

UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental



**ANÁLISIS DE LA VIABILIDAD DE LA SIEMBRA DE NUBES EN LA
PROVINCIA DE SAN ROMÁN DE SALIDA AREQUIPA - PUNO 2025**

Por:

Ebelio Hanco Soncco
Kenny Rogers Jara Chambi

Asesor:

Judith Marina Clavitea Catacora

Ciclo:

IV

Grupo:

Único

Juliaca, Junio de 2025

ANÁLISIS DE LA VIABILIDAD DE LA SIEMBRA DE NUBES EN LA PROVINCIA DE SAN ROMÁN DE SALIDA AREQUIPA - PUNO

Hanco Ebelio, Jara Kenny

^aEP. Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Peruana Unión

Resumen

La investigación aborda la problemática de la escasez de agua en las zonas rurales de la provincia de San Román de salida Arequipa, Puno, agravada por el cambio climático y la gestión ineficiente de los recursos hídricos. Frente a esta situación, se propone analizar la viabilidad técnica, ambiental y social de la siembra de nubes utilizando yoduro de plata, una técnica de modificación climática que induce lluvias artificiales. El objetivo principal es determinar si esta técnica puede ser efectiva y segura para combatir las sequías. Entre los objetivos específicos destacan el análisis comparativo entre la lluvia natural y la artificial, y el cálculo de la cantidad adecuada de yoduro de plata para su implementación. En lo siguiente describe el funcionamiento del proceso de siembra de nubes, la importancia del yoduro de plata como núcleo de congelación, y los factores que influyen en su efectividad (tipo de nubes, condiciones atmosféricas, dosis, entre otros). Incluye una planificación detallada del área de intervención, la gestión de permisos, la preparación del reactivo y la ejecución de un experimento piloto. Se utilizó una mezcla de nitrato de plata y yoduro de potasio para generar el yoduro de plata, que luego fue dispersado mediante cohetes hacia nubes con condiciones propicias. Esta fase inicial establece las bases científicas, técnicas y logísticas necesarias para evaluar si la siembra de nubes puede representar una solución sostenible frente a la escasez hídrica en la región de estudio.

Palabras clave: Siembra de nubes, Yoduro de plata, Viabilidad.

Abstract

The research addresses the issue of water scarcity in the rural areas of the province of San Román, in the Arequipa exit region of Puno, worsened by climate change and the inefficient management of water resources. In response to this situation, the study proposes to analyze the technical, environmental, and social feasibility of cloud seeding using silver iodide, a climate modification technique that induces artificial rainfall. The main objective is to determine whether this technique can be effective and safe in combating drought. Among the specific objectives are the comparative analysis between natural and artificial rainfall, and the calculation of the appropriate amount of silver iodide for its implementation. The following sections describe the functioning of the cloud seeding process, the importance of silver iodide as a freezing nucleus, and the factors that influence its effectiveness (such as cloud type, atmospheric conditions, dosage, among others). The study includes a detailed plan of the intervention area, the management of permits, the preparation of the reagent, and the execution of a pilot experiment. A mixture of silver nitrate and potassium iodide was used to generate silver iodide, which was then dispersed via rockets into clouds with suitable conditions. This initial phase establishes the scientific, technical, and logistical foundations necessary to evaluate whether cloud seeding can represent a sustainable solution to water scarcity in the study region.

Keywords: Cloud seeding, Silver iodide, Viability.

1. Introducción

En los últimos años, la escasez de agua se ha convertido en uno de los principales desafíos ambientales que enfrentan las zonas rurales, especialmente aquellas dedicadas a la agricultura y la ganadería. La sequía prolongada no solo afecta la producción de alimentos, sino que también pone en riesgo la sostenibilidad de comunidades enteras cuya economía depende directamente del uso del agua. Ante esta problemática, han surgido diversas alternativas para mitigar sus efectos, entre ellas, el cultivo de nubes mediante la siembra con yoduro de plata, una técnica de modificación climática que busca inducir lluvias artificiales. Este método consiste en dispersar partículas de yoduro de plata en las nubes con el objetivo de estimular la condensación del vapor de agua y provocar precipitaciones. La presente investigación analiza la viabilidad, efectividad y posibles impactos del uso de esta tecnología en regiones rurales afectadas por la sequía, considerando tanto los aspectos técnicos como los ambientales y sociales.

Los resultados obtenidos permiten observar que, si bien el volumen de agua inducido fue reducido en comparación con precipitaciones naturales, se logró provocar lluvia artificial con características dentro de los rangos aceptables para el consumo humano. Esto demuestra que la siembra de nubes es una alternativa técnicamente viable. No obstante, se requieren mayores esfuerzos de investigación, optimización de procesos y evaluaciones a gran escala para considerar su implementación como una política de mitigación hídrica sostenible.

- **Objetivo General:**

Determinar la viabilidad de la siembra de nubes usando el yoduro de plata en las zonas rurales de la región Puno.

- **Objetivos específicos:**

- Analizar los parámetros de la lluvia artificial antes y después de hacer llover.
- Calcular qué porcentaje se usará el yoduro de plata.
- Comparar los parámetros de la lluvia natural y una artificial.

2. Problemática:

La región de Puno enfrenta una problemática creciente de sequías recurrentes, intensificadas por el cambio climático y la sobreexplotación de los acuíferos, la disminución de las precipitaciones, combinada con prácticas agrícolas insostenibles y una gestión ineficiente del agua, ha resultado en una escasez crónica de agua, afectando la producción agrícola, la seguridad alimentaria de las comunidades rurales, y la biodiversidad de la región. Estas circunstancias exigen una investigación urgente para desarrollar estrategias de mitigación y adaptación que protejan los recursos hídricos y mejoren la resiliencia de la población.

3. Justificación:

Las sequías recurrentes en la región de Puno han causado pérdidas económicas significativas en el sector agrícola, afectando principalmente a pequeños agricultores que carecen de recursos para adaptarse, la falta de estudios específicos sobre la vulnerabilidad de estos grupos ante eventos climáticos extremos identificando estrategias de mitigación más efectivas y proponiendo recomendaciones para políticas públicas que mejoren su resiliencia.

4. Marco teórico:

La siembra de nubes:

La siembra de nubes es una técnica de modificación artificial del clima que busca influir en los procesos naturales de formación de precipitaciones. Consiste en introducir sustancias químicas, como yoduro de plata, hielo seco o compuestos higroscópicos, en nubes que ya tienen condiciones favorables para la lluvia, con el objetivo de estimular o intensificar la caída de agua, nieve o incluso suprimir fenómenos como el granizo. Estas sustancias actúan como núcleos de condensación o cristalización, promoviendo la formación de gotas de agua o cristales de hielo que crecen hasta precipitar (World Meteorological Organization, 2015).

Yoduro de plata:

El yoduro de plata (AgI) es una de las sustancias más utilizadas en los procesos de siembra de nubes debido a su estructura cristalina, que es muy similar a la del hielo natural. Esta similitud permite que actúe como un núcleo de congelación, es decir, una partícula que facilita la formación de cristales de hielo en las nubes súper enfriadas, es decir, nubes que contienen agua en estado líquido a temperaturas por debajo de 0 °C (Flossmann, A. I., & Wobrock, W. 2010).

Nucleación:

Un núcleo de condensación o de nucleación, es una pequeña partícula sólida o líquida presente en la atmósfera, sobre la cual el vapor de agua se condensa para formar gotas de agua o cristales de hielo. Estos núcleos son esenciales para la formación de nubes y precipitación, ya que sin ellos el vapor de agua difícilmente se convertiría en líquido o sólido (Cantrell, W., & Heymsfield, A. (2005). Production of ice in tropospheric clouds: A review. Bulletin of the American Meteorological Society, 86(6), 795–807).

Proceso de siembra de nubes con yoduro de plata:

La siembra de nubes con yoduro de plata es uno de los métodos más comunes de modificación del clima para inducir o aumentar la precipitación. Este proceso se basa en el principio de nucleación de hielo, utilizando el yoduro de plata (AgI) como agente que facilita la formación de cristales de hielo en el interior de las nubes.

El procedimiento inicia con la identificación de nubes súper-enfriadas, es decir, nubes que contienen gotas de agua líquida a temperaturas por debajo de 0 °C. Estas condiciones son ideales para la siembra, ya que permiten que el yoduro de plata actúe como un núcleo de congelación. Debido a su estructura cristalina similar a la del hielo natural, las partículas de AgI inducen la congelación del agua superenfriada, formando pequeños cristales de hielo.

Una vez liberado el yoduro de plata por medio de aviones, cohetes o generadores terrestres, este se dispersa dentro o alrededor de la nube. Los cristales de hielo que se forman alrededor del AgI comienzan a crecer al captar más vapor de agua del entorno. A medida que aumentan de tamaño y peso, estos cristales descienden por la gravedad, derritiéndose en su camino hacia la superficie si las temperaturas lo permiten, y cayendo finalmente en forma de lluvia o nieve.

El éxito del proceso depende de varios factores, como:

- La cantidad y tipo de nube.
- Las condiciones atmosféricas (temperatura, humedad, viento).
- La cantidad de yoduro de plata dispersada.
- El momento y lugar exactos de la siembra.

Este método se utiliza en distintas partes del mundo para combatir sequías, aumentar la disponibilidad de agua en embalses, apoyar la agricultura y en algunos casos, reducir el

impacto del granizo. Aunque su eficacia puede variar según las condiciones locales, ha mostrado resultados positivos en muchos proyectos experimentales y operativos (Ramírez López, J. A. (2019). Evaluación del impacto del proceso de siembra de nubes con yoduro de plata en la precipitación en la región central de México [Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México]. Repositorio UNAM).

5. Metodología

5.1. Planificación del área y condiciones meteorológicas

Se determinó el área geográfica preferiblemente con presencia de nubes y deficiencia de precipitaciones. Asimismo, se establecerá un **tiempo estimado de monitoreo**, tanto antes como después del experimento, para observar y registrar los efectos en la duración y volumen de la precipitación.

5.2. Gestión de permisos y autorizaciones

Previo a la ejecución del experimento, se gestionarán los permisos necesarios ante las autoridades ambientales competentes (MINAM). Esto incluirá también la notificación a las comunidades locales, en caso de ser necesario, con el fin de garantizar un desarrollo ético y legal de la investigación.

En este caso al ser una prueba piloto, es decir, el experimento se realizará en pequeñas cantidades y puede ser ejecutado sin comprometer a la población.

5.3. Materiales y preparación del reactivo (yoduro de plata):

El yoduro de plata será preparado bajo condiciones controladas, siguiendo protocolos de seguridad y manejo adecuados. Se definirá la concentración, forma de dispersión a través de un pirotécnico que alcance el reactivo hasta la nube, cantidad necesaria por nube y determinada por la prueba piloto son 10 gramos como mínimo.

Materiales

- Vaso precipitado de 250 ml
- pipetas
- Agua destilada
- 2 Reloj de luna
- 2 fioles de 50 ml

- 1 varilla de vidrio

- 2 Embudos pequeños
- 1 embudo grande
- 1 Matraz de 250 ml
- 2 papeles filtros
- 2 cohetes

Reactivos

- 1 g de nitrato de plata
- 1 g de yoduro de potasio

Parámetros para analizar

- Oxígeno disuelto
- Conductividad eléctrica
- Ph
- Dureza

Equipos de laboratorio

- Multiparametro
- Estufa
- Balanza Analítica
- Potenciometro

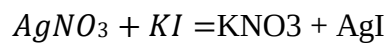
EPP de Laboratorio

- Bata
- Guantes quirurgico
- Barbijo

5.4. Preparación del reactivo:

Reactivos a usar:

Nitrato de plata + yoduro de potasio = Nitrato de potasio + yoduro de plata



Preparación:

2g $\text{AgNO}_3 \rightarrow$ 100 ml de agua destilada

2g KI $\rightarrow$ 1000 ml de agua destilada

Pesar 2 g de AgNO_3 (nitrato de plata) y mezclar con 100 ml de agua destilada en una fiola de 100 ml, posteriormente mezclar de forma homogénea, a continuación realizar el mismo procedimiento con el KI (yoduro de potasio) esto con 4 repeticiones, finalmente con la ayuda de una varilla de vidrio mezclar de forma continua ambos reactivos en un vaso precipitado de 250 ml para que se pueda mezclar homogéneamente ambos reactivos y dé como resultado la reacción esperada, mezclar aproximadamente por 1 hora min, mientras que el KNO_3 (nitrato de potasio) se queda en forma líquida en el vaso precipitado el AgI (yoduro de plata) se forma y se suspende en los bordes del vaso precipitado, luego se debe separar ambos reactivos, el que nos interesa es el AgI (yoduro de plata) por lo que se puede realizar de las siguientes formas:

- Método por filtración: Para separar el AgI (yoduro de plata) y el KNO_3 (nitrato de potasio) con un embudo, papel filtro y un matraz (250 ml)
- Método de secado: con bomba de vacío
- Método por secado: Incorporar el vaso precipitado con ambos reactivos en la estufa a 100 °C por 1 hora.

Resultado de generación del reactivo (yoduro de plata):

Sale aproximadamente 2.1 g por preparación, pero con las repeticiones nos 8.8 g y como mínimo se necesita 5-10 g para realizar la inyección del AgI (yoduro de plata) a una nube, así que, se debe repetir el proceso unas 5 veces (incluyendo la actual).

Después liberar el yoduro de plata con la ayuda de cohetes, esto siendo uno de los métodos utilizados profesionalmente. Este método consiste en lanzar cohetes que llevan una carga de yoduro de plata hacia una nube, donde se libera el compuesto para actuar como núcleo de condensación y provocar la aceleración de las precipitaciones.

- Carga útil: El cohete se llena con una mezcla sólida que contiene yoduro de plata
- Altura: el cohete debe alcanzar la base de una nube (normalmente entre 1.5 y 6 km de altura).

- Liberación: al llegar a la nube, el yoduro de plata se libera por explosión controlada esto provocando una dispersión en partículas muy finas mediante quemado.
- Condiciones: debe haber nubes con suficiente contenido de agua. Si no hay nubes o si están secas, no funcionará.

5.5. Ejecución del experimento piloto:

Se realizará una siembra de prueba en el área controlada, monitoreando en tiempo real las condiciones de la nube, los cambios en su desarrollo, la aparición de precipitación, el tiempo de precipitación acelerada.

5.6. Recolección y análisis de datos:

Analizar los 4 parámetros de agua natural para hacer la comparación

Durante y después del experimento, se recolectarán datos relacionados con:

- Volumen de precipitación (comparado con promedios previos).
- Tiempo de duración de la lluvia.
- Cambios en la estructura de la nube (si es posible mediante radar o imágenes satelitales).
- Posibles impactos no deseados (granizo, exceso de lluvia, etc.).

Los resultados serán comparados con datos históricos y con áreas no intervenidas, si aplica, para determinar la efectividad del experimento.

6. CALCULOS

Fórmula general:

$$V = A \times P$$

Donde:

- V = volumen de agua en m^3

- $A = \text{área en m}^2 (6,600,000 \text{ m}^2)$
- $P = \text{precipitación en metros}$

Precipitación natural según SENAMI

área: 6.6 km²

Precipitación.: 10mm = 0.01m

6.6 km² = 6,600,000 m²

$$V = A \times P = 6\,600\,000 \times 0.01 = 66\,000 \text{ m}^3$$

Precipitación artificial

área: 1200m

Precipitación.: 5mm = 0.005

$$V = A \times P = 1450 \text{m} \times 0.005 = 6 \text{ m}^3$$

7. Resultados

Tabla 1. Recolección de datos del agua de lluvia normal y artificial

	pH	Oxígeno disuelto	Conductividad eléctrica	Dureza
M1 (normal)	6.7	6.17 mg/L	28,7 us/cm	54 mg/L (Blando)
M2 (artificial)	7.6	6.39 mg/L	27.7 us/cm	56mg/L(Blando)
ECA de agua y OMS	6.5 - 8.5	>5 mg/L (no obligatorio en agua potable)	1500 us/cm	menor 100 mg/l

Según la tabla 1 comparando con el D.S. N° 004-2017-MINAM y DS N° 031-2010-SA (Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano) el agua recolectada no presentó alteraciones significativas en su calidad para el consumo humano.

Tabla 2. Recolección de datos de la precipitación

	Tiempo hasta el inicio de la precipitación	Duración	Área del precipitado	Volumen pluvial m ³
Prueba 1	1hora 27 min	43 min	1450m	6m ³

Según la tabla 2 en la prueba realizada el tiempo de espera de precipitación después de ser liberada el reactivo a la atmósfera fue de 1h con 37 min, la lluvia artificial también duro 43min precipitando un área de 1450m que esto equivale a 6m³ de volumen pluvial.

Tabla 3.

Comparación de resultado con las precipitaciones normales y Volumen pluvial

	PRECIPITACIÓN NATURAL	COMPARACIÓN	PRECIPITACIÓN ARTIFICIAL	DIFERENCIA
ÁREA PRECIPITADA	6.6 km ² según el SENAMI 10mm	1.0 km ² 10 mm	1450 m según la prueba realizada 5mm	muy significativa
VOLUMEN PLUVIAL	66,000 m ³	1000m ³	6m ³	muy significativa

Según la tabla 3 las coberturas del área en los métodos artificiales cubrieron un área sustancialmente más pequeña (1,45 km²) en comparación con la precipitación natural (6,6 km²) en cambio en la precipitación artificial produjo menos lluvia (5 mm) que la precipitación natural (10 mm). En el volumen total de lluvia cabe destacar que el proceso artificial produjo un volumen de lluvia extremadamente bajo (6 m³) en comparación con la precipitación natural (66.000 m³).

8. Conclusión

El presente estudio analiza la viabilidad de aplicar la técnica de siembra de nubes con yoduro de plata como una solución a la escasez hídrica en la provincia de San Román salida Arequipa región Puno. Esta técnica consiste en inducir lluvias artificiales mediante la dispersión de reactivos químicos en nubes súper enfriadas, con el fin de estimular la precipitación. A través de un experimento piloto, se logró generar lluvia artificial en un área determinada, evaluando sus características fisicoquímicas y comparándolas con la lluvia natural.

Los resultados muestran que, si bien el volumen de agua producido fue limitado (6 m³ frente a 66,000 m³ de una lluvia natural), se logró inducir precipitación, demostrando la viabilidad técnica del método. Además, el agua recolectada no presentó alteraciones significativas en su calidad comparados con el ECA de agua y el D. S N° 031-2010-SA (Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano). La investigación concluye que la siembra de nubes es una alternativa viable y prometedora para mitigar los efectos de la sequía en zonas rurales, aunque requiere mejoras en escala y control de variables climáticas para su implementación a mayor nivel.

9. Referencias Bibliográficas

Battan, L. J. (1965). "Física y siembra de nubes", Battan explora los fundamentos físicos de las nubes y las técnicas de siembra para inducir precipitaciones.

Bigg, EK y Turton, E.(1988). Efectos persistentes de la siembra de nubes con yoduro de plata. J. Appl. Meteorol. 27:505-514

Braham, RR (1986). Aumento de la precipitación: un desafío científico. Meteor. Monografía. Amer. Meteor. Soc. 21:1-6.

Bruintjes, RT (1999). Una revisión de experimentos de siembra de nubes para mejorar la precipitación y algunas nuevas perspectivas. BulletinAm. Meteorol. Soc. 80:5.

Edwards, GR y Evans, LF (1968). Nucleación del hielo por yoduro de plata: III. La naturaleza del sitio de nucleación. J. Atmos. Sci. 25:249-256.

García García, F. & Montero Martínez, G. (2023) En su boletín del Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático (UNAM), los autores analizan las tecnologías de modificación artificial del tiempo para incrementar la precipitación.

Hydro Tasmania. (2008). Efectos de la siembra de nubes en las precipitaciones en la Costa Oeste: informe de referencia 1. Hydro Tasmania y Consejo de la Costa Oeste. 74 págs.

Levin, Z. (2009). Sobre el estado de la siembra de nubes para potenciar la lluvia. Instituto de Chipre, Chipre, 19 págs.

Pérez, SE; Ahumada, AA y Mosiño, PA (1963). Doce años de siembra de nubes en la cuenca del Necaxa, México. J. Appl. Meteor. 2:311-323.

Rangno, AL y Hobbs, PV (1987). Una reevaluación de los experimentos de siembra de nubes en el clímax utilizando datos publicados por la NOAA. J. Clim. Appl. Meteor. 26:757-762.

Rosenfeld, D. y Woodley, WL (1989). Efectos de la siembra de nubes en el oeste de Texas. J. Appl. Meteor. 28:1050-1080.

Sharon, D.; Kessler, A.; Cohen, A. y Doveh, E. (2008). Una nota sobre la historia y la revisión reciente del Programa de Siembra de Nubes de Israel. Israel J. Earth Sci. 57:1.

López, J. A. (2019). Evaluación del impacto del proceso de siembra de nubes con yoduro de plata en la precipitación en la región central de México [Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México]. Repositorio UNAM).

Cantrell, W., & Heymsfield, A. (2005). Production of ice in tropospheric clouds: A review. Bulletin of the American Meteorological Society, 86(6), 795–807.

Flossmann, A. I., & Wobrock, W. 2010.

World Meteorological Organization, 2015.

10. Anexos

Anexo 1. Análisis de los parámetros de agua natural



Anexo 2. Uso de reactivos



Anexo 3. Mezcla de reactivos



Anexo 4. Métodos de secado



Anexo 5. Liberación del reactivo



Anexo 6. Análisis de los parámetros de la lluvia artificial

