2026

EL HACEDOR DE LLUVIA

Método para provocar lluvia

Tras la aplicación de este procedimiento llovió incluso en algunas de las regiones más secas del mundo



La imagen muestra una unidad móvil de aspersión con boquillas en anillo, directamente junto a un cuerpo de agua

Procedimiento, técnica y contexto
Edición 2026

Jonathan Hertig
Acompañamiento del proyecto, desarrollo y marketing
Schützenfahrstrasse 18, 3115 Gerzensee (Suiza)
jonathan.hertig@bluewin.ch
+41 79 758 89 42
www.der-regen-macher.ch

Prólogo – Por qué elaboré esta documentación

Hace unos 25 a 30 años vi en televisión un programa que hasta hoy no me ha dejado indiferente. En ese programa se mostraba a un equipo de investigadores que, en una región desértica, había instalado varios tubos metálicos de unos seis a nueve metros de altura. En el extremo superior de estos tubos había boquillas de aspersión muy finas. Agua, posiblemente agua de mar, era bombeada hacia arriba a través de los tubos y allí finamente atomizada. Una gran parte del agua se evaporaba ya en el aire. Después de que este procedimiento se había aplicado durante cierto tiempo, se podía ver en el programa que en la región en cuestión comenzaba a llover. La sencillez de este enfoque me impresionó mucho en aquel momento.

Durante muchos años, este recuerdo permaneció en segundo plano. Sin embargo, en los últimos años ha adquirido para mí una nueva urgencia. La creciente escasez de lluvias, así como los períodos de sequía y calor cada vez más largos en muchas regiones del mundo, me preocupan profundamente. Esta evolución se manifiesta de forma especialmente impactante en Chile: desde 2010, la zona central del país sufre una megasequía que dura más que cualquier otro período seco desde que existen registros, y el norte del país, con el desierto de Atacama, se cuenta entre las zonas más secas de la Tierra. Embalses y ríos como el Elqui, el Limarí, el Aconcagua y el Maipo llevan muy poca agua en los años secos, alrededor de 1,5 millones de personas no tienen acceso asegurado al agua potable y muchas de ellas son abastecidas mediante camiones aljibe. La agricultura sufre por los suelos resecos y la falta de forraje, los bosques y la vegetación se ven sometidos a un creciente estrés hídrico, y aumenta el peligro de incendios forestales, como lo demostró el devastador incendio en la Región de Valparaíso en febrero de 2024, con 138 víctimas fatales. Por lo tanto, las consecuencias ya no afectan solo a la naturaleza, sino también a la economía, el abastecimiento y la población. [16, 22, 29]

A raíz de esta preocupación, volví a recordar aquel programa de televisión y comencé a buscar en Internet, de manera específica, procedimientos comparables. Así encontré al suizo Hans Hangartner y su «Procedimiento para provocar lluvia». Para mi sorpresa, encontré indicios de que Hangartner había aplicado su método con mucho éxito durante muchos años en diversas regiones muy secas del mundo. Me llamó especialmente la atención su ensayo en el estado indio de Gujarat en el año 1988, donde, tras años de sequía, volvieron a producirse fuertes lluvias durante su estadía. [1, 3, 4]

Este descubrimiento fue para mí el verdadero motivo para reunir la información disponible y elaborar la presente documentación «El Hacedor de Lluvia». Mi objetivo es presentar el procedimiento de forma comprensible, documentar los trabajos y ensayos de campo de Hans Hangartner, reunir fuentes históricas y datos de precipitación y, al mismo tiempo, mostrar cómo podría construirse hoy una instalación experimental móvil.

En el centro está para mí una pregunta sencilla, pero importante: si un procedimiento de este tipo se aplicó en algunas de las regiones más secas del mundo y después comenzó a llover repetidamente, ¿por qué no debería examinarse y aplicarse también en Chile en las condiciones climáticas actuales? Desde aquellos ensayos, tanto el clima como las posibilidades técnicas y meteorológicas han cambiado considerablemente. Por ello, en mi opinión, no deberíamos detenernos demasiado en la pregunta teórica de si el procedimiento es posible o no. Lo decisivo sería iniciar el ensayo en las condiciones actuales con acompañamiento científico y observar lo que realmente ocurre. Solo un ensayo de campo práctico puede mostrar qué efecto se produce en condiciones reales. Si se demostrara que el procedimiento funciona, su beneficio podría ser de gran importancia para la agricultura, los bosques, los ríos y el abastecimiento de agua y, no en último lugar, para la lucha contra el calentamiento global. ¿Quién no lo conoce? El efecto sumamente agradable del enfriamiento cuando, tras un período prolongado de calor o sequía, por fin comienza a llover de forma persistente: en muy poco tiempo, las temperaturas ambientales bajan notablemente y, no en último lugar, también el suelo, antes fuertemente calentado, se enfría de manera perceptible. Me puedo imaginar perfectamente que precisamente este procedimiento de «hacer llover» podría contribuir, mediante lluvias provocadas de forma dirigida, no solo a evitar períodos de calor y sequía, sino también a contrarrestar el creciente calentamiento global.

Contenido

Tiempo estimado de lectura del prólogo a las conclusiones y perspectivas: aprox. 20 minutos

Prólogo – Por qué elaboré esta documentación 2
1. Introducción – Cambios climáticos en Chile 4
2. Origen del procedimiento – Hans Hangartner 6
3. Ensayos de campo y el experimento en Gujarat, India (1988) 7
4. Planteamiento a la política, la ciencia, la economía y las asociaciones – Propuesta de un proyecto piloto 9
5. Diferentes variantes constructivas de la unidad de boquillas de aspersión 11
6. Conclusiones y perspectivas 15
7. El procedimiento «hacer llover» – Principio básico 16
8. Antecedentes meteorológicos 19
9. Fuentes y referencias 20

1. Introducción – Cambios climáticos en Chile

Chile experimenta desde hace alrededor de una década y media un profundo cambio de su clima. En la zona central, entre las regiones de Coquimbo y del Biobío, impera desde 2010 la llamada megasequía): durante muchos años, las precipitaciones se situaron en promedio alrededor de un 25 a 30 por ciento por debajo del promedio de largo plazo, en algunos años incluso claramente más abajo, y esto durante la década más cálida desde el inicio de las mediciones.

Tampoco el año 2026 cambia esto en lo fundamental. A comienzos de julio, el déficit de precipitaciones entre Coquimbo y el Maule seguía superando el 50 por ciento en muchas zonas; solo después un fuerte evento de El Niño trajo lluvias por sobre lo normal. Sin embargo, especialistas de la Universidad de Chile subrayan que una megasequía no termina con un único año lluvioso, sino solo con una serie de años así; tras el debilitamiento de El Niño, se espera ya para 2028 o 2029 un retorno a precipitaciones deficitarias. Al mismo tiempo, en julio de 2026 se prorrogaron los decretos de escasez hídrica para las provincias de Elqui, Limarí y Choapa, en la Región de Coquimbo, y para el verano 2026/27 el Servicio Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres SENAPRED declaró una alerta por calor en todo el país hasta marzo de 2027. [17, 18, 19, 30, 31]

¿Dónde se encuentran las zonas áridas de Chile?

Chile se extiende a lo largo de más de 4.000 kilómetros junto al Pacífico. De norte a sur, las zonas afectadas por la sequía pueden clasificarse de la siguiente manera:

Zona	Regiones	Clima y situación hídrica
Norte Grande	Arica y Parinacota, Tarapacá, Antofagasta	Desierto de Atacama, el desierto no polar más seco de la Tierra; en Arica, en promedio menos de 1 mm de lluvia al año. El agua proviene casi exclusivamente de aguas subterráneas, de unos pocos ríos andinos y de la desalación de agua de mar. Escasez hídrica, entre otros, en el valle de Lluta (Arica). [19, 21]
Norte Chico	Atacama, Coquimbo	Zona semiárida con precipitaciones muy escasas y muy variables; ríos Copiapó, Huasco, Elqui, Limarí y Choapa. Desde hace años, decretos de escasez hídrica y de emergencia agrícola; la ganadería caprina y la agricultura de riego están fuertemente afectadas. [19, 24]
Zona Central	Valparaíso, Metropolitana, O'Higgins, Maule	Clima mediterráneo con lluvias invernales; núcleo de la megasequía desde 2010; principal zona de cultivo de frutas, vino y hortalizas y lugar de residencia de la mayor parte de la población. Abastecimiento de agua potable mediante camiones aljibe, sobre todo en la Región de Valparaíso. [16, 23]
Sur	Ñuble hasta Los Lagos	En principio con abundantes precipitaciones, pero también con precipitaciones en disminución; en 2021, por primera vez, escasez hídrica en 26 de las 30 comunas de la Región de Los Lagos. [20]

En el norte, la sequía es extrema: el desierto de Atacama se considera el desierto no polar más seco de la Tierra. En Arica caen en promedio solo unos 0,76 milímetros de precipitación al año y, según la Organización Meteorológica Mundial, la ciudad permaneció desde octubre de 1903 hasta enero de 1918 –durante 172 meses– sin una sola gota de lluvia. La mayor parte de la humedad llega allí a tierra en forma de neblina costera (*camanchaca*): la fría corriente de Humboldt enfría el aire sobre el mar y se forman campos de neblina y de nubes que, sin embargo, no traen lluvia. Precisamente esta situación de partida –tierra caliente y seca junto a un mar frío con un campo de neblina encima– corresponde de manera notable a la situación que Hans Hangartner describe en su esquema (Fig. 1, capítulo 7) como estado inicial. [21]

La gravedad de la situación la muestran los decretos de escasez hídrica que el Ministerio de Obras Públicas (MOP) dicta desde 2008: en el año récord 2021, 172 comunas con alrededor del 45 por ciento de la población estaban bajo un decreto de este tipo; en marzo de 2022 fueron incluso 188 de las 346 comunas del país. [20] Alrededor de 1,5 millones de personas en Chile no tienen acceso asegurado al agua potable. Muchas de ellas son abastecidas mediante camiones aljibe): solo entre 2011 y 2019, el Estado gastó en ello alrededor de 222.000 millones de pesos, y en los años 2023 y 2024 municipios y delegaciones presidenciales suscribieron contratos adicionales por más de 30.192 millones de pesos, casi la mitad de ellos en la Región de Valparaíso. [22, 23]

También la agricultura está directamente afectada: en mayo de 2026 hubo que declarar nuevamente la emergencia agrícola para la Región de Coquimbo, porque el déficit hídrico persiste y el rendimiento de los pozos disminuye. Los más golpeados son los pequeños crianceros de ganado caprino), a quienes les faltan superficies de pastoreo y forraje. Además, la sequía persistente aumenta el peligro de incendios forestales: los suelos resecos y la vegetación seca constituyen un caldo de cultivo para incendios que se propagan rápidamente. El megaincendio de febrero de 2024 en Viña del Mar, Quilpué y Villa Alemana cobró 138 vidas y se cuenta entre las peores catástrofes de la historia reciente de Chile. [24, 29]

También el suministro eléctrico se ve cada vez más presionado. En los últimos veinte años, alrededor del 31 por ciento de la generación eléctrica chilena provino de la energía hidroeléctrica. Los períodos de sequía reducen la producción hidroeléctrica en alrededor de una cuarta parte; en abril de 2021, su participación en la matriz eléctrica cayó a solo un 13 por ciento, el valor más bajo en décadas. La energía hidroeléctrica faltante debe ser reemplazada por centrales termoeléctricas, lo que aumenta los costos y las emisiones. [25, 26]

Además de la economía, también la población pasa a ocupar el centro de la atención. Un estudio de la Pontificia Universidad Católica de Chile (UC) cifró, solo para la ola de calor de enero de 2017, 584 muertes adicionales en un lapso de 21 días, sobre todo en personas mayores de 65 años. [27] Hoy, el calor extremo en Chile cobra ya más de 1.000 vidas al año, cuatro veces más que hace tres décadas. Con un calor persistente, el riesgo de complicaciones de salud aumenta considerablemente, en particular cuando el cuerpo y las viviendas ya no logran enfriarse lo suficiente ni siquiera durante la noche. [28]

En este contexto, cobra importancia la pregunta de si y cómo podría apoyarse de manera dirigida la formación de precipitaciones en períodos de sequía. ¿O sería incluso concebible que, durante tales períodos secos, se puedan «generar» de forma dirigida precipitaciones, es decir, lluvia? La presente documentación presenta un procedimiento que existe desde hace décadas, pero que hasta ahora nunca ha sido probado ni aplicado de manera sistemática y con acompañamiento científico:

El llamado «hacer llover» mediante una unidad móvil de boquillas de aspersión.

De manera simplificada, el principio subyacente puede describirse de la siguiente forma: sobre la tierra calentada asciende aire húmedo que, en altura, se condensa formando nubes; el aire, ahora más seco, fluye de regreso hacia la superficie de agua y allí vuelve a absorber humedad. En resumen: en la provocación dirigida de lluvia, se evapora agua –por ejemplo, de un lago, un río o el mar– para poner en marcha el ciclo descrito y reforzarlo cada vez más. **Este proceso puede imaginarse como un motor grande y potente: el procedimiento de la provocación dirigida de lluvia es la llave que lo pone en marcha.**

2. Origen del procedimiento – Hans Hangartner

El procedimiento aquí presentado se remonta al suizo Hans Hangartner, nacido en 1921, hijo de un ordeñador suizo emigrado a Transilvania, en Rumania. A los doce años llegó con su familia a Suiza, donde la familia vivió temporalmente en gran pobreza. Hangartner trabajó en el sector de la construcción de maquinaria, pero fue durante toda su vida un inventor autodidacta con un marcado interés por los fenómenos naturales. [2, 3]

Según sus propias declaraciones, se dedicó intensamente a la térmica, la física de la evaporación, los mapas meteorológicos y las corrientes de viento y oceánicas. Según su propia afirmación, recibió un impulso decisivo en el año 1977 a partir de conocimientos de la física del frío en la producción de hielo, que lo llevaron a la idea básica de su posterior procedimiento. [2, 3]

El 1 de junio de 1989, Hangartner presentó ante el Instituto Federal Suizo de la Propiedad Intelectual la patente CH 679 262 A5 con el título «Procedimiento y dispositivo para provocar lluvia». La patente fue concedida el 31 de enero de 1992. Describe tanto el procedimiento –la evaporación de agua de mar rociada en aire cálido y seco para estimular la precipitación– como un dispositivo correspondiente, fácil de transportar. [1]

Hangartner no se limitó a la mera solicitud de patente, sino que probó su procedimiento en la práctica durante décadas, y además en algunos de los lugares más secos del mundo. Sus intervenciones lo llevaron, entre otros, a Marruecos, Mauritania, Israel, Túnez, Togo, Namibia, al Sahel de África occidental y a la India. Para gran alegría de la población, después comenzó a llover efectivamente en cada ocasión. Los especialistas locales confirmaron sin excepción estos eventos de precipitación; si bien no fue posible aclarar científicamente de manera concluyente si podían atribuirse causalmente al experimento del hacedor de lluvia, lo que sí está claro es:

La lluvia cayó y la relación temporal entre el experimento y la precipitación siguió siendo llamativa y notable. [2, 3]

No sé si fueron las dudas recurrentes de los especialistas sobre la eficacia de su procedimiento las que, en junio de 1988, llevaron a Hans Hangartner a aventurarse nuevamente en el estado indio de Gujarat –una región en la que, de 1985 a 1988, reinaba comprobadamente una fuerte sequía– para demostrar allí una vez más que su método realmente puede generar lluvia. El corresponsal del Tages-Anzeiger, que acompañó el experimento en terreno, informó el 27 de julio de 1988 sobre la primera lluvia propiamente tal en cuatro años. [3, 4, 5, 6]

Y, sin embargo, el merecido reconocimiento no llegó en vida. Porque el problema de fondo sigue siendo el mismo: la lluvia no puede reproducirse en el laboratorio, y nunca se pudo aportar una prueba científica completa de que la precipitación se debía causalmente al experimento de aspersión. Meteorólogos, científicos y autoridades cuestionaron una y otra vez los éxitos, no con mala intención, pero sí de forma consecuente: la casualidad nunca podría descartarse.

Lo que queda es la imagen de un inventor suizo extraordinario que, con medios modestos y una fe inquebrantable, aplicó su procedimiento precisamente en zonas en las que otros ya se habían rendido hace mucho tiempo: un hombre que, dondequiera que iba, traía la lluvia, y que, sin embargo, nunca logró convencer al mundo de que no se trataba de una casualidad.

3. Ensayos de campo y el experimento en Gujarat, India (1988)

Merece especial atención un ensayo de campo que Hangartner realizó a comienzos de julio de 1988 en Jamnagar, en el estado indio de Gujarat. Jamnagar se encuentra en una península del distrito de Saurashtra y en ese entonces se veía afectada por una sequía que ya duraba cuatro años y que había golpeado duramente a este estado, de por sí pobre y económicamente atrasado (alrededor de 178.000 kilómetros cuadrados –lo que corresponde a casi una cuarta parte de la superficie de Chile–, en ese entonces alrededor de 40 millones de habitantes). La intervención fue acompañada por el entonces corresponsal para China y Asia del diario suizo «Tages-Anzeiger», H. B., quien documentó periodísticamente el ensayo de campo en terreno junto con su esposa. [4, 5, 6]

La intervención se concretó a través del consorcio industrial indio Tata, que invitó a Hangartner a Gujarat. El ensayo tuvo lugar en Jamnagar; en las cercanías, Tata Chemicals operaba una gran planta de producción. Los ingenieros y químicos de allí siguieron inicialmente el montaje de la instalación de Hangartner con un escepticismo no disimulado. [4]

«Con desbordante alegría, la población celebra la primera lluvia propiamente tal en cuatro años.» [4]
Tages-Anzeiger, 27 de julio de 1988

Tal como se describe en el artículo citado, unas dos semanas después de la llegada de Hangartner, el 14 de julio de 1988, efectivamente comenzó a llover. Para esta intervención, el suizo había llevado una vez más solamente su habitual equipo móvil, de unos 150–180 kilogramos de peso –compuesto por un compresor, tubos de alta presión y mangueras–, con el que intentaba en cada caso influir en una zona de varios cientos de kilómetros cuadrados. Los cauces secos de los ríos se llenaron de agua en poco tiempo, de modo que hubo que desocupar apresuradamente las chozas improvisadas en sus orillas. Mientras los especialistas de Tata, inicialmente escépticos, reaccionaban visiblemente sorprendidos, la población de Jamnagar celebraba la lluvia con euforia: los jóvenes se dejaban empapar por la lluvia, los niños jugaban por todas partes y las mujeres sacaban agua de los charcos formados para cocinar. El propio Hangartner declaró no haber vivido nunca en toda su vida algo comparable. Las persistentes lluvias intensas lo obligaron finalmente incluso a postergar en dos días su vuelo de regreso a Suiza. [4]



Ein Zelt, ein 'Sprühständer' und eine Kompressorpumpe – und kurze Zeit darauf regnet es zum ersten Mal in Gujarat, Westindien.



Dispositivo de aspersión histórico de Hans Hangartner durante su intervención en la India en julio de 1988. La sencilla construcción consistía en varios tubos de aspersión dispuestos en altura y se utilizaba para la fina atomización del agua. [2]

También las estadísticas oficiales de precipitación de la autoridad meteorológica india para las regiones afectadas muestran un panorama claro: [5, 6]

Región	01.01.–31.12.1987	01.01.–30.06.1988	Después del experimento: 01.07.–31.12.1988
Saurashtra y Kutch	92,5 mm	14,9 mm	773,2 mm
Estado de Gujarat	405 mm	75,6 mm	1.094,3 mm

Fuente: India Meteorological Department, imdpune.gov.in (Subdivisional Rainfall Data).
https://imdpune.gov.in/cmpg/subdivrainfall/saurashtraandkutch.html (aprox. 30 s hasta que se abre el enlace)
https://imdpune.gov.in/cmpg/subdivrainfall/gujaratregion.html [5, 6]

Es notable la relación temporal: hasta fines de junio de 1988, en ambas regiones seguía imperando una escasez de lluvias y una sequía extraordinarias, mientras que inmediatamente después del experimento, en el segundo semestre, siguió un período claramente más lluvioso. Una prueba científica inequívoca de que este cambio se debe realmente al experimento de aspersión es, por naturaleza, en principio difícil de demostrar: un estudio comparativo completamente controlado presupondría repetir la misma situación meteorológica una vez con y una vez sin aspersión, lo que es prácticamente imposible. En todo caso, los datos estadísticos son un fuerte indicio del efecto del procedimiento, sobre todo porque las lluvias efectivamente comenzaron después de cuatro años de sequía persistente. Sin embargo, el argumento quizás más fuerte a favor de la eficacia del procedimiento de aspersión sigue siendo un patrón llamativo:

Dondequiera que Hangartner aplicó su procedimiento –en algunas de las regiones más secas del mundo–, ¡cayó la lluvia! [2, 3]

Mientras que para el funcionamiento de la instalación durante 14 días se emplearon solamente **unos 42 m³** de agua, en la zona de Saurashtra y Kutch cayeron en el segundo semestre de 1988 773,2 mm de precipitación. Si se resta de ello la precipitación anual promedio de los 3,5 años anteriores, de 202,5 mm, quedan 570,7 mm de precipitación adicional. Sobre una superficie de alrededor de 109.000 km² –aproximadamente tan grande como las regiones chilenas de Atacama y Coquimbo juntas–, esto corresponde a un volumen de agua de alrededor de **62.200 millones de m³**. [39]

4. Planteamiento a la política, la ciencia, la economía y las asociaciones – Propuesta de un proyecto piloto

En vista de la evolución climática descrita al comienzo, quisiera someter este procedimiento a su consideración. El punto de partida de esta propuesta es la observación de que los períodos de sequía y calor en Chile aumentan en frecuencia y duración, y la pregunta que de ello se deriva: si, con un procedimiento comparativamente sencillo y de complejidad técnica manejable, podría favorecerse de manera dirigida la precipitación.

La propuesta consiste en que el Estado de Chile –eventualmente junto con los gobiernos regionales, la economía (en particular la agricultura, la minería y las empresas sanitarias), la ciencia y las asociaciones– ponga en marcha un proyecto piloto con acompañamiento científico. En el centro no debería estar una evaluación teórica previa de varios años, sino la pregunta práctica de si, en condiciones reales, efectivamente puede provocarse o al menos favorecerse la precipitación.

Un ensayo piloto con acompañamiento científico en condiciones reales sería el siguiente paso consecuente para examinar en la práctica el potencial del procedimiento del Hacedor de Lluvia en Chile. Precisamente durante un período marcado de sequía y calor, podrían registrarse y documentarse de manera integral las condiciones meteorológicas, el desarrollo de la operación de aspersión y los posibles cambios en la humedad del aire, las corrientes de aire, la formación de nubes y la precipitación.

Para ello, el acompañamiento científico debería apoyar y evaluar el ensayo práctico, pero sin retrasarlo innecesariamente con largos estudios previos, discusiones teóricas de principio u obstáculos administrativos excesivos. Tratándose de un procedimiento técnicamente relativamente sencillo y manejable, debería ser posible aclarar con rapidez las condiciones de seguridad y marco necesarias y, a continuación, realizar un ensayo de campo bien documentado. En definitiva, muchas de las preguntas decisivas solo pueden responderse en condiciones reales. Por ello, el objetivo debería ser: preparar cuidadosamente, acompañar científicamente, pero sobre todo, probar.

Según la propuesta, una posible unidad experimental móvil para un proyecto piloto de este tipo podría componerse de los siguientes componentes:

- un remolque con la unidad de boquillas de aspersión y bomba de agua premontada, compresor y, eventualmente, ventilador
- un segundo remolque con un generador eléctrico para el suministro de la instalación de bombeo y del ventilador
- las tuberías de agua y boquillas de aspersión necesarias, así como eventuales equipos de medición y control para el acompañamiento científico del ensayo

Posibles ubicaciones para un ensayo piloto en Chile

Chile ofrece condiciones casi ideales para un ensayo de este tipo: a lo largo de más de 4.000 kilómetros, superficies de tierra secas y soleadas limitan directamente con el Pacífico, de modo que el agua de mar –que, según el capítulo 7, es especialmente adecuada para el procedimiento– está disponible en cantidades casi ilimitadas. Como ubicaciones se ofrecen en particular:

- **Costa de la Región de Coquimbo** (provincias de Elqui, Limarí y Choapa): desde hace años bajo escasez hídrica, agricultura y ganadería caprina fuertemente afectadas. [19, 24]
- **Costa de la Región de Valparaíso** (p. ej., provincia de Petorca): foco de la megasequía y del abastecimiento de agua potable mediante camiones aljibe, cerca del Gran Santiago. [23]
- **Costa de las regiones de Atacama y Antofagasta:** marcadas condiciones desérticas con neblina costera (*camanchaca*), comparables con las anteriores zonas de intervención de Hangartner en las costas desérticas del noroeste de África y de Namibia. [21]

Como período de aplicación son especialmente adecuados los meses de verano calurosos, secos y soleados, de diciembre a marzo.

Además, Chile ya se ha mostrado en el pasado abierto a procedimientos para fomentar las precipitaciones: desde hace años se llevan a cabo –en parte con participación del Ministerio de Agricultura– programas de siembra de nubes; el más reciente fue un proyecto piloto en 2024 en la Región de Coquimbo. A diferencia de

ello, el procedimiento del Hacedor de Lluvia no requiere ni aviones ni agentes químicos de siembra como el yoduro de plata, sino únicamente agua, idealmente agua de mar del Pacífico. [36]

Costos en comparación con el gasto de Chile en medio ambiente, clima y agua

Una instalación de este tipo costaría alrededor de 160.000 a 230.000 dólares estadounidenses, lo que equivale a alrededor de 157 a 225 millones de pesos chilenos (CLP). [37] Debido a la gran extensión norte-sur de las zonas afectadas, en la etapa final probablemente bastarían 4 a 6 instalaciones para provocar lluvia de manera dirigida en las zonas áridas de Chile, desde el Norte Grande, pasando por el Norte Chico, hasta la Zona Central. Como se menciona en la documentación, con este procedimiento no solo podría combatirse la escasez de lluvias, sino también reducirse las temperaturas locales en constante aumento.

Ámbito de gasto (selección)	Monto	aprox. en USD	Fuente
Ministerio del Medio Ambiente (MMA), proyecto de presupuesto 2026	96.441 MM CLP	98 MM USD	32
– de ello, programa «Adaptación y Mitigación del Cambio Climático»	1.715 MM CLP	1,8 MM USD	32
Proyectos de inversión pública vinculados al clima (2022; 13,7 % de todas las inversiones públicas)	258.888 MM CLP	264 MM USD	33
Ministerio de Obras Públicas (MOP), presupuesto 2026	4,39 billones CLP	4.500 MM USD	34
– de ello, Dirección de Obras Hidráulicas (DOH), proyectos de inversión 2026	194.791 MM CLP	199 MM USD	34
Abastecimiento de emergencia de agua potable con camiones aljibe, 2023–2024 (municipios y delegaciones)	más de 30.192 MM CLP	31 MM USD	23
Abastecimiento de emergencia de agua potable con camiones aljibe, 2011–2019	aprox. 222.000 MM CLP	aprox. 240 MM USD	22
Proyectos planificados de desalación y reutilización de agua (públicos y privados, 53 proyectos, a sept. 2026)	23.914 MM USD	23.900 MM USD	35
Una instalación experimental móvil del Hacedor de Lluvia	**aprox. 157–225 MM CLP**	**160.000–230.000 USD**	**37**

Conversión al tipo de cambio del Banco Central de Chile del 06.11.2026 (1 USD = 979,88 CLP), redondeado. MM = millones; 1 billón de CLP = 1.000.000 millones de CLP. [37]

Si se considera que Chile, solo para el abastecimiento de emergencia de agua potable mediante camiones aljibe, gastó en los años 2023 y 2024 más de 30.000 millones de pesos, que el Ministerio de Obras Públicas dispone en 2026 de un presupuesto de alrededor de 4,4 billones de pesos y que actualmente están planificados o en construcción proyectos de desalación y tratamiento de agua por alrededor de 24.000 millones de dólares estadounidenses, una instalación experimental de este tipo sería un gasto ínfimo. Sin embargo, estoy convencido de que su efecto sería grande.

Tengamos el valor de dejar de lado eventuales prejuicios, patrones de pensamiento arraigados y dudas precipitadas, y de abrirnos a nuevos enfoques de solución. Precisamente ante los crecientes desafíos que plantean la sequía, el calor, la escasez de agua y el calentamiento global, deberíamos actuar con apertura tecnológica y orientados a soluciones. El procedimiento del Hacedor de Lluvia muestra que posiblemente ya con una tecnología comparativamente sencilla, económica y respetuosa con el medio ambiente se puede lograr algo grande. Por ello, lo decisivo no debería ser si una idea parece inusual a primera vista, sino si funciona en condiciones reales y aporta un beneficio concreto. Tener el valor de examinarla sin prejuicios y probarla en la práctica podría resultar mucho más importante de lo que hoy quizás todavía podemos imaginar.

5. Diferentes variantes constructivas de la unidad de boquillas de aspersión

Para la implementación práctica del procedimiento son posibles diferentes formas constructivas móviles. En primer plano se encuentran tres variantes técnicas básicas: una unidad de aspersión con bomba de alta presión, una unidad de aspersión con bomba de agua e inyección combinada de aire comprimido, así como una versión con ventilador vertical adicional, según un principio básico similar al de un cañón de nieve. Las formas constructivas siguientes muestran posibles variantes de construcción para un futuro prototipo.

Variante 1 – Unidad de boquillas de aspersión con bomba de alta presión

El agua se aspira de un lago, un río o el mar, se filtra y se impulsa con una potente bomba de alta presión hacia el distribuidor y los tubos de aspersión. La presión de aspersión necesaria es generada completamente por la bomba de agua; las boquillas atomizan el agua en finas gotitas. Esta versión puede combinarse adicionalmente con uno o varios ventiladores orientados hacia arriba.

Ventajas: construcción sencilla; alto caudal de agua; menos componentes; menor esfuerzo de mantenimiento.

Desventajas: para una atomización muy fina se requiere una presión de agua correspondientemente alta; el tamaño de las gotitas depende fuertemente de la boquilla y de la presión. [11]

Variante 2 – Unidad de boquillas de aspersión con bomba e inyección de aire comprimido (compresor)

La bomba de agua impulsa el agua hacia boquillas bifluido o boquillas atomizadoras neumáticas; el compresor suministra por separado el aire comprimido. Solo en la boquilla o inmediatamente fuera de ella se encuentran el aire y el agua. La rápida corriente de aire desintegra el chorro de agua en gotitas considerablemente más pequeñas. En determinadas boquillas bifluido bastan, por ejemplo, presiones de agua de aprox. 1–10 bar y presiones de aire de aprox. 1–15 bar. Según el sistema, son posibles gotitas en el rango de unos pocos micrómetros. También esta variante puede combinarse con un ventilador adicional.

Ventajas: atomización muy fina y bien regulable; menor presión de agua necesaria; tamaño de las gotitas regulable mediante la presión del agua y del aire.

Desventajas: se requiere un compresor y un sistema separado de conductos de aire; mayor consumo de energía; técnicamente más complejo. [12, 13]

Variante 3 – Unidad de boquillas de aspersión con bomba, inyección de aire comprimido (compresor) y ventilador vertical

Esta forma constructiva combina la atomización neumática con una corriente de aire dirigida hacia arriba y se basa técnicamente en el principio de un cañón de nieve. Sin embargo, a diferencia de la producción de nieve, el agua no debe congelarse, sino distribuirse lo más finamente posible en el aire cálido y evaporarse. Uno o varios ventiladores verticales transportan las gotitas hacia arriba, aportan continuamente aire del entorno y prolongan el tiempo de permanencia de la niebla de agua en el aire.

Ventajas: atomización muy fina; mezcla intensiva con el aire del entorno; mayor tiempo de suspensión y de evaporación; transporte dirigido hacia arriba.

Desventajas: máximo esfuerzo técnico y energético; peso adicional; la potencia del ventilador, del compresor y de la bomba deben coordinarse entre sí. [14]

Posibles formas de ejecución constructiva

Los siguientes ejemplos muestran diferentes disposiciones de la unidad de boquillas de aspersión y posibles combinaciones de las tres variantes técnicas básicas.

Nota sobre las ilustraciones: las unidades de boquillas de aspersión representadas son visualizaciones conceptuales y no fotografías de instalaciones existentes. Las representaciones fueron creadas como visualizaciones de diseño asistidas por IA según las indicaciones del autor. [15]



Unidad de aspersión con boquillas en anillo y ventilador vertical

Uso: Con bomba, compresor y ventilador vertical.

Transporte: El mástil es abatible; la unidad de boquillas en anillo y el ventilador son desmontables para el transporte.



Disposición circular de una unidad de boquillas de aspersión

Uso: Con bomba, compresor y ventilador vertical.

Transporte: La parte superior de los tubos de aspersión y el ventilador son desmontables.



Unidad de boquillas de aspersión de doble fila

Uso: Con bomba de alta presión o con bomba y compresor.

Transporte: La parte superior de los tubos de aspersión es desmontable.



Unidad de aspersión con boquillas en anillo

Uso: Con bomba de alta presión o con bomba y compresor.

Transporte: El mástil es abatible; la parte superior de la unidad de boquillas en anillo es desmontable.



Unidad de boquillas de aspersión de una fila

Uso: Con bomba de alta presión o con bomba y compresor.

Transporte: La parte superior de los tubos de aspersión es desmontable.



Unidad de boquillas de aspersión en haz

Uso: Con bomba de alta presión o con bomba y compresor.

Transporte: La parte superior de los tubos de aspersión es desmontable.

6. Conclusiones y perspectivas

El procedimiento «El Hacedor de Lluvia» combina una idea básica técnica y física comparativamente sencilla con un posible beneficio extraordinario. Las experiencias y los ensayos de campo realizados hasta ahora muestran que, en mi opinión, existen razones suficientes para retomar este procedimiento en las condiciones climáticas actuales y probarlo en la práctica.

Precisamente ante la creciente escasez de lluvias, los períodos de sequía y calor más prolongados y las consecuencias que de ello se derivan para la agricultura, los bosques, los ríos, el abastecimiento de agua, la economía y la población, cabe preguntarse si podemos permitirnos dejar sin aprovechar una posibilidad de este tipo. A ello se suma el efecto refrescante directamente perceptible de una lluvia persistente: tras largos períodos de calor, la temperatura ambiente baja claramente en poco tiempo, y también el suelo, antes fuertemente calentado, se enfría de manera duradera. Si con el procedimiento del Hacedor de Lluvia fuera realmente posible provocar o fomentar las precipitaciones de manera dirigida, posiblemente no solo podría combatirse la sequía, sino que, gracias a este efecto refrescante, también podría contrarrestarse el creciente calentamiento global.

Por ello, no deberíamos detenernos demasiado en la pregunta teórica de si el procedimiento es posible o no. Lo decisivo sería iniciar el ensayo en las condiciones actuales con acompañamiento científico y observar lo que realmente ocurre.

¿Qué pasaría si el procedimiento del Hacedor de Lluvia tuviera éxito –de lo cual estoy convencido– y pudiéramos así algún día influir o «controlar» de manera dirigida las precipitaciones no solo en Chile, sino quizás también en otros países de Sudamérica, de modo que la escasez de lluvias y los largos períodos de sequía se convirtieran cada vez más en algo desconocido?

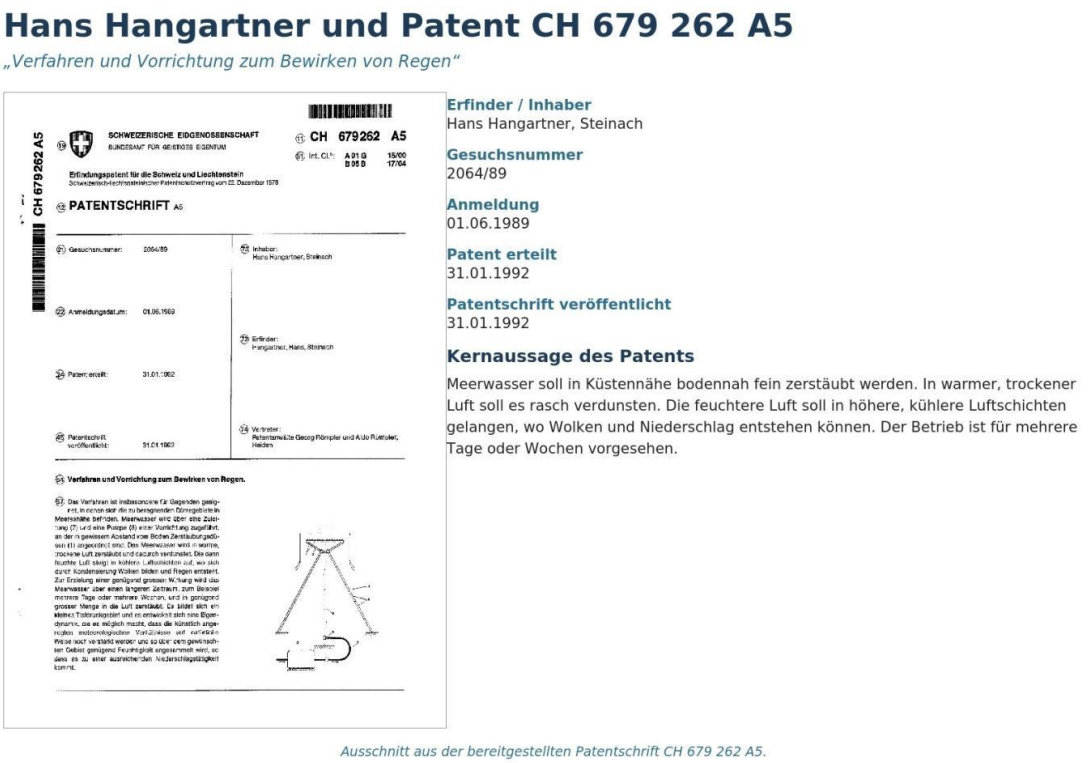
No menos importante podría ser su aplicación en países en desarrollo, cuyas posibilidades de vida y de desarrollo se ven fuertemente limitadas precisamente por la falta de precipitaciones y la escasez crónica de agua. Una tecnología comparativamente sencilla que pudiera hacer posible allí la lluvia de forma fiable tendría una importancia difícil de sobrestimar para la agricultura, el abastecimiento de agua y la seguridad alimentaria.

La presente documentación pretende aportar una contribución objetiva a ello y servir a las instancias interesadas de la política, la ciencia, la economía, las asociaciones y la administración como base para un examen más profundo.

Porque, en definitiva, solo un ensayo práctico puede mostrar lo que realmente es posible.

«Lo que es posible no lo descubrimos solo a través de la duda, sino teniendo el valor de intentarlo.» [38]

7. El procedimiento «hacer llover» – Principio básico



Ausschnitt aus der bereitgestellten Patentschrift CH 679 262 A5.

Extracto de la memoria de patente CH 679 262 A5 puesta a disposición

La base del procedimiento es una reflexión física sumamente sencilla: si el agua –idealmente agua de un arroyo, un río, un lago o el mar– se bombea mediante un sistema de tubos a una altura de unos cinco a nueve metros y allí se atomiza en finísimas gotitas, la superficie total del agua aumenta enormemente. De este modo, en poco tiempo puede evaporarse una gran cantidad de agua. La evaporación extrae calor del aire circundante y, al mismo tiempo, lo enriquece con humedad adicional. Precisamente este cambio en la capa de aire cercana al suelo debe crear condiciones favorables para el movimiento del aire, la térmica, la formación de nubes y, finalmente, la lluvia. [1, 2]

El aire cercano al suelo, fuertemente calentado, se humedece mediante el proceso de aspersión y se enfría localmente. En interacción con el calentamiento continuo del suelo y las diferencias de temperatura y densidad existentes por ello, puede desarrollarse una corriente ascendente local. Si este proceso se mantiene de forma continua durante un tiempo prolongado –según la documentación disponible, durante varios días hasta semanas–, debería desarrollarse a partir de ello, a nivel del suelo, una zona de baja presión pequeña pero estable, o bien una circulación de aire creciente. [1, 2]

Según las descripciones disponibles, este sistema local desarrolla una cierta dinámica propia: se atrae aire más húmedo del entorno, en particular de una superficie de agua adyacente. El aire ascendente llega a capas de aire más frías, donde el vapor de agua puede condensarse y pueden formarse nubes. Según los informes históricos, la zona de influencia debería ampliarse en el transcurso de varios días, hasta que se produce un intercambio entre el aire caliente sobre la tierra seca y el aire más húmedo sobre el mar o un lago. [1, 2]

La especial importancia del agua de mar o agua salada

Para el procedimiento del Hacedor de Lluvia, el agua de mar o agua salada es especialmente interesante por dos razones. Por un lado, como toda agua rociada, cumple la función térmica del procedimiento: el fuerte aumento de la superficie de las finísimas gotitas favorece la evaporación, enfría el aire circundante y, al mismo tiempo, aumenta su contenido de humedad.

Por otro lado, con el agua de mar o agua salada llegan al aire sales y minerales disueltos en diminutas gotitas. Si se evapora una parte del agua, quedan partículas salinas muy pequeñas. Estas son higroscópicas, es

decir, pueden absorber humedad del entorno. De este modo, al efecto térmico del agua rociada se suma un efecto microfísico que puede ser importante para la formación y el crecimiento de gotitas de nube. [9]

Por lo tanto, la posible ventaja del agua de mar o agua salada no reside en que el agua salada se evapore con mayor intensidad o más rápidamente que el agua pura. Más bien, combina el aporte de agua con la incorporación adicional de núcleos naturales de aerosol y de condensación salinos. En este sentido, el agua de mar o agua salada puede complementar funcionalmente el procedimiento descrito frente al agua dulce muy pobre en minerales y posiblemente hacerlo más eficiente. [9]

Núcleos de condensación y gotitas de nube

Para que el vapor de agua pueda condensarse en la atmósfera formando gotitas de nube, los llamados núcleos de condensación desempeñan un papel importante. Se trata de partículas muy pequeñas en el aire a las que pueden adherirse las moléculas de agua. Al rociar agua con minerales disueltos –de manera especialmente marcada en el agua de mar y en menor medida en el agua de lago o de río–, tras una evaporación parcial o completa pueden quedar finísimas partículas de sal o de minerales. [9]

Estas partículas higroscópicas pueden absorber humedad y, en condiciones adecuadas, actuar como núcleos naturales de condensación de nubes. En una nube en desarrollo, las pequeñas gotitas así formadas pueden seguir creciendo y unirse con otras gotitas. Sin embargo, para que de las gotitas de nube se forme finalmente precipitación, deben darse además las condiciones meteorológicas necesarias para ello. [9]

La ley de Raoult

En el informe «Der Mann, der es in der Sahel-Zone regnen liess» («El hombre que hizo llover en el Sahel»), del año 1989, se hace referencia expresa, en relación con la activación de lluvia de Hangartner, al profesor François-Marie Raoult, de Grenoble, y a la ley de Raoult, que lleva su nombre. El informe de entonces vincula esta ley con el descenso del punto de congelación y el aumento del punto de ebullición de las soluciones. [2, 7]

Para el efecto del agua salada aquí considerado, resulta especialmente interesante la presión de vapor de una solución. De manera simplificada, la ley de Raoult describe que el agua con sales u otras sustancias disueltas –es decir, por ejemplo, el agua de mar o agua salada– tiene una presión de vapor algo menor que el agua casi pura o destilada. También el agua dulce contiene por lo general minerales y sales disueltos, aunque en su mayoría en menor concentración que el agua de mar. Este llamado efecto Raoult también es importante en gotitas salinas muy pequeñas o en partículas de aerosol. [7]

$$p(\text{agua, solución}) = x(\text{agua}) \times p^{o}(\text{agua})$$

La teoría de Köhler – Relación con la formación de nubes

Una clasificación física más amplia la proporciona la teoría de Köhler de la microfísica de nubes. Describe en qué condiciones pequeñas partículas de aerosol higroscópicas absorben agua, siguen creciendo y pueden activarse como gotitas de nube. En ella, la influencia de las sustancias disueltas, tal como se describe con el efecto Raoult, se combina con la influencia de la superficie curva de gotitas muy pequeñas. [8, 9]

Precisamente en el caso de la sal marina, esta relación es de especial interés: las partículas de sal marina pueden, debido a sus propiedades higroscópicas, absorber agua y, con una humedad del aire adecuada o una sobresaturación, activarse como núcleos de condensación de nubes. Con ello, la referencia de Hangartner al agua de mar y a la ley de Raoult recibe una explicación microfísica adicional. [8, 9]

En resumen

En el procedimiento descrito, el agua dulce actúa sobre todo a través de la atomización, la evaporación, el enfriamiento y el enriquecimiento de humedad. El agua de mar o agua salada combina además este efecto con la incorporación de partículas salinas higroscópicas que pueden actuar como núcleos de condensación. Por ello, el agua de mar o agua salada puede tener para el procedimiento una ventaja funcional adicional.

El modelo de funcionamiento de Hangartner – los dos esquemas

Los dos esquemas utilizados por Hangartner ilustran la interacción que él suponía entre la tierra seca, el mar y la atmósfera. Para la documentación fueron redibujados y rotulados con claridad, de modo que más adelante también puedan trasladarse fácilmente a otros idiomas. [2]

Fig. 1

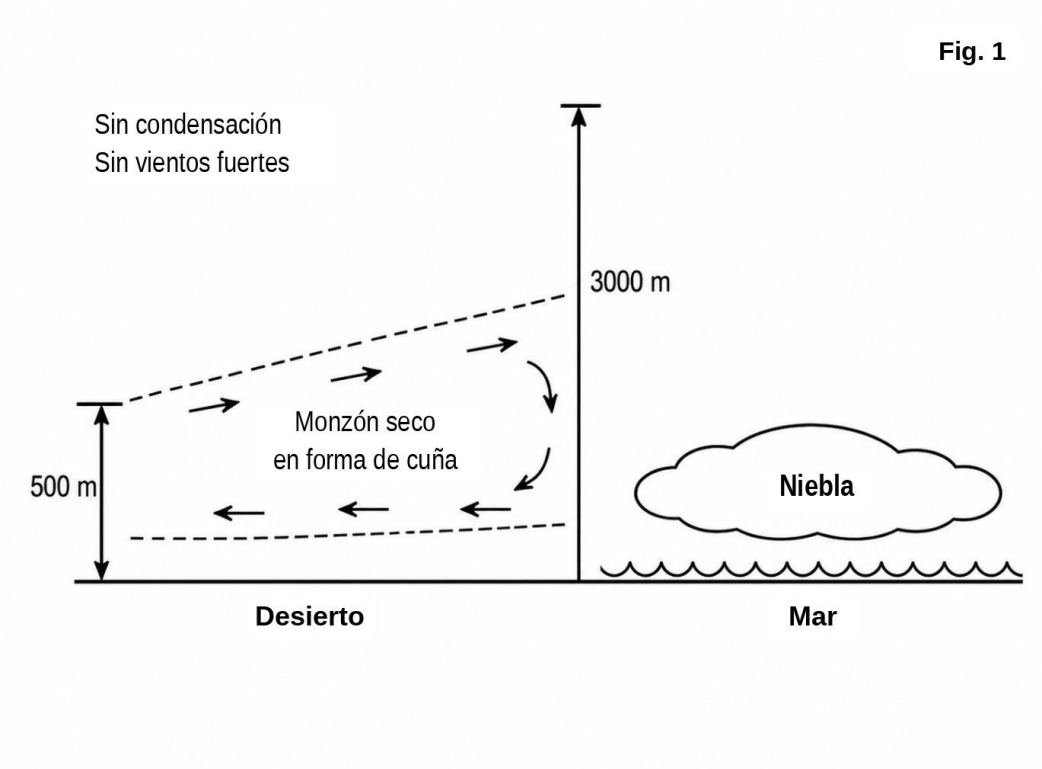


Fig. 1 (redibujada): Situación inicial según Hangartner – monzón seco en forma de cuña sobre el desierto; sobre el mar se encuentra un campo de neblina.

La Fig. 1 muestra la situación inicial: según la representación de Hangartner, sobre el desierto se desplaza un monzón seco en forma de cuña solo a una altura comparativamente baja. Sobre el mar, en cambio, se encuentra un campo de neblina. El esquema caracteriza este estado con «Sin condensación» y «Sin vientos fuertes». En esta representación, el intercambio de humedad entre el mar y la tierra aún es débil. [2]

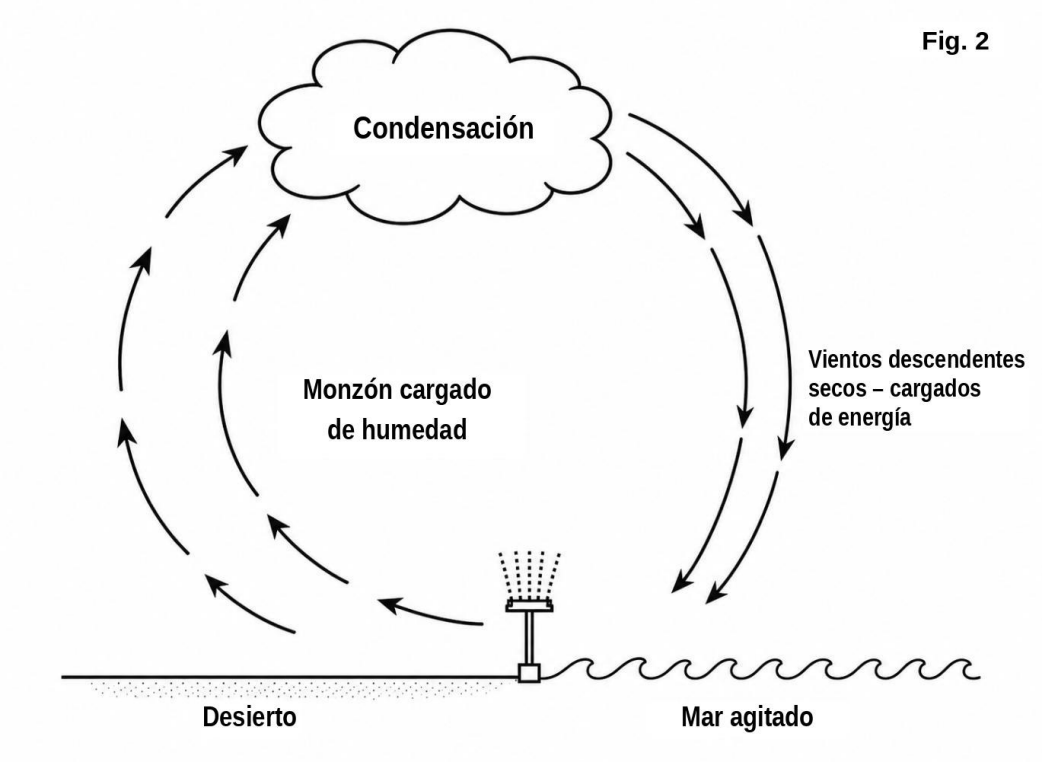


Fig. 2 (redibujada): Ciclo reforzado – el aire cargado de humedad asciende, comienza la condensación, los vientos descendentes secos –cargados de energía– fluyen de regreso hacia la superficie de agua.

La Fig. 2 muestra el ciclo activado según la concepción de Hangartner. El aire cargado de humedad fluye desde una superficie de agua vecina –mar, lago o río– en dirección a la tierra más cálida y allí asciende. A mayor altura comienza la condensación, con lo que se libera calor. El aire, ahora más seco, vuelve a descender y fluye –denominado en el esquema de Hangartner «vientos descendentes secos – cargados de energía»– de regreso en dirección a la superficie de agua. Allí puede volver a absorber humedad. La operación continua de aspersión debe estimular este ciclo y reforzarlo cada vez más. [2]

Nota: la base de las dos ilustraciones redibujadas son los esquemas manuscritos del artículo de Hans-Joachim Ehlers, «Der Mann, der es in der Sahel-Zone regnen liess», raum&zeit 43/89, p. 70. En el redibujo se mantuvo la idea básica representada. [2]

Dos niveles de acción interrelacionados

Los esquemas describen sobre todo el nivel dinámico a gran escala del procedimiento: movimiento del aire, transporte de humedad, ascenso, condensación y flujo de retorno.

La ley de Raoult y la teoría de Köhler complementan este modelo en el nivel microfísico: explican la relación entre las sales disueltas, las partículas de aerosol higroscópicas y la formación o activación de gotitas de nube. [7, 8, 9]

En conjunto, resulta así un modelo de funcionamiento ampliado: por un lado, la instalación de aspersión debe influir térmica y dinámicamente en el aire cercano al suelo y apoyar una circulación mayor entre la tierra y el agua; por otro lado, al utilizar agua de mar o agua salada, pueden incorporarse adicionalmente a la atmósfera núcleos de condensación salinos naturales.

Según las fuentes disponibles, el efecto descrito –desde el inicio de la aspersión hasta el comienzo de la precipitación– debería producirse habitualmente después de unos tres a catorce días, aunque esto puede variar mucho según las condiciones locales. [2, 4]

El informe del Sahel describe que, después de unos tres días, se había desarrollado una circulación suficientemente grande y que al cuarto día comenzó a llover. En la intervención en la India de 1988, comenzó a llover unas dos semanas después de la llegada de Hangartner, el 14 de julio de 1988. [2, 4]

El procedimiento del Hacedor de Lluvia despliega su efecto tanto mejor cuanto más seco está el aire y cuanto más intensa es la radiación solar.

8. Antecedentes meteorológicos

La relación entre baja y alta presión

Para el procedimiento es de especial importancia el gradiente de temperatura y de presión entre la tierra fuertemente calentada y una superficie de agua vecina, más fría. Sobre la tierra cálida asciende el aire, mientras que el aire sobre el mar, el lago o el río permanece comparativamente más frío y más denso. De este modo puede generarse una corriente de aire como la que se conoce, en principio, de la circulación natural de brisas de tierra y de mar. [10]

Importancia del lugar de aplicación

Por ello, la elección del lugar de aplicación desempeña un papel central. En lo posible, la unidad de aspersión debería operar directamente junto a un mar, lago, río u otra superficie de agua suficientemente grande. Así no solo se dispone de suficiente agua para la operación de aspersión, sino al mismo tiempo de una fuente natural de humedad en las inmediaciones. [2, 3, 10]

En Chile, esta condición se cumple a lo largo de toda la costa del Pacífico. Especialmente en el norte del país, sobre el mar frío se encuentra con frecuencia un campo de neblina y de nubes (*camanchaca*), mientras que la tierra adyacente permanece caliente y seca: una situación de partida muy cercana al esquema de Hangartner de la Fig. 1. [21]

Condiciones meteorológicas

La intensidad con que se desarrolla el proceso iniciado por la instalación de aspersión depende de las respectivas condiciones meteorológicas. Son importantes, en particular:

- Temperatura del aire y humedad del aire
- Intensidad de la radiación solar
- Dirección y velocidad del viento
- Distribución de la temperatura en las capas de aire superiores
- Estabilidad o inestabilidad de la atmósfera
- Tamaño y temperatura de la superficie de agua adyacente
- Forma del terreno y sistemas de vientos regionales existentes. [10]

Por ello, la elección del momento y del lugar de la aplicación es decisiva. Según las descripciones disponibles, las condiciones especialmente calurosas, secas y soleadas son favorables para el procedimiento.

Otras influencias

Es concebible que otros factores locales o meteorológicos influyan en el desarrollo del procedimiento. Precisamente un ensayo en la práctica podría contribuir a observar directamente tales relaciones y a obtener así conocimientos sobre ubicaciones adecuadas, el momento óptimo de aplicación y el efecto en diferentes condiciones meteorológicas.

9. Fuentes y referencias

Las siguientes fuentes constituyen la base de los datos históricos, meteorológicos, científicos y técnicos de esta documentación. Los números corresponden a las referencias a fuentes en el texto.

Fuentes históricas, meteorológicas y científicas

[1] Hans Hangartner: patente suiza CH 679 262 A5, «Verfahren und Vorrichtung zum Bewirken von Regen» («Procedimiento y dispositivo para provocar lluvia»). Solicitud 01.06.1989; patente concedida y memoria de patente publicada el 31.01.1992. Fuente: memoria de patente puesta a disposición / Instituto Federal Suizo de la Propiedad Intelectual.

[2] Hans-Joachim Ehlers: «Der Mann, der es in der Sahel-Zone regnen liess» («El hombre que hizo llover en el Sahel»), raum&zeit, n.º 43/89, pp. 68–72. Fuente: artículo original puesto a disposición. Especialmente relevante: p. 69 – después de unos tres días la circulación es suficientemente grande; al 4.º día comienza a llover.

[3] Edith Lier: «Hans Hangartner – Der verkannte Regengott» («Hans Hangartner – El dios de la lluvia incomprendido»), Beobachter, 08.07.2005. https://www.beobachter.ch/familie/hans-hangartner-der-verkannte-regengott (consultado el 19.08.2026).

[4] H. B.: «Ein Schweizer als Regenmacher in Indien» («Un suizo como hacedor de lluvia en la India»), Tages-Anzeiger, miércoles 27.07.1988, p. 48. Fuente: artículo original puesto a disposición. Especialmente relevante: p. 48 – la lluvia comienza el 14 de julio de 1988, unas dos semanas después de la llegada de Hangartner a fines de junio.

[5] India Meteorological Department (IMD): Subdivisional Rainfall Data – Saurashtra and Kutch. Precipitaciones mensuales y anuales históricas. https://imdpune.gov.in/cmpg/subdivrainfall/saurashtraandkutch.html (consultado el 19.08.2026).

[6] India Meteorological Department (IMD): Subdivisional Rainfall Data – Gujarat Region. Precipitaciones mensuales y anuales históricas. https://imdpune.gov.in/cmpg/subdivrainfall/gujaratregion.html (consultado el 19.08.2026).

[7] International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC): «Raoult's law», Compendium of Chemical Terminology (Gold Book), DOI: 10.1351/goldbook.15349. https://doi.org/10.1351/goldbook.15349 (consultado el 19.08.2026).

[8] Köhler, H.: «The nucleus in and the growth of hygroscopic droplets», Transactions of the Faraday Society, 1936, vol. 32, pp. 1152–1161. DOI: 10.1039/TF9363201152.

[9] Kleinheins, J.; Shardt, N.; Lohmann, U.; Marcolli, C.: «The surface tension and cloud condensation nuclei (CCN) activation of sea spray aerosol particles», Atmospheric Chemistry and Physics, 25, 881–903, 2025. DOI: 10.5194/acp-25-881-2025.

[10] NOAA / National Weather Service: fundamentos de la circulación de brisas de tierra y de mar, diferencias de presión de origen térmico y zonas de convergencia de brisa marina (Sea-Breeze-Convergence-Zonen). https://www.weather.gov/source/zhu/ZHU_Training_Page/winds/Wx_Terms/Flight_Environment.htm (consultado el 19.08.2026).

Fuentes técnicas sobre sistemas de bombas, boquillas y ventiladores

[11] Danfoss: «High-pressure water mist systems». Sistemas industriales de niebla de agua a alta presión con presiones de servicio de hasta 100 bar y altos caudales. https://www.danfoss.com/en/products/hpp/high-pressure-water-mist-systems/high-pressure-water-mist-systems/ (consultado el 19.08.2026).

[12] Lechler: «KSD nozzle lances» – boquillas bifluido de mezcla externa. Rango de presión típico: líquido 1–10 bar, aire de atomización 1–15 bar. https://www.lechler.com/my-en/products/process-technology/nozzle-lances-and-systems-for-gas-cooling/ksd-nozzle-lances (consultado el 19.08.2026).

[13] Ikeuchi Europe: «AKIJet – Impinging-type pneumatic spray nozzle». Atomización neumática ultrafina con un diámetro medio de gotitas de 10 µm o menos. https://www.ikeuchi.eu/catalogs/akijet/ (consultado el 19.08.2026).

[14] TechnoAlpin: datos técnicos sobre cañones de nieve con ventilador (Fan Guns), entre otros TR10/MMS. Combinación de presión de agua, compresor/nucleadores y turbina; presión de servicio del agua típicamente 8–40 bar. https://www.technoalpin.com/en/snow-guns/fan-guns/tr10/ (consultado el 19.08.2026).

[15] Visualizaciones conceptuales de la unidad móvil de boquillas de aspersión: representaciones de diseño asistidas por IA según las indicaciones del autor, elaboradas en 2026. Las ilustraciones sirven para visualizar posibles formas constructivas y no muestran instalaciones de serie existentes.

Fuentes complementarias para la edición Chile

[16] Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2: «Informe a la Nación – La megasequía 2010–2015: Una lección para el futuro», Santiago, noviembre de 2015. Déficit de precipitaciones de alrededor del 25–30 % en Chile central, década más cálida desde el inicio de las mediciones. https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/136717 (consultado el 19.11.2026).

[17] Universidad de Chile: «Roberto Pizarro, académico U. de Chile: "Las megasequías no se terminan con un año lluvioso"», 2026. https://uchile.cl/u243973 (consultado el 19.11.2026).

[18] Emol: «"La pregunta es cuánta agua logra almacenarse": Lluvias no aplacarían "fantasma" del estrés hídrico en la zona central», 03.07.2026. Déficit de precipitaciones de más del 50 % entre Coquimbo y el Maule. https://www.emol.com/noticias/Nacional/2026/07/03/1204491/estres-hidrico-escasez-lluvias-embalses.html (consultado el 19.11.2026).

[19] Diario Oficial de la República de Chile: prórroga de los decretos de escasez hídrica (Decretos MOP N.º 177 y 179 del 09/10.07.2026) para las provincias de Limarí y Elqui, así como para la provincia de Choapa, Región de Coquimbo; además, Decreto MOP N.º 184 del 24.07.2026 (Lluta Bajo, Región de Arica y Parinacota). https://www.diariooficial.interior.gob.cl/publicaciones/2026/08/13/44524/01/2851683.pdf y https://www.diariooficial.interior.gob.cl/publicaciones/2026/09/03/44541/01/2862962.pdf (consultado el 19.11.2026).

[20] Chilevisión: «Récord con 172 comunas: 45 % de la población en Chile está bajo decretos de escasez hídrica» (2021), así como «Crisis del agua en la Patagonia: Decreto de escasez hídrica involucra al 61 % de los habitantes de Aysén» (marzo de 2022: 188 de 346 comunas); además, «Inédito en el sur de Chile: Decretan escasez hídrica en Osorno, Llanquihue y Chiloé» (abril de 2021: 26 de 30 comunas de la Región de Los Lagos). https://www.chilevision.cl/noticias/record-con-172-comunas-45-de-la-poblacion-en-chile-esta-bajo-decretos (consultado el 19.11.2026).

[21] Guinness World Records: «Driest desert» – desierto de Atacama; humedad proveniente principalmente de la neblina costera (camanchaca); Arica, alrededor de 0,76 mm de precipitación anual; período seco más largo según la OMM: 172 meses (octubre de 1903 a enero de 1918). https://www.guinnessworldrecords.com/world-records/577412-driest-desert (consultado el 19.11.2026).

[22] Infraestructura Pública (CPI): «Chile deberá invertir más que dinero para asegurar el acceso al agua a su población». Alrededor de 1,5 millones de personas sin acceso a agua potable segura; gasto en camiones aljibe de alrededor de 222.000 millones de CLP (casi 240 millones de USD) en una década. https://www.infraestructurapublica.cl/?p=83165 (consultado el 19.11.2026).

[23] Consejo para la Transparencia (CPLT): «Fiscalización CPLT: Municipios y delegaciones contrataron más de $30 mil millones en camiones aljibe en 2023 y 2024», comunicado de prensa vía Mediabanco, 06.10.2026. 370 contratos por más de 30.192 millones de CLP; Región de Valparaíso, 47 % del monto total. https://www.mediabanco.com/?p=371586 (consultado el 19.11.2026).

[24] Diario Oficial de la República de Chile: Ministerio de Agricultura, «Declara emergencia agrícola …», Región de Coquimbo, N.º 44.454 del 20.05.2026 (déficit hídrico persistente, disminución del rendimiento de los pozos). https://www.diariooficial.interior.gob.cl/publicaciones/2026/05/20/44454/01/2810579.pdf (consultado el 19.11.2026).

[25] Banco Interamericano de Desarrollo (BID): «Ahí viene El Niño: qué nos enseñan las sequías sobre la resiliencia de los sistemas eléctricos», Blog Energía, 2026. Energía hidroeléctrica, alrededor del 31 % de la generación eléctrica chilena en los últimos 20

años; las sequías reducen la producción hidroeléctrica en alrededor de un 25 %. https://www.iadb.org/es/blog/energia/ahi-viene-el-nino-que-nos-ensenan-las-sequias-sobre-la-resiliencia-de-los-sistemas-electricos (consultado el 19.11.2026).

[26] La Tercera / Infraestructura Pública: «Producción hidroeléctrica en Chile cae a mínimos históricos ante prolongada sequía», 02.06.2021. Participación de la energía hidroeléctrica en abril de 2021: 13 %. https://www.infraestructurapublica.cl/produccion-hidroelectrica-en-chile-cae-a-minimos-historicos-ante-prolongada-sequia/ (consultado el 19.11.2026).

[27] Centro de Políticas Públicas UC: «Impacto de las olas de calor en la salud en Chile: evidencia y recomendaciones», enero de 2024. 584 y 245 muertes adicionales, respectivamente, durante las olas de calor de 2017 y 2019, sobre todo en personas mayores de 65 años. https://politicaspublicas.uc.cl/web/content/uploads/2024/01/Documento-Calor-extremoVOK.pdf (consultado el 19.11.2026).

[28] 24horas.cl: «Calor extremo ya provoca más de mil muertes anuales en Chile: estudio UC-Bupa …», 15.05.2025. https://www.24horas.cl/conciencia-24-7/sostenibilidad/calor-extremo-provoca-mas-mil-muertes-anuales-chile (consultado el 19.11.2026).

[29] La Tercera: «Megaincendio en Valparaíso: Fiscalía confirma 138 fallecidos y tribunal extiende plazo de investigación», 2025. https://www.latercera.com/nacional/noticia/megaincendio-en-valparaiso-fiscalia-confirma-138-fallecidos-y-tribunal-extiende-plazo-de-investigacion/ (consultado el 19.11.2026).

[30] Meteored Chile: «Senapred activa alerta por calor en todo Chile hasta marzo de 2027: el modelo europeo anticipa un verano más cálido», 2026. https://www.meteored.cl/noticias/actualidad/senapred-activa-alerta-por-calor-en-todo-chile-hasta-marzo-de-2027-el-modelo-europeo-anticipa-un-verano-mas-calido.html (consultado el 19.11.2026).

[31] The Clinic: «El Niño golpea de nuevo: advierten de un verano con temperaturas extremas tras una primavera cálida y lluviosa», 28.08.2026. La megasequía iniciada en 2007 no ha terminado; retorno a precipitaciones deficitarias previsto para 2028 o 2029. https://www.theclinic.cl/2026/08/28/el-nino-golpea-de-nuevo-advierten-de-un-verano-con-temperaturas-extremas-tras-una-primavera-calida-y-lluviosa/ (consultado el 19.11.2026).

[32] Dirección de Presupuestos (DIPRES): Proyecto de Ley de Presupuestos 2026, Partida 25 Ministerio del Medio Ambiente – presupuesto total de 96.441 millones de CLP, de ello programa «Adaptación y Mitigación del Cambio Climático», 1.715 millones de CLP. https://www.dipres.gob.cl/597/articles-387347_doc_pdf.pdf (consultado el 19.11.2026).

[33] DIPRES / Ministerio de Hacienda / PNUD: «El 13,7 % del gasto en proyectos de inversión pública en Chile estuvo asociado a cambio climático en 2022» – 258.888 millones de CLP. https://www.hacienda.cl/noticias-y-eventos/noticias/el-13-7-del-gasto-en-proyectos-de-inversion-publica-en-chile-estuvo-asociado-a (consultado el 19.11.2026).

[34] Ministerio de Obras Públicas (MOP): presentación «El MOP en cifras», mayo de 2026 – Partida MOP 2026: 4,39 billones de CLP; DIPRES, Proyecto de Ley de Presupuestos 2026, Partida 12, Dirección de Obras Hidráulicas: proyectos de inversión por 194.791 millones de CLP. https://lyd.org/wp-content/uploads/2026/05/PPT_Ministro_v5.3.pdf y https://www.dipres.gob.cl/597/articles-387005_doc_pdf.pdf (consultado el 19.11.2026).

[35] Reporte Minero: «Inversión en desalación y reúso hídrico en Chile alcanza los US$ 23.914 millones con 53 proyectos», informe de catastro CBC–ACADES, 22.09.2026. https://reporteminero.cl/noticia/noticias/2026/09/catastro-cbc-acades-inversion-desalacion-reuso-agua-chile (consultado el 19.11.2026).

[36] Meganoticias: «Bombardeo de nubes en región Coquimbo: ¿Cuál fue el resultado?», 21.08.2024; Portal Frutícola: «Chile: Ministro de Agricultura confirma nuevo plan para estimular las precipitaciones». https://www.meganoticias.cl/nacional/456481-bombardeo-nubes-region-coquimbo-lluvias-cordillera-nieve-objetivo-pdp-21-8-2024.html (consultado el 19.11.2026).

[37] Banco Central de Chile: Tipos de cambio y paridades de monedas extranjeras, al 06.11.2026 (1 EUR = 1.092,40 CLP; 1 USD = 979,88 CLP), publicado en el Diario Oficial N.º 44.594 del 09.11.2026. https://www.diariooficial.interior.gob.cl/publicaciones/2026/11/09/44594/01/2899957.pdf (consultado el 19.11.2026).

Cita del autor

[38] Jonathan Hertig: «Lo que es posible no lo descubrimos solo a través de la duda, sino teniendo el valor de intentarlo.» Cita del autor, 2026.

Cálculo propio

[39] Cálculo propio del autor sobre el volumen de agua liberado por el experimento de lluvia, de alrededor de 62.200 millones de m³, derivado de los datos de precipitación del India Meteorological Department para Saurashtra y Kutch [5]. Bases de cálculo y derivación: véanse los detalles de cálculo a continuación.

Detalles de cálculo del agua empleada para provocar lluvia y de la cantidad de lluvia: [39]

En los años:

- 1985: 297,7 mm de precipitación anual
- 1986: 303,8 mm de precipitación anual
- 1987: 92,5 mm de precipitación anual
- 1988: 14,9 mm de precipitación semestral enero–junio de 1988
  708,9 mm de precipitación total / 3,5 años = 202,5 mm de precipitación promedio por año
  (A comienzos de julio, Hangartner inició el «experimento de lluvia», y el 14 de julio de 1988 comenzó la lluvia.)
  Después del experimento de lluvia del 1 al 14 de julio de 1988, hasta fines de 1988 cayeron 773,2 mm de lluvia (véase el capítulo 3).
- Durante los 14 días, Hangartner utilizó cada día aprox. 3 m³ de agua = total 42 m³ de agua
- Superficie de la zona de Saurashtra + Kutch en la India = 109.000 km²
- Cantidad de precipitación: lluvia hasta fines de 1988: 773,2 mm, menos 202,5 mm de precipitación promedio = 570,7 mm × 109.000 km² = total 62.206.300.000 m³ (**62.200 millones de m³ de lluvia**)

Datos de precipitación del India Meteorological Department para Saurashtra y Kutch:
https://imdpune.gov.in/cmpg/subdivrainfall/saurashtraandkutch.html (el enlace se abre en aprox. 30 segundos)