

Visión histórica de la desertificación en la cuenca de Camiña, en la región norte del desierto de Atacama

Historical view of desertification in the Camiña Basin, in the northern region of the Atacama Desert

Olga Stella Penagos Piñeros^{1*}  <https://orcid.org/0009-0008-5466-7528>

Edwin Martin Pino Vargas²  <https://orcid.org/0000-0001-7432-4364>

Recibido 23 de enero de 2025, aceptado 5 de septiembre de 2025

Received: January 23, 2025 Accepted: September 05, 2025

RESUMEN

El cambio climático ha impactado severamente el desierto de Atacama, el más árido del mundo, donde se desarrollan actividades económicas significativas. El objetivo de este estudio fue analizar la variación del recurso hídrico en la cuenca de la quebrada de Camiña entre 1977 y 2023 y evaluar sus efectos sobre la cobertura vegetal y las condiciones ambientales, utilizando cartografía histórica y datos satelitales de Landsat y Sentinel. Los resultados revelan una alarmante disminución del agua superficial, con una reducción del 77% entre los años 1977 y 2000. A pesar de esto, se observó un aumento del 2% en la superficie húmeda en 2021, posiblemente debido al fenómeno de La Niña. Además, el índice NDVI mostró una reducción en la cobertura vegetal, de 0,69% a 0,43% en casi cuatro décadas, indicando cambios climáticos cíclicos. Las temperaturas extremas alcanzaron hasta 37,3 °C, lo que resalta las condiciones críticas que enfrenta la región. Los hallazgos evidencian los efectos del cambio climático sobre los recursos hídricos y la biodiversidad, fundamentales para la economía y cultura local. La investigación subraya la necesidad urgente de implementar estrategias de adaptación para mitigar los efectos adversos del cambio climático en estas comunidades y su entorno. Los resultados respaldan la urgencia de políticas adaptativas integradas para mitigar los efectos del cambio climático en regiones.

Palabras clave: Crisis hídrica, índice de aridez, cambio climático, cuenca Camiña.

ABSTRACT

Climate change has severely impacted the Atacama Desert, the world's driest desert, where significant economic activity occurs. The objective of this study was to analyze the variation of water resources in the Camiña ravine basin between 1977 and 2023 and to evaluate its effects on vegetation cover and environmental conditions, using historical cartography and Landsat and Sentinel satellite data. The results reveal an alarming decrease in surface water, with a 77% reduction between 1977 and 2000. Despite this, a 2% increase in wet surface area was observed in 2021, possibly due to the La Niña phenomenon. In addition, the NDVI index showed a reduction in vegetation cover, from 0.69% to 0.43% in almost four decades, indicating cyclical climatic changes. Extreme temperatures reached up to 37.3 °C, highlighting the critical conditions facing the region. These findings are concerning as they highlight how climate change impacts water resources and biodiversity, which are essential for economic activities such as

¹ Universidad de Tarapacá. Departamento de Ciencias. Iquique, Chile. Email: openagos@academicos.uta.cl

² Universidad Jorge Basadre Grohmann. Departamento de Ingeniería Civil. Tacna, Perú. Email: epinov@unjb.edu.pe

* Autor de correspondencia: openagos@academicos.uta.cl

mining and agriculture, as well as for ancestral communities. The research underscores the urgent need to implement adaptation strategies to mitigate the adverse effects of climate change on these communities and their environment. The results support the urgency of integrated, adaptive policies to mitigate the effects of climate change in the region.

Keywords: Water crisis, aridity index, climate change, watershed Camiña.

INTRODUCCIÓN

La cuenca de la quebrada Camiña, al igual que otras regiones montañosas del mundo, enfrenta desafíos significativos debido a la variabilidad y el cambio climáticos [1]. En los Andes, por ejemplo, se ha documentado que el retroceso de glaciares y la alteración de patrones de precipitación afectan la disponibilidad de agua, lo que tiene implicaciones directas en la agricultura y la ganadería en países como Bolivia y Perú [2].

Adicionalmente, estudios recientes han mostrado que las condiciones climáticas extremas en el altiplano chileno han influido significativamente en la disponibilidad de recursos hídricos en esta región [3]. Investigaciones sobre el impacto del cambio climático en las cuencas andinas sugieren que las alteraciones en los patrones de precipitación están afectando tanto el caudal como la calidad del agua [4].

En 1983, ocurrieron eventos climáticos significativos, como El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) [5] que desencadenaron notables transformaciones en diversas regiones del mundo. En el Golfo de California, se observó un aumento significativo en la productividad de biomasa de fitoplancton [6]. En contraste, en los departamentos altoandinos del Perú, se experimentaron condiciones de sequía [7]. Registros igualmente relevantes de sequía se documentaron en la República China, específicamente en su parte noroccidental, así como en áreas perimetrales de África [8], las cuencas del río Nilo también están experimentando cambios en su caudal debido a las sequías prolongadas y las lluvias intensas, exacerbadas por el cambio climático, lo que afecta tanto a la agricultura como a la biodiversidad regional [9]. Similarmente, en el Himalaya, el derretimiento de glaciares está provocando cambios en los caudales de ríos que son vitales para millones de personas en India y Nepal, lo que genera preocupaciones sobre la seguridad

hídrica y la sostenibilidad agrícola [10]. Estos eventos resaltan la diversidad y la globalidad de los impactos climáticos, subrayando la importancia de comprender y abordar las complejidades de los fenómenos climáticos extremos a nivel mundial.

En el año 2000, la revista Time acuñó el término “refugiados ambientales” en respuesta al creciente aumento de la temperatura en la superficie terrestre [11]. Este suceso impulsó la realización de cumbres y compromisos internacionales, como el Protocolo de Kioto y los Acuerdos de París, que buscan abordar los desafíos ambientales emergentes mediante la cooperación global y la implementación de políticas sostenibles [12]. Por esta razón, es importante realizar un análisis detallado de la cantidad de agua superficial y la cobertura vegetal en diferentes periodos clave, de 1977 a 2020 y proyectando hacia el 2023, sobre la cuenca de Camiña. La información recopilada en estos periodos establece una base sólida para investigaciones futuras y proporciona conocimientos valiosos que pueden orientar acciones concretas para mejorar el entorno ambiental [13]. Este enfoque se convierte en una contribución esencial para elevar la calidad de vida de las comunidades que comparten interacciones con la cuenca, alineándose con los esfuerzos por enfrentar los desafíos medioambientales y crear un futuro más sostenible [14]. La integración de datos históricos con proyecciones futuras permitirá no solo mitigar los efectos adversos del cambio climático, sino también fomentar un desarrollo regional que respete y potencie los recursos naturales disponibles.

La cuenca de la quebrada Camiña se caracteriza porque su caudal es intermitente, condicionado por las precipitaciones en la alta cordillera, específicamente en los faldeos del cerro Pumiri (Figura 1), y por los efectos del cambio climático, según lo indicado por Taucare [15]. Las primeras exploraciones de la cuenca de la quebrada de Camiña datan de 1977 y fueron llevadas a cabo



Figura 1. Se muestra el cerro Pumiri en la zona 19 K con coordenadas 375207.58 mE, 7857547.90 mS con una altitud de 5305 ms.n.m. según el perfil del sector encerrado en el círculo rojo. Se ubica en el límite de Bolivia con Chile.

por el profesor Hans Fernández, como documenta Niemeyer [16]. Esa valiosa información recopilada ha quedado registrada en los mapas elaborados por el Instituto Geográfico Militar de Chile (IGM), estableciendo así un precedente importante para la comprensión de la dinámica de esta cuenca a lo largo del tiempo.

Este estudio tiene como objetivo analizar la evolución de la disponibilidad de agua superficial y cobertura vegetal en la cuenca de Camiña entre los años 1977 y 2023, utilizando herramientas cartográficas e imágenes satelitales, con el fin de entender los efectos del cambio climático sobre este ecosistema árido.

METODOLOGÍA

En la Figura 2 se presenta el proceso metodológico para abordar el problema de la situación hídrica en la Cuenca de Camiña, partiendo de la combinación de datos históricos, meteorológicos y satelitales multitemporales. Se integraron herramientas de análisis cartográfico, sensores remotos e imágenes satelitales mediante el uso de plataformas como Google Earth Engine (GEE), para analizar la evolución de la disponibilidad de agua superficial y cobertura vegetal en la cuenca de Camiña entre 1977 y 2023, contribuyendo a entender los impactos del cambio climático en este ecosistema árido.

Clasificación y análisis espacial (GEE)

La zona de estudio corresponde a la cuenca de la Quebrada de Camiña (Figura 3), una cuenca exorreica que desemboca en el océano Pacífico, en la localidad de Pisagua Antiguo. Esta región se caracteriza por un clima desértico, con precipitaciones estacionales muy escasas. A lo largo de la quebrada se ubican asentamientos Aymara, cuyos habitantes dependen de la gestión hídrica de las municipalidades de Huará y Camiña. La población local cultiva en parcelas situadas en la sección hidráulica de la quebrada y han desarrollado diversas estrategias de adaptación para enfrentar las condiciones climáticas extremas, demostrando una notable resiliencia para subsistir y preservar su legado cultural, social y patrimonial.

La investigación es de carácter longitudinal, ya que realiza un seguimiento de los cambios en la cuenca desde 1977 hasta 2023. El estudio es programado y procedimental, comenzando con el reconocimiento en terreno de la realidad hídrica, lo que permitió definir los objetivos y la metodología. Además, es sistemático, pues sigue un orden definido y estructurado. El nivel de la investigación es exploratorio y descriptivo.

Se definieron Regiones de Interés (ROI) correspondientes al área delimitada de la cuenca. La clasificación de imágenes fue realizada utilizando

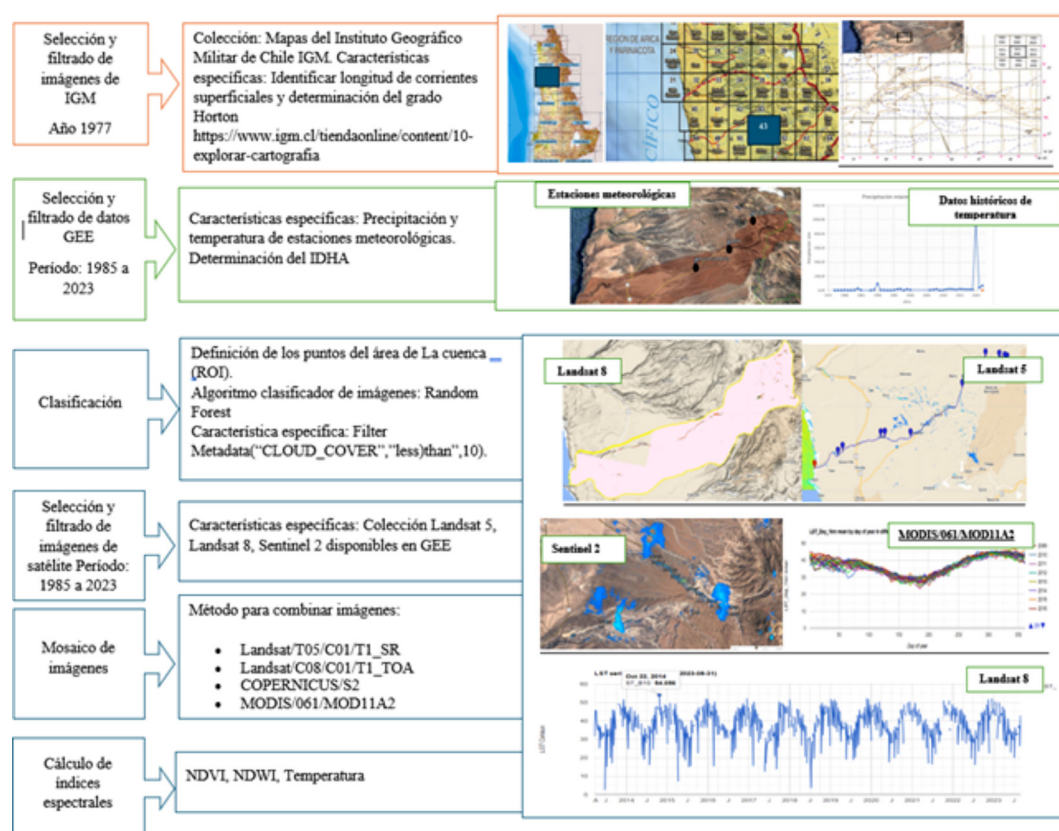


Figura 2. Diagrama metodológico donde se describen tres metodologías complementarias: 1) Investigación cartográfica del año 1977. 2) Análisis con datos meteorológicos para el período de 1985 a 2023. 3) Obtención de imágenes satelitales con sensores que analicen cobertura vegetal y cantidad de agua superficial y registros de temperatura.

algoritmos para asegurar la calidad y confiabilidad de los resultados, se aplicó un filtro basado en metadatos relacionados con la nubosidad, descartando o ajustando las áreas con presencia de nubes que podrían afectar la interpretación correcta de las imágenes.

Para el análisis del año 1977 se toma como base la información obtenida de los planos del IGM, fue abarcan la zona correspondiente a la cuenca de Camiña desde el nacimiento hasta la zona que desemboca en el mar en Pisagua, además de la investigación bibliográfica. Es importante mencionar que, aunque los planos se editaron en 1977, el contenido se basó en un proceso fotogramétrico del año 1950.

Selección y filtrado de imágenes cartográficas

En la primera etapa se seleccionaron Imágenes cartográficas históricas de los mapas topográficos

del IGM del año 1977 para identificar la longitud de corrientes superficiales, que mide la ramificación de la red hidrográfica en la cuenca. Desde el nacimiento del río hasta su desembocadura, se realizó la digitalización y georreferenciación de mapas históricos. Además, se identificaron las redes de drenaje y se calculó el orden de Horton para evaluar la jerarquía de los cursos de agua.

Selección y filtrado de datos meteorológicos (DGA, CIDERH)

Se recopilieron datos de precipitación y temperatura de estaciones meteorológicas disponibles en la zona de estudio entre los años 1985 a 2023. Estos datos fueron fundamentales para calcular el Índice de Disponibilidad Hídrica Anual (IDHA) y evaluar tendencias climáticas que pudieran estar relacionadas con los cambios observados en la cuenca. Los

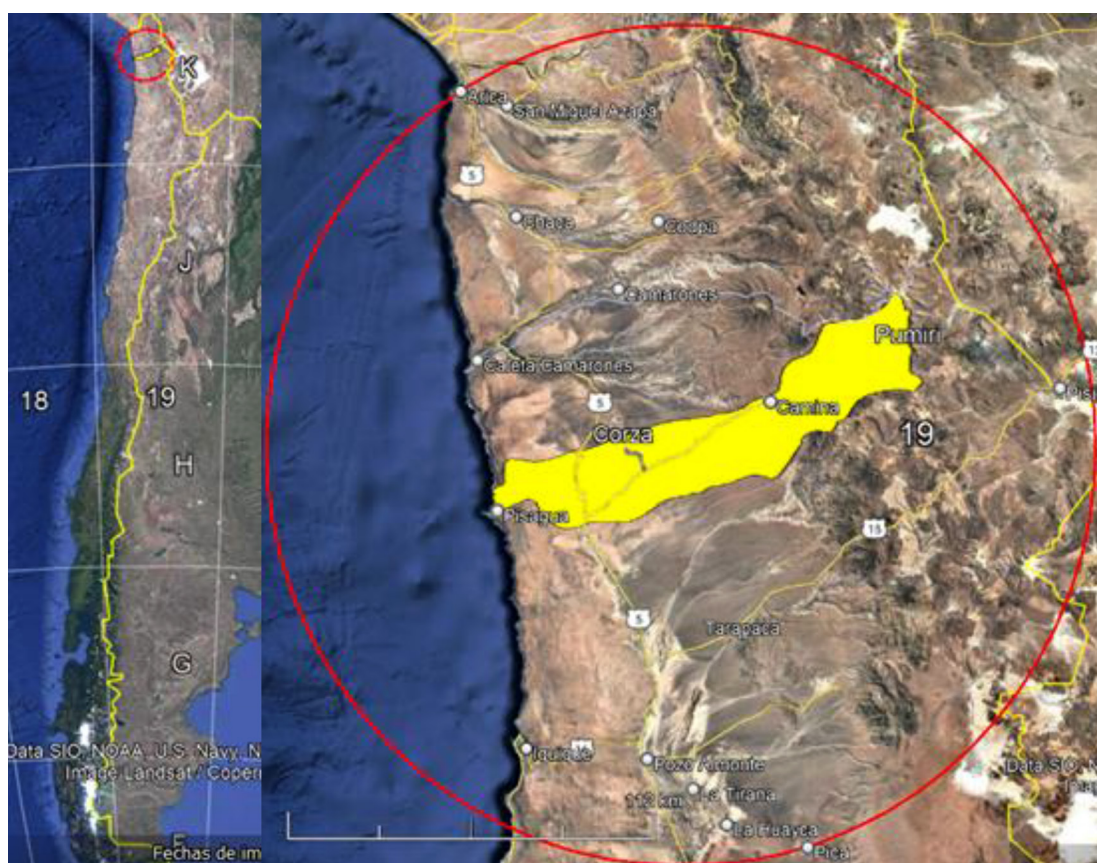


Figura 3. Mapa de Google Earth (GE) de ubicación de la cuenca de Camiña resaltada con color amarillo en el norte de Chile, en la Región de Tarapacá en la zona 19K con coordenadas 444015.51 mE, 7853479.92 mS en el centro aproximado del área.

datos utilizados de las estaciones ubicadas en la quebrada Camiña provienen de registros del Centro de Investigación de Recursos Hídricos (CIDERH), Dirección General de Aguas (DGA). La compilación de series temporales de datos climáticos permitió determinar el IDHA, efectuar el análisis de tendencias y sus correlaciones con los cambios en la cobertura vegetal y cuerpos de agua.

Selección y preprocesamiento de imágenes satelitales

Se seleccionaron imágenes satelitales multitemporales para el periodo de 1985 a 2023 de las colecciones Landsat 5, Landsat 8, Sentinel-2 y MODIS disponibles en GEE para analizar cambios en la cobertura vegetal y cuerpos de agua superficiales a lo largo del tiempo. Para el procesamiento y combinación de imágenes se elaboró un mosaico para cada período de interés, utilizando las bandas

específicas (por ejemplo, banda B3 para análisis espectral) de las colecciones Landsat y Sentinel, mediante los comandos en GEE con el lenguaje de programación JavaScript, a continuación, se listan las colecciones utilizadas.

- var collection1 = ee.ImageCollection("LANDSAT/LT05/C01/T1_SR").select("B3");
- var collection2 = ee.ImageCollection("COPERNICUS/S2").select("B3");
- var collection3 = ee.ImageCollection("LANDSAT/LC08/C01/T1_TOA");

Se filtraron las imágenes por metadatos para excluir aquellas con cobertura de nubes mayor al 10% (función CLOUD_COVER<10), además eliminar píxeles afectados por nubes y sombras (función cloudMask), para la corrección atmosférica se utilizaron productos de reflectancia superficial (SR)

para Landsat y Sentinel. Para la homogenización espacial, las imágenes fueron reproyectadas a la resolución más alta disponible para cada análisis según la información registrada en la Tabla 1. Asimismo, todas las imágenes fueron recortadas al ROI correspondiente a la cuenca de Camiña, asegurando la calidad de los datos para el análisis. Se seleccionaron las bandas específicas de interés para cada colección, lo que garantiza la comparabilidad entre los diferentes sensores.

Cálculo de índices espectrales

Se calcularon los siguientes índices relevantes para el monitoreo de vegetación y recursos hídricos, se estimó el Índice de Vegetación Normalizada (NDVI) que permite obtener la densidad de la vegetación según la ecuación (1), en base a la reflectancia en el infrarrojo cercano (NIR) y la reflectancia en la banda roja (rojo), [17].

$$NDVI = \frac{NIR - rojo}{NIR + rojo} \quad (1)$$

El Índice de Diferencia Normalizada de Agua (NDWI), de acuerdo con la ecuación (2) donde se incluye la reflectancia en la banda verde (verde), [18].

$$NDWI = \frac{verde - NIR}{verde + NIR} \quad (2)$$

La temperatura superficial estimada, es derivada de bandas térmicas MODIS apoyados en los algoritmos para determinar la Temperatura de la Superficie Terrestre (TES), como indicador complementario en el análisis climático e hídrico [19].

Se realiza un análisis cuantitativo de diversas variables, entre las que se incluyen desertificación,

meteorología que proporciona datos como precipitación, temperatura entre otros y pérdida de vegetación. En base a estos datos, se determina el Índice de Aridez (IDHA) según la ecuación (3). Se utilizaron datos numéricos e imágenes satelitales que determina indicadores para analizar la disponibilidad del agua en la cuenca. El índice de disponibilidad hidro ambiental (IDHA) se obtiene a partir del ajuste a la ecuación de Martonne con el valor de k_e , para que sea sensible a valores bajos de precipitación, como es el caso de la cuenca de la quebrada de Camiña. En suelos arenosos con baja capacidad de retención de humedad k_e entre 0,4 y 0,5 es apropiado para resaltar la mayor sensibilidad los periodos de sequía, para suelos arcillosos o limosos con mayor capacidad de almacenamiento de agua entre 0,2 y 0,3.

$$IDHA = k_e \cdot \frac{\text{Precipitación media anual (mm)}}{\text{Temperatura media anual (°C)} + 10} \\ = k_e \cdot \frac{P}{(T_m + 10)} \quad (3)$$

Análisis de tendencias

En los periodos 1985 a 2023 se lleva a cabo un análisis de tendencias, que implica posibles cambios en el comportamiento de las variables a lo largo del tiempo. Este análisis se centra específicamente en la cantidad de agua superficial, identificando patrones de aumento o disminución, y en la cantidad de vegetación mediante la determinación del índice NDWI. Se utilizó las imágenes Landsat 5-TM, para calcular el NDWI, el cual permite identificar las características de aguas superficiales o abiertas. Para ello el NDWI aprovecha la reflexión de la radiación infrarroja cercana a la longitud de onda de luz visible verde, así elimina la presencia de características del suelo y vegetación terrestre [18].

Tabla 1. Sensores satelitales, períodos de operación, resolución espacial y temporal utilizados.

Sensor	Años de Uso	Resolución Espacial	Resolución Temporal (días)	Fuente
Landsat 5	1985-2011	30 m	16	GEE
Landsat 8	2013-2023	30 m (bandas ópticas)	16	
Sentinel 2	2015-2023	10 m (bandas visibles)	5	
MODIS	2000-2023	1 km	1	

Fuente: Datos obtenidos de NASA/USGS (Landsat), ESA (Sentinel-2), NASA EOSDIS (MODIS) y Google Earth Engine (GEE).

RESULTADOS

Análisis 1977: Línea base histórica

En el periodo correspondiente a 1977, se dispone de mapas que abarcan la totalidad de la cuenca de la Quebrada de Camiña, desde su origen hasta su desembocadura en Pisagua. Estos mapas se identifican respectivamente con las coordenadas 1900-6900, 1915-6915, 1915-6930, 1915-6945 (Figura 4), 1915-7000 y 1930-7000, siendo 1900-6900 la ubicación geográfica que abarca desde 19°00' hasta 69°00'. El nacimiento de la Quebrada de Camiña se localiza aproximadamente en las coordenadas 69°02'30"E - 19°04'30"N, formado por las aguas de escorrentía del cerro Pumiri entre otros, a una altitud aproximada de 5206 ms.n.m. Este punto de origen se sitúa al pie del cerro Llanquipa (Figura 5), que alcanza una elevación de 5210 ms.n.m.

En 1963, se registró un caudal máximo de 15,16 m³/s y un mínimo de 1,23 m³/s. Al año siguiente, en 1964, el caudal máximo fue de 2,71 m³/s, mientras que el mínimo se situó en 0,29 m³/s. Además, los análisis del agua indicaban que su calidad permitía la práctica de cualquier tipo de cultivo. La zona de cultivo abarcaba aproximadamente 300 ha y se distribuía en tres sectores a lo largo de la quebrada,

con cultivos en las localidades más bajas de Tana, Tiliviche y Quinoa utilizando agua de vertientes aflorantes [16].

Utilizando la metodología propuesta por Horton y detallada en el boletín de la Sociedad Geológica de América, se determina que el orden de la cuenca geográfica de la quebrada de Camiña hasta el poblado de Pisagua es de 40 (adimensional) lo que implica la importancia ecológica, el impacto hidrológico y la relevancia de interacción con el entorno [20]. En la Figura 4 se detalla la información obtenida de la plataforma GEE. La longitud total de recorrido de la quebrada de 159,20 km, y la extensión de la Cuenca de Camiña de 281.032, 94 ha.

La cuenca se encuentra enmarcada en un relieve donde las depresiones guían los cursos de agua hasta su desembocadura en el océano Pacífico, específicamente en la población de Pisagua, el comportamiento hidrogeológico de la quebrada de Camiña corresponde al análisis de los flancos norte y sur; además del sistema propio de la quebrada y sus depósitos, el comportamiento de los tres depende de factores estructurales y geomorfológicos. El primero es generado por la infiltración de agua del río Camiña en su curso superior, la recarga se produce dependiendo del nivel de este sobre las

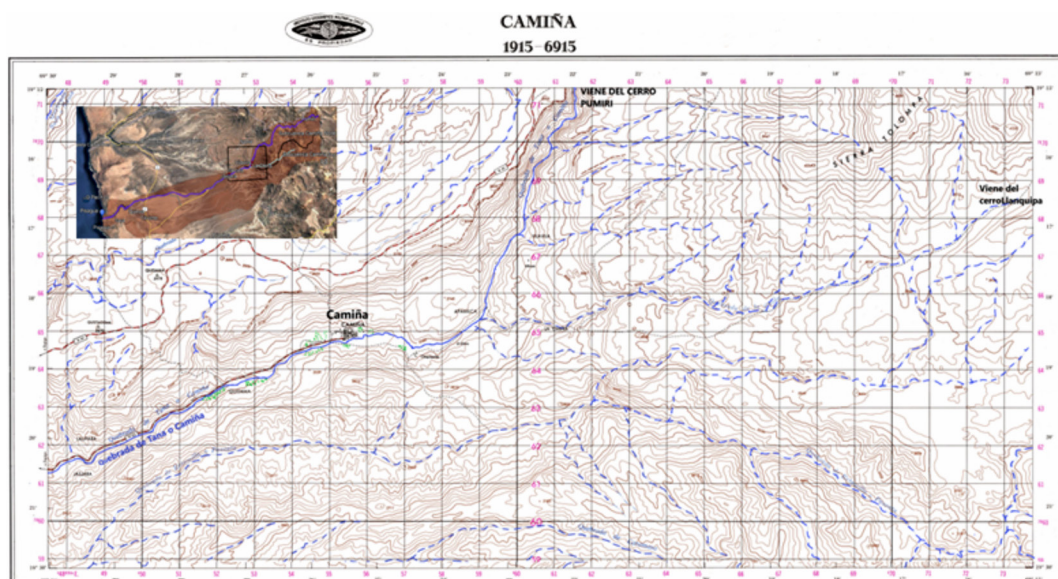


Figura 4. Plano cartográfico de la plancha indicada donde se visualiza en azul las líneas de corrientes superficiales que existían según la investigación del profesor Hans y el IGM, 1977. Obtenida de la tienda online del IGM.



Figura 5. En la imagen obtenida de GEE con línea azul se aprecia el recorrido de la quebrada Camiña, la zona sombreada corresponde a la extensión de la cuenca de camaña y la línea de color negro divide dos flancos, subcuenca Camiña norte y subcuenca Camiña sur.

capas de mayor permeabilidad de la formación Latagualla [21], este primer flanco genera infiltración y descarga posterior en los manantiales aguas abajo. El segundo corresponde a un acuífero del flanco sur en Pacagua perteneciente a la formación Latagualla. Los acuíferos en el norte de Chile y sur de Perú presentan características especiales, destacando la fosilidad de sus aguas debido a las condiciones áridas y la recarga limitada. Según Pocco et al. (2023), en la cuenca árida del Desierto de Atacama, la evaluación del potencial de aguas subterráneas mediante técnicas multicriterio y sensores remotos revela que estos acuíferos, como los asociados a la formación Latagualla, dependen en gran medida de la infiltración del agua del río en su curso superior y de la infiltración de aguas meteóricas en épocas de mayor precipitación. Esta fosilidad se debe a que la recarga es esporádica y limitada, lo que implica que el agua almacenada puede tener una antigüedad considerable, reflejando procesos hidrogeológicos lentos y un balance hídrico restringido [22].

Además, los sedimentos fluviales en las secciones hidráulicas superficiales, como en la quebrada de Camiña, contribuyen a la formación de acuíferos locales con características particulares relacionadas con su permeabilidad y capacidad de almacenamiento. En conjunto, estos acuíferos en el norte de Chile y sur de Perú constituyen sistemas complejos donde

la interacción entre infiltración fluvial, recarga meteórica y características geológicas condiciona la disponibilidad y calidad del recurso hídrico en zonas áridas, con implicancias importantes para su gestión sostenible [23].

A continuación, se presenta la Tabla 2 que resume las bandas espectrales del satélite Landsat 5 utilizadas para calcular los índices NDWI y NDVI, los cuales permiten identificar cuerpos de agua, zonas húmedas y evaluar la salud de la vegetación en la cuenca, expresados en términos de área y porcentaje respecto al total [24].

Análisis período: 1985 a 2015

Stephen Schneider, un matemático que en 1997 publicó el libro *The Genesis Strategy: Climate and Global Survival* [25], modeló parámetros climáticos con proyecciones muy desalentadoras, siendo uno de los primeros en señalar de manera clara y contundente que el cambio climático es provocado por la actividad humana. En su obra, destacó el aumento progresivo de la temperatura global y sus efectos negativos en los patrones climáticos, alertando sobre las consecuencias ambientales, sociales y económicas que podrían derivarse si no se tomaban medidas urgentes. Este trabajo marcó un hito al llamar la atención mundial sobre la necesidad de proteger el medio ambiente, una situación que ya era evidente

Tabla 2. Índices NDWI y NDVI derivados de bandas espectrales del satélite Landsat 5 para el análisis ambiental de la cuenca.

Índice	Bandas Landsat 5 Utilizadas	Propósito	Resolución Espacial
NDWI	Banda 4 (Infrarrojo Cercano, 0.76-0.90 μm) Banda 5 (Infrarrojo Medio, 1.55-1.75 μm)	Identificación de cuerpos de agua y áreas con elevada saturación de humedad.	30 m
NDVI	Banda 3 (Rojo Visible, 0.63-0.69 μm) Banda 5 (Infrarrojo Medio, 1.55-1.75 μm)	Indicador de biomasa fotosintéticamente activa, expresado en términos de área y porcentaje respecto al área total de la cuenca.	30 m

en los años 80, cuando se registraron hambrunas severas en África [26], tal como lo documenta la ONG Feed My Starving Children [27].

En el análisis se utiliza el sensor Landsat 5-TM junto con el índice NDWI para identificar el cuerpo de agua en la cuenca de la Quebrada de Camiña. Este método se basa en la reflexión de la radiación en el infrarrojo cercano y en la longitud de onda

de luz visible verde, lo que permite eliminar las características del suelo y la vegetación terrestre, destacando así las áreas de agua abierta en imágenes digitales obtenidas mediante teledetección [28].

A través del análisis del NDWI, que detecta masas de agua utilizando las bandas B4 (rojo) y B5 (infrarrojo cercano), se generó imágenes satelitales que se presentan en la Figura 6. Este índice mide

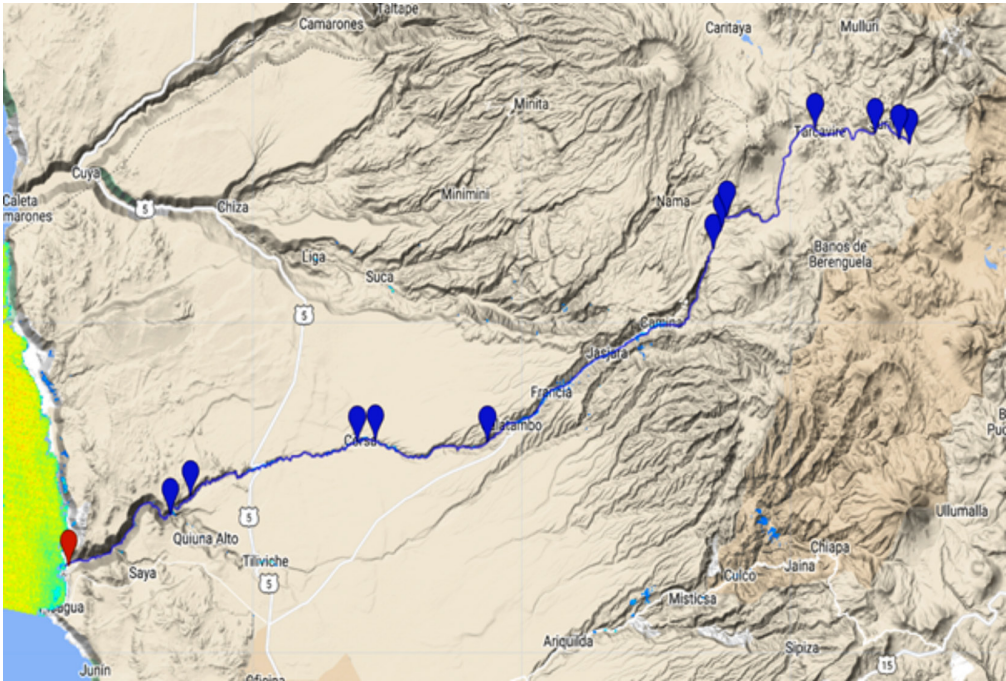


Figura 6. En la imagen se observó en color azul las zonas con agua superficial para el año 1985, los globos azules marcan los puntos de poblaciones, el globo rojo la llegada al mar, línea azul marca la depresión del terreno donde fluye la quebrada hacia el mar (exorreica), para el 2015 el agua llega solo hasta el cruce que conduce a Tiviliche. Obtenida de GEE- Landsat 5. El NDWI permitió mapear cambios históricos con alta precisión, eliminando interferencias de otros elementos del paisaje.

efectivamente el contenido de humedad, permitiendo resaltar las masas de agua al reducir la reflectancia del suelo y la vegetación. Los valores obtenidos del NDWI son positivos para superficies acuáticas y negativos o cercanos a cero para suelos y vegetación, facilitando así la identificación precisa de cuerpos de agua en las imágenes analizadas.

La pérdida del recurso hídrico superficial en la cuenca de la Quebrada de Camiña durante el periodo de 1985 a 2000 es notable, especialmente al compararla con los datos del año 1977. En este contexto, la longitud de las vertientes que desembocan en la quebrada es de 272 km. Para el año 1985, se registró una pérdida total de las corrientes superficiales que llegaban a la quebrada. Aunque en el año 2000 se observó un aumento en la masa de agua en comparación con 1985, esta sigue siendo 62,20 km menor que en 1977, lo que implica una reducción del 77% en la presencia de agua superficial. Esta disminución respalda las observaciones realizadas por la Organización Germanwatch [29] sobre el Índice de Riesgo Climático Global (IRC), el cual se fundamenta en un análisis exhaustivo de los impactos de eventos climáticos extremos y los datos socioeconómicos correspondientes, tal como se detalla en su informe para el periodo de 1997 a 2016.

Aunque se realizó un filtro de nubes en el GEE, la masa de agua observada, en algunas zonas puede ser

influenciada por la humedad del suelo, por lo que es preciso determinar el NDVI, indicador de biomasa fotosintéticamente activa, para tener otro referente que indique la situación de la cuenca en el tiempo. En la Figura 7 construida con datos obtenidos del Landsat 5 se registra el porcentaje de suelo vegetal respecto al 100% del área de la cuenca registrados desde 1985 hasta el 2015 con valores que oscilan entre 0,69% y con valor máximo para 2005 de 3,08%, sin embargo, termina el período con disminución de biomasa del 0,57% lo cual constituye una evidencia de los cambios ambientales registrados. Esto indica que la cobertura de vegetación es menor al 15% que es un rango de suelo árido [17], lo que refleja que el suelo está en condiciones extremas de aridez.

La variación de la cobertura vegetal está asociada a la presencia de agua [30], es así como la única fuente de agua superficial que existe en la cuenca de estudio a partir de 1985 corresponde a la quebrada, situación similar se presentaba a nivel global según la investigación realizada por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) en 2013, la cual señala que los eventos climáticos extremos observados en el decenio de 2001 a 2010 se deben tanto a eventos cíclicos naturales, como los movimientos terrestres en relación con el sol, los fenómenos solares y las variaciones propias de la Tierra, como a factores antropogénicos, es decir, aquellos provocados por la actividad humana [31].

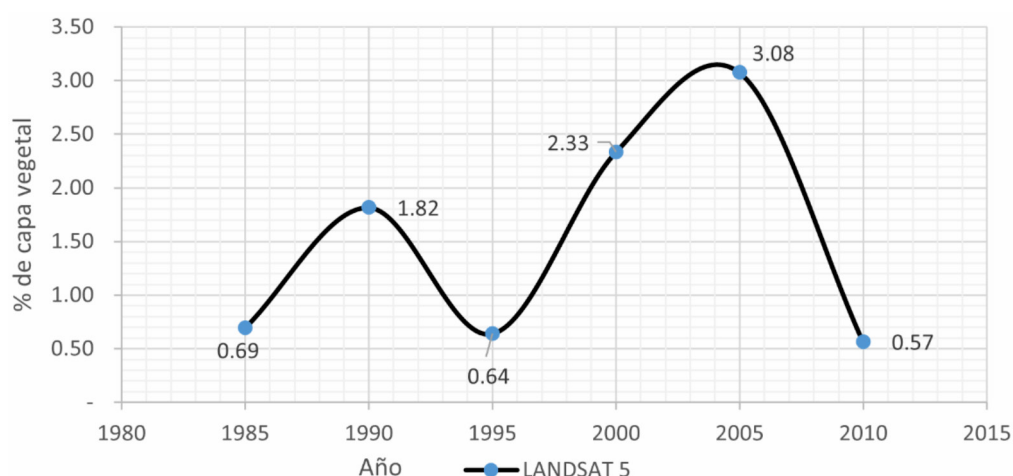


Figura 7. Indicador NDVI para el período 1985 a 2010, información obtenida de GEE en base a satélite landsat5, los números representan el porcentaje de suelo vegetal respecto al área total de la cuenca. Se logró obtener información con el Landsat 5 hasta el año 2010, debido a que por problemas técnicos dejó de enviar imágenes.

Sequías en Chile a lo largo de las décadas: Una perspectiva climática

Chile ha experimentado diversas etapas de sequías a lo largo de su historia, siendo la de 1968 considerada como la más severa, abarcando el periodo de 1967 a 1969 [31]. Además, se destaca la sequía de 1998, que afectó los años 1994, 1995, 1996 y 1998. La mega sequía del 2010 se distingue por sus importantes reducciones en la precipitación anual, llegando incluso hasta un 80%. Este fenómeno se atribuye a la coincidencia de la fase cálida de la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) y el ENSO[32].

Análisis: Periodo 2015 a 2023

El análisis para los últimos 8 años se realizó con imágenes del Landsat8 y con una mayor precisión con el satélite europeo Copernicus Sentinel 2, comparando estos resultados, los índices NDVI tienen la misma tendencia según lo registrado en la Figura 8.

Según fuentes como National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) en 2020, así como los científicos de Copérnico del Servicio de Cambio Climático Europeo y la NASA, se ha corroborado que los años 2016 y 2020 se han destacado como los más cálidos a nivel mundial.

Estas observaciones refuerzan la preocupación por los patrones climáticos cambiantes y su impacto a nivel global. El aumento de la temperatura ha sido un factor relevante en la dinámica de los vientos, según la Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC) de Chile en el boletín de mayo de 2019 la zona de la costa norte chilena la temperatura del mar había ascendido a $+0,82^{\circ}\text{C}$ y para la misma fecha, pero en el 2020, se presentó una sequía en la alta cordillera asociada al déficit de lluvias y a la probabilidad de condiciones tipo de la Niña hacia fines del 2020 en el pacífico ecuatorial[33].

Análisis del año 2000: Cambios en la humedad superficial y fenómeno de La Niña

La Figura 9 revela un notable aumento en la humedad superficial en comparación con el análisis de años anteriores. En particular, se observó lluvias en verano en la zona central del país, un fenómeno inusual que se atribuye a la presencia del fenómeno de La Niña, caracterizado por un enfriamiento anormal del agua del Pacífico. En este caso, los vientos alisios, que soplan entre los trópicos, se intensifican y, al concentrarse en la región ecuatorial del pacífico tropical, desplazan las aguas superficiales más cálidas hacia Australia e Indonesia [34]. Esto resulta en un aumento de temperatura y precipitaciones en esa región, afectando a la zona costera de Chile, donde

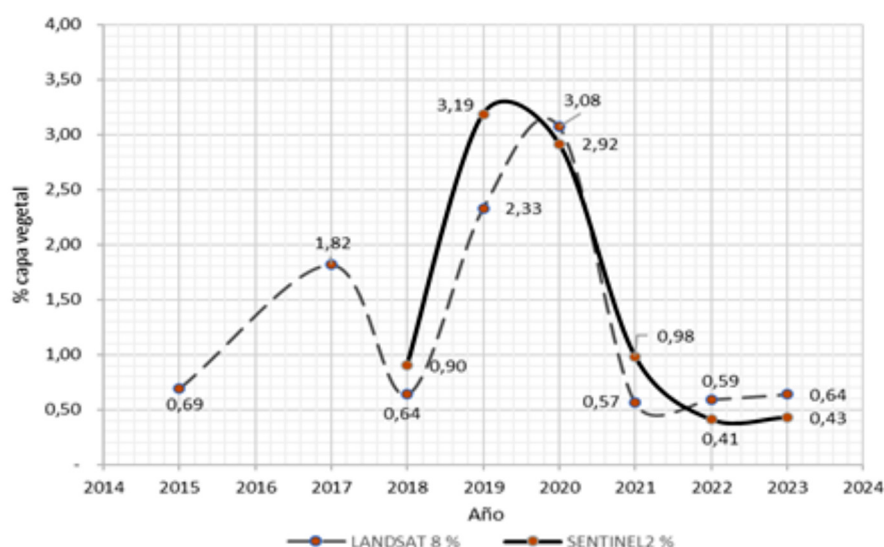


Figura 8. Índice NDVI para el período 2015 a 2023, los números representan el porcentaje de suelo con cobertura vegetal respecto al área total de la cuenca, Información obtenida de GEE en base a información de satélite Landsat8 con línea cortada y Sentinel 2 con línea continua.

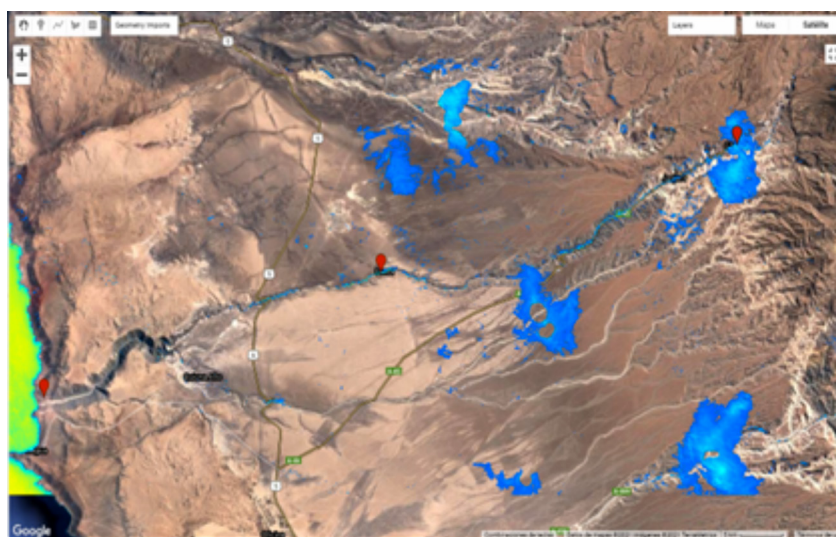


Figura 9. Registro de agua superficial del año 2000 con Sentinel 2, adaptada de GEE Copernicus Sentinel-2.

emergen aguas más frías [35]. Como consecuencia, se experimentan temperaturas más bajas en el sur de Perú y el norte de Chile, acompañadas de escasas precipitaciones y sequías prolongadas [36]. En síntesis, las repercusiones del fenómeno de La Niña se traducen en veranos menos calurosos, lluvias altiplánicas y la pérdida de tierras fértiles por la desertificación.

Por otro lado, en la zona norte, especialmente en altitudes cercanas a los 2000 ms.n.m., se genera

una masa de aire inestable durante el verano. Este fenómeno, propiciado por la altura, induce nubosidad que resulta en precipitaciones casi constantes durante la temporada estival. A mayores altitudes, como los 3500 ms.n.m., las precipitaciones pueden originarse en las tardes de verano debido a procesos convectivos derivados del ascenso de masas de aire cargadas de humedad desde la ladera oriental de los Andes [37].

En la Figura 10, se observa que la variación de temperatura anual para el periodo 2001 a 2023,

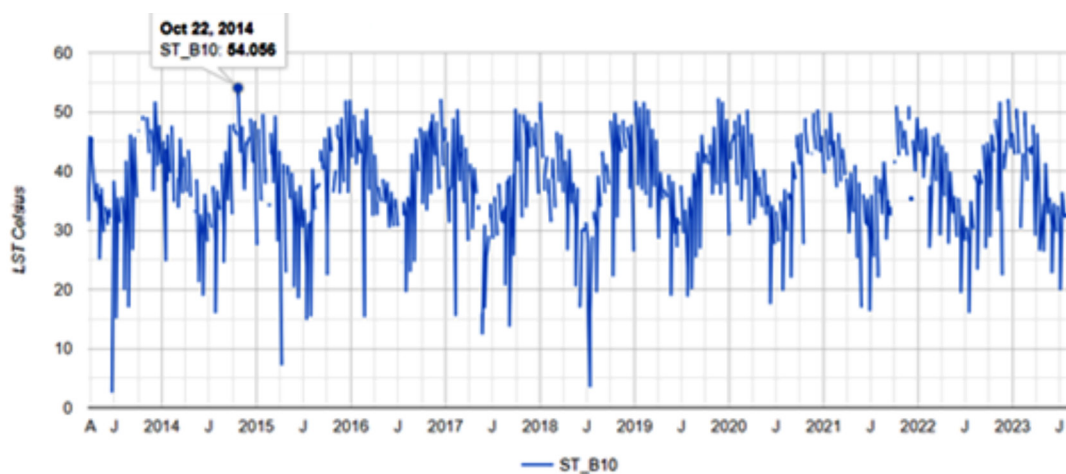


Figura 10. Temperatura mensual de la cuenca de Camiña entre el año 2014 a 2023, obtenida de GEE LANDSAT/LC08/C02.

registra que la tendencia se repite de forma cíclica en todos los años analizados, incluso en los meses más fríos de mayo y junio, las temperaturas se mantienen entre 28 y 35 °C. Estas tendencias se han observado de manera consistente en este periodo analizado [38].

El análisis de la temperatura en el espacio y el tiempo, obtenido de imágenes MODIS/061/MOD11A2 [39], presentado en la Figura 11 es fundamental para comprender los impactos del cambio climático a nivel local. La gama de colores muestra que la zona presentó temperaturas superiores a los 40 °C, en casi el 50% de la cuenca. En la zona de la cordillera aguas arriba las temperaturas oscilan entre 28 y 20 °C, hacia la cabecera de la cuenca.

En la Figura 12 se presenta una reseña histórica basada en datos de temperatura del MODIS/061/MOD11A, complementada por el análisis del Índice de De Martonne (IDHA) y la información obtenida del GEE de los satélites Landsat 5, Landsat 8, Copernicus Sentinel 2 y sensor MODIS. Estos datos evidencian el porcentaje de cobertura vegetal en relación con el área total de la cuenca. Se destaca que la biomasa fotosintéticamente activa se

encuentra exclusivamente en la sección hidráulica de la quebrada. Desde 1988, el grado hidráulico de la cuenca se ha mantenido constante en 1, lo que indica una notable disminución de las corrientes superficiales que anteriormente alimentaban el sistema. En la actualidad, solo se observan vestigios de la presencia de agua, evidenciados por la abundancia de cantos rodados. Los eventos de precipitaciones puntuales, exacerbados por los efectos del cambio climático, han ocasionado daños significativos a este frágil ecosistema árido según Martonne. Sin embargo, estas precipitaciones no son suficientes para restaurar el ecosistema de la cuenca.

Esta línea de tiempo comparativa que muestra las fechas y eventos clave en la historia de los compromisos internacionales sobre cambio climático, desde la creación del primer protocolo de gases efecto invernadero en 1977, pasando por el Protocolo de Kioto en 1997, hasta el Acuerdo de París en 2015 y las recientes cumbres climáticas. En un segundo esquema complementario se resumen las acciones y políticas implementadas en Chile durante esos mismos períodos, incluyendo la adopción de compromisos internacionales, desarrollo de normativas nacionales

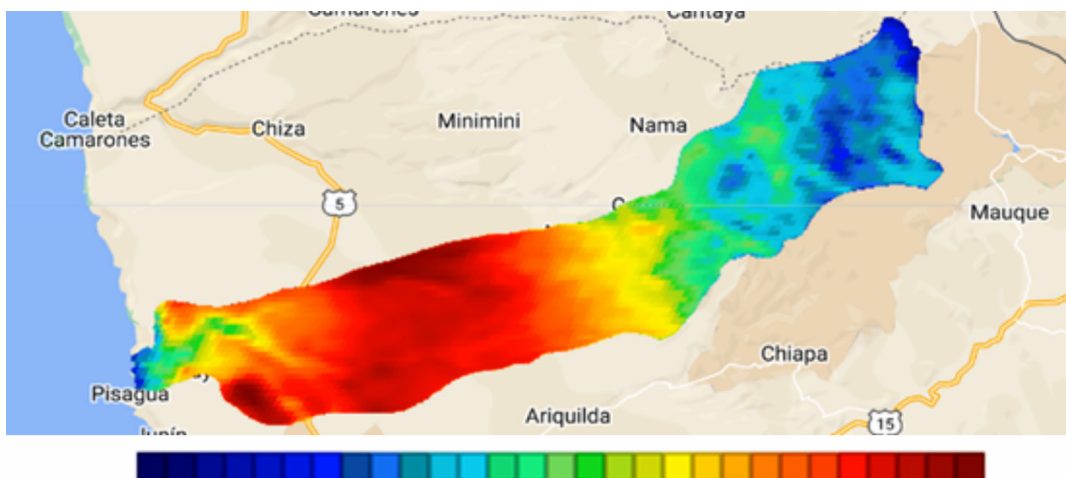


Figura 11. Mapa de temperatura de la cuenca de Camiña, la paleta de colores se encuentra en un rango de temperaturas entre 15 °C y 46 °C. Cada escala de color aumenta en 1,1 °C, lo que indica los rangos: azul claro (15 °C -20 °C), verde (29,3 °C a 32,6 °C), amarillo (33,7 °C a 37,0 °C), naranja (37,1 °C a 41,0 °C), rojo oscuro (41,1 °C a 46,0 °C). Información obtenida de GEE de la colección de imágenes MODIS/061/MOD11A2 con resolución espacial de 1 Km × 1 Km por píxel, esta resolución permite un análisis detallado a escala local y regional, ideal para estudios de cuencas hidrográficas y evaluación de impactos climáticos en zonas específicas.

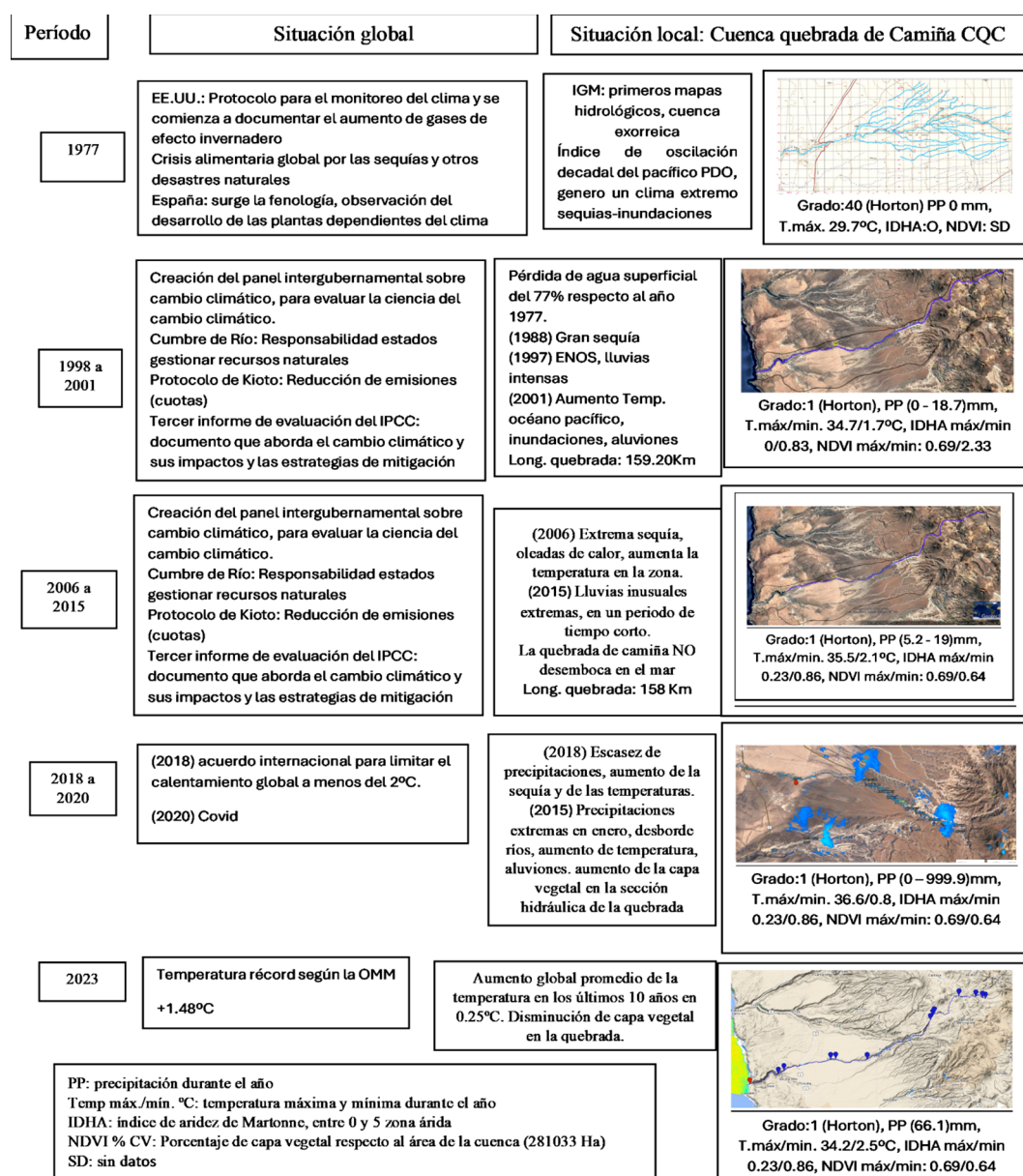


Figura 12. Línea de tiempo comparativa que muestra las fechas y eventos clave en la historia de los compromisos internacionales sobre cambio climático y su interacción en la cuenca Camiña.

y programas de adaptación y mitigación. Finalmente, se refleja la realidad observada en la cuenca de Camiña, donde se presenta un deterioro progresivo del ambiente, con aumento de la degradación del suelo, disminución de aguas superficiales y pérdida de cobertura vegetal, mostrando un desfase entre los compromisos globales y locales y los impactos reales en ecosistemas vulnerables. Esta comparación evidencia

la necesidad urgente de fortalecer la implementación efectiva de políticas ambientales y la gestión sostenible de los recursos hídricos a nivel local.

DISCUSIÓN

La temperatura se revela como un factor crucial para entender el estrés hídrico en la cuenca de

Camiña, donde los registros de la última década indican condiciones extremas que agravan la crisis hídrica y la desertificación [40]. Durante el invierno, se ha observado un descenso promedio de 0,21 °C, alineándose con las tendencias globales sobre el cambio climático, que advierte sobre un aumento de más de 1,5 °C a nivel mundial [41]. Los picos de temperatura han alcanzado hasta 37,3 °C, superando en 1,64 °C el promedio de los últimos 12 años, mientras que los mínimos han llegado a 0,20 °C. Estas fluctuaciones extremas subrayan la situación crítica que enfrenta la cuenca, intensificada por el cambio climático y la reducción de recursos hídricos [42].

Es importante señalar que los resultados obtenidos se basan en las fuentes de datos Landsat 8 y MODIS debido a las diferentes resoluciones espaciales. Landsat 8 ofrece una resolución de 30 metros con frecuencia de 16 días, mientras que MODIS con frecuencia de 1 día y de baja resolución oscila entre 250 metros y 1 kilómetro lo que puede generar incertidumbre en la representación de eventos extremos o cambios rápidos en la temperatura [16]. Estas diferencias tecnológicas permiten captar las dinámicas de temperatura con distintos grados de detalle, pero en conjunto subrayan el aumento sostenido de las temperaturas en los últimos años, lo que intensifica la desertificación y la crisis hídrica en la cuenca de Camiña. La combinación de ambos permite un balance entre detalle espacial y temporalidad, mejorando la comprensión integral del sistema estudiado.

La validación de los datos satelitales con estaciones meteorológicas en campo es fundamental, pero en la cuenca de Camiña la cobertura de estaciones es limitada solo se cuentan con 3 puntos de muestreo en la zona alta de la cuenca, considerando que la cuenca tiene 2810 Km² y que, según la OMM, se recomienda aproximadamente una estación meteorológica por cada 600 km² [43], lo que permitiría evaluar adecuadamente la variabilidad espacial del clima. Esto implicaría por lo menos contar con 5 estaciones en la zona de estudio, lo que dificulta la verificación precisa de las temperaturas registradas. Esta limitación en la cobertura de estaciones meteorológicas puede generar errores al interpretar las fluctuaciones térmicas registradas, dificultando una evaluación precisa del estrés hídrico en la cuenca y afectando

la confiabilidad de los análisis climáticos y de disponibilidad hídrica.

El análisis del recurso hídrico superficial en la cuenca de la quebrada de Camiña ha permitido determinar cómo a partir de la información registrada en los primeros trabajos de aerofotogrametría del IGM de Chile de imágenes del año 1977, se aprecia una cuenca alimentada por corrientes superficiales que nacen en cotas sobre los 5000 ms.n.m. y aguas abajo sobre cerros con cotas promedio 3000 ms.n.m. Sin embargo, a partir de 1985, se comenzó a obtener información del satélite Landsat 5, y desde 2015, del Landsat 8, ambos con una resolución de imagen de 30 metros. A partir de 2018, se dispone de imágenes con una resolución de 10 metros del satélite Sentinel-2. Este último permite realizar comparaciones utilizando el NDVI que es fundamental para evaluar la salud y la cobertura vegetal en diferentes áreas geográficas.

El satélite Sentinel-2, del programa Copernicus de la ESA, está equipado con 13 bandas espectrales que permiten un análisis detallado del suelo y la vegetación. Su capacidad para capturar imágenes a una resolución de 10 metros es especialmente valiosa para el monitoreo ambiental y la gestión de recursos naturales.

La cuenca de Camiña presenta un contexto ambiental crítico, caracterizado por un IDHA de 0,25 entre 2000 y 2022 [44], lo que la clasifica como una región árida [45]. Este nivel de aridez impacta negativamente en la cobertura vegetal, un componente esencial para la salud y fertilidad del suelo. La evidencia sugiere que esta cobertura ha experimentado una disminución constante; de acuerdo con los análisis realizados mediante imágenes satelitales en GEE, la vegetación verde se ha reducido del 0,60% a 0,57% en los años 1985 y 2010 respectivamente, y se estima que en 2023 alcanzó un mínimo alarmante del 0,43%, lo que significa que al final del periodo de estudio ha disminuido en 0,17%, es decir en la última década duplica la pérdida de biomasa fotosintéticamente activa respecto a las dos décadas anteriores.

A pesar de eventos climáticos significativos como las lluvias extremas provocadas por el fenómeno de La Niña entre enero y febrero de 2019 y las precipitaciones adicionales en 2020, la recuperación

de la capa vegetal no ha sido satisfactoria. Este fenómeno se alinea con las observaciones del académico Juan Boisier de la Universidad de Chile en el 2020 [46], quien argumenta que las precipitaciones no han sido suficientes para contrarrestar la crisis hídrica que afecta al norte de Chile. La persistente degradación de la cobertura vegetal en Camiña no solo refleja un desafío ambiental inmediato, sino que también plantea interrogantes sobre la sostenibilidad a largo plazo de los ecosistemas locales y su capacidad para soportar condiciones climáticas adversas.

Los datos generados pueden ser fundamentales para apoyar a las comunidades locales en la toma de decisiones frente al cambio climático y la gestión de recursos naturales. Los mapas de cobertura y cambios detectados pueden informar estrategias de manejo sostenible del suelo, prevención de desastres y planificación agrícola. Además, la identificación de áreas vulnerables permite diseñar acciones de adaptación específicas, como la implementación de sistemas de alerta temprana o la promoción de prácticas agrícolas resilientes.

CONCLUSIONES

La biomasa fotosintética en la cuenca de la Quebrada de Camiña disminuyó de 0,64% en 1985 a 0,43% en 2023, confirmando un avance sostenido de la desertificación. Este proceso coincide con la reducción del 77% del agua superficial registrada en el año 1977 a la obtenida en 1985 según el índice NDWI. Aunque en 2021 se observaron zonas más húmedas asociadas al fenómeno de La Niña, estos eventos no reflejan una recuperación real de las corrientes superficiales. Así mismo, las temperaturas máximas extremas de 37,30 °C en 2011 y 2014 superaron en 1,64 °C el promedio histórico, mientras que las mínimas alcanzaron 0,20 °C, evidenciando un clima cada vez más errático y hostil para los ecosistemas locales.

Los resultados indican que la degradación del suelo y la disminución de las aguas superficiales siguen en aumento, intensificados por el cambio climático y la reducción de los recursos hídricos. Se requiere la implementación de planes de gestión ambiental enfocados en la rehabilitación de suelos, la promoción de prácticas agroecológicas sostenibles,

la conservación del agua con la sustitución sistemática de cultivos en áreas agrícolas o parcelas agrícolas por construcción de invernaderos inteligentes, entre otros, el monitoreo climático en tiempo real generando convenio con las instituciones educativas en proyectos que incluyan nuevas estaciones de monitoreo en la cuenca de Camiña y la participación comunitaria Aymara en la gestión de recursos hídricos incorporando conocimientos tradicionales en los planes de manejo con cooperación interinstitucional, especialmente a través de la Mesa Estratégica de Recursos Hídricos de la DGA, debe ser un compromiso para diseñar políticas adaptativas basadas en evidencia científica.

Además, fortalecer una cultura responsable y consciente del uso del agua representa un desafío fundamental para la sostenibilidad de la cuenca de Camiña. La gestión eficiente y equitativa del recurso hídrico no solo depende de tecnologías y políticas, sino también del compromiso activo de las comunidades locales, en especial de los pueblos originarios Aymara, quienes poseen un profundo conocimiento ancestral sobre el manejo sostenible del agua en ambientes áridos. Promover la educación ambiental, la valorización de prácticas tradicionales y la participación comunitaria en la toma de decisiones es clave para garantizar que las acciones de conservación y rehabilitación sean efectivas y perduren en el tiempo. Este enfoque integral contribuye a construir resiliencia frente a los impactos del cambio climático y a asegurar el bienestar social y ambiental de la región.

REFERENCIAS

- [1] Secretaría General de la Comunidad Andina, “El cambio climático no tiene fronteras”, Lima, 2008, *Comunidad andina.org*. Accedido: 23 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.comunidadandina.org/StaticFiles/OtrosTemas/MedioAmbiente/libro_cambioclimatico.pdf
- [2] Iniciativa Andina de Montañas (IAM), “Vulnerabilidad y adaptación al cambio climático en zonas de alta montaña de la región andina”, Accedido: 1 de enero de 2024. [En línea] Disponible en: https://iam-andes.org/wp-content/uploads/2023/12/DEU_Policy-brief.pdf

- [3] E. Pino y E. Chávarri, "Evidence of climate change in the hyper-arid region of the southern coast of Peru, head of the Atacama Desert", *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. 13, no. 1, 2022, doi: 10.24850/J-TYCA-2022-01-08.
- [4] M.R. Uribe, "Acerca de complejidad, desigualdad social y el complejo cultural Pica-Tarapacá en los Andes Centro-Sur (1000-1450 d.C.)", *Estudios Atacameños*, vol. 31, 2006, pp. 91-114, 2006, doi: 10.4067/S0718-10432006000100007.
- [5] B. Hernández, "Variabilidad interanual de las anomalías de la temperatura superficial del mar en aguas cubanas y su relación con eventos El Niño-Oscilación del Sur (ENOS)", *Investigaciones marinas*, vol. 30, no. 2, pp. 21-31, 2002. [En línea]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/456/45630202.pdf>
- [6] J.E. Valdés-Holguín y J.R. Lara-Lara, "Primary productivity in the Gulf of California: effects of El Niño 1982-1983 event", *Ciencias Marinas*, vol. 13, no. 2, pp. 34-50, 1987, doi: 10.7773/cm.v13i2.533.
- [7] E. Pino, L. Ramos, J. Mejía, E. Chávarri y D. Ascencios, "Medidas de mitigación para el acuífero la Yarada, un sistema sobreexplotado en zonas áridas", *Idesia*, vol. 38, no. 3, pp. 21-31, 2020, doi: 10.4067/S0718-34292020000300021.
- [8] J. Maturana, M. Bello y M. Manley, "Antecedentes históricos y descripción del fenómeno El Niño-Oscilación del Sur", en *El Niño-La Niña 1997-2000. Sus Efectos en Chile*, Valparaíso, Chile: CONA, 2004, pp. 13-27.
- [9] M.S. Siam and E.A.B. Eltahir, "Climate change enhances interannual variability of the Nile River flow," *Nature Climate Change*, vol. 7, no. 5, pp. 350-354, 2017, doi: 10.1038/nclimate3273.
- [10] K.J. Osorio, L. Ramos y T. Velásquez, "Proyección de los impactos del cambio climático en el caudal del río Lurín-Perú, bajo escenarios del CMIP5-RCP", *Idesia*, vol. 40, no. 1, pp. 101-114, 2022, doi: 10.4067/S0718-34292022000100101.
- [11] F.J. Feldmann y R.B. Furriela, "Cambios climáticos globales y el desafío de la ciudadanía planetaria", *Acta Bioethica*, vol. 7, no. 2, pp. 287-292, 2001, doi: 10.4067/S1726-569X2001000200010.
- [12] J. Espinoza, K. Acosta, E. Chambe, G. Huayna, E. Pino, and J. Abad, "Spatiotemporal analysis of urban heat islands in relation to urban development, in the vicinity of the Atacama Desert," *Climate*, vol. 10, no. 6, Art. no. 87, 2022, doi: 10.3390/cli10060087.
- [13] Servicio de Evaluación Ambiental, "*Guía área de influencia en humedales en el SEIA*". Accedido: 4 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.sea.gob.cl/sites/default/files/imce/archivos/2023/03/29/Guia-AI-Humedales-SEIA-2023.pdf>
- [14] J. Carrasco y J. Riquelme, "Métodos y prácticas de conservación de suelos y aguas", *Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA)*, *Boletín no. 103*, Santiago, Chile, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/20.500.13082/15702>
- [15] M.T. Taucare, "*Hidrogeología y aplicación del método TEM para el reconocimiento de acuíferos en la Quebrada de Camiña Región de Tarapacá Chile*", Tesis de Geólogo, Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas, Universidad Católica del Norte, Antofagasta, Chile, 2015.
- [16] H.F. Niemeyer, *Hoyas hidrográficas de Chile: 1a. Región de Tarapacá*, Santiago, Chile: Dirección General de Aguas, 1980, pp. 5-122.
- [17] R.P. Machaca, E.V. Pino, L.F.R. Ramos, J.M. Quile y A.R. Torres, "Estimación de la evapotranspiración con fines de riego en tiempo real de un olivar en Tacna", *Idesia*, vol. 40, pp. 55-65, jun. 2022, doi: 10.4067/S0718-34292022000200055.
- [18] E.S. Nascimento, M. de L.B.T. Galo y S.M. Benini, "Detection of the effect of the current water crisis on the reduction of the water surface of the Po River, Italy," *Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista*, vol. 18, no. 2, 2022. doi: 10.17271/1980082718220223236.
- [19] G. Hulley, N. Malakar and R. Freepartner, *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Land Surface Temperature and Emissivity Product (MxD21) Algorithm Theoretical Basis Document Collection-6*, JPL Publication 12-17, Pasadena, USA, 2016, [Online]. Available: https://modis-land.gsfc.nasa.gov/pdf/MOD21_ATBD_Hulley_v2.4.pdf
- [20] R.E. Horton, "Erosional development of streams and their drainage basins hydrophysical

- approach to quantitative morphology compress,” *Bulletin of the Geological Society of America*, vol. 56, no. 3, pp. 275-370, mar. 1945, doi: 10.1130/0016-7606(1945)56[275:EDO SAT]2.0.CO;2.
- [21] L. Pinto, G. Hérail y R. Charrier, “Sedimentación sintectónica asociada a las estructuras neógenas en la Precordillera de la zona de Moquella, Tarapacá (19°15’S, norte de Chile)”, *Revista Geológica de Chile*, vol. 31, no. 1, pp. 19-44, 2004, doi: 10.4067/S0716-02082004000100002.
- [22] V. Pocco, S. Chucuya, G. Huayna, E. Ingol-Blanco, and E. Pino-Vargas, “A multi-criteria decision-making technique using remote sensors to evaluate the potential of groundwater in the arid zone casin of the Atacama Desert,” *Water*, vol. 15, no. 7, Art. no. 1344, abr. 2023, doi: 10.3390/w15071344.
- [23] M. Paicho Hidalgo, M. Meza Aliaga, G. Espinoza González y C.V. Burgos, “Impacto de eventos aluvionales, sobre humedales de quebrada: caso de Altuzá e Iquiuca-Parca. Región de Tarapacá (Chile)”, *Revista Geográfica del Sur*, vol. 6, no. 9, pp. 1-17, 2015. [En línea]. Disponible en: <https://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/20.500.13082/26583>
- [24] EAMENA, “GIS tutorial 5: Agriculture and NDVI with GEE,” [eamena.org](https://www.eamena.org/sites/default/files/eamena/documents/media/gis_5-_agriculture_and_ndvi_with_gee_compressed.pdf). Accessed: July 2, 2024. [Online]. Available: https://www.eamena.org/sites/default/files/eamena/documents/media/gis_5-_agriculture_and_ndvi_with_gee_compressed.pdf
- [25] S. Schneider and L.E. Mesirow, *The Genesis Strategy: Climate and Global Survival*. New York, NY, USA: Plenum Press, 1977.
- [26] K. Pérez de Armiño, “Crisis alimentaria y lucha contra el hambre en el África Subsahariana”, *Revista Económica Mundial*, no. 27, pp. 117-148, 2011.
- [27] World Food Programme, “Feed My Starting Children,” [fmsc.org](https://www.fmsc.org/about-us/resources). Accessed: April 11, 2024. [Online]. Available: <https://www.fmsc.org/about-us/resources>
- [28] NASA, “Landsat,” landsat.gsfc.nasa.gov. Accessed: April 17, 2024. [Online]. Available: <https://landsat.gsfc.nasa.gov>
- [29] Germanwatch, “Global Climate Risk Index 2018,” Accessed: May 25, 2024. [Online]. Available: <https://www.germanwatch.org/en/14987>
- [30] E.A. Barrantes y V.H. Méndez, “Riqueza del recurso hídrico y su relación con la cubierta vegetal en la Reserva Forestal Grecia, Alajuela, Costa Rica”, *UNED Research Journal*, vol. 8, no. 1, pp. 11-15, 2016, doi: 10.22458/urj.v8i1.1215.
- [31] P. Camus y F. Jaksic, “The great drought of 1968: socio-political effects and crisis of democracy in Chile”, *Revista de Historia (Chile)*, vol. 2, no. 28, pp. 271-293, 2021, doi: 10.29393/RH28-34GSPF20034.
- [32] J. Nuñez Cobo, K. Verbist, J. Ramírez Hernández y M. Hallack-Alegría, “Guía metodológica para la aplicación del análisis regional de frecuencia de sequías basado en L-momentos y resultados de aplicación en América Latina”, Montevideo, Uruguay: UNESCO, 2010, PHI-VII, no. 27. [En línea]. Disponible en: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000227721>
- [33] DGAC, “Un invierno con lluvias bajo el rango normal junio-julio-agosto”, Boletín no. 158, 2020, Chile. [En línea]. Disponible en: <https://climatologia.meteochile.gob.cl/publicaciones/boletinTendenciasClimaticas/boletinTendenciasClimaticas-202005.pdf>
- [34] Instituto Antártico Chileno, *La Antártica Nuestra. Una Introducción a su Conocimiento*, Punta Arenas, Chile: INACH, 2006. [En línea]. Disponible en: <https://www.inach.cl/wp-content/uploads/2023/08/antartica-nuestra-2006-PDF.pdf>
- [35] G. de J. Montoya, J. Pelkowski y J.A. Eslava, “Sobre los alisios del nordeste y la existencia de una corriente en el piedemonte oriental Andino”, *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, vol. 25, no. 96, pp. 363-370, 2001, doi: 10.18257/raccefyn.25(96).2001.2800.
- [36] E. Pino. Vargas, “Conflictos por el uso del agua en una región árida: Caso Tacna, Perú”, *Diálogo Andino*, no. 65, pp. 405-415, 2021, doi: 10.4067/S0719-26812021000200405.
- [37] R. Garreaud y J. Rutllant, “Precipitación estival en los Andes centrales”, *Atmósfera*, vol. 10, no. 4, pp. 191-211, 1997, [En línea]. Disponible en: <https://www.revistascca.unam.mx/atm/index.php/atm/article/view/8418>
- [38] A. Hannart, M. Ghil, J.-L. Dufresne and P. Naveau, “The uncertain future of climate

- uncertainty,” *Geophysical Research Letters*, 2012. [Online]. Available: https://dept.atmos.ucla.edu/sites/default/files/Hannart.co-Uncertain_future-2col
- [39] T.W. Gillespie, J. Chu, E. Frankenberg, and D. Thomas, “Assessment and prediction of natural hazards from satellite imagery,” *Progress in Physical Geography*, vol. 31, no. 5, pp. 459-470, 2007, doi: 10.1177/0309133307083296.
- [40] M. Finger, C. Naudon, A. Osses, M.Á. Caro y A. Zenteno, *Estudio preliminar de recursos superficiales río Camiña*, Santiago, Chile: Dirección General de Aguas (DGA), Accedido: 22 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://snia.mop.gob.cl/repositorioidga/>
- [41] AEMet, “Cambio Climático: Calentamiento Global de 1,5 °C”, ipcc.ch. Accedido: 15 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://ipcc.ch/report/sr15/>
- [42] Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (BCN), *Resolución 256 exenta*. 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?i=1180667>
- [43] Organización Meteorológica mundial (OMM), *Guía del Sistema Mundial de Observación*, no. 488. 2010. [En línea]. Disponible en: <http://library.wmo.int/viewer/32618/?offset=#page=1&viewer=picture&co=download&n=8&q=>
- [44] S.S. Matus, M. Gil, E. Blanco, A. Llavona y L. Naranjo, “Desafíos hídricos en Chile y recomendaciones para el cumplimiento del ODS 6 en América Latina y el Caribe”, cepal.org. Accedido: 7 de diciembre de 2024. [En línea]. Disponible en: www.cepal.org/apps
- [45] A. Tapia, “Dossier Geografía Zonas Áridas”, Universidad de Tarapacá, Arica, Chile, 2014. [En línea]. Disponible en: <http://sb.uta.cl/libros/DossierGeogaf%C3%ADaZonas%C3%81ridasyMonta%C3%B1as-1.pdf>
- [46] R.D. Garreaud, J.P. Boisier, R. Rondanelli, A. Montecinos, H.H. Sepúlveda, and D. Veloso-Aguila, “The central Chile mega drought (2010-2018): A climate dynamics perspective,” *International Journal of Climatology*, vol. 40, no. 1, pp. 421-439, 2020, doi: 10.1002/joc.6219.