



INSTITUTO DE GEOGRAFÍA
FACULTAD DE HISTORIA, GEOGRAFÍA
Y CIENCIA POLÍTICA

El Boletín Electrónico de Geografía (BeGEO) es una publicación que intenta crear un espacio de difusión de los estudios realizados por los estudiantes del Instituto de Geografía de la Pontificia Universidad Católica de Chile.

BeGEO reúne artículos originales de alta calidad que son elaborados por los estudiantes de pregrado en las distintas actividades curriculares impartidas por docentes del Instituto de Geografía.

ISSN 0719-5028

www.geografia.uc.cl

BeGEO

Boletín electrónico de Geografía

BeGEO, 2023, N°11

Análisis del aporte de agua de niebla y agua de rocío a los ecosistemas de *Tillandsia landbeckii* en el hiperárido costero de Tarapacá

Rocío Briones Meneses¹

Resumen

Los campos de *Tillandsia landbeckii* en la costa del Desierto de Atacama deben su existencia a la niebla, lo que ha propiciado múltiples investigaciones. No obstante, se carece de información sobre la frecuencia, volúmenes y variables meteorológicas del rocío, otra fuente hídrica potencial en este árido entorno. Mediante la discriminación de eventos de niebla y rocío, sumado al análisis de datos de la estación meteorológica Cerro Oyarbide; se resalta que en verano-otoño predomina el rocío, mientras que la niebla impera en invierno-primavera. El volumen de agua anual de rocío fue 2.446 L m², en comparación con los 129.91 L m² de la niebla. El rocío requiere temperaturas bajas y mayor humedad relativa para formarse, a diferencia de la niebla, que expone un mayor rango térmico y menores humedades relativas. La niebla es la fuente principal de agua para los tillandsiales, pero el rocío complementa la administración de agua y nutrientes.

Palabras claves: niebla, rocío, *Tillandsia landbeckii*, ecosistemas de niebla.

Abstract

The *Tillandsia landbeckii* fields on the coast of the Atacama Desert owe their existence to fog, which has spurred numerous investigations. However, there is a lack of information on the frequency, volumes, and meteorological variables of dew, another potential water source in this arid context. By discriminating between fog and dew events, coupled with the analysis of data from the Cerro Oyarbide meteorological station, it is highlighted that dew predominates in summer-autumn, while fog prevails in winter-spring. The annual volume of dew is 2.446 L m², compared to 129.91 L m² of fog. Dew requires lower temperatures and higher relative humidity to form, unlike fog, which occurs over a wider temperature range and lower relative humidities. Fog serves as the primary water source for *Tillandsia landbeckii*, with dew complementing the supply of water and nutrients.

Keywords: fog, dew, *Tillandsia landbeckii*, fog oasis.

Los climas áridos y que, a su vez, presentan un carácter desértico, exhiben una patente escasez de fuentes de agua, situación que se puede transformar en una problemática (Kim et al., 2018). El área costera de la región de Tarapacá, dentro del Desierto de Atacama, se distingue por su particularidad climática, descrita como un desértico costero de tipo nuboso (García et al., 2021). Esta aridez resulta de la estabilidad atmosférica, lo que da lugar a una escasez de precipitaciones a lo largo del año (Uribe-Rivera et al., 2017). Aunque esta zona se encuentra ubicada en uno de los sitios más secos y áridos del mundo, factores como el farellón costero, el flujo de aire marítimo y el fenómeno del ENSO han propiciado las condiciones idóneas para el desarrollo de una vegetación nativa única, a pesar de la hostilidad ambiental (Moat et al., 2021).

¹ Instituto de Geografía, Pontificia Universidad Católica de Chile (Chile). E-mail: rociobrionesm@uc.cl

La presencia de vegetación en esta área se atribuye al elevado nivel de humedad atmosférica que prevalece en el entorno, propiciando la ocurrencia del fenómeno meteorológico conocido como niebla. Este fenómeno se origina debido al flujo de aire marítimo presente en la región, cuya interacción con patrones de viento y la topografía de la zona posibilitan la intrusión de nubes marinas de carácter bajo, las cuales penetran desde la costa hacia el interior, generando una cantidad significativa de niebla (Jung et al., 2019; Koch et al., 2019; CIREN, 2013). Dada la escasa disponibilidad de fuentes de agua dulce, prácticamente inexistentes en el costero de Tarapacá, esta fuente hídrica atmosférica adquiere gran importancia, principalmente porque suministra humedad a las comunidades vegetales, configurando ecosistemas singulares conocidos como oasis de niebla, que representan auténticos *hotspots* de biodiversidad en el contexto hiperárido (del Río et al., 2018; Koch et al., 2022; Vargas et al., 2017).

Una de las especies que componen los oasis de niebla mono-específicos en la zona corresponde a un tipo de bromelia denominada *Tillandsia landbeckii*, una planta que carece de raíz y que crece en dunas estabilizadas (Moat et al., 2021). La máxima cobertura de tillandsiales se encuentra entre las latitudes 20°S y 20.5°S, específicamente en el Cerro Oyarbide (CO), donde se extienden en cumbres elevadas entre los 900 y 1300 m.s.n.m (Koch et al., 2019; García et al., 2021). La *Tillandsia* posee un alto nivel de adaptación al entorno, ya que emplea sus tricomas foliares para absorber la humedad atmosférica durante las noches, dado que durante el día sus estomas se cierran para maximizar el recurso hídrico captado (Koch et al., 2019; Pauca-Tanco et al., 2020). Su coordinación con el ciclo anual de la niebla y su variabilidad, la han vuelto altamente dependiente a esta humedad para persistir en el entorno, siendo alimentada principalmente por episodios nocturnos de carácter intermitente (García et al., 2021).

A pesar de la amplia comprensión de la niebla como la fuente principal de agua para estas especies, el rocío y la elevada humedad relativa del aire también son recurrentes en estos oasis, proporcionando agua adicional en episodios nocturnos y matutinos poco estudiados (Jung et al., 2019; García et al., 2021). En contraste, la niebla ha sido profundamente investigada debido a su importancia en la vegetación de este lugar extremadamente árido, analizando su frecuencia, formación y potencial hídrico, generando una sólida base de información. Sin embargo, autores como Cereceda et al. (2008) previamente resaltaron la necesidad de explorar otras fuentes de humedad atmosférica, como el rocío, cuyo escaso estudio ha dificultado comprender su función y contribución en este particular entorno. Incluso investigaciones recientes, como la de García et al. (2021), subrayan el papel del rocío como una fuente de humedad relevante que no debe pasarse por alto debido a su capacidad para mantener la vegetación en el área, especialmente a las tillandsias.

A nivel nacional, la investigación sobre el rocío es limitada en términos de volumen de estudios, siendo el trabajo de Carvajal et al. (2018) en Combarbalá, región de Coquimbo, el más exhaustivo en este sentido. A nivel global, el rocío es considerado por Maphangwa et al. (2012) y Zhuang et al. (2021) como una fuente microhidrológica vital en áreas de escasez de agua, ya que las plantas que obtienen humedad foliarmente muestran mejoras en sus niveles de agua después de eventos de rocío, además de ser crucial para mitigar los efectos de sequías prolongadas.

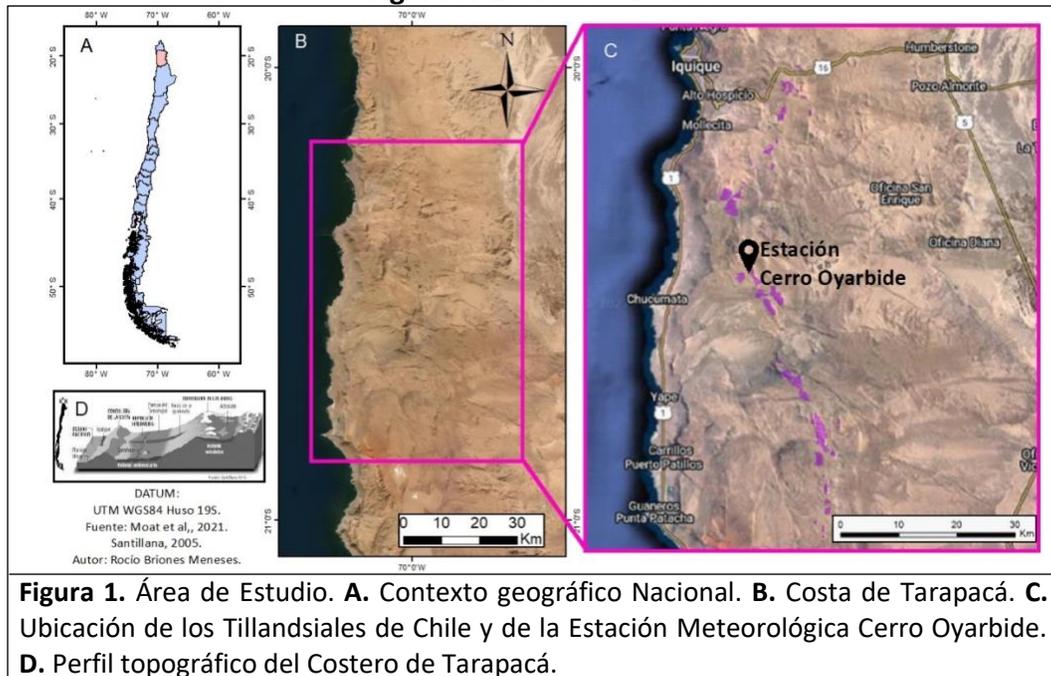
En relación con lo expuesto, el presente estudio se enfocará en la profundización y ampliación del análisis del fenómeno de rocío, otorgando particular énfasis a su frecuencia, los volúmenes

de agua asociados, y las variables meteorológicas que lo determinan. El objetivo es comprender el papel del rocío en el desértico costero de Tarapacá, con un enfoque específico en su contribución al suministro de agua para las tillandsias como complemento de la niebla, dada la marcada escasez de recursos hídricos característica de la región.

Metodología

En esta investigación, se seleccionó la estación meteorológica de Cerro Oyarbide ($20^{\circ} 29' 28'' S/70^{\circ} 03' 31'' O$), perteneciente al Centro UC Desierto de Atacama de la Pontificia Universidad Católica de Chile (Figura 1). Esta selección se basa en la disponibilidad de equipos avanzados, especialmente la inclusión de un rocímetro. Según García et al. (2021), el puesto de estudio está ubicado en la Cordillera de la Costa, a 11.4 kilómetros del litoral, 6 kilómetros del acantilado costero, y a una altitud de 1211 m.s.n.m. Es importante señalar que esta estación se sitúa en la zona superior de los campos de *T. landbeckii*, lo cual ofrece una representación precisa de las condiciones atmosféricas relevantes.

Figura N°1. Área de Estudio



Fuente: Elaboración propia, 2023.

Para la caracterización del fenómeno de la niebla y el rocío en la zona, se considera el análisis de la frecuencia, volumen y factores meteorológicos influyentes dentro de una ventana temporal que contempla desde el 15 de enero de 2022 hasta el 15 de enero del 2023. En consecuencia, se seleccionaron seis variables clave que incluyen: agua de niebla (AN), agua de rocío (AR), temperatura (T), humedad relativa (HR), velocidad del viento (VV) y dirección del viento (DV).

Instrumentos meteorológicos

La variable de agua de niebla se cuantifica con el colector de niebla estándar denominado SFC (Schemenauer y Cereceda, 1994). Este dispositivo se conecta a un pluviómetro y está dispuesto a

una elevación de dos metros con respecto a la superficie del suelo, y su orientación es WSW (225°). Cabe mencionar que sus registros se expresan en litros por metro cuadrado (L m²).

Para el agua de rocío, se emplea un rocímetro (Tomaszkiewicz et al., 2017) conectado a un pluviómetro. Se compone de una superficie plana y cuadrada con dimensiones de 1.0 metro por 1.0 metro, posicionada a un metro sobre la superficie del suelo y con orientación WSW (225°). La cuantificación del agua de rocío se mide en litros por metro cuadrado (L m²).

La variable temperatura del aire fue cuantificada con el dispositivo *Hygro-Thermo Compact Thies*, el cual no solo registra la temperatura atmosférica, sino que también efectúa mediciones de la humedad relativa del aire. Este instrumento se encuentra emplazado a una elevación de dos metros sobre la superficie del suelo en la estación meteorológica en Cerro Oyarbide.

La velocidad y dirección del viento se determinan mediante los dispositivos *Wind T. Compact Thies* y *Wind Dir. Compact Thies*, respectivamente. Este estudio se enfoca en los registros de viento efectuados a una elevación de 3 metros sobre el nivel del suelo, coincidiendo con la altura que expone el SFC.

Dos instrumentos adicionales refuerzan la distinción entre eventos de niebla y rocío. El primer dispositivo, conocido como *Dew status*, registra la humedad a nivel del suelo. El segundo aparato, denominado *Leaf wetness*, el cual se posiciona a nivel del suelo entre las tillandsiales, con el fin de reflejar sus propiedades foliares.

Es relevante resaltar que todos los instrumentos efectúan un muestreo cada 10 minutos, y estos datos son registrados en el ThiesDL16, una componente del CDA; posteriormente, fueron trabajados y analizados a través de *Microsoft Excel*.

Discriminación de los eventos de niebla y los eventos de rocío

Para definir el evento de niebla se adopta la definición de Osses et al. (2018) quienes establecieron que un evento de niebla puede durar muchas horas, pero puede ser interrumpido por un intervalo de 50 minutos y, aun así, se considera como un solo evento. En consecuencia, se concibe como evento de niebla cuando el SFC registra $AN > 0$ L m² en conjunto con el criterio explicado anteriormente; y si $AN = 0$ L m², no se considera como evento.

En el caso del rocío, se presenta un desafío en la definición del evento y la medición de agua debido a que la niebla puede activar el rocímetro, generando registros inexactos de AR. Para abordar esto, se establecen los siguientes criterios: si ambos instrumentos - SFC y rocímetro - se activan simultáneamente, se clasifica como un evento de niebla, anulando los datos de AR dentro de ese intervalo. También se debe tener presente lo señalado por García et al. (2021), quienes indican que el SFC requiere un tiempo para activarse, incluso si un evento de niebla está manifestándose. Por lo tanto, se excluyen todos los datos de AR previos a los 60 minutos antes de la activación del SFC, considerando únicamente las captaciones de AR que superaron este intervalo. Además, se aplica esta regla a los registros de AR que siguen después de la desactivación del SFC, si se extienden posterior a los 60 minutos, se considera un evento de rocío.

Los registros de los dispositivos *Leaf wetness*, *Dew status* y la humedad relativa se emplean para confirmar la categoría del evento. Cuando estos tres dispositivos están activos simultáneamente,

se clasifica como un evento de rocío. Cabe mencionar que la relevancia de estos eventos radica en su contribución hídrica a las tillandsias, por lo tanto, si el *Leaf wetness* no está activo, aunque se cumplan todos los criterios anteriores, no se cataloga como un evento de rocío.

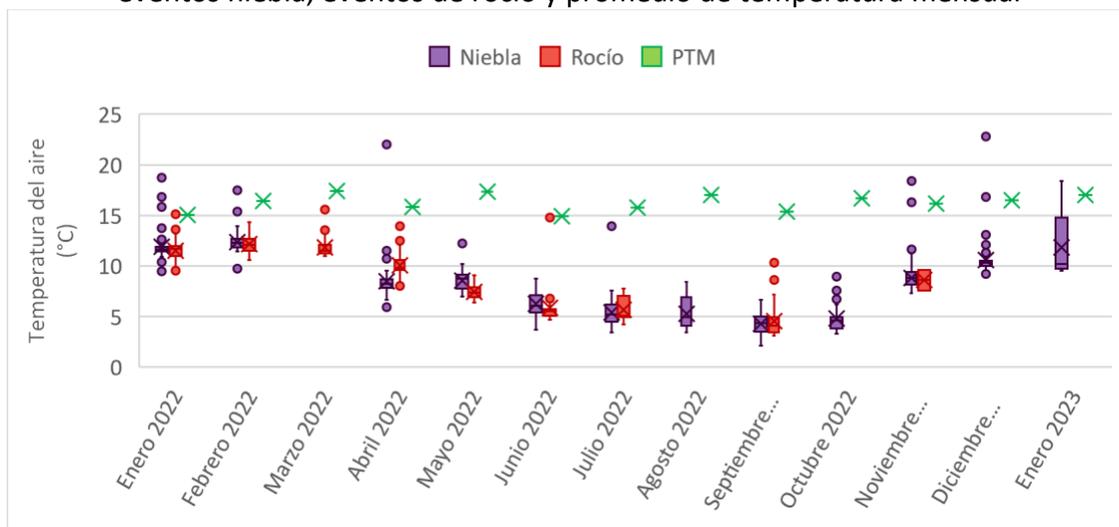
Resultados

Temperatura del aire

Respecto a la formación de eventos de niebla, los datos exhiben una tendencia a la disminución de temperatura dentro de los eventos desde enero de 2022 hasta septiembre, seguido de un aumento a partir de octubre hasta enero de 2023 (Figura 2), lo cual puede relacionarse con la influencia estacional. García et al. (2021) señalan que las temperaturas óptimas para la formación de eventos se ubican entre 5°C y 7°C. Esto se refleja en la frecuencia mensual de junio (16) y julio (11), cuyos eventos se ubican en este rango. En contraste, agosto exhibe menos eventos (4), a pesar de tener T° similares, sin embargo, su promedio de temperaturas mensual (PTM) es más alto (17.04°C) en comparación con junio y julio, exhibiendo más bien un carácter "cálido". Los meses con T° más altas registran menos eventos, o incluso, como en marzo, no expone eventos de niebla, lo cual podría deberse al alto PTM que registra. Un mes atípico es enero 2022, que posee un alto número de eventos (13), y cuya explicación podría ser su PTM de 15.06°C, similar al de junio y julio. A pesar de ser un mes de temperaturas más altas, enero 2022 podría clasificarse como "frío".

Los rendimientos de AN varían según el mes y expone mayores captaciones cuando las T° oscilan entre 3°C y 8°C; a excepción de enero 2022, que registra mayores colectas cercanas al eje de los 12°C. Esta tendencia se confirma a nivel anual, siendo junio y julio dos de los tres meses con mayores captaciones mensuales 35.488 L m² mes y 14.238 L m² mes, respectivamente. Enero 2022, es el mes con la segunda mayor colecta (22.018 L m² mes), lo cual puede tener relación con su bajo PTM, similar a los de junio y julio (Figura 2). Por lo tanto, las colectas de AN presentan volúmenes más grandes a bajas temperaturas.

Figura N°2. Comparación y variación entre los rangos mensuales de temperatura del aire de los eventos niebla, eventos de rocío y promedio de temperatura mensual



Fuente: Elaboración propia (2023).

Las temperaturas mensuales de los eventos de rocío tienden a disminuir de enero 2022 a septiembre del mismo año, ascienden nuevamente en octubre, (Figura 2). Los eventos ocurren en rangos térmicos bajo los 15°C; y los meses de verano enero (8) y febrero (8) exhiben la mayor frecuencia, siendo los meses más cálidos, oscilando en 9.51°C-15.1°C y 11.5°C-15.1°C respectivamente, y con la mayoría de los eventos de rocío ocurriendo alrededor de los 12°C. En contraste, los meses de invierno junio (3) y agosto (0), exponen algunas de las frecuencias más bajas. Cabe mencionar que los meses con los PTM más altos no necesariamente coinciden con la mayor frecuencia de eventos, por ejemplo, enero 2022, a pesar de tener un comportamiento "frío", registra una de las frecuencias más altas (8 eventos), mientras que marzo (5 eventos), que expone el PTM más alto, no tiene un número de eventos superior a enero 2022 o febrero.

En cuanto a las temperaturas del aire y los datos de AR, se observa que entre enero 2022 y abril las colectas abarcan un rango de 6°C a 16°C, y los mayores rendimientos se ubican en los 8°C-13°C. Las captaciones disminuyen entre mayo y noviembre, cuyos datos de AR ocurren en los 3°C y 16°C. Además, los valores más altos de AR se encuentran en los 4°C-6°C, exhibiendo T más bajas en comparación con el rango anterior. En rendimientos anuales, los meses de verano, enero y febrero, registran las cifras más notables de AR, y esta estación en su conjunto muestra la mayor colecta de agua, seguida por la invernal. Si bien se aplicó un criterio para distinguir los eventos, es probable que las cifras registradas como AR en junio y julio correspondan a datos de AN, debido a que ningún otro mes presenta captaciones de AR tan elevadas, como sí ocurre en la niebla.

Considerando ambas fuentes, los eventos de rocío se producen en un rango de temperaturas más estrecho, entre 3.08°C y 15.5°C, mientras que la niebla tiene un rango más amplio, oscilando de 2.08°C a 22°C (Figura 2). La niebla puede formarse en T° por debajo de los 3°C, a diferencia del rocío. Además, la formación de niebla en temperaturas superiores a los 20°C es más frecuente, llegando incluso a registrarse a los 22.8°C, lo cual no ocurre con el rocío, ya que ninguno de sus datos supera los 16°C. En resumen, la formación de rocío no se produce a temperaturas del aire por encima de los 15.5°C, pero tampoco se observa en T° muy bajas inferiores a los 3°C.

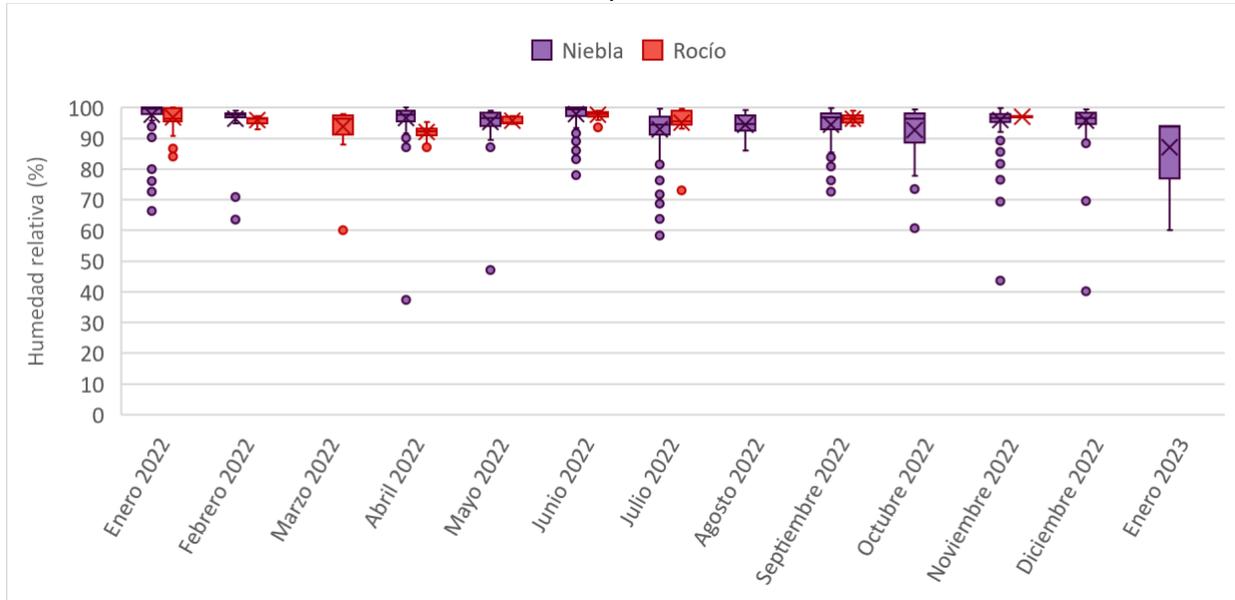
Humedad Relativa

García et al. (2021) exponen la necesidad de una alta HR para la formación de eventos de niebla. En Cerro Oyarbide, esto se refleja en la variación de las HR dentro del año de datos, ya que la mayoría se sitúa sobre el 80%, siendo poco recurrentes y atípicos las cifras inferiores a este límite. Del total de valores de HR, el 97.9% se ubica en el rango del 80% - 100% (Figura 3), y el 11.9% de los datos anuales corresponde a cifras de HR del 100%. La variabilidad de eventos de niebla con relación a la HR evidencia que julio lidera la frecuencia de eventos (16), pero expone múltiples HR atípicas entre el 50%-80%. Un patrón similar ocurre en enero 2022, el segundo mes con mayor frecuencia (13), y que también posee variados registros atípicos de HR en el rango del 60%-80%.

En relación con los rendimientos de AN y los datos de HR, se observa que las captaciones más elevadas de AN registradas en el año se sitúan exclusivamente en el intervalo de humedad relativa del 90% al 100%. Esto indica que se requieren porcentajes de HR altos para obtener colectas significativas. Por otro lado, los rendimientos de agua menores exhiben una variedad más amplia de humedades, abarcando desde el 37.3% hasta el 100%. Es importante destacar que la presencia

de HR al 100% no garantiza automáticamente altas colectas de AN, aunque la existencia de cantidades considerables de AN siempre está asociada a niveles elevados de HR.

Figura N°3. Comparación Y variación entre los rangos mensuales de humedad relativa de los eventos niebla y eventos de rocío



Fuente: Elaboración propia (2023).

Los eventos anuales del rocío presentan HR que oscilan entre el 60.2% y el 100%. La gran mayoría de estos datos se ubican en el rango del 90% al 100%, abarcando el 95.1% de las cifras anuales (Figura 3), y solo el 4.9% de los datos alcanza el 100% de HR. En todo el año solo existen dos datos de HR por debajo del 80%, evidenciando que la formación del rocío depende en gran medida de niveles elevados de HR, puesto que sus rangos mensuales de humedad se mantienen elevados.

En cuanto a los rendimientos anuales de AR y sus cifras de HR, se destaca que las colectas más significativas, se concentran exclusivamente en el rango de humedad del 90% al 100%. Por otro lado, los registros más bajos de AR abarcan un rango de humedades más amplio, que va desde el 60% hasta el 100%. Esto pone de manifiesto que las captaciones más elevadas de AR están siempre asociadas a niveles altos de HR. Sin embargo, la presencia de HR elevadas no garantiza necesariamente colectas abundantes de AR, como se observa en el rango de colectas menores.

Al comparar la niebla y el rocío en relación con la humedad relativa, se expone que el rocío se forma y capta principalmente cuando la HR supera el 80%. En contraste, la niebla puede desarrollarse incluso con HR por debajo del 40%, una condición que no aplica al rocío. Es relevante destacar que, en al menos tres meses, algún evento de niebla registró datos del 100% de HR, mientras que el rocío solo alcanzó este máximo en enero 2022. A pesar de estas diferencias, tanto la niebla como el rocío requieren niveles elevados de HR para su formación en Cerro Oyarbide.

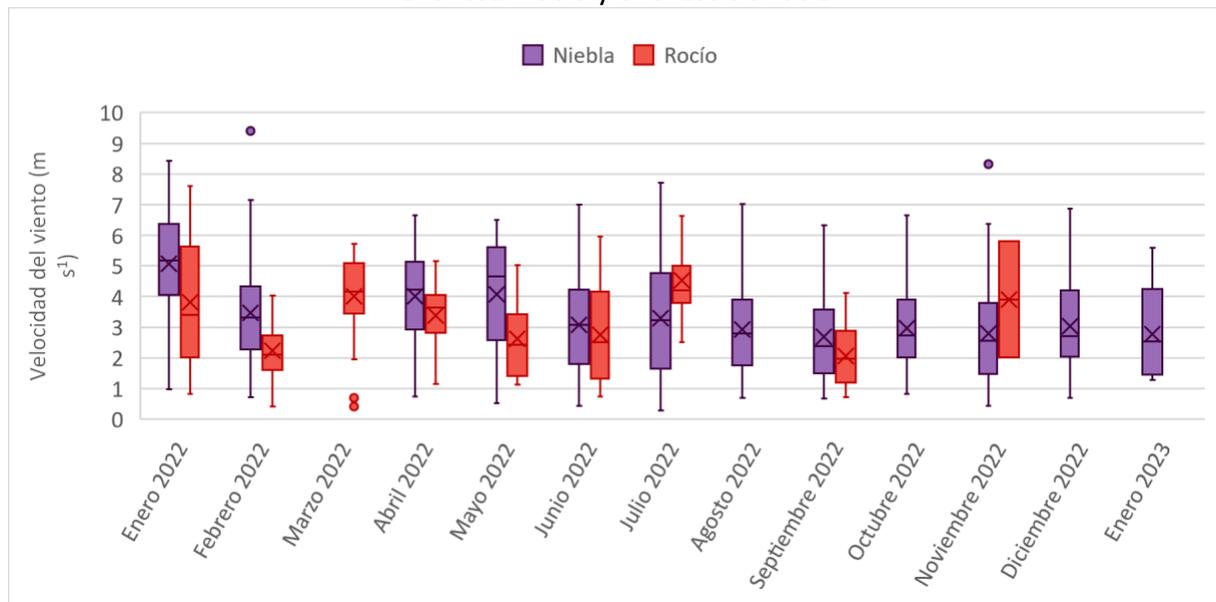
Velocidad del viento

Los eventos de niebla en el año estudiado se encuentran asociados con velocidades del viento que varían entre 0.279 m s⁻¹ y 9.41 m s⁻¹. La Figura 4 expone que los rangos mensuales de VV tienen

una gran amplitud, generalmente oscilando entre velocidades inferiores a 1 m s^{-1} y superiores a 6 m s^{-1} . Es importante señalar que estos rangos tienden a registrar velocidades cada vez más bajas desde enero 2022 hasta julio, con un aumento progresivo entre agosto y octubre, mientras que de noviembre a enero 2023 las VV varían entre los 0.43 m s^{-1} y los 6.33 m s^{-1} .

En cuanto a los rendimientos de AN y las velocidades de viento, García et al. (2021) señalan que las colectas más abundantes están asociadas con VV más elevadas. Durante el año, las captaciones más relevantes de AN varían entre 5 y 7 m s^{-1} en diferentes meses, como enero 2022, abril y julio; mientras que las colectas de menor magnitud, en meses como junio y agosto, se encuentran en un rango de 3 y 5 m s^{-1} de VV. Aunque se registran colectas en VV superiores a 7 m s^{-1} , suelen ser captaciones de agua menores. Los meses con la mayor cantidad de AN registrada a lo largo del año son junio ($35.488 \text{ L m}^2 \text{ mes}$) y enero ($22.018 \text{ L m}^2 \text{ mes}$), coincidiendo con los meses que exponen algunas de las velocidades más altas. En consecuencia, se establece una relación entre los rendimientos más altos de AN y las VV, reflejada en los rangos específicos de cada mes en relación con sus valores máximos (Figura 4).

Figura N°4. Comparación y variación entre los rangos mensuales de velocidad del viento en los eventos niebla y eventos de rocío



Fuente: Elaboración propia (2023).

En el caso de los eventos de rocío anuales, las velocidades de viento oscilan entre 0.403 m s^{-1} y 7.61 m s^{-1} (Figura 4). Del total de meses analizados, cuatro meses no registran VV inferiores a 1 m s^{-1} (abril, mayo, junio y noviembre); mientras que solo dos meses (enero 2022 y julio) exponen velocidades de viento que sobrepasan los 6 m s^{-1} . Se debe mencionar que, si bien los rangos mensuales de VV varían en amplitud según el caso, enero 2022 y junio corresponden a los meses que presentan el mayor intervalo (Figura 4).

En cuanto a las captaciones de AR y las velocidades de viento, la frecuencia anual expone variaciones según el mes. De enero 2022 a abril, las colectas son menores y se distribuyen uniformemente en el rango de VV, que abarca desde menos de 1 m s^{-1} hasta 7.61 m s^{-1} (Figura 5).

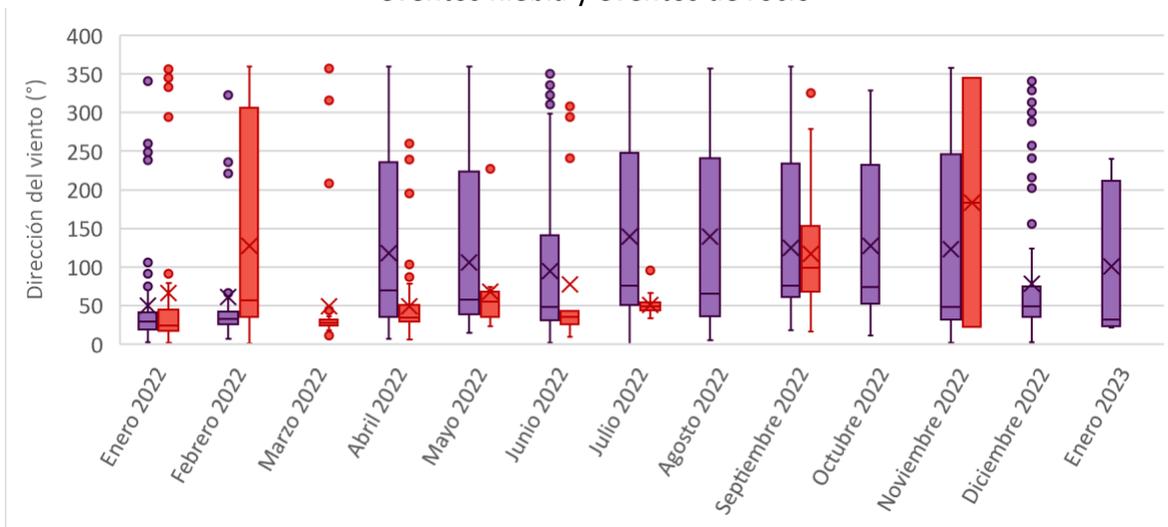
En cambio, de junio a septiembre, se datan cifras significativas, concentradas entre 4 m s⁻¹ y 6 m s⁻¹, pudiendo corresponder a datos de AN debido a su distribución y elevada magnitud. Por otro lado, el rocío parece manifestarse en un rango de VV que va de 0.403 m s⁻¹ a 7.61 m s⁻¹, y su captación no se restringe en un intervalo de VV, aunque los datos de AR sean relativamente bajos.

Comparando las VV de la niebla con las del rocío, se observa que la niebla presenta un rango más amplio de velocidades de viento para la formación de eventos, sobrepasando incluso los 9 m s⁻¹, en contraste con el rocío, cuya formación se produce en un rango más estrecho. En cuanto a las captaciones máximas de AN, estas varían significativamente según el mes, mientras que el rocío muestra una distribución más uniforme en relación con las VV en la mayoría de los meses. Es importante señalar que la formación y captación de rocío no dependen exclusivamente de la VV, a diferencia de la niebla, cuyas captaciones disminuyen a velocidades más altas debido a que baja la eficiencia del SFC. En contraste, el rocío expone una colecta más constante a lo largo de las VV.

Dirección del viento

En relación con las direcciones del viento observadas en la frecuencia anual de eventos de niebla, se puede destacar que los vientos más frecuentes son N, NE, SO y O (Figura 5). Si bien se presentan eventos en todas las direcciones, estas no son tan recurrentes como las mencionadas previamente. En particular, predominan los eventos de niebla con dirección N y NE, que constituyen el 67.2% de los datos anuales. Estos eventos suelen ocurrir durante la tarde-noche, lo cual coincide las observaciones de García et al. (2021), quienes relacionaron estas DV con este ciclo. Esta tendencia se explica por el calentamiento solar, que provoca el ascenso de aire en estas horas del día (Cereceda et al., 2002). Por otro lado, las direcciones SO y O son más comunes en los eventos diurnos (Cereceda et al., 2002), constituyendo el 23.3% de los datos de este estudio.

Figura N°5. Comparación y variación entre los rangos mensuales de dirección del viento en los eventos niebla y eventos de rocío



Fuente: Elaboración propia (2023).

Los rendimientos de AN se relacionan con las direcciones de viento. Durante enero 2022 a mayo, se observan mayores captaciones con vientos N y NE, mientras que, de junio a diciembre, las mayores colectas se registran con direcciones N, NE, SO y O. Otras orientaciones tienen registros

menores, o bien no datan cifras de AN en ciertos meses. Estos resultados coinciden con estudios previos, como el de García et al. (2021), puesto que el 60.8% de los datos de AN ocurren en direcciones NE y SO en Cerro Oyarbide, debido a los patrones de viento y la orientación del SFC. En esta investigación, el 72.2% de las colectas de AN provienen de vientos N y NE, totalizando 93.866 L m² en el año, mientras que los vientos SO y O abarcan el 13.5% (17.596 L m² año).

En el caso del rocío, se observa que la mayoría de los eventos datados exponen orientaciones N y NE. No obstante, en febrero y septiembre, se registran eventos significativos con vientos E y SE (Figura 5). Se debe destacar que, a lo largo del año, se registran eventos de rocío en todas las DV, aunque la frecuencia varía. Si bien la presencia de eventos de rocío no depende de la DV debido al funcionamiento del rocímetro, específicamente el 79.7% de los datos de viento presentes en los eventos anuales conciernen a direcciones N y NE. Estos vientos, según señalan García et al. (2021), se asocian con el ciclo tarde-noche, pero en este estudio se observa que el rocío se forma principalmente en horarios matutinos y al mediodía, lo que difiere del ciclo datado por los autores. No obstante, no se descarta que los vientos N y NE también ocurran en horario diurno.

La captación de AR evidencia que los mayores rendimientos se obtienen con direcciones de viento del N y NE, lo que coincide con las DV más frecuentes en eventos de rocío registrados desde enero 2022 hasta enero 2023. Aproximadamente, el 75.4% de la colecta anual de AR corresponde a estas direcciones, representando 1.844 L m² del total anual de 2.446 L m².

Las direcciones de viento registradas por la niebla y el rocío muestran similitudes en las frecuencias anuales y rendimientos de agua en las direcciones N y NE. No obstante, la formación de niebla depende de direcciones específicas, como S y SO, que no son relevantes para el rocío. La niebla, a diferencia del rocío, sí necesita de DV específicas (N, NE, S y SO) para su captación y formación, puesto que en estos vientos activan el SFC, evidenciando una fuerte relación.

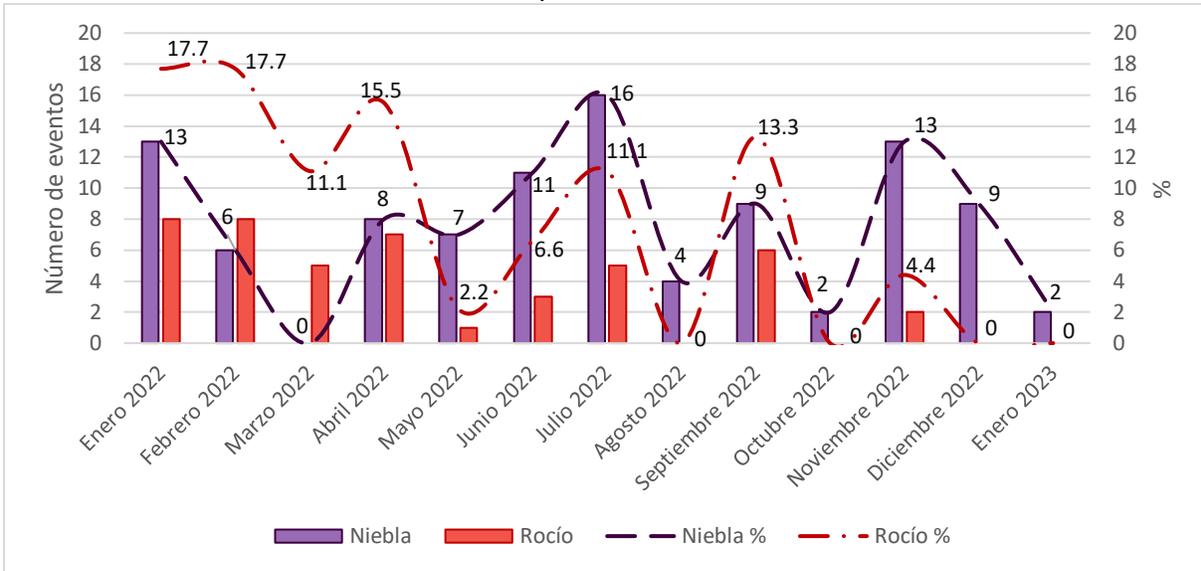
Variabilidad de la frecuencia de eventos

Los registros anuales de eventos de niebla siguen una distribución similar a estudios previos, como el de Osses et al. (2017), que evidenciaron una mayor ocurrencia de eventos de mayo a noviembre, y una menor entre diciembre y abril. En esta investigación, se datan 62 eventos de niebla entre mayo y noviembre, y 38 eventos de diciembre a abril, totalizando 100 eventos de niebla en el año registrado. En este contexto, se expone un aumento progresivo en la frecuencia de eventos desde abril a julio (Figura 6), con un pico de 16 eventos en julio. Enero 2022 es una excepción con 13 eventos; no obstante, la frecuencia disminuye en febrero y alcanza su mínimo en marzo con 0 eventos. Los meses estivales albergan el 30% del total anual de eventos de niebla, mientras que el otoño, expone solo el 15%. El invierno se consolida como la temporada alta de la niebla, con un porcentaje del 31% de la frecuencia; la primavera posee el 24% de los eventos, y si se descarta el verano por su comportamiento, la primavera sería la segunda estación robusta.

La frecuencia anual de eventos de rocío en Cerro Oyarbide expone una predominancia marcada en las estaciones de verano y otoño, con un total de 16 y 12 eventos, respectivamente. Este hecho coincide con el estudio de Carvajal et al. (2018), quienes identificaron el verano como la época propicia para los eventos de rocío en Combarbalá. Este patrón sufre un cambio drástico en la temporada invernal, exhibiendo una disminución evidente en los eventos de rocío (Figura 6). La frecuencia aumenta en septiembre, pero decae a 0 en octubre y solo hay 2 eventos en noviembre,

para un total de 8 eventos en ese período. La frecuencia anual contabiliza un total de 45 eventos de rocío, donde el 35.5% de ellos ocurren en verano, convirtiéndola en la estación que más contribuye en cuanto a frecuencia. La estación otoñal representa un 26.6%; en contraste, tanto el invierno como la primavera poseen una contribución igual a 17.7% cada una. En base a este estudio, se puede señalar de forma exploratoria que el rocío parece ser más frecuente en verano y otoño, mientras que es menos común en las estaciones concernientes a invierno y primavera.

Figura N°6. Comparación del número de eventos mensuales de los eventos de niebla y los eventos de rocío y su frecuencia mensual relativa



Fuente: Elaboración propia (2023).

Estableciendo una comparación entre la niebla y el rocío, es relevante destacar que la frecuencia anual de eventos de niebla expone una formación más abundante en concordancia al rocío. Lo anterior se basa en que los eventos totales de niebla desde enero del 2022 hasta enero de 2023 alcanzan una cifra de 100, mientras los eventos de rocío se limitan a 45 en el mismo intervalo de tiempo. Por lo tanto, se puede inferir de forma prematura que la niebla constituye la fuente de humedad predominante en Cerro Oyarbide, siendo el rocío una fuente hídrica más esporádica y complementaria en consideración a su frecuencia (Figura 6).

La frecuencia relativa de niebla y rocío expone los eventos mensuales de cada fuente atmosférica de forma relativizada en contraste con su frecuencia anual correspondiente (Figura 6). Al analizar ambas frecuencias, se evidencia un patrón de comportamiento inversamente correlacionado entre los ciclos relativos de ambas fuentes hídricas. Las temporadas de mayor incidencia de niebla (invierno-primavera) coinciden con las temporadas de menor presencia de rocío, lo que se refleja en la curva de la niebla, superando a la curva del rocío durante estos períodos. En cambio, las temporadas de menos niebla (verano-otoño) concuerdan a las de mayor frecuencia de rocío, expuesto en la curva del rocío, superando a la de niebla en estos meses.

La frecuencia de la niebla supera a la del rocío en la mayoría de los meses (Figura 6), excepto en febrero y marzo, cuando el rocío se encuentra en su temporada alta. Desde mayo hasta agosto, la niebla es notablemente más común que el rocío, ya que corresponde a su temporada de mayor

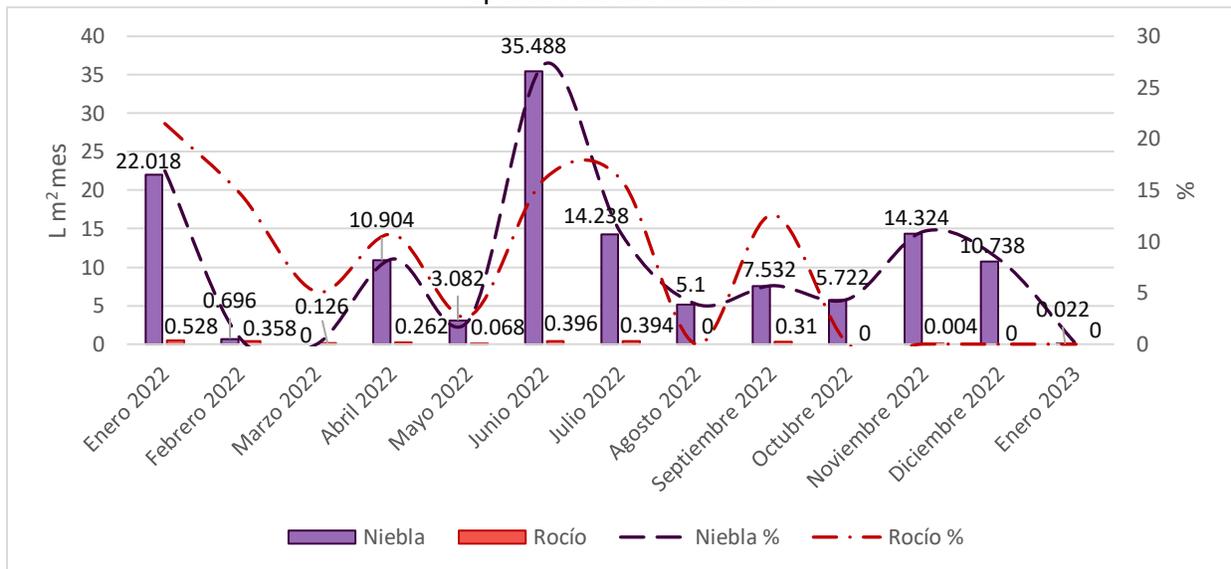
frecuencia. Tanto la niebla como el rocío tienen meses sin eventos, marzo para la niebla, en su temporada baja; y agosto y octubre para el rocío, en su periodo de menor frecuencia. Sin embargo, los primeros quince días de enero de 2023 no registraron eventos de rocío, a pesar de ser una temporada alta.

Rendimientos de agua de niebla y agua de rocío

Los rendimientos mensuales de AN exhiben una variabilidad notable durante el año. En verano y otoño, se exponen cifras especialmente bajas, alineadas con la menor presencia de niebla (Figura 7). Febrero posee una captación inferior a 1 L m² mes, y en contraste, enero posee el segundo mayor acumulado de AN, alcanzando 22.018 L m² mes, a pesar de ser un mes de temporada baja, culminando la temporada con un total de 33.47 L m². El otoño registra una disminución de los rendimientos totales (13.99 L m² mes), e incluso en marzo no hubo colectas. Por otro lado, junio se erige como el mes con el rendimiento más alto de AN (35.488 L m² mes) siendo congruente con la estacionalidad, puesto que es período JAS (julio, agosto y septiembre), caracterizado por ser el intervalo de mayor rendimiento de AN en la región, según García et al. (2021). Junio también posee una alta colecta (14.238 L m² mes), de modo que el invierno culmina con un total de 54.83 L m² de AN. Por último, en primavera se captan volúmenes de 27.63 L m², de los cuales noviembre representó el mayor aporte con su colecta mensual de 14.324 L m² de AN (Figura 7).

Los rendimientos de AN exponen una significativa variabilidad estacional, con un predominio destacado en invierno. Sin embargo, se distingue un volumen total inusualmente alto de AN en verano, lo que indica un comportamiento atípico en términos de niebla durante esa estación. En el contexto de la variabilidad anual de la niebla, se registró un total de 129.91 L m² de AN.

Figura N°7. Comparación de los rendimientos mensuales de agua de niebla, agua de rocío y su aporte relativo mensual



Fuente: Elaboración propia (2023).

Los rendimientos AR constatan cifras significativas durante el verano, superando los 0.3 L m² mes (Figura 7), y con un total estacional de 1.02 L m². Destaca enero 2022 con el máximo de AR mensual, llegando a 0.528 L m². Este patrón tiene concordancia con lo expuesto en la frecuencia

de eventos de rocío, que identifica a los meses de verano como parte de la temporada alta. Por otro lado, durante otoño se registran volúmenes mensuales de menor magnitud, con un descenso gradual a lo largo del período, culminando con un total de 0.456 L m² de AR. En junio y julio, aumenta la colecta de AR, superando los 0.3 L m² mes, si bien la frecuencia de eventos en invierno es baja, el total de agua estacional es de 0.79 L m². En primavera, los datos de AR disminuyen de forma notable, exponiendo ausencia de eventos en octubre, mientras que noviembre posee la colecta mensual más baja datada en el año, acabando la estación con 0.314 L m². En el contexto de la variabilidad anual del rocío, se observa un rendimiento total de 2.442 L m² de AR.

La variabilidad anual del rocío expone al verano e invierno como temporadas de alta colecta, sin embargo, el invierno es la temporada baja de frecuencia del rocío, razón por la que no se descarta la posibilidad de que estos registros correspondan a datos de AN, dado que las cantidades recolectadas son considerablemente superiores y presentan valores más afines a los observados en la niebla. En ese caso, las temporadas altas de colectas, recaerían en la estación de verano y otoño, lo cual guarda relación con la temporada de alta frecuencia de esta fuente hídrica.

Al comparar los rendimientos mensuales de AN y AR, se muestra una notable diferencia en las cantidades recogidas, ya que la mayoría de los meses en el caso de la niebla presentan cifras que superan los 3 L m² mes, siendo febrero y enero 2023 los únicos con volúmenes inferiores. En contraste, en el caso del rocío, ningún mes expone rendimientos de agua que superen 1 L m² mes, puesto que todas las cifras mensuales se mantienen por debajo de 0.5 L m² mes, a excepción de enero 2022, que es el mes con la mayor colecta de AR en el año (Figura 7).

La curva de aportes relativos de AN y AR normaliza los rendimientos mensuales respecto a la colecta anual de cada fuente hídrica atmosférica (Figura 7). El gráfico revela una correlación inversa entre ambas curvas de rendimientos relativos. Durante la temporada alta de rocío (verano-otoño), su curva supera a la de niebla, puesto que esta última se encuentra en temporada baja. En cambio, en invierno y primavera, la curva de niebla -correspondiente a su temporada alta- supera a la del rocío (con la excepción de septiembre) que se encuentra en temporada baja.

Por lo tanto, se confirma que la niebla es la principal fuente de agua para la *Tillandsia landbeckii* en Cerro Oyarbide. Sin embargo, los registros de AR muestran que este recurso complementa la alimentación de la planta, especialmente durante la temporada baja de niebla, cuando el rocío aumenta en frecuencia y volumen. El rocío desempeña un papel crucial en la temporada más seca, que abarca el verano y el otoño, y en casos como marzo se evidencia que las *tillandsias* logran sobrevivir con bajos niveles mensuales de agua, donde el único recurso hídrico fue el rocío con un total mensual de 0.126 L m². En consecuencia, el rocío permite que las *T. landbeckii* en Cerro Oyarbide mantengan su suministro de agua y nutriente en caso de que la niebla escasee.

Reflexiones finales

Los datos analizados en este estudio muestran que la variabilidad de los eventos de niebla y de rocío dependen de la interacción de diferentes variables meteorológicas como la temperatura del aire, la humedad relativa, la velocidad del viento y la dirección del viento. Las cuales poseen rangos muy delimitados dependiendo de la fuente de humedad que se observe. El rocío en Cerro Oyarbide requiere temperaturas del aire más bajas que la niebla para formarse, con máximas que no superan los 15°C, lo cual refleja una relación negativa con las temperaturas, necesitando

temperaturas más bajas para captar más agua de rocío. Por otro lado, el rocío requiere humedad relativa alta entre el 80% y 100% (siendo poco común encontrar datos inferiores) exhibiendo una relación positiva con la humedad relativa, puesto que obtiene mayores rendimientos en el rango mencionado, a veces incluso entre el 90% y el 100%. La velocidad del viento varía en un rango de 0.4 m s^{-1} y 7.6 m s^{-1} en la formación del rocío, sin embargo, no existe una relación clara entre el AR y las velocidades debido al comportamiento uniforme de los datos. La dirección de viento dominante en el rocío son N-NE, pero no se muestra una relación directa con la captación de agua debido a que se privilegia esta orientación por la posición del rocímetro.

Ambas fuentes hídricas atmosféricas cumplen un rol vital para la existencia de campos de *T. landbeckii* en CO, aunque la niebla es la principal fuente, el rocío es crucial en las temporadas de escasa niebla durante el verano y el otoño, que son las estaciones de mayor frecuencia de rocío. Ambas fuentes de agua funcionan de manera complementaria, ya que cuando una de ellas no se forma, la otra toma su lugar, como ocurrió en marzo, donde no se registraron eventos de niebla, pero sí de rocío; o en el caso de agosto, donde no hubo eventos de rocío, pero sí de niebla.

La niebla se erige como la principal fuente de agua para los oasis de niebla en Cerro Oyarbide, ya que sus altos rendimientos de captación de AR durante el año, con un total de 129.91 L m^{-2} , superan significativamente las cifras registradas para el rocío, que totalizan 2.446 L m^{-2} . El rocío actúa como fuente secundaria y complementaria de agua y nutrientes para las plantas. Sin embargo, dado que el SFC no capta niebla a nivel del suelo, sino a 2 m de altura, es posible que los aportes reales de AN a los tillandsiales sean menores, reduciendo la brecha entre las captaciones de niebla y rocío. Se debe destacar que CO se encuentra en la región desértica costera de Tarapacá, donde el rocío, a pesar de registrar un pequeño aporte (en comparación a la niebla), sigue siendo esencial para la sobrevivencia de plantas en una de las zonas más áridas del mundo.

Culminando el estudio, es importante señalar que, debido a su calidad exploratoria, es posible que no se haya logrado una separación completa entre los datos de niebla y rocío. Sin embargo, esta investigación ha logrado proporcionar una caracterización sólida del rocío, siendo uno de los pocos estudios que se han adentrado en este tipo de humedad atmosférica en la región.

Referencias Bibliográficas

CARVAJAL, D.; MINONZIO, J.; CASANGA, E.; MUÑOZ, J.; ARACENA, A., MONTECINOS, S. y BEYSENS, D. Roof-integrated dew water harvesting in Combarbalá, Chile. *Journal of Water Supply: earch and Technology-Aqua*, 2018, Vol 67, N°4, p.357–374.

CERECEDA, P.; LARRAÍN, H.; OSSES, P.; FARÍAS, M. y EGAÑA, I. The spatial and temporal variability of fog and its relation to fog oases in the Atacama Desert, Chile. *Atmospheric research*, 2008, Vol 87, N°3-4, p.312-323.

CIREN. (2013). Caracterización de humedales altoandinos para una gestión sustentable de las actividades productivas del sector del norte del país. <https://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstream/handle/20.500.13082/6803/CIRENHUMED036.pdf?sequence=1>

DEL RÍO, C.; GARCÍA, J.; OSSES, P.; ZANETTA, N.; LAMBERT, F.; RIVERA, D.; SIEGMUD, A.; WOLF, N.; CERECEDA, P.; LARRAÍN, H. y LOBOS, F. ENSO influence on coastal fog-water yield in the Atacama Desert, Chile. *Aerosol and Air Quality Research*, 2018, Vol 18, N°1, p.127–144.

GARCÍA, J.; LOBOS-ROCO, F.; SCHWEEN, J.; DEL RÍO, C.; OSSES, P.; VIVES, R.; PEZOA, M.; SIEGMUD, A.; LATORRE, C.; AALFARO, F.; KOCH, M. y LOEHNERT, U. Climate and coastal low-cloud dynamic in the hyperarid Atacama fog Desert and the geographic distribution of *Tillandsia landbeckii* (Bromeliaceae) dune ecosystems. *Plant Systematics and Evolution*, 2021, Vol 307, N°57.

JUNG, P.; EMRICH, D.; BRIEGEL-WILLIAMS, L.; SCHERMER, M., WEBER, L.; BAUMANN, K.; COLESIE, C.; CLERC, P.; LEHNERT, L.; ACHELLES, S.; BENDIX, J. y BUDEL, B. Ecophysiology and phylogeny of new terricolous and epiphytic chlorolichens in a fog oasis of the Atacama Desert. *Microbiology Open*, 2019, Vol 8, N°10.

KIM H.; RAO, S.; KAPUSTIN, E.; ZHAO, L.; YANG, S.; YAGHI, O. y WANG, E. Adsorption-based atmospheric water harvesting device for arid climates. *Nature Communications*, 2018, Vol 9, N°1191.

KOCH, M.; KLEINPETER, D.; AUER, E.; SIEGMUND, A.; DEL RÍO, C.; OSSES, P.; GARCÍA, J.; MARZOL, M.; ZIZKA, G. y KIEFER, C. Living at the dry limits: ecological genetics of *Tillandsia lomas* in the Chilean Atacama Desert. *Plant systematics and Evolution*, 2019, Vol 305, p.1041-1053.

KOCH, M.; QUANDT, D. y SIEGMUND, A. Living at its dry limits: *Tillandsiales* in the Atacama Desert. *Plant systematics and Evolution*, 2022, Vol 308, N°11.

MAPHANGWA, K. Differential interception and evaporation of fog, dew and wátervapour and elemental accumulation by lichens explain their relative abundance in a coastal desert. *Journal of Arid Enviroments*, 2012, Vol 82, p.71-80.

MOAT, J.; ORELLANA-GARCÍA, A.; TOVAR, C.; ARAKAKI, M.; ARANA, C.; CANO, A.; FAUNDEZ, L.; GARDNER, M.; HECHENLEITNER, P.; HEPP, J.; LEWIS, G.; MAMANI, J.; MIYASIRO, M. y WHALEY, O. Seeing through the clouds – Mapping desert fog oasis ecosystems using 20 years of MODIS imagery over Peru and Chile. *Atmospheric Research*, 2021, Vol 103.

OSSES, P.; ESCOBAR, R.; DEL RÍO, C.; GARCÍA, R. y VARGAS, C. El Clima desértico costero con nublados abundantes del desierto de Atacama y su relación con los recursos naturales energía solar y agua de niebla. Caso de estudio Alto Patache (20,5°S), región de Tarapacá, Chile. *Revista Norte Grande*, 2017, N°68, p.33-48.

OSSES, P.; DEL RÍO, C.; VARGAS, C.; GARCÍA, J.; SIEGMUND, A. y MARZOLI, M. (2018, diciembre). Fog water yields in the hyper arid atacama coastal desert- a spatiotemporal analisis of natural water resoirces in the Tarapacá region, Chile. Póster presentado al AGU Fall Meeting, Washington DC, USA.

PAUCA-TANCO, G.; VILLASANTE-BENAVIDES, F.; VILLEGAS-PAREDES, L.; LUQUE-FERNÁNDEZ, C. y QUISPE-TURPO, J. Distribución y caracterización de las comunidades de *Tillandsia* (Bromeliaceae)

en el sur de Perú y su relación con la altitud, pendiente y orientación. *Ecosistemas*, 2020, Vol 29, N°3.

SCHEMENAUER, R. y CERECEDA, P. Fog collection's role in water planning for developing countries. *Natural Resources Forum ONU*, 1994^a, Vol 18, N°2, p.91-100.

TOMASZKIEWIZ, M.; ABOU, M.; ZURAYK, R. y EL-FADEL, M. Dew as an adaptation measure to meet water demand in agriculture and reforestation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, Vol 232, p.441-421.

URIBE-RIVERA, D.; VERA-BURGOS, C.; PAINCHO, M. y EESPINOZA, G. Eco-social Observatory of Climate Change Effects for High Altitude Wetlands of Tarapacá Region, Northern Chile. *Climate Change Adaptation in Latin America*, 2017, N°54, p.63-82.

VARGAS, R.; STANTON, D. y NELSON, P. Aportes al conocimiento de la biota líquénica del oasis de neblina de Alto Patache, Desierto de Atacama. *Revista de geografía Norte Grande*, 2017, N°68, p.49-64.

ZHUANG, Y.; ZHAO, W.; LUO, L. y WANG, L. Dew formation characteristics in the gravel desert ecosystem and its ecological roles on *Reaumuria soongorica*. *Atmospheric Research*, 2021, Vol 603.