Se recomienda requerir a la NASA y a otros organismos apropiados que sigan ingresando datos relevantes a Internet. Por ejemplo, imágenes de la cobertura global del índice de aerosoles del TOMS y el INV.

Las estaciones receptoras de datos del ERIRM aún no están bien desarrolladas. Este tema requiere atención para que las estaciones receptoras sean asequibles.

#### *Desarrollo de software:*

Se deben desarrollar paquetes de software y material de capacitación para el uso de datos provenientes del satélite a fin de pronosticar los efectos de los humos y analizar sus concentraciones.

Se recomienda desarrollar un modelo de asimilación de humos que use modelos globales de circulación mejorados con datos meteorológicos locales y ecuaciones sencillas de balance de masa de humos. El modelo se debe iniciar con la densidad de los incendios o la energía de radiación de estos y con factores de emisión de fuego. Este modelo se debe actualizar regularmente a través de datos provenientes del satélite sobre la presencia y la propagación de humos.

#### *Validación:*

Los cálculos de emisiones de incendios efectuados a partir de sensores remotos se deben validar continuamente a través de mediciones tanto remotas como en el terreno, en áreas con problemas graves de salud debido a episodios de incendios extensos e intensos. Esta validación mejorará la utilidad de los datos provenientes del satélite que se ingresen al modelo de simulación. Asimismo, ayudará a determinar los riesgos ambientales para la salud humana.

Se requiere una red en el terreno de instrumentos destinados a obtener muestras de aire (bombas de aire y sujetadores de filtro) a fin de medir la concentración de aerosoles para tamaños inferiores a 1 ó 2,5  $\mu\text{m}$  de diámetro.

## **2.5 MONITOREO DEL CLIMA Y ELABORACIÓN DE MODELOS SOBRE LA DISTRIBUCIÓN DE INCENDIOS**

Las distribuciones y concentraciones de incendios deben describirse mediante el cálculo del transporte atmosférico a través de modelos diseñados con esta finalidad.

La tarea de describir la distribución espacial y temporal de los incendios está dividida en determinaciones, que pueden hacerse:

- antes del incendio,
- durante el incendio, y
- después del incendio.

En cada una de estas tres etapas se deben alcanzar metas establecidas con anterioridad.

### **2.5.1 ANTES DE UN INCENDIO DE GRAN MAGNITUD: IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS DE INCENDIOS**

Antes de la ocurrencia de un incendio de gran magnitud, los centros nacionales o regionales deben realizar estudios preparatorios que servirán de indicadores de alerta temprana y proporcionarán el marco para monitorear las plumas cuando ocurran incendios importantes. Estos estudios preparatorios pueden dividirse en componentes espaciales y temporales.

*Espacio:*

Se debe determinar la distribución histórica en el espacio de los incendios graves para cada región. Se deben realizar esfuerzos por:

- identificar los incendios graves ocurridos en el pasado en la región;
- definir un incendio grave en función de la magnitud de las emisiones (masa, concentración, grado); y
- obtener un registro lo más amplio posible de estos incendios.

La distribución espacial de incendios grandes en las regiones deben correlacionarse con controles climáticos en la región. La información climática sobre la distribución espacial de precipitación, sequía o índices de incendio debe correlacionarse con el registro de incendios anteriores.

### *Tiempo:*

La distribución temporal de los principales incendios en la región debe determinarse en escalas de tiempo interanuales, anuales y por estaciones. Se debe prestar atención especial a los lapsos correspondientes a las oscilaciones del clima, provocadas por el fenómeno de la El Niño (ENSO) (NOAA, 1999).

Los pronósticos estacionales y anuales, así como el monitoreo de fenómenos importantes como las oscilaciones provocadas por El Niño, deben estar relacionados con las ocurrencias históricas de los principales incendios en la región.

En las escalas más cortas de tiempo, incluido el monitoreo diario, se deben usar intensamente los sistemas de pronóstico de incendios existentes. Por lo general, estos sistemas incluyen:

- índice de sequía,
- número de días secos,
- lecturas de la humedad relativa,
- índice de vegetación, e
- índice de calidad del aire.

Algunas de estas mediciones se obtienen a partir de los sensores vinculados al satélite.

### *Modelos de transporte a gran escala:*

Se debe compilar un registro de las condiciones atmosféricas que caracterizaron a los principales incendios identificados anteriormente. Estas condiciones atmosféricas prototípicas se deben usar para calcular las trayectorias de largo alcance (hasta 10 días) desde los puntos de ocurrencia.

Estas trayectorias de largo alcance deben calcularse para una serie de niveles en la atmósfera (por ejemplo, 850, 700, 500 y 200 hectopascales) y usarse para establecer:

- rutas de transporte más probables,
- centros de población en riesgo,
- ubicaciones óptimas para puntos de monitoreo superficial,
- indicadores de tiempos de transporte,
- indicadores de probabilidad y localización de la recirculación y mayores concentraciones, e
- indicadores de la persistencia de condiciones de contaminación .

Los cálculos de transporte en gran escala se pueden realizar con los modelos de trayectoria existentes en centros nacionales, regionales o en centros meteorológicos de la OMM. Estos modelos se deben intercambiar entre los centros para resolver cualquier incongruencia y estandarizar los procedimientos antes de que ocurra un incendio importante en el futuro. La información también se puede usar para ubicar los puntos de monitoreo en el terreno.

## **2.5.2 DURANTE UN INCENDIO DE GRAN MAGNITUD: PROVISIÓN DE DATOS DEL MODELO DE TRANSPORTE A LOS ORGANISMOS ENCARGADOS DE AFRONTAR EMERGENCIAS**

Una vez que un incendio ha alcanzado un umbral que provoca una respuesta correspondiente a emergencias de gran escala, un componente crítico de dicha respuesta será brindar información sobre las posibles áreas afectadas por emisiones a sotavento del incendio y, si fuese posible, sobre las concentraciones de contaminantes. El modelo de transporte atmosférico (MTA), basado en observaciones asimiladas y modelos de predicción numérica del clima (PNC), es el enfoque más útil para determinar los efectos locales y regionales de los incendios de vegetación. Estas predicciones deben ser accesibles al organismo encargados de responder ante casos de emergencia.

Esta actividad sería emprendida por los servicios meteorológicos nacionales o regionales que tienen capacidad para hacerlo. La OMM tiene una red de centros meteorológicos regionales especializados (CMRE) que brindan apoyo meteorológico durante emergencias ambientales asociadas con accidentes nucleares o radiológicos (OMM-TD/No.778). Estos centros están plenamente capacitados para elaborar modelos de transporte atmosférico (para elaborar modelos en áreas regionales y globales junto con un MTA totalmente integrado). Cada centro es responsable de brindar asesoría en su región a través de un conjunto básico de productos, que incluye la predicción de trayectorias para la liberación del fuego a alturas específicas, la exposición atmosférica y la precipitación superficial.

### *Adquisición de datos para MTA:*

El organismo meteorológico designado brindará información meteorológica y detallará los resultados de la PNC para ser usados en MTA en escalas de tiempo y espacio compatibles con las capacidades del modelo en uso y los requerimientos de respuesta en casos de emergencias. Para modelar la trayectoria y la concentración relativa, se requiere la mejor información disponible sobre localizaciones y áreas de incendios, junto con las alturas de liberación de las emisiones, si fuese posible. Actualmente, esta información se obtiene a través de sensores remotos por vía satélite. Un modelo detallado de las concentraciones requiere información adicional sobre las tasas de emisión de las partículas (u otros contaminantes), la distribución del tamaño de estas y las tasas de precipitación, que aún no están disponibles.

### *Modelo de la trayectoria y dispersión a través del MTA:*

El organismo meteorológico designado proporcionará al organismo encargado de afrontar los casos de emergencia la mejor información posible sobre las trayectorias de transporte y dispersión de la contaminación generada por incendios de vegetación. Las trayectorias pueden precisarse por adelantado para determinar las áreas receptoras o retrotraerse para determinar las áreas que pueden convertirse en fuentes de contaminación. Un modelo “relativo” de concentración que requiere limitados datos de entrada, brindará información sobre la distribución espacial del posible impacto de contaminación.

El modelo de transporte que se emplee debe ser consistente dentro de los errores de pronóstico, lo cual sugiere que los pronósticos de transporte no deben extenderse más allá de 3 a 4 días. El modelo de transporte también debe actualizarse continuamente durante el episodio a través de datos de observación comparados (diferentes de los datos del pronóstico).

*Validación de los resultados del modelo:*

Durante una emergencia por incendio, se debe realizar una continua validación cualitativa y cuantitativa de los resultados obtenidos del modelo. Se puede hacer una verificación de los patrones generales del humo y de trayectorias predichas por el MTA a través de datos obtenidos por vía satélite, a través de aeronaves y en el terreno. Los transportes basados en datos de observación comparativos pueden cotejarse con transportes pronosticados que sean equivalentes. Esto es suficiente para un modelo “relativo” (cualitativo). Sin embargo, para aplicaciones referentes a la salud y cuando se desea elaborar modelos de concentración absoluta, se requerirá un modelo cuantitativo. En ese caso, se deberá determinar las tasas de emisión como una función del tamaño de la partícula, el área de emisión, la altura y mediciones de las concentraciones transportadas por el aire y las precipitaciones superficiales.

### **2.5.3 DESPUÉS DE UN INCENDIO DE GRAN MAGNITUD: REVISIÓN DE DATOS DEL MODELO DE TRANSPORTE Y PROVISIÓN DE ESTOS A LOS ORGANISMOS ENCARGADOS DE AFRONTAR EMERGENCIAS**

Luego del incendio, se debe evaluar los siguientes puntos para mejorar el rendimiento general de los modelos y su uso:

- El rendimiento del o de los modelos debe validarse con datos provenientes de mediciones y obtenidos por vía satélite.
- Si se usaron varios modelos, ¿se obtuvieron resultados similares?
- Los resultados del modelo, ¿llegaron a la audiencia adecuada?
- ¿Cómo se usó la información?
- ¿Estuvo satisfecha la audiencia con la información recibida?
- ¿Qué necesidades no han sido satisfechas?

## 2.5.4 RECOMENDACIONES

- Identificar en cada región al organismo responsable de realizar el monitoreo del clima y de crear modelos sobre la distribución de incendios. Estas capacidades deben incluir:
  - uso de datos históricos sobre los incendios y el clima para elaborar distribuciones espaciales y temporales de los principales episodios de incendio;
  - evaluación de las áreas propensas a incendios y los tiempos más probables para que estos se produzcan en cada región a partir del registro histórico;
  - descripción, a partir de registros anteriores de las rutas y los tiempos más probables de transporte, la población en riesgo de exposición, las localizaciones óptimas para los puntos de monitoreo superficial, las áreas donde ocurre una recirculación y concentración de incendios y donde se prevé que persista una alta concentración de estos;
  - desarrollo de una base de datos para la verificación de los modelos de transporte y dispersión de largo alcance, incluido el acceso a bases de datos mundiales generadas por el modelo.
  - pronósticos del cambio climático, incluido, conocimiento de los cambios periódicos, de la variabilidad del clima asociada con El Niño y de los cambios, tanto estacionales como diarios, en variables como el índice de sequía para prever las localizaciones y los tiempos potenciales de incendio;
  - aprovechamiento de la capacidad disponible para elaborar modelos de trayectoria y dispersión a través de modelos más recientes y aplicables a la región.
- Mejorar e instalar sistemas de monitoreo de emisiones, incluido el acceso a mediciones realizadas por sensores remotos a través del satélite.
- Realizar estudios de verificación del modelo, lo que incluye:
  - estudios de la trayectoria seca;
  - comparaciones entre trayectorias secas y observaciones realizadas por satélite y en el terreno;
  - comparaciones con productos desarrollados por diferentes organismos para los mismos estudios de casos y estandarización con estos;
  - pruebas del sistema integral de respuesta ante emergencias en cada región para determinar que los productos en tiempo real lleguen a los usuarios en una forma utilizable y oportuna.
- Ultimar las capacidades para producir descripciones generadas por modelos y predicciones de la distribución de incendios, a través del envío de documentación clara sobre las capacidades y los productos a todos los organismos involucrados en las regiones respectivas.
- Realizar una evaluación posterior al episodio, tanto de las capacidades de monitoreo del clima como del modelo, incluida una comparación con observaciones provenientes del satélite y generadas en el terreno, así como la satisfacción del usuario con los materiales provistos. Los sistemas deben actualizarse según se requiera.

## **2.6 PROCEDIMIENTOS DE RESPUESTA EN CASO DE EMERGENCIA**

### **2.6.1 INTRODUCCIÓN**

Un requisito para el manejo y control efectivo de incendios es establecer un programa estricto de prevención. Este programa requiere un monitoreo regular de las fuentes de incendios y de neblina, así como de la calidad del aire y la visibilidad, las condiciones meteorológicas y climáticas. También necesita el desarrollo de pronósticos oportunos y un sistema de alerta temprana. El manejo debe realizarse a través de una legislación, acuerdos institucionales, recursos financieros y apoyo técnico. Estas estrategias deben estar respaldadas por objetivos claros y guiadas por políticas consistentes.

El programa se basa principalmente en diversos planes de acción nacional para casos de neblina de los países miembros de la Asociación de Naciones de Asia Sudoriental (ASEAN) y en el informe de la ADB-ASEAN Preparatory Meeting on National Haze Action Plans, llevada a cabo en Manila, Filipinas, del 8 al 9 de junio de 1998. El programa incluye políticas y estrategias de evaluación y manejo, especialmente aquellas relacionadas con mecanismos de respuesta ante emergencias y posibles aspectos legales. Asimismo, enfatiza la necesidad de tratar no solo las causas y efectos de los incendios como fuentes externas de neblina y contaminación, sino también la contaminación local, particularmente en aquellas zonas con vegetación afectadas por incendios.

### **2.6.2 REVISIÓN DE LAS POLÍTICAS**

Como se resumió anteriormente, la mayoría de países, especialmente en la región del sudeste asiático, ha introducido políticas como parte de planes de acción nacional para prevenir y mitigar incendios en terrenos y en zonas con vegetación.

El objetivo común de las políticas de la región es “prevenir y controlar los incendios y la neblina”, con variaciones mínimas en los aspectos enfatizados entre siete de los ocho países miembros de la ASEAN. Sin embargo, solo cuatro países han introducido e implementado políticas de prohibición estricta de la quema abierta: Malasia, Myanmar, Filipinas y Singapur. En Brunei Darussalam, la prohibición solo se aplica durante el periodo de sequía. Se recomienda la implementación de medidas como esta en otros países de la región.

Indonesia se ha fijado objetivos más altos al introducir en su política aspectos concernientes al desarrollo. Uno de ellos es establecer objetivos de conversión de terrenos dentro de niveles sustentables. De manera implícita, se dejan a un lado las áreas de gran biodiversidad y las medidas de mitigación adoptadas para esas comunidades, afectadas por incendios de vegetación y neblinas, son solo marginales. El manejo de incendios es bastante focalizado: se limita al manejo efectivo de combustibles a través de la quema controlada. Sin embargo, la implementación de esta práctica es confidencial, especialmente durante periodos de sequía.

Debido a la necesidad de tratar otras fuentes locales de neblina y contaminación, cinco países ► a saber, Brunei Darussalam (Br), Malasia (My), Filipinas (Ph), Singapur (Sg) y Tailandia (Th)► han establecido e implementado normas de emisión para vehículos motorizados, industria y sectores domésticos. El control de fuentes locales de contaminación, especialmente durante episodios de neblina, es importante para proteger la salud y la seguridad pública, así como otros aspectos ambientales.

En cuanto a la evaluación del marco de las políticas, seis países de la ASEAN, sin incluir a Indonesia (Id), han enfatizado la necesidad de un monitoreo del aire ambiental y elaborar un reporte de los resultados obtenidos. El monitoreo y reporte son básicos para la evaluación y el manejo. Además, Brunei Darussalam se propone “determinar la fuente de neblina”, mientras Filipinas intenta “determinar los peligros para la salud” como parte de la evaluación de sus respectivas políticas.

En lo concerniente al manejo, se deben introducir y fortalecer acuerdos legales e institucionales de escala nacional y regional. Seis países de la ASEAN, sin incluir a Brunei Darussalam, han enfatizado la importancia de la cooperación regional, especialmente en el despliegue de recursos para combatir incendios. Brunei Darussalam, Singapur y Tailandia han subrayado la necesidad de informar al público y a las instituciones relevantes de los distintos episodios y las respuestas a ellos. Algunos países han introducido especificaciones para el manejo que incluyen los siguientes puntos:

- Incentivar el uso de la tierra deteriorada (Id);
- Sustituir el método de tala y quema por las técnicas de cultivo sustentables (My);
- Fomentar el uso de residuos agrícolas (Th);
- Brindar infraestructura para recolectar y disponer residuos sólidos (Sg), y
- “Minimizar la contaminación con neblina generada por el manejo de combustibles” a través de la quema controlada (Id).

*Resumen de las políticas nacionales relacionadas con la neblina en el sudeste asiático:*

#### OBJETIVOS DE LAS POLÍTICAS:

- A. Prevenir y mitigar incendios forestales y del terreno, así como la contaminación del aire resultante (Br, Id, Ma, My, Sg);  
Prevenir y monitorear la contaminación transfronteriza del aire relacionada con la neblina (Ph);  
Mitigar los efectos de los incendios forestales ocurridos en Indonesia (Th) en la salud y en el ambiente;
- B. Proteger la salud y la seguridad pública (Br);
- C. Prohibir la quema abierta (My, Ph, Sg);
- D. Controlar las emisiones producidas por fuentes móviles y fijas (Br, My, Ph, Sg, Th);
- E. Introducir guías y normas de calidad del aire ambiental (Ph).

## DESARROLLO DE LAS POLÍTICAS:

- A. Fijar objetivos de conversión del terreno dentro de niveles sustentables (Id);
- B. Proteger a las comunidades y ecosistemas valiosos que puedan resultar afectados por los incendios y neblina (Id);

## EVALUACIÓN:

- A. Obtener información sobre el estado de la calidad del aire (Br); monitorear la calidad del aire (Br, My, Ph, Sg, Th) y reportar los resultados (My, Ph, Th);
- B. Determinar la fuente de neblina (Br);
- C. Monitorear las emisiones de humos y de material particulado proveniente de fuentes móviles y fijas (Ma);
- D. Determinar los peligros para la salud (Ph);
- E. Promover medidas de vigilancia (My), y realizar acciones de vigilancia para prevenir y detectar incendios (Th).

## MANEJO:

- A. Informar al público y las autoridades de la calidad del aire y de las medidas adoptadas al respecto (Br); fomentar la toma de conciencia, la educación y la información pública en torno a este tema (Sg, Ph, Th);
- B. Garantizar instalaciones médicas y de salud (Br);
- C. Apoyar a los países vecinos pertenecientes a la ASEAN (Th); fomentar la cooperación entre los países asiáticos (Ph);
- D. Minimizar la contaminación con neblina provocada por el manejo de combustibles (Id), y fortalecer la cooperación y la ayuda interinstitucional (My, Sg, Ph, Th); y movilizar recursos para fortalecer la capacidad de los institutos responsables del plan (My, Sg, Th).

### **2.6.3 MECANISMOS DE RESPUESTA ANTE EMERGENCIAS**

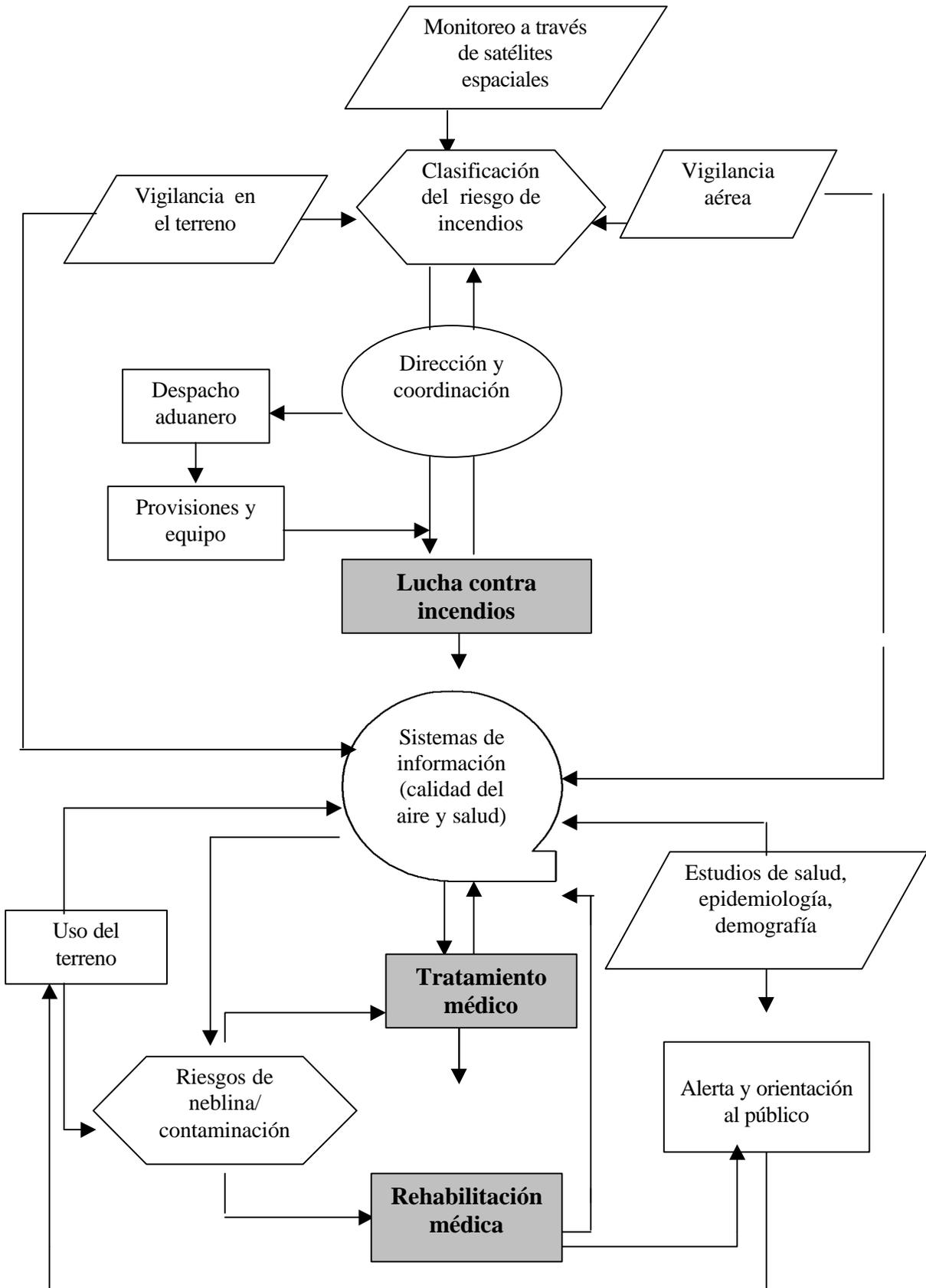
Los diversos aspectos y componentes de los mecanismos de respuesta ante emergencias en los niveles nacional y subregional en el sudeste asiático sirven de base para elaborar mecanismos de respuesta en la región. Como se muestra en la figura 2.6.3-1, los mecanismos necesarios, en orden de prioridad, son los siguientes:

- ❖ Detección temprana de conatos de incendios y humos;
  - monitoreo a través de satélites;
  - vigilancia aérea;
  - vigilancia terrestre;

- pronóstico del clima, y
- elaboración de modelos atmosféricos basados en la superficie.
  
- ❖ Lucha contra incendios;
  - coordinación en la escala nacional;
  - coordinación y asistencia en la escala subregional, y
  - medidas en la escala local.
  
- ❖ Vínculos de comunicación;
  - Internet;
  - intranet;
  - teléfono/telefax, y
  - radio.
  
- ❖ Cumplimiento;
- ❖ Campañas de educación y toma de conciencia entre el público;
- ❖ Monitoreo de la calidad del aire;
- ❖ Estudios de los efectos socioeconómicos y en la salud;
- ❖ Clasificación del peligro de incendio, y
- ❖ Planificación del uso del terreno.

El plan enfatiza la necesidad de establecer una cooperación internacional y regional a través del intercambio de datos provenientes del satélite, así como de la vigilancia aérea y terrestre. La evaluación de estos datos servirá de base para prevenir y controlar incendios forestales. Ello será posible a través de la asistencia técnica de todos los centros de excelencia, especialmente para el pronóstico del clima y la elaboración de modelos de transporte de neblina de largo alcance. El manejo forestal oportuno es importante para asegurar el éxito de todo plan de respuesta ante emergencias.

**Figura 2.6.3-1 Mecanismos básicos de respuesta ante emergencias**



## 2.6.4 OTROS ASPECTOS LEGALES POSIBLES

Generalmente, se espera que la ejecución del plan de respuesta ante emergencias no genere problemas legales a escala regional. Ello se relaciona particularmente con el tránsito de las embarcaciones, aviones, equipo y personal a través de las fronteras nacionales. Para el despacho aduanero y la inmigración, se aplica un procedimiento normalizado de operación (SOP).

Sin embargo, se prevé que en el ámbito nacional se produzcan algunos problemas legales, ya que durante un episodio varias autoridades implementan o activan sus planes de acción nacional para casos de neblina (PANN). Debido a que las fuentes externas de neblina o contaminación están más allá de su control, las autoridades nacionales deben reducir, controlar e incluso prohibir ciertas actividades contaminantes durante un episodio. Esta medida tendrá implicancias financieras y económicas.

La mayoría de países cuenta con leyes y reglamentos generales o específicos tanto para controlar los incendios de vegetación y la contaminación del aire, como para proteger la salud pública y el ambiente de los efectos de estas fuentes. A manera de ejemplo, en Malasia las leyes y reglamentos específicos se enmarcan en el Environmental Quality Act (1974, con enmienda en 1996) e incluyen:

- Environmental Quality (Clean Air) Regulations, 1978: establecimiento de normas de emisión para fuentes fijas y móviles;
- Environmental Quality Act (enmienda), 1998 (Ley 1030): introducción de disposiciones que prohíben la quema abierta, y
- Environmental Quality (Prescribed Activities) (Environmental Impact Assessment) Order, 1987.

En Malasia, existen otras leyes y disposiciones aplicables al control y mitigación de incendios forestales y de terrenos así como a la contaminación del aire. Estas incluyen prácticas aceptables en los campos del manejo forestal, el desarrollo de los terrenos, la disposición de residuos sólidos, etc.

Para complementar las medidas reguladoras, la “autorreglamentación” es una política apropiada para las responsables de la contaminación del aire, como una respuesta a condiciones ambientales deficientes, sin necesidad de depender de las directivas de las autoridades.

## 2.6.5 RESUMEN

Muchos países, si no la mayoría, han establecido en alguna medida, políticas, legislaciones y disposiciones de respuesta ante emergencias para controlar y combatir los incendios de vegetación y la contaminación del aire, y para minimizar los efectos de estos episodios. Por esta razón, es oportuna la elaboración de guías de salud comunes para todos los países. Para asegurar el cumplimiento de estas, son muy importantes los mecanismos de ayuda a los respectivos

países, que deben incluir dichas guías en su política, legislación y sistema de respuesta ante emergencias. De esta manera, se podrán identificar y fortalecer las áreas deficientes.

En términos de políticas, los elementos esenciales pueden ser extraídos a través de la combinación de los enfoques desarrollados por los diferentes países. Con respecto a los objetivos, los elementos identificados son:

- Prevenir y controlar incendios forestales y de terrenos;
- Proteger la salud y la seguridad pública en esos casos;
- Prohibir la quema abierta;
- Introducir e implementar guías y normas de calidad sobre el aire, y
- Fortalecer el control de emisiones de fuentes fijas y móviles.

Los elementos relativos a la política de desarrollo son los siguientes:

- Planificar el uso de terrenos a partir de los principios del desarrollo sustentable, y
- Proteger a las comunidades y ecosistemas que puedan resultar afectados por los incendios y la neblina.

Los elementos referentes a la política de evaluación incluyen los siguientes:

- Monitorear y reportar los resultados de la calidad del aire;
- Desarrollar un mecanismo efectivo de monitoreo de incendios forestales y de tierras;
- Crear capacidades para detectar y pronosticar incendios forestales y neblina, y
- Monitorear los impactos de la neblina en la salud y el ambiente.

Las políticas de control se centran en los siguientes aspectos:

- Informar al público y las autoridades de la situación de la calidad del aire y las medidas adoptadas al respecto;
- Asesorar al público sobre las medidas de protección de la salud;
- Asegurar provisiones e instalaciones médicas para mitigar los efectos del episodio en la salud;
- Brindar apoyo a las naciones necesitadas y fomentar la cooperación entre los países asiáticos;
- Minimizar la contaminación por la neblina generada por la quema de combustibles;
- Fortalecer las capacidades de las instituciones relevantes, y
- Fortalecer la cooperación y el apoyo entre instituciones.

La mayoría de países tiene en vigencia algún tipo de ley para el control de los incendios forestales y la contaminación del aire, así como para la protección de la salud pública y el ambiente de los efectos de la neblina. Las necesidades actuales se centran en la identificación de áreas deficientes y el establecimiento de mecanismos para fortalecer el cumplimiento de los reglamentos. El marco para la formulación de mecanismos de respuesta ante emergencias puede derivarse de la experiencia de cooperación entre los tres países más afectados durante el episodio

de neblina ocurrido en 1997, a saber, Indonesia, Malasia y Singapur. Este marco incluye actividades de coordinación, monitoreo y detección de incendios, lucha contra estos, canales de comunicación, cumplimiento, monitoreo de la calidad del aire y de sus efectos en la salud, educación pública y campañas de toma de conciencia, planificación del uso de tierras y clasificación de los peligros de incendios.

El éxito de las políticas dependerá del intercambio oportuno de datos y experiencias, posiblemente a través de medios electrónicos y mediante teleconferencias entre las diversas autoridades o centros de excelencia en los ámbitos nacional, regional e internacional, así como de la cooperación estrecha y el apoyo continuo entre ellos.

## 2.6.6 RECOMENDACIONES

- ❑ Esta sección de las guías debe actualizarse continuamente y ampliarse de manera que tome en cuenta las experiencias de regiones distintas, del sudeste asiático.
- ❑ A fin de proteger a los grupos de la población particularmente sensible a los riesgos de la neblina y de los incendios, se debe desarrollar una guía de salud, establecer un sistema de alerta temprana y adoptar medidas para la movilización de dichos grupos como medida de salud preventiva.
- ❑ Se deben establecer e implementar acuerdos institucionales en los ámbitos internacionales y regionales, similares al ASEAN Specialized Meteorological Centre, para desarrollar un sistema de alerta temprana de las condiciones meteorológicas que generan neblina. La capacidad de efectuar este tipo de alerta es invaluable para las autoridades nacionales que tratan de aplicar controles estrictos sobre la quema tanto controlada como abierta de cualquier forma de biomasa o residuos.
- ❑ Como un seguimiento de este sistema de alerta temprana, se debe instalar una infraestructura para el monitoreo del aire similar a las redes privadas de monitoreo en Malasia, a sotavento de las áreas propensas a incendios y en las comunidades que puedan resultar afectadas.
- ❑ Para las comunidades afectadas por incendios de vegetación y otras fuentes de contaminación, se debe desarrollar una serie de guías para proteger la salud pública no solo de los efectos de las partículas sino también de otros contaminantes que dañan la salud, especialmente el dióxido de azufre, el ozono y el monóxido de carbono.
- ❑ Durante un incendio, las autoridades nacionales deben consultar con organismos internacionales competentes tales como la OMS, la OMM y el PNUMA. Estos organismos internacionales deben investigar la factibilidad de establecer un panel de expertos en neblina, cuyos miembros estén comunicados a través de medios electrónicos para un intercambio rápido de datos.

## 2.7 USO Y APLICACIÓN DE ESTAS GUÍAS

Las siguientes secciones enumeran las medidas que deben tomarse antes, durante y después de un episodio de incendio

### 2.7.1 MEDIDAS PREVIAS AL EPISODIO

- ❖ Organismos internacionales como la OMS y la OMM deben incentivar a las autoridades nacionales para que incluyan estas guías dentro de sus planes de emergencia.
- ❖ En el ámbito nacional, las autoridades responsables (Ministerio de Salud, Ministerio del Medio Ambiente) deben identificar un grupo de trabajo para casos de emergencia que incluya un componente encargado de los incendios de vegetación dentro de sus planes nacionales de salud o deben crear un plan de emergencia para esos casos.
- ❖ Coordinar reuniones multidisciplinarias para elaborar un “plan de respuesta”, que incluyen a los siguientes componentes:
  - bomberos (prevención y control);
  - servicios de salud (centros de salud y hospitales);
  - unidad de vigilancia epidemiológica;
  - redes de vigilancia ambiental, y
  - monitoreo ambiental y servicios meteorológicos.
- ❖ Este “plan de respuesta” debe incluir:
  - identificación de las responsabilidades generales, aptitudes técnicas, experiencias, recursos humanos de cada sector;
  - división del plan en tres bloques;
    - medidas previas al episodio y alerta temprana;
    - medidas por aplicar durante el episodio: respuesta y evaluación de daños y necesidades;
    - medidas posteriores al episodio: evaluación y actualización del plan, incluida la divulgación de las lecciones aprendidas.
- ❖ Definir las fuentes de información:
  - vigilancia epidemiológica de la salud pública;
  - monitoreo de la calidad del aire;
  - vigilancia meteorológica, y
  - datos provenientes del satélite.
- ❖ Evaluar la disponibilidad y la calidad de la información;

- ❖ Evaluar los complementos necesarios para las fuentes de información (frecuencia, monitoreo adicional, otras técnicas, nuevas investigaciones, etc.);
- ❖ Evaluar los recursos financieros y de capacitación necesarios;
- ❖ Identificar los niveles básicos para la salud y la calidad del aire;
- ❖ Describir las responsabilidades y las medidas adoptadas por cada institución durante emergencias relacionadas con incendios de vegetación;
- ❖ Definir la coordinación y el flujo de información entre las diversas instituciones;
- ❖ Definir la comunicación de riesgos con los siguientes estamentos:
  - autoridades;
  - medios de comunicación, y
  - público.
- ❖ Incentivar a otras instituciones relevantes para que contribuyan con una mejor planificación de la respuesta;
- ❖ Capacitar a los equipos, realizar simulaciones y ejercicios de coordinación;
- ❖ Reproducir el plan en los ámbitos regional y local;
- ❖ Planificar el presupuesto y la distribución de recursos.

## **2.7.2 MEDIDAS PARA APLICAR DURANTE EL EPISODIO**

Respuestas y evaluación de los daños y las necesidades:

- ❖ Evaluación de los sistemas de vigilancia;
- ❖ Comparación de la información registrada durante el episodio con la información de base;
- ❖ Mitigación;
  - asesorar al público y crear conciencia en torno al problema, y
  - evaluar la capacidad del sistema de salud pública para brindar servicios y reforzar sus recursos humanos, farmacológicos y otras necesidades.

### **2.7.3 MEDIDAS POSTERIORES AL EPISODIO**

- ❖ Evaluación crítica de las medidas tomadas durante el episodio;
- ❖ Evaluación del impacto del incendio en la salud pública y el ambiente;
- ❖ Evaluación del impacto socioeconómico;
- ❖ Actualización y mejora del plan de emergencia para incendios de vegetación, y
- ❖ Divulgación de las lecciones aprendidas.