****

**Informe de Criterios Meteorológicos para la siembra de nubes**

****

**Introducción**

Los resultados de la siembra dependen de la variabilidad natural de las nubes por lo que es necesario escoger sitios donde el clima favorece que las nubes tengan las características adecuadas para incrementar su precipitación una vez que son sembradas. Aun cuando se escojan sitios donde hay alta frecuencia de nubes con potencial para la siembra y se configuren los generadores en forma óptima, sigue siendo necesario determinar el momento adecuado para sembrar y por tanto existe una dependencia de la capacidad del personal que realiza la siembra de escoger las nubes adecuadas. Es importante identificar las oportunidades de siembra o las situaciones donde no se debe sembrar para reducir los riesgos inadvertidos y minimizar el costo de las operaciones.

Bajo tales circunstancias, es necesario tener criterios de los cuales inferir la existencia de condiciones para la siembra a partir de otras variables meteorológicas. Las mediciones son de gran valor en la determinación y verificación en tiempo real de estos criterios. Por esto, en gran parte de las operaciones de siembra que se realizan en el mundo, además de las observaciones convencionales con radiosondas y las estaciones de superficie, se cuenta con radiómetros de microondas portables, nefobasímetros, radares y mediciones de instrumentos a bordo de aviones. Aunque los expertos concuerdan con la necesidad de contar con estas observaciones en las operaciones de siembra, estos equipos tienen un costo elevado y las entidades que financian la siembra no siempre invierten en este equipamiento.

La fuentes de información disponibles operativamente en Chile generalmente se reducen a la estación de radiosondeo más cercana, estaciones de superficie, imágenes satelitales y las salidas de los modelos numéricos de predicción del tiempo disponibles. Sin embargo, la falta de información no es el mayor de los problemas sino el hecho de que los valores y umbrales de las variables que se usan como criterio son los obtenidos para otros países. Además, no toda la información disponible es utilizada (Ej. productos satelitales de la base y el tope de las nubes, la reflectividad, etc.). Entonces, este proyecto responde dos interrogantes necesarias para realizar operaciones de siembra efectiva: ¿Cuáles son los valores de los criterios de sembrabilidad en Chile? ¿Cuáles son las herramientas más adecuadas para verificar en tiempo real la existencia de dichos criterios? De esta manera se puede ayudar a que la siembra de nubes sea una alternativa real para mitigar la sequía en nuestro país.

**Criterios meteorológicos**

 Las condiciones necesarias para iniciar o continuar la siembra para la región de O’Higgins se obtuvieron a partir de los criterios meteorológicos que actualmente se utilizan en este proceso. Estos criterios se verificaron y adaptaron a las condiciones específicas de las nubes y la topografía del área de interés, utilizando todas las observaciones disponibles (incluidas las de las campañas) y las simulaciones numéricos para la cuenca prototipo.

Los criterios obtenidos a partir del estudio anterior fueron:

1. **El área cubierta por la nubosidad (CC):** El área cubierta debe exceder al menos el 50% o sea el cielo cubierto debe superar las 4 octas.
2. **Temperatura del tope de las nubes (Ttc):** El sistema frontal deberá presentar nubes cuyos topes tengan temperaturas entre los -7.0 y los -27.3° C. Es bueno señalar que aunque el yoduro de plata se activa a temperaturas tan altas como -4ºC, su activación es mucho más eficiente por debajo de los -8ºC por lo que podría reducirse el intervalo de topes a aquellos que se encuentren entre -8 y -27ºC.
3. **Altura de la base de las nubes (Hbc):** La altura máxima de la base de la nube debe ser de 2050 msnm (metros sobre el nivel del mar). Si se consideran sitios donde el generador está por debajo de 900 msnm y con poco potencial de siembra, el valor máximo de la altura de la base disminuye a 1780 msnm.
4. **Altura de la isoterma -5°C (H-5C):** La temperatura en el nivel de 700mb debe ser menor a -8ºC.
5. **Altura de la isoterma 0°C (H0C):** La altura de la isoterma 0ºC debe ser inferior a 2400 msnm. El criterio para la altura de la isoterma 0°C debe ajustarse según la altura de la nieve acumulada en tormentas previas.
6. **Dirección del viento (WD700):** La dirección del viento predominante a 700 mb, debe estar entre los 270-360º (debe tener una componente NO). Este criterio es un indicador de que el viento conduce al transporte de material de siembra hacia las áreas objetivo y depende de la ubicación de los quemadores.
7. **Velocidad del viento en 800mb (WF800):** Las velocidades del viento en o cerca de 800 mb no deben exceder los 30 m s-1 (60kt)

El primer criterio que se determinó fue el por ciento de cielo cubierto umbral sobre el cual se debe activar la siembra, obtenido a partir del análisis del porciento de cielo cubierto de los datos de los satélites en presencia de nubes con potencial para ser sembradas.

El siguiente criterio que se evaluó fue el intervalo de temperaturas en el que deben encontrarse los topes de las nubes para que estas contengan agua sobreenfriada (SLW). Para determinar estas temperaturas del tope críticas (Ttc), primero se calculó el percentil 80 de los valores de temperatura del tope para todas las nubes con SLW (Tt80). Luego, si existían nubes con temperaturas de los topes inferiores a Tt80 y presencia de hielo se utilizó Tt80 como Ttc. De lo contrario, se utilizó como Ttc el valor de -25°C para el cual se conoce que existen suficientes núcleos de congelación (Cotton y Pielke, 1995).

El criterio de altura de la base (Hbc) se evaluó para la cuenca del Cachapoal teniendo en cuenta la altura de la topografía y la distancia al los generadores instalados (Hs). La base de la nube debe estar por debajo de la cima de las montañas donde se colocan los generadores y la distancia entre la base de la nube y el generador deberá permitir que la pluma alcance la nube (Hs). Esta distancia se determinó realizando un estudio de modelación para evaluar la dispersión y trayectoria de la pluma de yoduro de plata bajo distintas condiciones meteorológicas frontales. Operativamente no es frecuente disponer de datos de altura de la base nube en el lugar, por lo que el criterio que aquí damos se obtuvo estadísticamente a partir del sondeo de Santo Domingo cuando se cumplía con lo descrito anteriormente para los lugares con potencial dentro de la cuenca.

Otros criterios importantes son la altura de las isotermas -5°C (H-5c) y 0°C (H0c). La primera debe estar a una altura que no exceda la distancia Hs sobre el generador para garantizar que el yoduro de plata ingrese a la parte de la nube donde se activa como núcleo glaciogénico. Mientras que la isoterma 0°C debe encontrarse a alturas inferiores a la línea de nieve en el área de interés en el momento de la siembra, pues en caso contrario la precipitación llegará en forma de líquida y contribuirá al derretimiento de la nieve acumulada.

Por último para lograr una siembra efectiva de las nubes es necesario que el material glaciogénico ascienda desde el generador hasta la base de la nube con ayuda de la topografía, por lo que es necesario colocar los generadores en posiciones que favorezcan el ascenso en presencia de los vientos frontales. Según el análisis de trayectoria en presencia de nubes con potencial para la configuración actual de los quemadores se obtuvo el intervalo de la direcciones del viento que favorecen los movimientos ascendentes. Por otra parte, la velocidad del viento cerca del tope de las montañas en la que se ubican los generadores no debe exceder cierto umbral (WF) para asegurar que haya suficiente tiempo disponible para el crecimiento y la precipitación de cristales de hielo sembrados dentro del área objetivo.

La forma de evaluar estos criterios usando las observaciones disponibles en la Región de O’Higgins se explica el modelo operativo de siembra de nubes.

**Referencias**

Cotton, W. R., and R. A. Pielke (1995) Human Impacts on Weather and Climate. Cambridge, Mass.: University of Cambridge Press.