

El Cambio Climático, medidas de mitigación mediante la siembra de nubes

Carlos A. Antonietti.

Piloto de Combate durante la Batalla de Malvinas volando Mirage V Dagger. Piloto de siembra de nubes en Texas, USA. Gerente Regional América del Sur de SAHC, Empresa de Siembra de Nubes con Aviones y Terrestre, para siembra glaciogénica y electrostática.

Mucho se habla en nuestros días del Cambio Climático, algunas veces con base científica, otras simplemente repitiendo conceptos que no siempre se condicen con la realidad. Lo cierto es que el cambio climático se produce en nuestro universo de manera repetitiva, con intervalos de millones de años, y consecuencias conocidas, aunque la ciencia va desentrañando misterios de esos fenómenos año a año.

Una de las consecuencias del cambio climático es no sólo el aumento de las temperaturas, sino también sequías prolongadas, inundaciones, fenómenos extremos.

Pero no podemos hablar de siembra de nubes, sin antes explicar someramente, los factores en juego, quiénes son, qué son, cómo actúan a diario en nuestras vidas, aunque no nos dediquemos a observarlas detenidamente.

Comencemos por la Física de Meteorología, una sección de la Meteorología que estudia esos fenómenos que no están directamente relacionados con la circulación atmosférica. Conecta la Meteorología con otras ciencias como la Química. La Meteorología misma es una ciencia basada en la Física; por lo tanto, la circulación atmosférica es un problema físico; pero el uso común del término "física" se ha transformado en algo menos mecánico, más Termodinámica, Electromagnetismo y también Física Cuántica. Es otro ejemplo de cómo el lenguaje evoluciona por caminos inesperados".

Este artículo dará al lector un viaje resumido sobre tópicos como los aerosoles y polución, nubes y precipitaciones, electricidad atmosférica, química, óptica atmosférica y modificación del clima; una corta visita a la atmósfera superior también está en esta mezcla.

Los Aerosoles son particulados atmosféricos, sólidos o líquidos. Se forman ya sea por desintegración de sólidos o líquidos, o por la conversión de gases.

Los aerosoles tienen gran impacto sobre las condiciones meteorológicas y el clima como también sobre la salud. Los factores más importantes para tener en cuenta cuando se describe el comportamiento de aerosoles son: tamaño de la partícula, concentración y composición química.

- **Tamaño de Partículas:** hay aerosoles de distintos tamaños, de 0,01 micrón, hasta 1 o más micrones. Dependerá de la composición y la forma de los aerosoles, que los hay de variadas formas e influyen de manera importante en las propiedades ópticas de la atmósfera, y las precipitaciones.
- **Concentración:** Es el número de partículas por unidad de volumen. La concentración de aerosoles varía enormemente según la zona, por ejemplo sobre los mares, la concentración a aproximadamente de 10-4 m-3, mientras que sobre zonas altamente contaminadas, o áreas urbanas, es de 1011 m-3.



Una de las consecuencias del cambio climático es no sólo el aumento de las temperaturas, sino también sequías prolongadas, inundaciones, fenómenos extremos.

- **Composición Química:** dependerá de variaciones de temperatura y concentraciones de la Fuente de emisión, o la mezcla de aerosoles de distintas fuentes; aún una sola partícula pueden estar compuestas de muchas especies químicas. Normalmente los aerosoles atmosféricos están compuestos de cantidades variables de sulfatos, amonio, nitratos, sodio, cloratos, trazos metálicos, material de desprendimiento rocoso, y materiales carboníferos, orgánicos e inorgánicos.

Núcleos de Condensación de Nubes (CCN) y Núcleos de Formación de Hielo (IN)

Es importante establecer la existencia de aerosoles hidrofóbicos y aerosoles hidrófilos. Cuando el vapor de agua se supersatura, el crecimiento de condensación de esos aerosoles los hace CCN y sobre ellos se forman las gotas de lluvia.

Por otro lado, los aerosoles insolubles en agua, juegan un rol importante en la nucleación de hielo a temperaturas por debajo de la usual de congelamiento. Algu-

nos aerosoles de origen calcáreo fundamentalmente, de tamaños entre 2 y 20 micrones, pueden congelarse recién a -5°C , y pueden permanecer suspendidas en el aire por varios días.

A temperaturas de -25°C es cuando se observa un congelamiento generalizado en nubes convectivas. Las operaciones de siembra de nubes buscan promover la formación de hielo en nubes convectivas para alcanzar esas concentraciones a -5°C , usando yoduro de plata o materiales similares.

Nubes

Las nubes son visibles en la tierra pues están compuestas por aerosoles, y/o suspensiones coloidales. Sus partículas se forman desde el vapor de agua por condensación y cristalización cuando el aire es lo suficientemente frío para alcanzar supersaturación. En detalle, son agregados de gotas de agua y/o cristales de hielo penetrados por aire. Para ser visibles, las nubes necesitan suficiente cantidad de concentraciones

de partículas llamadas hidrometeoros. Esos hidrometeoros tienen tamaños del orden de los 10 micrones de radio, pero cuando hay partículas que precipitan, pueden alcanzar milímetros de radio.

Observaciones de satélite muestran que a escala planetaria, aproximadamente un 70% de la superficie Terrestre está cubierta por nubes en promedio anual, con un 10% (+/-5%) más de nubes sobre los océanos que sobre la tierra.

Las nubes son un factor importante en la ecuación de radiación de la tierra. Pueden reflejar la radiación solar (onda corta) enviándola de regreso al espacio, y mantener atrapada la radiación infrarroja (onda larga) emitida por la superficie de la tierra.

Obviamente, las nubes son parte del ciclo hidrológico. Adicionalmente las nubes son lugares para reacciones químicas, (dentro de las gotas de nubes).

Tipos de Nubes

Jean Baptiste Lamarck (1744-1829) clasificó las nubes en tres grandes grupos: cumulus, stratus, y cirrus, todos nombres con raíces del latín. La Organización Mundial Meteorológica, considera 10 tipos de nubes:

- **Cirrus (Ci):** nubes altas, (5 – 13 km)
- **Cirrocumulus (Cc):** nubes altas (5 -13 km)
- **Cirrostratus (Cs):** nubes altas (5 -13 km)
- **Alto cumulus (Ac):** nubes de niveles medios (2 - 7 km)
- **Altostratus (As):** nubes de niveles medios (2 - 7 km)
- **Stratocumulus (Sc):** de base baja y en capas (0 - 2 km)
- **Stratus (St):** de base baja y en capas (0 - 2 km)
- **Nimbostratus (Ns):** de base baja y en capas de color gris y precipitaciones constantes
- **Cumulus (Cu):** de base baja con crecimiento vertical
- **Cumulonimbus (Cb):** de base baja con crecimiento muy vertical, densas, con precipitaciones

Visitando el siguiente link se pueden ver imágenes de nubes, que es mejor que la descripción con palabras. <https://cloudatlas.wmo.int/principles-of-cloud-classification-genera.html>

Las dos clasificaciones previas de nubes, se basan en su apariencia. Pero esas apariencias tienen una

Las nubes son un factor importante en la ecuación de radiación de la tierra. Pueden reflejar la radiación solar (onda corta) enviándola de regreso al espacio, y mantener atrapada la radiación infrarroja (onda larga) emitida por la superficie de la tierra.

relación estrecha con las condiciones atmosféricas y es necesario el estudio micro físico de las nubes para entenderlas como suspensiones coloidales.

Dinámica de las nubes: las nubes tienen movimientos internos, con un ensamble de gases (aire, vapor de agua) y condensados (gotas líquidas y partículas de hielo) que se mueven. Quizá se vea un paisaje nuboso calmo, pero internamente hay movimientos de masas de aire, alcanzando velocidades verticales inimaginables para quien sólo las observa (100 y más km/hora)

Las nubes se forman principalmente por enfriamiento adiabático de aire ascendente no saturado; a medida que la parcela de aire se enfría, el vapor de agua comienza a saturarse, y cuando la temperatura es lo suficiente fría, el vapor de agua se satura y una parte llega a la súper saturación que permite se formen las gotas. La condensación libera calor latente y el proceso ya no es más adiabático.

Los procesos aquí descriptos muy brevemente son complicados matemáticamente, siendo necesarios modelos numéricos para descifrarlos en detalle.

Propiedades microfísicas de las nubes

Como suspensiones coloidales, las nubes están bien descritas por sus propiedades microfísicas:



1. **Liquid Water Content (LWC):** cantidad de agua por metro cúbico
2. **Ice Water Content (IWC):** cantidad de hielo por metro cúbico
3. **Cloud Droplet Concentration (CDC):** cantidad y concentración de gotas por centímetro cúbico
4. **Ice Crystal Concentration (ICC):** cantidad y concentración de cristales de hielo por centímetro cúbico

Estas cuatro propiedades establecen un promedio del tamaño de las partículas de nubes y de la reflectividad de la luz solar, por eso las vemos con distintos grados de grises y blancos. También influyen en esas propiedades, factores geográficos, por ejemplo, las gotas de nubes más pequeñas se encuentran en nubes continentales, comparándolas con nubes marítimas, como consecuencia de la mayor concentración de aerosoles sobre la tierra que sobre los océanos.

Precipitación

Por convención, todas las gotas mayores a 0.1 mm (100 micrones) de radio, se consideran gotas de precipitación, aunque algunos científicos prefieren darle una clasificación más detallada. Gotas con un radio cercano a 0.1 mm son llamadas “precipitación embrionaria”.

Algunos tipos de precipitación:

- **Lluvia:** gotas de agua con radios mayores a 0.25 mm (250 micrones)
- **Llovizna:** gotas de agua con radios menores a 0.25 mm (250 micrones) Nieve: cristales de hielo y agregados que precipitan desde una nube.
- **Graupel (pellets de nieve, hielo muy pequeño):** granos de nieve con un radio menor a 2.5 mm.
- **Granizo:** cristales de hielo con radio mayor a 2.5 mm.

Breve descripción de la formación de precipitaciones:

Condensación del vapor de agua no explica como las gotas pueden ser lo suficientemente grandes para llegar a precipitación. Sin embargo, las gotas en las corrientes de aire dentro de las nubes colisionan y se agregan unas a otras (coalescencia), inmediatamente forman núcleos de condensación (CCN) que pueden actuar de colectores y pueden crecer a expensas de gotas más pequeñas.

No vamos a entrar en las ecuaciones matemáticas del crecimiento de las gotas, pero debe saberse que todo está matemáticamente investigado, calculado y de-

mostrado, aunque no totalmente entendido, la Madre Naturaleza guarda secretos que aún no fueron entendidos totalmente por los investigadores.

Hay tres procesos principales, identificados para la nucleación del hielo: deposición de vapor, agregación (la suma de varios cristales hace uno más grande) y escarcha. La deposición aparece al máximo a partir de los $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$, agregación a partir de $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, y la escarcha muestra ser muy eficiente a partir de cualquier temperatura negativa. El granizo se forma a partir de escarcha extrema, a bajas temperaturas, aproximadamente $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$, pudiendo el granizo llegar a medir hasta 15 centímetros de diámetro. Hay procesos secundarios que no vamos a tratar como la fragmentación, por ejemplo.

Electricidad atmosférica en tiempo claro

Sobre la tierra hay campos eléctricos mayores que sobre los océanos, y a medida que se asciende en la atmósfera se llega a una altura (aprox 60 km) donde hay regiones de constante potencial eléctrico debido a la conductividad, la zona llamada ionósfera.

No entraremos en detalles, pero es importante saber que los campos eléctricos influyen en los aerosoles, la formación de nubes y nos dan indicios claros sobre futuras precipitaciones de distinto tipo.

Electricidad de las nubes

Pequeñas nubes tienen una estructura eléctrica, pero el campo eléctrico es débil. Una gran tormenta por el contrario genera señales electromagnéticas fuertes que causan el llamado “resonancia de Schumann” porque las señales van y vienen entre dos superficies que hacen de capacitores. Es lo que se llama “clima eléctrico de la Tierra”.

La mayoría de las tormentas tienen una estructura tripolar de distribución de la carga eléctrica. En el tercio superior de la tormenta (nube) a temperaturas de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ o más fría, las partículas de hielo son mayormente positivas. En el tercio medio, las gotas de lluvia y graupel llevan cargas negativas (alrededor de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$).



Y en el tercio más bajo, cerca de la base de la nube, hay a menudo una pequeña carga positiva, aunque se observó que algunas tormentas tienen un estructura eléctrica inversa.

No por casualidad, se invirtieron cientos de millones de dólares en el proyecto “RELAMPAGO” <https://sites.google.com/illinois.edu/relampago/home> en 2018/19, para estudiar - entre otras cosas- el comportamiento de las tormentas eléctricas desde San Luis (extremo sur de las Sierras de los Comechingones, hasta el norte de Santa Fé). Aún no se dio a conocer el resultado científico final de este proyecto, pero hay centenares de científicos de distintas universidades y organizaciones científicas trabajando en él.

Un detalle, hay un satélite llamado TRMM (Tropical Rain Measurement Mission- Misión para Medir Llu-

Sobre la tierra hay campos eléctricos mayores que sobre los océanos

Las tormentas eléctricas ocurren mayormente sobre tierra, y las más importantes generalmente en América del Sur, África Centra y Sudeste Asiático

vias Tropicales) que fue lanzado en 1997 desde el Centro Espacial Tanegashima, en Japón y midió el “campeón de tormentas”, la que mayor altitud alcanzó, en el noreste de Santa Fé.

Química de Aerosoles y Nubes

La formación y desarrollo de nubes impactan en la química de la atmósfera, pudiendo disociarse la mayoría de los químicos presentes en los aerosoles en gotas de aguas produciendo iones; por ejemplo el ácido nítrico (HNO_3), amoníaco (NH_3), ácido hidrocloreídrico (HCl), dióxido de sulfuro (SO_2), y aún el dióxido de carbono (CO_2) al ser disueltos en agua, aparecen los correspondientes iones.

En resumen, también la química de aerosoles y nubes son un tópico importante en la investigación atmosférica, orientada al estudio de las precipitaciones.

Óptica de la Atmósfera

Cuando la luz impacta un aerosol, pueden ocurrir dos procesos: scattering (dispersión de energía con la misma longitud de onda), y absorción (algo de energía se dispersa internamente y otra es dispersada con distinta longitud de onda).

Dispersión y absorción son muy importantes para radares meteorológicos.

Modificación del Clima mediante siembra de nubes

Este es un ejemplo de una visión multidisciplinaria que integra ciencias (física, química, matemáticas, biología, electricidad, meteorología, etc.) pero su objetivo es resolver problemas con óptimas soluciones (ecológica y económicamente). La Modificación del Clima científicamente tiene sus raíces en la física y química, pero las consideraciones meteorológicas son importantes para obtener éxito. Fue definida originalmente como las acciones intencionales para alterar el clima, aunque últimamente acciones no intencionales

han sido incluidas, un ejemplo: la indeseada polución, que está demostrado disminuye las precipitaciones y que aumente la temperatura. Por otro lado, la siembra de nubes es el principal ejemplo de acciones intencionales de modificar el clima, e históricamente el corazón de la disciplina.

Siembra de nubes ha sido usada con diferentes objetivos en los últimos 70 años: incremento de precipitaciones (lluvia, nieve), mitigación de granizo, supresión de nieblas y aún modificación de huracanes.

Como toda acción humana, está guiada por una relación de intereses y costo beneficio. Una de las primeras preguntas es: funciona? Se logran los efectos deseados (precipitaciones...mitigación de niebla y granizo...?) Está demostrado que sí, se logran. En que proporción? Dependerá de múltiples factores, a analizar científicamente, buenos resultados no se obtienen solamente sembrando nubes.

Del escepticismo al éxito

La premisa de la siembra de nubes es simple. Ciertas nubes contienen grandes cantidades de “agua líquida súper fría”, o agua que todavía existe en estado líquido debajo del punto de congelamiento. A temperaturas por debajo de -5 Grados Celsius, agregando partículas de yoduro de plata a esa agua, se puede promover la formación de cristales de hielo, resultando en precipitación adicional de nieve/lluvia.

Pero mientras los principios básicos de la siembra de nubes eran descubiertos y más de 50 países ponían en funcionamiento programas de siembra de nubes allá por 1947, científicos han discutido largamente para cuantificar cuan efectiva es la siembra de nubes, o si en realidad funciona.

Otros estudios han medido ganancias de hasta un 10 por ciento pero fueron incapaces de probar que los beneficios fueron debido a la siembra de nubes, dice Sarah Tessorf, una científica de NCAR-Centro Nacional para Investigación Atmosférica, quien estudia la siembra de nubes. En 2017, NCAR asociada con un

consorcio de universidades e Idaho Power lanzó el primer experimento en su tipo llamado SNOWIE (Seed and Natural Orographic Wintertime Clouds: The Idaho Experiment. -Nubes sembradas y orográficas naturales de invierno: el Experimento Idaho). Desde Enero a Marzo, los investigadores usaron aviones equipados especialmente para investigar la atmósfera y para inyectar yoduro de plata en las nubes sobre las cuencas del Payette al norte de Boise, también midieron el impacto sobre la nieve, usando una combinación de radares, instrumentos terrestres, medidores de nieve y modelos numéricos. Los resultados, publicados el año pasado en las Actas de la Academia Nacional de Ciencias de EEUU, fueron indudables: **la siembra de nubes funciona.**

En tres ocasiones, los investigadores vieron cristales de hielo formados dentro de las nubes sembradas en el exacto patrón de vuelo en zigzag que había volado el avión.

“Fuimos capaces de mostrar el hielo y nieve formándose en las nubes, y rastrearlos en el suelo para cuantificar cuanta nieve adicional precipitó desde esas nubes”, dijo Tessendorf, una investigadora co-principal de SNOWIE. “Eso fue importante – y realmente puso la siembra de nubes de nuevo sobre el mapa”. El programa, está concentrado ahora en destacar cualquier efecto sutil de la siembra que pudiera ocurrir durante esos intentos, y usando modelos computarizados de alta resolución para cuantificar mejor la siembra de

La siembra de nubes es el principal ejemplo de acciones intencionales de modificar el clima.

nubes. La temperatura de las nubes, la cantidad de agua súper fría dentro de ellas, y otras condiciones como dirección del viento, todas juegan un rol en la eficiencia de la siembra de nubes.

Como la ciencia de siembra de nubes continúa avanzando, un número de Estados del Oeste de los Estados Unidos – algunos de los cuales han hecho operaciones de siembra de nubes por décadas- están expandiendo sus programas ante la persistente falta de agua.

El Directorio de Recursos de Agua de Idaho, que ayuda con fondos al programa de siembra de nubes de Idaho Power en las Cuencas de los ríos Boise, Wood y Upper Snake está llevando a cabo un estudio climatológico en el Estado, para identificar otras cuencas que podrían beneficiarse de la siembra de nubes.

En Septiembre 2021, el Directorio autorizó fondos para un Proyecto piloto de siembra de nubes en la cuenca del río Bear, en sudeste de Idaho este invierno. El oficial ejecutivo Brian Patton del Directorio de Recursos de Agua de Idaho explicó que las cuencas sembradas



han visto “un claro incremento impresionante en provisión de agua” — **hasta el 15 por ciento algunos años.** “La gente de la Cuenca del río Bear miran y dicen “nosotros queremos eso también”.

En el mes de noviembre de 2021, (el Estado de) Colorado, que ha llevado a cabo operaciones de siembra de nubes desde 1950, espera instalar generadores terrestres de yoduro de plata en la cuenca del río North Platte limitando con Wyoming. Durante dos inviernos, ambos estados han estado sembrando sus respectivas áreas de la cuenca usando aeronaves.

Parte de la razón por la cual Estados del oeste están optando por la siembra de nubes, sin importar constantes incertidumbres acerca de los beneficios, **es porque es barato.** Utah, que estima la red de 165 generadores incrementará la cantidad de nieve de un 5 a 10 por ciento, dice que el programa trabaja con un costo de 2,18 dólares por acre-pie de agua que produce.

“**Es básicamente gratis,**” dice el coordinador de siembra de nubes del Estado, Jake Serago, recalando que en las áreas urbanas del oeste, el agua puede costar cientos de dólares por acre-pie. (1 acre-pie = 1.233.481 litros). El costo sería 0,000017 dólares por litro de agua producido mediante siembra de nubes.

Pero hay una razón todavía mas fundamental porque la siembra de nubes gana popularidad. “**La única manera de agregar agua al sistema es a través de siembra de nubes,**” dijo un gerente de programa.

En 2013, la Universidad del Estado de Dakota del Norte, EEUU y su Departamento de Agronegocios y Economía Aplicada, localizada en Fargo, analizó la relación beneficio:costo del programa de siembra de nubes que se opera en ese Estado desde el año 1951, de manera ininterrumpida, y presentó un informe de:

- **Operaciones**
- **Evaluación del impacto del granizo y lluvia precipitados por la siembra de nubes**
- **Análisis Económico**
- **Conclusiones**

Nos referiremos solamente a las conclusiones: Para un escenario de incremento del 5 % de beneficio (ya sea mitigación de granizo o incremento de precipitaciones) la relación **Beneficio:Costo** solamente para los productores (mayores cosechas) es de **15,7:1**

Si el escenario fuera de un beneficio del 10 %, solamente para los productores, esa relación sería de

Hoy, en más de 37 Países del mundo se realizan operaciones de siembra de nubes, con distintos objetivos.

25,6:1 Tomando en cuenta el beneficio bruto, es decir incluyendo todos los beneficiados directos e indirectos de la siembra de nubes, (recaudación de impuestos, movimiento económico, etc.) para un escenario de beneficios del 5 % la relación **Beneficio: Costo** es de **48,3:1**

Y para un escenario del 10 % de Beneficios, ese beneficio es de **78,8:1**

Los mencionados son sólo algunos ejemplos que muestran que la siembra de nubes funciona y es redituable su operación con bases científicas. Por algo hoy, en más de 37 Países del mundo se realizan operaciones de siembra de nubes, con distintos objetivos.

En todos los casos, antes de tomar la decisión de operar un programa de siembra de nubes, se debe realizar un estudio científico que determinará la capacidad de éxito del programa de siembra de nubes y fijar los objetivos, para que se realiza un programa de siembra de nubes:

- **Determinación del área de interés, superficie, orografía del terreno, composición de los suelos**
- **Cantidad de vapor de agua en la atmósfera de la zona de interés**
- **Estadísticas meteorológicas de al menos 10 años previos al momento del estudio**
- **Calidad del aire en la zona y microfísica de las nubes de la zona**
- **Que agente de siembra se pretende operar? (yoduro de plata, cloruro de sodio, agua cargada electrostáticamente, agentes criogénicos?)**
- **Cual será la resolución espacial y temporal del pronóstico disponible o a disponer**
- **Que instrumentos o sensores se utilizarán para que el programa sea eficiente**
- **Método científico de evaluación de eficiencia del programa a utilizar**

Con todos estos datos y algunos más que los científicos determinarán llegado el momento, se toman decisiones si la siembra será aérea, con cuantos aviones, si fuera terrestre, con cuantos generadores o árboles de bengalas, o si fuera mixta. O, llegado el caso, puede que se decida que no se justifica un programa de modificación del clima.

No hay otra forma de exprimir al máximo las nubes para obtener recursos de agua, de mitigar la precipitación de granizo para mejorar las condiciones de vida de los ciudadanos y de ese modo también mitigar el cambio climático verdaderamente, en la escala que se pueda.

