

**UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN**

**Facultad de Ciencias**

**Escuela Profesional de Biología – Microbiología**

**Factores climáticos que influyen en el patrón del ancho de los anillos en las  
poblaciones de *Polylepis tarapacana* Phil. en Tacna – Perú**

**TESIS**

**Presentada por:**

**Bach. Josué Daniel Pumasupa Banda**

**Para optar el Título Profesional de:**

**BIÓLOGO - MICROBIÓLOGO**

**TACNA-PERÚ**

**2025**

## ACTA DE SUSTENTACIÓN



ACTA DE SUSTENTACION DE TESIS Nro. 453

En la ciudad de Tacna, en el auditorium de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann; siendo las 11.15 horas del día viernes 25 de septiembre del 2025, estando presente el jurado calificador nominado con Resolución de Facultad Nro. 11423-2025 - 2025 FACI-UNJBG, conformado por los siguientes docentes:

Mg. Giovanni Abrahami Aragón Alvarado (Presidente)  
Msc. Víctor Hugo Carbajal Zegarra (Secretario)  
Dr. Pedro Juan Franco Leoni (Vocal)

Acto seguido, se dio lectura a la Resolución correspondiente, y del mismo modo se informa a la (al) Bachiller que el acto de sustentación constará de dos partes: (I) exposición y sustentación de la tesis, (II) absolución de preguntas del jurado. Todo ello en un tiempo no mayor a 60 minutos ni menor a 30 minutos. A continuación, el presidente del Jurado instó a la (al) Bachiller:

Josie Daniel Pumasupa Banda.

a exponer la Tesis titulada:

Factores climáticos que confluyen en el patrón de archo de las  
avillas en las poblaciones de Pelylepis tarapacana Phil. en Pampa - Per

para optar el Título Profesional de Biologo Microbiologo.

Siendo las 11.50 horas, la (el) tesista concluye su exposición, luego se procedió a la formulación de las preguntas por parte de los miembros del jurado calificador, terminado este proceso, se invitó al público presente a abandonar la sala de sustentación para que los miembros del jurado emitan su calificación de acuerdo a reglamento. El promedio de la calificación dio el siguiente resultado: Aprobado por unanimidad, con nota de 15, de acuerdo al Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann - Tacna.

Siendo las 12.40 horas, se dio por concluido el acto de sustentación de la tesis, firmando los miembros del jurado calificador, en señal de conformidad.

[Signature]  
Presidente

[Signature]  
Secretario

[Signature]  
Vocal

## CERTIFICADO DE SIMILITUD

### CONSTANCIA DE SIMILITUD

Yo Pablo Juan Franco León, en mi condición de asesor acreditado, **CERTIFICO** que, la tesis titulada “**Factores climáticos que influyen en el patrón del ancho de los anillos en las poblaciones de *Polylepis tarapacana* Phil. en Tacna – Perú**”, desarrollado por el Bach. Josue Daniel Pumasupa Banda, para optar el Título Profesional de **Biólogo - Microbiólogo**.

Después de realizado el análisis correspondiente en el software de similitud textual TURNITIN con fecha 10/10/2025; con la siguiente configuración:

- Excluir material bibliográfico
- Excluir material citado
- Excluir coincidencia baja (menos de 15 palabras)

Dicho documento presenta un porcentaje de **similitud de 3 %**

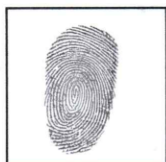
En tal sentido, **CERTIFICO QUE LA SIMILITUD** de la tesis está de acuerdo con el nivel **PERMITIDO**, para continuar con los tramites correspondientes y para su **publicación en el repositorio institucional**.

Se emite la presente constancia para los fines correspondientes.

Tacna, 13 de octubre de 2025

Bach. Josue Daniel Pumasupa Banda

AUTOR



Dr. Pablo Juan Franco León

ASESOR



## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco enormemente al profesor Dr. Pablo Franco y al proyecto de investigación “Ecología, distribución espacial y estado de conservación y balance hídrico de los bosques de Polylepis en los Andes semiáridos de la región Tacna” con resolución **R.R. N° 7424-2020 UN/JBG**, por darme la oportunidad de ejecutar esta tesis y formar parte del equipo de investigación.

También agradezco de todo corazón a mi gran y maravilloso equipo de campo, mis queridos colegas biólogos Javier Ignacio y Syntia Huisa, y al gran tipazo y avezado chofer, Fortunato Barboza, alias “Raulito”, que estuvieron conmigo en las condiciones más duras y adversas de nuestro maravilloso altiplano Tacneño.

## CONTENIDO

|  |    |
|--|----|
| CONTENIDO DE FIGURAS .....                       | 1  |
| CONTENIDO DE TABLAS.....                         | 4  |
| RESUMEN.....                                     | 5  |
| INTRODUCCIÓN .....                               | 7  |
| CAPÍTULO I.....                                  | 8  |
| PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....                 | 8  |
| 1.1 Antecedentes.....                            | 8  |
| 1.2 Formulación del Problema .....               | 10 |
| 1.3 Definición y delimitación del problema ..... | 12 |
| 1.4 Hipótesis .....                              | 14 |
| 1.5 Objetivos.....                               | 15 |
| 1.5.1 Objetivo General.....                      | 15 |
| 1.5.2 Objetivos Específicos .....                | 15 |
| 1.6 Variables:.....                              | 15 |
| 1.6.1 Variable independiente .....               | 15 |
| 1.6.2 Variable dependiente .....                 | 16 |

|  |    |
|--|----|
| CAPITULO II .....  | 17 |
| MARCO TEÓRICO.....   | 17 |
| 2.1    Genero <i>Polylepis</i> .....                                 | 17 |
| 2.2 <i>Polylepis tarapacana</i> .....                                | 17 |
| 2.3    Crecimiento radial, anillos de árbol y Dendrocronología ..... | 18 |
| 2.4    Climatología .....  | 22 |
| 2.5    Régimen climático en los Andes del sur peruano .....          | 22 |
| 2.6    El niño Oscilación del Sur (ENSO).....                        | 24 |
| 2.7    Oscilación decadal del Pacifico (PDO) .....                   | 26 |
| CAPITULO III.....  | 28 |
| MARCO METODOLÓGICO.....  | 28 |
| 3.1    Tipo y diseño de la investigación .....                       | 28 |
| 3.2    Área de estudio.....  | 28 |
| 3.3    Población .....   | 32 |
| 3.4    Muestra .....   | 32 |
| 3.5    Toma y preparación de muestra .....                           | 33 |
| 3.6    Medición de Muestra.....                                      | 34 |

|  |    |
|--|----|
| 3.7 Análisis de cronologías y estadísticas .....   | 34 |
| 3.7.1 Rbar.....  | 35 |
| 3.7.2 EPS (Señal Poblacional Expresada) .....  | 36 |
| 3.7.3 AR1 (Auto-regresión de primer orden) .....   | 37 |
| 3.7.4 Sensibilidad Promedio (Mean Sensitivity o MS) .....                                    | 38 |
| 3.8 Extracción de datos climáticos y control de calidad .....                                | 38 |
| 3.9 Efecto del clima en el patrón de ancho de anillos .....                                  | 39 |
| CAPITULO IV .....  | 42 |
| RESULTADOS.....  | 42 |
| 4.1 Medición y obtención del patrón de ancho de anillos de <i>Polylepis tarapacana</i> ..... | 42 |
| 4.2 Relaciones de Temperatura y Precipitación con el patrón de ancho de anillos.....         | 48 |
| 4.2.1 Zona 1 .....   | 49 |
| 4.2.2 Zona 3 .....   | 51 |
| 4.2.3 Zona 4 .....   | 53 |
| 4.2.4 Zona 5 .....   | 55 |
| 4.2.5 Región.....  | 57 |
| 4.2.6 Análisis temporal entre variables climáticas y cronologías .....                       | 59 |

|  |    |
|--|----|
| 4.3 Relación con Índices oceánico .....  | 66 |
| 4.3.1 Influencia de temperatura superficial del océano pacifico Zona El Niño 3<br>(ENSO) ..... | 66 |
| 4.3.2 Influencia de Oscilación decadal del Pacifico (PDO) .....                                | 68 |
| 4.3.3 Influencia de la temperatura superficial del mar atlántico (AMO).....                    | 69 |
| CAPÍTULO V .....   | 72 |
| DISCUSIÓN .....  | 72 |
| 5.1 Medición y obtención del patrón de ancho de anillos .....                                  | 72 |
| 5.2 Relación Precipitación y temperatura en el patrón de ancho de anillos .....                | 73 |
| 5.3 Relación con Oscilaciones atmosféricas .....   | 75 |
| CAPÍTULO VI.....   | 78 |
| CONCLUSIONES .....   | 78 |
| RECOMENDACIONES .....  | 80 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....  | 81 |
| ANEXOS O APÉNDICES.....  | 95 |

## CONTENIDO DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1. <i>Vista panorámica de un bosque de <i>Polylepis tarapacana</i> a 4800 m.s.n.m. perteneciente de la Zona 3 del presente estudio, con vista al altiplano Tacneño y a la derecha el volcán Jucure.</i> ..... | 29 |
| Figura 2. <i>Mapa de zonas y puntos de muestreo de cores de <i>Polylepis tarapacana</i></i> ....   | 31 |
| Figura 3. <i>Tipos de cores: core dañado (izquierda) y Core ideal (derecha) para análisis</i> .....  | 42 |
| Figura 4. <i>Aplicación del paquete <i>dplR</i> con el principio de cofechado para las muestras colectadas.</i> .....  | 43 |
| Figura 5. <i>Cronologías maestras de las zonas incluidas en el presente estudio correspondientes a Z1, Z3, Z y Z5 (A, B, C y D respectivamente).</i> .....   | 45 |
| Figura 6. <i>Cronología Maestra de TR_Reg</i> .....  | 46 |
| Figura 7. <i>Gráfico de líneas del índice de ancho de anillos (RWI) a nivel zonal y regional</i> .....   | 48 |
| Figura 8. <i>Correlación del RWI de la Zona 1 y precipitación (a), temperatura máxima (b), temperatura mínima (c) y temperatura promedio (d)</i> .....   | 50 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 9. <i>Correlación del RWI de la Zona 3 y precipitación (a), temperatura máxima (b), temperatura mínima (c) y temperatura promedio (d)</i> .....                     | 52 |
| Figura 10. <i>Correlación del RWI de la Zona 4 y precipitación (a), temperatura máxima (b), temperatura mínima (c) y temperatura promedio (d)</i> .....                    | 54 |
| Figura 11. <i>Correlación del RWI de la Zona 5 y precipitación (a), temperatura máxima (b), temperatura mínima (c) y temperatura promedio (d)</i> .....                    | 56 |
| Figura 12. <i>Correlación del RWI regional y precipitación (a), temperatura máxima (b), temperatura mínima (c) y temperatura promedio (d)</i> .....                        | 58 |
| Figura 13. <i>Series temporales comparando cronología de ancho de anillos (línea negra) y precipitación acumulada del año de crecimiento (celeste)</i> . ....              | 60 |
| Figura 14. <i>Series temporales de flags de cronología de ancho de anillos (línea negra) y flags de precipitación acumulada del año de crecimiento (línea azul)</i> . .... | 61 |
| Figura 15. <i>Series temporales comparando cronología de ancho de anillos (línea negra) y temperatura promedio del año de crecimiento (línea roja)</i> . ....              | 63 |
| Figura 16. <i>Series temporales comparando cronología de ancho de anillos (línea negra) y temperatura máxima del año de crecimiento (línea roja)</i> . ....                | 64 |
| Figura 17. <i>Series temporales entre anomalías de la temperatura superficial del mar pacifico zona el Niño 3 (ENSO) y ancho de anillos estandarizado (Z-scores)</i> ..... | 67 |

Figura 18. *Series temporales entre el índice de Oscilación decadal del Pacífico (PDO) y ancho de anillos estandarizado (Z-scores)*. ..... 68

Figura 19. *Series temporales entre anomalías de la temperatura superficial del mar atlántico (AMO) y ancho de anillos estandarizado (Z-scores)*. ..... 70

## CONTENIDO DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1. <i>Estadísticos calculador con dplR para evaluar la calidad de las cronologías presentadas</i> .....     | 47 |
| Tabla 2. <i>Estadísticos de correlación de series temporales de ancho de anillos y variables climáticas</i> ..... | 65 |
| Tabla 3. <i>Correlación entre ancho de anillos y anomalías oceánicas suavizadas.</i> .....                        | 71 |

## RESUMEN

La gran variabilidad climática global amplificada por el cambio climático exige comprender cómo han ocurrido las fluctuaciones pasadas para estimarlas en el presente; en los Andes Centrales, y particularmente en la Puna Seca, la precipitación y la temperatura controlan fuertemente la dinámica ecológica y el crecimiento de los árboles. Frente a la limitación de registros instrumentales, la paleoclimatología y, en concreto, la dendrocronología ofrece una ventana anual y multidecadal para reconstruir sequías y periodos húmedos; *Polylepis tarapacana*, por su adaptación a condiciones extremas y su sensibilidad climática, constituye un proxy ideal en Tacna. Este estudio busca responder la pregunta central: **¿Como los factores climáticos determinan el patrón del ancho de anillos en las poblaciones de *P. tarapacana* en Tacna?** Los objetivos son: (i) obtener cronologías de ancho de anillos de *P. tarapacana* en Tacna; (ii) evaluar la influencia de precipitación y temperatura sobre esas cronologías; y (iii) determinar qué oscilaciones atmosféricas inciden en el patrón radial.

Se obtuvieron cuatro cronologías locales y una regional de *Polylepis tarapacana* en Tacna a partir de >140 árboles; los estadísticos encontrados, aunque son bajos comparado a otras especies ( $r_{bar} = 0.30$ ,  $MS = 0.31$ ,  $EPS = 0.85$ ) son lo suficientemente robustas para detectar señales climáticas regionales. El crecimiento responde positivamente a la disponibilidad hídrica estacional especialmente a las

primeras lluvias de octubre–noviembre ( $r = 0.29$ ) y de forma inversa a la precipitación del verano del año de crecimiento, mientras que las temperaturas máximas de enero - marzo muestran la asociación más fuerte con el ancho de anillos ( $r=0.63$ ; temperaturas medias  $r = 0.31$ ). ENSO deja una huella interanual clara ( $r=0.36$ ) y la AMO aporta una señal multidecadal relevante ( $r = 0.247$ ), en tanto que el PDO no resultó significativo a escala inmediata ( $r = 0.15$ ). Las discrepancias entre localidades reflejan factores biológicos y microclimáticos (edad, genética, suelo, topografía) por lo que se recomienda ampliar redes de muestreo, realizar estudios ecofisiológicos y análisis de baja frecuencia para separar la señal climática de la variabilidad individual.

## INTRODUCCIÓN

Los andes tropicales son uno de las zonas más impactadas por el cambio climático, sufriendo una serie de eventos extremos, desde deglaciación, sequías prolongadas, cambio de la cobertura vegetal, extinción de especies y entre otros. Una herramienta que va a permitir modelar escenarios futuros y en base a registros climáticos históricos, es la dendrocronología, que usa los anillos de árboles, que son organismos altamente sensibles a las variaciones estacionales y ambientales en frecuencias interanuales y hasta decadales, por lo que ha ido sumando importancia en los últimos años debido a la incertidumbre climática que espera nuestro planeta en los próximos años. Esto permite generar cronologías con periodos prolongados en el tiempo, y conocer la climatología y forzantes ambientales de una localidad y la respuesta de los seres vivos (en este caso arboles) a estos eventos.

En el presente estudio se trabajó con la especie arbórea emblemática de Tacna, *Polylepis tarapacana*, una especie estudiada en esta temática, que tiene cronologías en los andes centrales en una extensión que abarca 4 países, Perú, Bolivia, Chile y Argentina. Por lo que la importancia radica en ampliar los registros dendrocronológicos en nuestra región para plantear escenarios futuros en base a la respuesta del patrón de ancho de anillos de esta especie, teniendo en cuenta que la región Tacna pertenece altamente sensible por su naturaleza semiárida.

## CAPÍTULO I

### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

#### 1.1 Antecedentes

La mayoría de los estudios dendrocronológicos en este género, se desarrollaron en la especie *Polylepis tarapacana*. Estudios basados en la anatomía del árbol mencionan que durante el verano, el incremento de la temperatura y así mismo el inicio de la temporada de lluvias, son condiciones que activan el cambium vascular y, asimismo, favorecen el desarrollo de los anillos de crecimiento anuales (Argollo et al., 2004). Algo que es lo contrario en la época de invierno, donde temperaturas extremas de -20 °C, acompañados de precipitaciones mínimas de ~100 mm, reducen su metabolismo y por lo tanto limitan su desarrollo (Rodríguez-Caton et al., 2021; Rodríguez-Ramírez et al., 2022).

En el Altiplano boliviano, se realizó cronologías que oscilan entre los 110 y 705 años, representando el registro de anillos de crecimiento a mayor altitud en el mundo (3900-4850 metros de altitud) y su fuerte relación con fenómenos océano-atmosféricos (Solíz et al., 2009). Esta compleja relación se usó para evaluar la respuesta de crecimiento de *Polylepis* su variabilidad según la temporada en el altiplano sur tropical (Christie et al., 2009).

Crispin-DelaCruz et al., 2022, en su estudio también llevada a cabo con la especie *Polylepis tarapacana*, presentaron una cronología de 400 años en los parches ubicados en Chiluyo-Tacna, a 5000 m.s.n.m. Además, encontraron una fuerte relación positiva con la temperatura del año actual que sugiere que el crecimiento radial puede verse favorecido por condiciones cálidas y menos nubladas durante el año de formación. De manera similar, las cronologías del ancho de los anillos, registraron una mayor sensibilidad a las influencias de ENOS (Crispín-DelaCruz et al., 2022).

Silva, 2012, trabajo con otra especie, *Polylepis rugulosa*, en su proyecto titulado “Estudio dendrocronológico de una población de *Polylepis rugulosa* en los Andes semiáridos de Arica y Parinacota” se reportó una edad del bosque de 200 años. El resultado fue el cálculo del crecimiento radial promedio de *P. rugulosa*, con un valor de 0.708 mm/año y una cronología que abarca el periodo de 1728-2009. Además, se encontró una relación positiva entre el crecimiento de *P. rugulosa* y la precipitación, por lo que estas poblaciones siguen el régimen hídrico durante el monzón de verano (Silva, 2012).

Morales et al., 2012, realizan la primera reconstrucción cuasi milenaria de precipitación para el Altiplano Sudamericano, basada en anillos de árboles de *Polylepis tarapacana*. Este registro de 707 años revela eventos extremos y oscilaciones en las precipitaciones, así como teleconexiones con fenómenos como El Niño-Oscilación del

Sur, observando una tendencia negativa en las precipitaciones desde la década de 1930, con los años más secos registrados en las últimas siete décadas (Morales et al., 2012).

Barichivich et al., 2009; analiza la respuesta climática de tres especies nuevas para la dendrocronología entre las latitudes 19° y 30°, donde *Kageneckia angustifolia*, *Proustia cuneifolia* y *Fabiana imbricata*, muestran correlaciones entre su crecimiento radial y la precipitación invernal, así como con la temperatura durante la temporada de lluvias. Además, se observa una influencia significativa de fenómenos climáticos como El Niño-Oscilación del Sur (ENSO) y la Oscilación Interdecadal del Pacífico (PDO) en la variabilidad del clima regional y el crecimiento de los árboles (Barichivich et al., 2009).

## **1.2 Formulación del Problema**

La gran variabilidad climática que existe en nuestro planeta, y más aún impulsada por el cambio climático, ha creado una necesidad de comprender como se han dado estos cambios en el pasado para estimarlas en el presente. Las observaciones modernas han demostrado que el sistema climático es enormemente complejo y difícil de predecir, debido a las constantes interacciones continuas entre la tierra, el mar, criósfera y la atmósfera (Elias, 2018).

Uno de los sistemas climáticos más complejos, está situado en los ecosistemas de los Andes Centrales, en particular aquellos ubicados en la Puna Seca (Olson et al., 2001) que son fuertemente influenciados por la variabilidad de factores climáticos, principalmente la precipitación y la temperatura. Dichos factores climáticos a su vez, se ven afectados por oscilaciones atmosféricas de escala global y regional que determinan la intensidad de las variaciones estacionales y la ocurrencia de años con climas extremos (Garreaud, 2009). La más común de las grandes oscilaciones atmosféricas en el hemisferio sur es el fenómeno del Niño (El Niño Southern Oscillation, ENSO). Con una temporal incierta, el fenómeno del Niño se expresa en anomalías térmicas en el Pacífico Sur-Central que tiene efectos modificadores sobre la precipitación y la temperatura a escala global, incluyendo los Andes peruanos (Timmermann et al., 2018).

Dado a que los sistemas de datación climática comenzaron a implementarse hace unos cuantos siglos, queda un vacío de información sobre eventos climáticos importantes en nuestra región. La paleoclimatología, contribuye a responder las fluctuaciones temporales que han ocurrido, mediante diferentes herramientas de datación, como la liquenometría, análisis de núcleos de hielo de glaciares, sedimento de océanos y lagos, anillos de árbol y entre otros (Shuman, 2021). Considerando a los anillos de árbol potencialmente aprovechables en nuestra región, ya que son

particularmente sensibles a los factores ambientales en los límites altitudinales y latitudinales del área de distribución de una especie. El género *Polylepis* presenta anillos de crecimiento y una gran sensibilidad a los patrones climáticos debido a las duras condiciones climáticas de los andes, a pesar de que en zonas tropicales se supone que no hay formación de los anillos. Diversos estudios dendrocronológicos (Argollo et al., 2004; Morales et al., 2012), donde se evaluó la influencia climática en poblaciones de *Polylepis*, mostraron su sensibilidad a variables climáticas como la precipitación y temperatura a nivel local y regional, y además a forzantes climáticos como es El Niño oscilación del sur. Por lo que, en el presente estudio con el uso de técnicas dendrocronológicas se plantea responder la siguiente pregunta.

**¿Cómo los factores climáticos influyen en el patrón del ancho de los anillos en las poblaciones de *Polylepis tarapacana* en Tacna?**

**1.3 Definición y delimitación del problema**

En muchas partes del mundo, la estacionalidad está bien marcada por la variación de la temperatura y precipitación, dos factores que tienen una gran influencia en los procesos metabólicos y fisiológicos que determinan el crecimiento de las plantas. Debido a ello, el ancho de los anillos de los árboles provee información útil sobre los acontecimientos climáticos que afectan a los ecosistemas forestales, ganando más

relevancia en los últimos años debido al cambio climático que se está experimentando en nuestro planeta (Babst et al., 2018).

*Polylepis* es un género de la familia rosácea distribuido a lo largo de todos los Andes y representado por 45 especies (Boza & Kessler, 2022). Compuesto por especies arbóreas y arbustivas, *Polylepis* forma algunos de los bosques ubicados a mayor altitud en el mundo, y por su ubicación en sectores altos de la cordillera de los Andes, dichos bosques se encuentran sometidos a riesgos asociados con el cambio climático (Cuyckens & Renison, 2018). El género *Polylepis* se encuentra adaptado a la marcada estacionalidad de los andes, donde la época más fría coincide con el déficit hídrico temporal, provocando que durante esta época se reduzca la producción de biomasa y el crecimiento de la planta. Esto afecta al patrón en el ancho de los anillos y además a su sistema vascular (Rodríguez-Ramírez et al., 2022). Los bosques de *Polylepis* son hábitat para una variedad de especies endémicas y, además, fuente de recursos naturales que los pobladores aledaños de las zonas altoandinas aprovechan para sus actividades diarias. Esto ha contribuido a la degradación y fragmentación de estos ecosistemas (Boza & Kessler, 2022). Sin embargo, proporciona indicadores potenciales de los factores ambientales que influyen en el crecimiento de los árboles que deben ser aprovechados.

La elaboración de una cronología y datación climática, será de gran utilidad para realizar reconstrucciones del clima y para estudiar la dinámica a escala local de los bosques. Debido a la resolución anual y la amplitud espacial de los registros de anillos de árboles, los análisis dendrocronológicos proporcionan archivos confiables y ubicuos para datar eventos pasados y para la reconstrucción paleoambiental. Por lo que se puede estimar periodos de grandes lluvias o grandes sequias, entre otros acontecimientos a futuro.

#### ***1.4 Hipótesis***

##### ***1.4.1 General***

El patrón del ancho de los anillos de las poblaciones de *Polylepis tarapacana* Phil. en Tacna, está determinado por factores climáticos

##### ***1.4.2 Especifica***

H1: Se puede obtener cronologías de ancho de anillos de *Polylepis tarapacana* en Tacna que presenten una señal común climática significativa y reproducible

H2: El patrón del ancho de los anillos de *Polylepis tarapacana* está fuertemente influenciado por la precipitación y la temperatura

H3: El patrón del ancho de los anillos de *Polylepis tarapacana* en Tacna, responde a Oscilaciones atmosféricas como: El Niño Oscilación del Sur (ENOS), Oscilación decadal del Pacífico (PDO), Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO).

## **1.5 Objetivos**

### ***1.5.1 Objetivo General***

- Evaluar la influencia de los factores climáticos en el patrón del ancho de los anillos en las poblaciones de *Polylepis tarapacana*.

### ***1.5.2 Objetivos Específicos***

- Obtener el patrón de ancho de anillos de *Polylepis tarapacana* en Tacna.
- Evaluar la influencia de la precipitación y la temperatura en el patrón del ancho de los anillos de las poblaciones de *Polylepis tarapacana* en Tacna.
- Determinar la influencia de las oscilaciones atmosféricas: ENSO, AMO y PDO; en el patrón del ancho de los anillos en las poblaciones de *Polylepis tarapacana* en Tacna.

## **1.6 Variables:**

### ***1.6.1 Variable independiente***

- Precipitación media mensual

- Temperatura Media mensual
- Índices Oceánicos: ENSO, PDO y AMO

### ***1.6.2 Variable dependiente***

- Ancho de anillos

## CAPITULO II

### MARCO TEÓRICO

#### **2.1 Genero *Polylepis***

*Polylepis* es un género distribuido a lo largo de los Andes centrales y septentrionales llegando a altitudes que pueden superar los 4800 m.s.n.m. y siendo un emblema entre los pueblos aledaños de este dominio (Boza & Kessler, 2022). Las especies de *Polylepis*, proporcionan hábitats adecuados para una amplia diversidad de otras plantas y animales en las zonas andinas. Por otro lado, también brindan servicios ecosistémicos a los pobladores, como leña, protección contra la erosión de suelos y entre otros (Boza & Kessler, 2022).

La distribución de las diferentes especies está definida por rangos altitudinales y algunos factores climáticos. En los límites altitudinales inferiores los limita las actividades humanas y los altitudinales superiores la temperatura (Kessler, 2002). En consecuencia, las diferentes especies adoptan diferentes adaptaciones morfológicas y ecofisiológicas para hacer frente para su posoperación (Macek et al., 2009).

#### **2.2 *Polylepis tarapacana***

Se distribuye por la cordillera volcánica occidental de los Andes, a una gran altitud entre los 4400 a 5103 m.s.n.m, formando los bosques a mayor elevación en el

mundo, abarcando desde el sur oeste del Perú, norte de Chile y el noroeste de Argentina (Boza & Kessler, 2022). Sus formas de vida son arbóreas y arbustivas, siguiendo un patrón marcado a expensas del gradiente altitudinal, comportándose de forma arbustiva en el límite superior de la vegetación y de forma arbóreo en el límite inferior, esto favorecido principalmente por la temperatura (López et al., 2023). Su tamaño es variable, según al comportamiento o formas de vida que tenga, desde 1 metro hasta máximos (pero extremadamente raro) de 7 metros de altura (Rojas et al., 2022).

Su clasificación taxonómica es la siguiente

**Reino:** Plantae

**Phyllum:** Streptophyta

**Clase:** Magnoliopsida

**Orden:** Rosales

**Familia:** Rosaceae

**Género:** *Polylepis*; Ruiz & Pav.

**Especie:** *Polylepis tarapacana*; Phil.

### **2.3 Crecimiento radial, anillos de árbol y Dendrocronología**

El proceso de formación del crecimiento radial, xilema secundario (madera) lleva a cabo una serie de etapas sucesivas: división celular, expansión (elongación y ensanchamiento radial), engrosamiento de la pared celular con participación de celulosa, hemicelulosa, proteínas de la pared y deposición de lignina, y finalmente la muerte celular programada. Cada ciclo anual de actividad cambial deposita hacia el interior el xilema y hacia el exterior floema. Mientras que el xilema se conserva y se acumula en el tallo formando los anillos de crecimiento, el floema, en cambio, se degrada progresivamente y se integra en el peridermo (Crang et al., 2018) .

En la mayoría de las especies leñosas de regiones templadas, el diámetro de los elementos vasculares y las traqueidas refleja las condiciones estacionales: un crecimiento acelerado en primavera, una disminución en verano y el cese de actividad en otoño. Este patrón da lugar a los anillos de crecimiento anuales y a las características visibles de la madera, conocidas como veta o veteado (Schweingruber, 1993). En coníferas y eudicotiledóneas templadas, estos anillos resultan claramente definidos. En contraste, en ecosistemas tropicales, donde las variaciones de temperatura y precipitación a lo largo del año son mínimas, los anillos de crecimiento suelen ser poco notorios. Como consecuencia, especies como el eucalipto o la caoba muestran un veteado más uniforme, denominado veteado liso.

En regiones con climas estacionales, los árboles forman anillos anuales a medida que crecen. El crecimiento radial del árbol se produce a medida que las células del cambium vascular se dividen. Durante el invierno, el árbol está inactivo (cambium permanece inactivo) y la producción de células cesa (Elias, 2021). Posteriormente en primavera, cuando se dan las condiciones térmicas e hídricas, el árbol se activa y estimula el nuevo crecimiento de cambium y comienza a producir células leñosas grandes y dispersas (madera temprana) (Bradley, 2015b). A finales de la primavera e inicios del verano, el crecimiento se hace más lento, las células producidas son más pequeñas y densas, con paredes gruesas (madera tardía), concluyendo con el final del verano, donde ya no se producen células a lo largo del tronco (Guiot & Daux, 2021). Al cortar un tronco o extraer una muestra, se pueden observar bandas alternas claras (madera temprana) y oscuras (madera tardía) que, combinadas, constituyen un anillo de crecimiento anual.

En ocasiones, sucede que, en condiciones desfavorables prolongadas, se genera un período de inactividad, seguido de una reanudación de la actividad, en consecuencia, resultará en un anillo faltante (Crang et al., 2018). Un anillo falso se forma cuando hay una interrupción del crecimiento, por ejemplo, una severa sequía primaveral, de la cual el árbol se recupera y comienza un nuevo anillo más adelante en la temporada de crecimiento (formando dos anillos).

La dendrocronología se enfoca en el estudio de como los árboles, debido a la fuerte estacionalidad de un determinado lugar, responden generando anillos de crecimiento anuales diferentes (Stoffel et al., 2013). Proporciona fechas absolutas precisas para el año calendario y reconstrucciones cualitativas y cuantitativas de variaciones ambientales en escalas estacionales a centurias (Dean, 1997). A diferencia de otros métodos de datación, donde la asignación de edad se basa solo del recuento automático de los depósitos anuales (Bradley, 2015a), la dendrocronología se basa en el conjunto de intercomparaciones de un gran número de cronologías con el fin de eliminar errores como anomalías en los anillos (ausencia de anillos o falsos anillos) (Guibal & Guiot, 2021).

Durante los últimos 30 años se ha convertido en una herramienta importante en la reconstrucción de los climas del último milenio en muchas áreas del mundo (Luckman, 2013). La investigación dendroclimática ha sido especialmente importante para documentar la frecuencia, la extensión geográfica y la gravedad de los episodios de sequía anteriores, así como los períodos de cantidades de lluvia inusualmente altas (Hughes, 2011). También se han aplicado para reconstruir los tipos de circulación atmosférica, como la Oscilación multidecadal del Atlántico (AMO) (Zhu et al., 2021), la Oscilación Decadal del Pacífico (Welsh et al., 2019), entre otros. En todos estos casos, las reconstrucciones paleoclimáticas han ampliado nuestra comprensión de la

variabilidad de estas oscilaciones y han proporcionado información sobre anomalías de gran amplitud sobre muchas regiones del mundo.

## **2.4 Climatología**

Es la ciencia que estudia los fenómenos atmosféricos y la variabilidad de eventos en un determinado lugar, y que al igual que la meteorología, comparten principios científicos pero difieren en la escala de tiempo y aplicación (Coleman & Law, 2015). La meteorología por su parte se caracteriza de ver los eventos actuales que suceden en la atmósfera y predecirlos a corto plazo (horas, días y/o semanas), teniendo en cuenta diferentes variables meteorológicas puntuales del momento, principalmente la temperatura y precipitación (sin embargo, también consideran la humedad relativa (HR), la nubosidad, la velocidad y dirección del viento y la presión atmosférica). Por otro lado la climatología, estudia los patrones meteorológicos a largo plazo (muchos años) en un lugar particular, teniendo un mayor énfasis en las interacciones dentro del sistema tierra – atmósfera (Molloy et al., 2008).

## **2.5 Régimen climático en los Andes del sur peruano**

Los Andes del sur del Perú consisten principalmente en una meseta, con una elevación media de 3.800 m situada en una frontera climática, donde los Andes actúan como una barrera entre la cuenca amazónica húmeda durante todo el año en el este y

la costa muy seca del Pacífico en el oeste (Ufimtsev, 2010). En los Andes del sur del Perú, las comunidades dependen fuertemente de las condiciones climáticas, debido a que la agricultura es principalmente de secano y a la relevancia de los glaciares y del deshielo como fuentes de agua dulce (Salzmann et al., 2013). Las tendencias a largo plazo y la variabilidad interanual de la precipitación y la temperatura influyen de manera decisiva en las condiciones de vida.

En esta región, la precipitación presenta un marcado ciclo anual, con meses invernales muy secos y la mayor parte de las lluvias concentradas entre primavera y otoño. Espacialmente, durante la primavera austral se observa un gradiente noreste–suroeste, asociado a un inicio más temprano de la temporada de lluvias en el sector nororiental. Durante el invierno austral (junio a agosto), la corriente en chorro subtropical alcanza su posición más al norte, lo que limita el ingreso de humedad proveniente de la Amazonía, debido al predominio de vientos del oeste sobre el Altiplano (altas planicies de Bolivia y parte del sur de Perú). Esta configuración atmosférica genera condiciones secas en la zona de estudio. Con la llegada del verano austral, la corriente en chorro se debilita y se desplaza hacia el sur, mientras que la convección profunda asociada a la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) se intensifica sobre la Amazonía (Garreaud et al., 2003). Dichos procesos, junto con la formación del Anticiclón Boliviano (Alta Bolivia) —originado por el calentamiento

latente en la Amazonía y la liberación de calor sensible en los Andes— favorecen el fortalecimiento de los vientos del este y el transporte de humedad hacia el Altiplano, lo que se traduce en un incremento de las precipitaciones en esta región (Lenters & Cook, 1999). Las tendencias de precipitación desde 1965 muestran baja coherencia espacial (Imfeld et al., 2021), salvo en verano austral, cuando en la mayor parte de la región se registran aumentos, y en primavera austral, cuando varias estaciones del sector centro-occidental evidencian disminuciones.

En cuanto a la temperatura, las tendencias de la máxima son más marcadas que las de la mínima en todas las estaciones y a nivel anual. La temperatura máxima presenta incrementos más fuertes en invierno y primavera, mientras que la mínima registra mayores tendencias en invierno. Las variaciones estacionales de la temperatura máxima son poco pronunciadas, con un máximo anual en primavera austral, relacionado con una menor cobertura nubosa respecto al verano. En contraste, las temperaturas mínimas muestran fluctuaciones más amplias a lo largo del año, posiblemente reforzadas por cambios en la radiación de onda larga entrante vinculados al ciclo de precipitaciones (Imfeld et al., 2021).

## **2.6 El niño Oscilación del Sur (ENSO)**

El fenómeno El Niño se caracteriza por el incremento anómalo de la temperatura superficial del océano, que se presenta aproximadamente cada 2 a 7 años,

alrededor de la época navideña, a lo largo de la costa peruana y que se propaga hacia el Pacífico ecuatorial central y oriental. La comprensión teórica de la dinámica y evolución del ENSO trasciende la meteorología y la oceanografía dinámica clásicas, ya que exige analizar cómo la atmósfera tropical responde a las variaciones en la temperatura superficial del mar, cómo el océano ecuatorial se ajusta a los cambios en los vientos y de qué manera operan e interactúan los diversos mecanismos de retroalimentación océano-atmósfera (Chang & Zebiak, 2003). Dicho conocimiento constituye la base para el desarrollo de sistemas de predicción del ENSO, fundamentales para los pronósticos climáticos operativos a escala estacional e interanual.

Durante la fase fría (La Niña) de la Oscilación del Sur, el anticiclón del Pacífico Sur oriental y la circulación atmosférica sobre la región de Indonesia se encuentran fortalecidos, lo que intensifica los alisios del este que recorren el Pacífico ecuatorial y acumulan aguas cálidas en el extremo occidental. Como consecuencia, se acentúa la pendiente este-oeste del nivel del mar, la capa mixta oceánica se profundiza hacia el oeste y la Corriente Submarina Ecuatorial se intensifica, generando condiciones de aguas particularmente frías frente a la costa occidental de Sudamérica y en una extensa franja al sur del ecuador que se prolonga desde la costa hasta el Pacífico abierto (Hastenrath, 2003).

Por el contrario, durante la fase cálida (El Niño), la interacción océano-atmósfera en el Pacífico funciona de manera distinta: los anticiclones del Pacífico Sur oriental e Indonesia se debilitan, lo que reduce el gradiente de presión zonal y, en consecuencia, los vientos alisios se tornan más débiles. Esto ocasiona un aplanamiento de la pendiente oceánica y de la termoclina, mientras que la Corriente Submarina Ecuatorial se debilita e incluso puede disminuir su influencia en el Pacífico oriental (Hastenrath, 2003). En síntesis, la fase fría favorece un escenario relativamente más estable y menos propenso a eventos extremos en la costa y sierra del Perú; en cambio, la fase cálida está asociada a impactos climáticos severos, como inundaciones en el norte del país y sequías en el sur.

## **2.7 Oscilación decadal del Pacífico (PDO)**

La Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) corresponde a una variabilidad oceánica de largo plazo en el Pacífico, que puede considerarse análoga a un evento de El Niño pero de mayor duración dentro de la variabilidad climática de esta cuenca (Zhang et al., 1997). El patrón asociado a la PDO se manifiesta a través de cambios en el clima tanto del Pacífico como de América del Norte. La PDO adquiere una fase positiva cuando las anomalías de la temperatura superficial del mar (SST) muestran enfriamiento en el Pacífico Norte y calentamiento a lo largo de la costa del Pacífico, acompañado de presiones a nivel del mar (SLP) inferiores al promedio en el Pacífico

Norte. En contraste, se encuentra en fase negativa cuando las anomalías de la SST son cálidas en el Pacífico Norte y frías a lo largo de la costa del Pacífico, con un SLP por encima del promedio en el Pacífico Norte (Hwang & Yoon, 2023). Aunque la distribución espacial de la PDO guarda similitudes con la del fenómeno ENSO, la diferencia radica en la escala temporal, pues mientras ENSO se desarrolla en intervalos interanuales, la PDO se manifiesta en escalas decenales.

## CAPITULO III

### MARCO METODOLÓGICO

#### 3.1 Tipo y diseño de la investigación

La presente investigación es de tipo básica, cuantitativa observacional/no experimental y descriptivo-correlacional, ya que no se manipularon las variables y se está tratando fenómenos ya estudiados y sus componentes, además se está cuantificando la relación entre variables.

Tiene un diseño longitudinal (multitemporal) y multi sitio, ya que se tomaron en cuenta el muestreo de árboles en varias zonas a lo largo de la extensión del bosque y se construyeron cronologías de ancho de anillos y se analizaron estadísticamente como series temporales frente a variables climáticas (precipitación, temperatura) e índices oceánicos (ENSO, AMO, PDO) para identificar relaciones correlacionales.

#### 3.2 Área de estudio

El área de estudio se da en el altiplano Tacneño con una altitud promedio de 4200 msnm y con picos nevados de hasta 5900 msnm. Siendo 20 puntos de muestreo a lo largo de toda la extensión del bosque de *Polylepis tarapacana*. Los puntos fueron ubicados en las cercanías de pueblos, caseríos o carreteras que facilitaron el acceso y además teniendo en cuenta el criterio de seguridad (Figura 1).

## **Figura 1**

*Vista panorámica de un bosque de *Polylepis tarapacana* a 4800 m.s.n.m. perteneciente de la Zona 3 del presente estudio, con vista al altiplano Tacneño y a la derecha el volcán Jucure.*



Estas zonas se caracterizan por poseer tipos de clima semiseco con otoño e invierno secos, frígido C (o, i) E', con temperaturas promedio máximas entre 9 a 13 °C y mínimas de -15 °C a -9 °C, y precipitaciones entre 300 a 500 mm al año. Y más

al Noreste, cerca al límite con Puno y Bolivia, tiene un clima Semiseco con invierno seco, semifrío C (i) D', con temperaturas promedio máximas entre 11 °C a 15 °C y mínimas de -11 °C a -7 °C, y precipitaciones entre 500 a 700 mm al año (SENAMHI, 2010).



### 3.3 Población

La población son los bosques o parches de *Polylepis tarapacana* de la región Tacna, que abarca las provincias de Tacna y Tarata en su extensión, incluyendo la variabilidad altitudinal, topográfica y de condiciones microambientales presentes en la región de estudio.

### 3.4 Muestra

Se empleó un diseño de muestreo espacialmente balanceado y basado en muestreo aleatorio estratificado por accesibilidad y heterogeneidad del rodal, con la siguiente estructura:

- **Unidades de muestreo (muestreos primarios):** 20 puntos distribuidos en 5 zonas (aproximadamente 4 puntos por zona), seleccionados en el área de estudio manteniendo una separación entre puntos de aproximadamente 5–10 km para reducir la autocorrelación espacial y garantizar que las muestras representen la variabilidad regional. La selección de puntos fue aleatoria dentro de criterios prácticos de accesibilidad y seguridad en campo dentro de cada zona.
- **Unidades de muestreo secundarias (individuos):** En cada punto se muestrearon aproximadamente 12 a 15 árboles de *P. tarapacana*, obteniendo

un aproximado de 300 individuos muestreados. Este número proporciona un equilibrio entre el esfuerzo de muestreo de campo y la necesidad de obtener cronologías robustas a nivel local y regional.

- **Selección de muestra:** Para minimizar el sesgo y asegurar la comparabilidad entre sitios, la selección de árboles en cada punto siguió criterios preestablecidos, observacionales y reproducibles: se eligieron individuos con porte sano, sin daños extensos por plagas, enfermedades o necrosis profundas, para evitar series de crecimiento distorsionadas por episodios recientes de mortalidad; se priorizaron ejemplares monofustales y bisfustales de gran porte en los casos de bisfustales se registró la condición y se seleccionó el fuste más representativo; se prefirieron árboles relativamente aislados o con espacio suficiente alrededor, evitando individuos en competencia inmediata o con supresión extrema para reducir los efectos de competencia local sobre la señal dendrocronológica

### **3.5 Toma y preparación de muestra**

Se colectaron núcleos de incremento (cores) para arboles vivos, usando barrenos Haglöf de 5.15 mm de diámetro. Después de la colecta en cada zona, se realizó un rotulado que correspondía a la nominación de cada cerro o centro poblado cercano. Los núcleos se secaron en tubos de papel de 6 mm para posteriormente realizar el

montaje en maderas con ranuras y se procedieron a pegar con goma de madera (cola sintética) los núcleos colectados y se lijaron con lijas de grano desde 120 a 1200 (Schweingruber, 1988). Para arboles muertos o caídos, se extrajeron cortes transversales usando una sierra de mano y de la misma manera se lijaron con lijas de grano desde 120 a 1200 (Speer, 2010).

### **3.6 Medición de Muestra**

Las muestras se analizaron con un escáner de la marca Epson Perfection V800 de alta resolución de ~4000 pixeles por pulgada (en sus siglas en inglés, Pixels Per Inch), configurándolo para aprovechar en lo máximo la resolución en cada muestra, según el tamaño de la montura del core. Cuando se obtuvieron las imágenes, se almacenaron en un computador y posteriormente se analizaron con el programa WinDendro de la marca Regent Instrument Inc., que, por defecto, opera con las imágenes proporcionadas por el escáner mencionado previamente.

### **3.7 Análisis de cronologías y estadísticas**

Se obtuvieron en total 6 cronologías maestras, que tuvieron la abreviatura según la zona que fueron muestreadas, siendo TR\_Z1, TR\_Z2, TR\_Z3, TR\_Z4 y TR\_Z5 (correspondiente a cada zona evaluada) y otra cronología maestra que representaba solo

los individuos de toda la región mejor correlacionados entre sí abreviado como TR\_Reg.

Las cronologías se analizaron visualmente para ver la concordancia entre picos y valles y el comportamiento entre los árboles muestreados. Posteriormente, se procesan utilizando el lenguaje de programación R que contiene el paquete Dendrochronology Program Library in R en sus siglas en inglés “dplR” (Bunn, 2008), que contiene una función basado en el principio de COFECHA para verificar los cruces y mediciones (Holmes, 1983), que, al ejecutarlo, se obtiene la correlación del patrón de crecimiento entre los diferentes arboles muestreados. De la misma forma, se comprueba esto de manera estadística para saber la inter-correlación entre árboles y verificar la señal común que los rige.

Asimismo, se calcularon otros estadísticos con dplR, necesarios para determinar la calidad y concordancia de la cronología maestra final:

### **3.7.1 Rbar**

El Rbar es la correlación media entre todas las series individuales de una cronología (Fritts, 1976). Refleja el grado de señal común entre los árboles y qué tanto comparten una variabilidad coherente (ej., respuesta al clima). Se calcula promediando las correlaciones Pearson de todas las posibles combinaciones de pares de series:

$$Rbar = \frac{2}{N(N-1)} \sum_{i < j} r_{ij}$$

Donde N es el número total de árboles y  $r_{ij}$  es la correlación entre un par de series.

Un Rbar alto indica que las series responden de forma similar a forzantes ambientales, mientras que valores bajos sugieren mayor ruido individual (edad, micrositio, perturbaciones locales).

### 3.7.2 EPS (*Señal Poblacional Expresada*)

El EPS es un estadístico fundamental en dendrocronología que mide en qué grado una cronología construida a partir de un número limitado de árboles representa fielmente la señal común de la población teórica de la cual provienen. En otras palabras, evalúa la confiabilidad de la cronología promedio respecto a la señal climática o ambiental que comparten los individuos. Matemáticamente, se expresa como:

$$EPS = \frac{N * \bar{r}}{(N * \bar{r}) + (1 - \bar{r})}$$

donde:

$N$  = número de series (árboles o núcleos) incluidas,

$\bar{r}$  = correlación media entre pares de series individuales (Rbar).

Valores de EPS mayores a 0.85 suelen considerarse como un umbral de confiabilidad aceptable (Wigley et al., 1984)

### **3.7.3 AR1 (Auto-regresión de primer orden)**

El AR1 mide cuánto del valor de un ancho de anillo depende del año anterior. Se obtiene como el coeficiente de autocorrelación de orden 1 en un modelo autorregresivo:

$$X_t = \phi_1 X_{t-1} + \varepsilon_t$$

Donde:

$X_t$  = Es el valor de la serie en el año t

$\phi$  = Es el coeficiente AR1,  $X_{t-1}$  es el valor del año anterior de la serie

$\varepsilon_t$  = Es el es un término de error aleatorio (ruido blanco), es decir, variación independiente que no depende del año previo.

En dendrocronología, un AR1 alto refleja persistencia biológica, es decir, la influencia del crecimiento del año previo (por reservas de carbohidratos, estado de vigor o condiciones hídricas acumuladas). Una cronología con bajo AR1 representa mejor la señal climática de cada año.

### **3.7.4 Sensibilidad Promedio (Mean Sensitivity o MS)**

La Mean Sensitivity cuantifica la variabilidad relativa de año a año en la serie de anillos (E. Cook et al., 1990). Es una medida de qué tan “sensible” es un árbol a fluctuaciones anuales (usualmente climáticas). Se calcula como el promedio de la diferencia relativa entre anillos consecutivos:

$$MS = \frac{1}{n-1} \sum_{t=1}^{n-1} \frac{|X_{t+1} - X_t|}{\frac{1}{2}(X_{t+1} + X_t)}$$

Donde  $X_t$  es el ancho de anillo en el año  $t$

Valores de MS altos indican fuerte variación interanual (bueno para detectar señales climáticas), mientras que valores bajos reflejan crecimiento más estable.

### **3.8 Extracción de datos climáticos y control de calidad**

Para el análisis climático se descargaron datos históricos de precipitación y temperatura de las estaciones meteorológicas del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) ubicadas en los centros poblados circundantes a la zona: Paucarani, Chuapalca, Alto Perú, Challapalca, Mazocruz y Capazo. Debido a que los registros históricos de las estaciones mencionadas, solo tienen datos desde 1964 al

2013 y 2017 al presente (y en algunos casos solo presentan valores de precipitación), se completaron los datos entre las estaciones con un mayor coeficiente de correlación, ayudado de un corrplot en R Studio, entre todas las estaciones usadas. Posteriormente, las estaciones mejor relacionadas entre sí, se usaron para estimar los datos faltantes con ecuaciones de regresión para estimar la precipitación y temperatura de los años faltantes. Una vez obtenido los datos, se obtuvieron las sumatorias de precipitación mensual y anual por cada año, y, para los datos de temperatura, se extrajeron promedios máximos y mínimos mensuales y anuales, esto con el fin de correlacionar los patrones climáticos con los patrones de crecimiento de los diferentes arboles muestreados.

En cuanto a los índices de ENSO, PDO y AMO, se descargaron los proporcionados por la NOAA que se encuentra en su base de datos, y es basada en la temperatura superficial de mar y anomalías en la temperatura superficial del mar.

### **3.9 Efecto del clima en el patrón de ancho de anillos**

A las cronologías de ancho de anillos que pasaron los test anteriores, se le aplicaron funciones exponenciales negativas para eliminar ciertas tendencias no climáticas (biológicas o propias del árbol) que afectan el patrón del ancho de anillos (Biondi & Qeadan, 2008). Posteriormente, fueron convertidos a una señal común entre todos los árboles, conocido técnicamente en el mundo de la dendrocronología como la

cronología maestra, esto usando dplR. Esta cronología maestra resalta las tendencias del patrón de ancho de anillos en el tiempo a nivel local o regional (según la dimensionalidad del muestreo).

Para determinar la relación que existe entre los factores climáticos y el ancho de anillos, se utilizó otra librería ampliamente usado llamado “TreeClim” también en el entorno del lenguaje de programación R (Zang & Biondi, 2015). Se realizó un análisis entre la temperatura - ancho de anillo y precipitación – ancho de anillo, para corroborar con la literatura, los potenciales meses de crecimiento de los individuos de las zonas muestreadas, ya que estudios muestran variabilidad en los resultados sobre el mes/meses que más afecta el crecimiento radial de *Polylepis tarapacana* (Argollo et al., 2004; Christie et al., 2009; Morales et al., 2012).

Finalmente se determinó con análisis de series de tiempo la relación entre los anillos de árbol y la temporada de crecimiento, basado en la sumatoria de PP y promedio de temperatura de los meses desde noviembre del año previo a marzo del año actual.

Y de la misma forma con los índices oceánicos para ver la influencia de eventos anómalos que influyen en la climatología y el crecimiento radial de la zona de estudio. Donde para comparar la cronología de anillos con los índices oceánicos se aplicaron

tres métodos de suavizado: una media móvil centrada de 24 meses (MA24), una media móvil centrada de 60 meses (MA60) y la tendencia obtenida por descomposición STL (STLtrend). Las medias móviles permiten filtrar la variabilidad de alta frecuencia MA24 atenúa la señal interanual y MA60 enfatiza variaciones plurianuales/decadales, mientras que STL separa explícitamente estacionalidad y tendencia mediante suavizado local (loess), resultando en una estimación robusta de la componente de baja frecuencia. El uso combinado de estos métodos proporciona una visión multi-escala: MA24 destaca señales pluri-anales, MA60 resalta señales multianuales/decadales relevantes para procesos fisiológicos, y STLtrend confirma la persistencia de tendencias sin confundirlas con la estacionalidad.

## CAPITULO IV

### RESULTADOS

#### 4.1 Medición y obtención del patrón de ancho de anillos de *Polylepis tarapacana*

Se midieron en total aproximadamente 240 muestras pertenecientes a un árbol cada uno, entre 12 individuos por puntos y fueron reduciendo su cantidad debido a fracturas de la muestra o por no presentar anillos notorios (Figura 3)

#### Figura 3

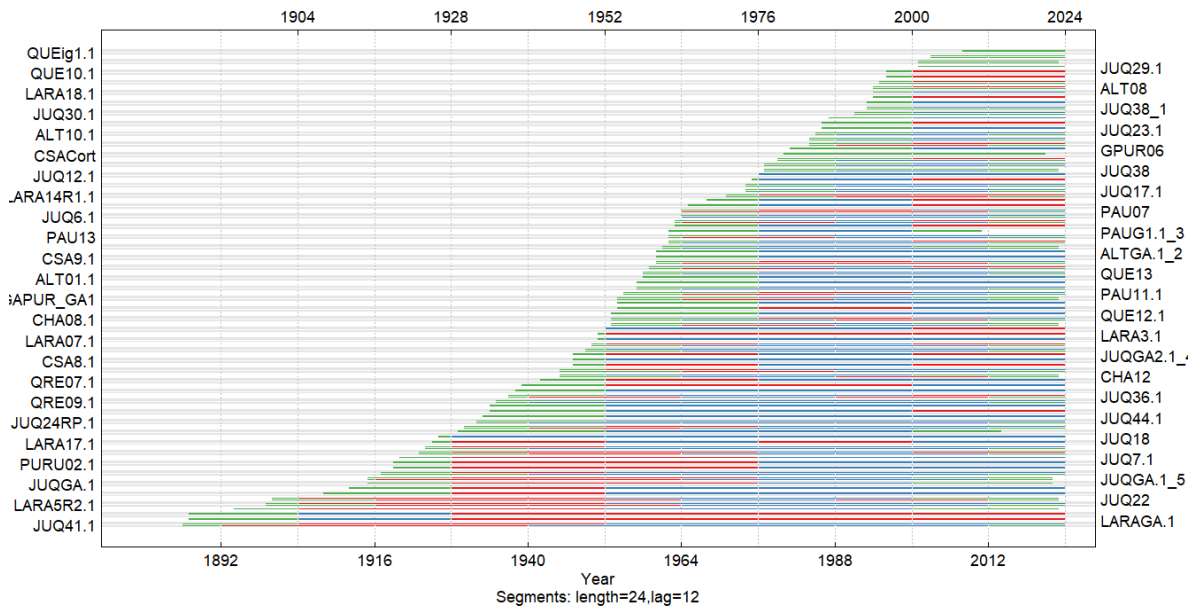
*Tipos de cores: core dañado (izquierda) y Core ideal (derecha) para análisis*



De las 6 cronologías obtenidas (TR\_Z1-5, y TR\_Reg), solo se analizaron 5, descartando las TR\_Z2, debido a su muy baja correlación y una desviación estándar alta, lo cual mostraba que existía una baja armonía entre las muestras. Esto se comprobó siguiendo los métodos descritos previamente, como lo fue el COFECHADO (Figura 4) que revelo el ruido y las muestras que tenían errores, por lo que se procedió a la verificación y a la limpieza de cada uno.

**Figura 4**

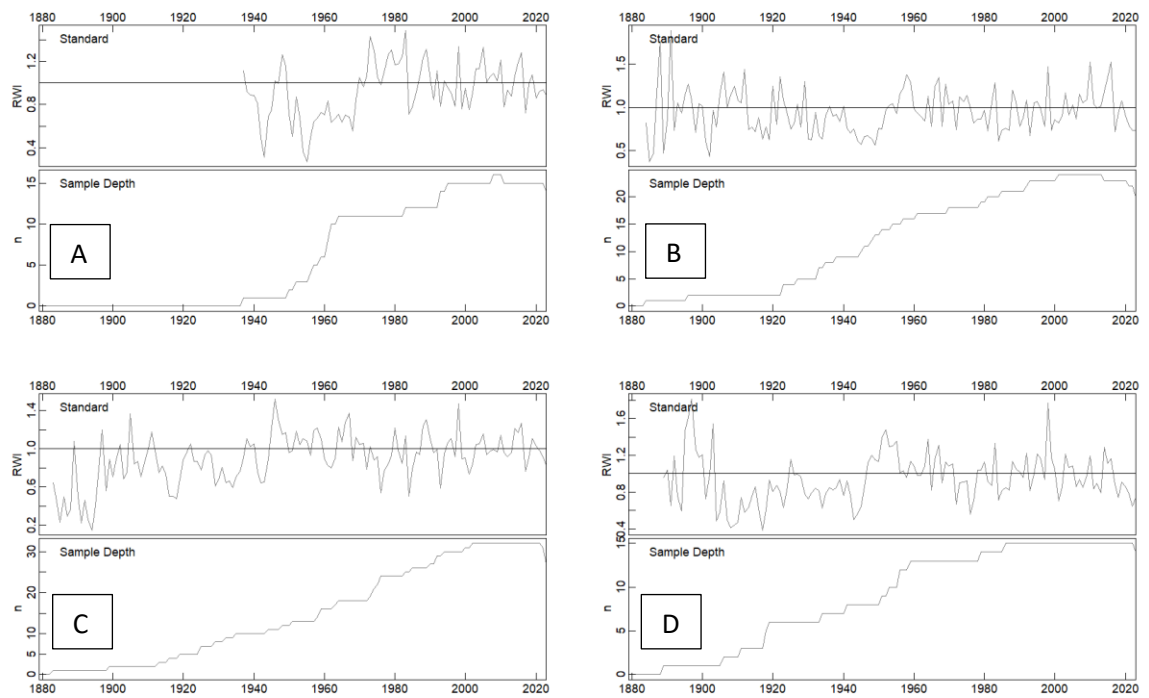
*Aplicación del paquete dplR con el principio de cofechado para las muestras colectadas.*



En forma paralela se trabajó con las imágenes y el programa WinDendro para verificar si es que hubo existencia de anillos erróneos y faltantes, y además si alguna muestra no era coherente con el resto de las cronologías, por lo que, una vez modificado la base de datos, se realizaron los estadísticos para ver la mejora. Se obtuvo que en cada zona (Figura 5) la inter-correlación fue de 0.36 a 0.45, que indica que existe una señal común en los árboles debido al ambiente. Asimismo, los árboles seleccionados para representar a toda la región por su alta correlación (Figura 6), alcanzo una inter-correlación de 0.52 con una desviación estándar de 1.2.

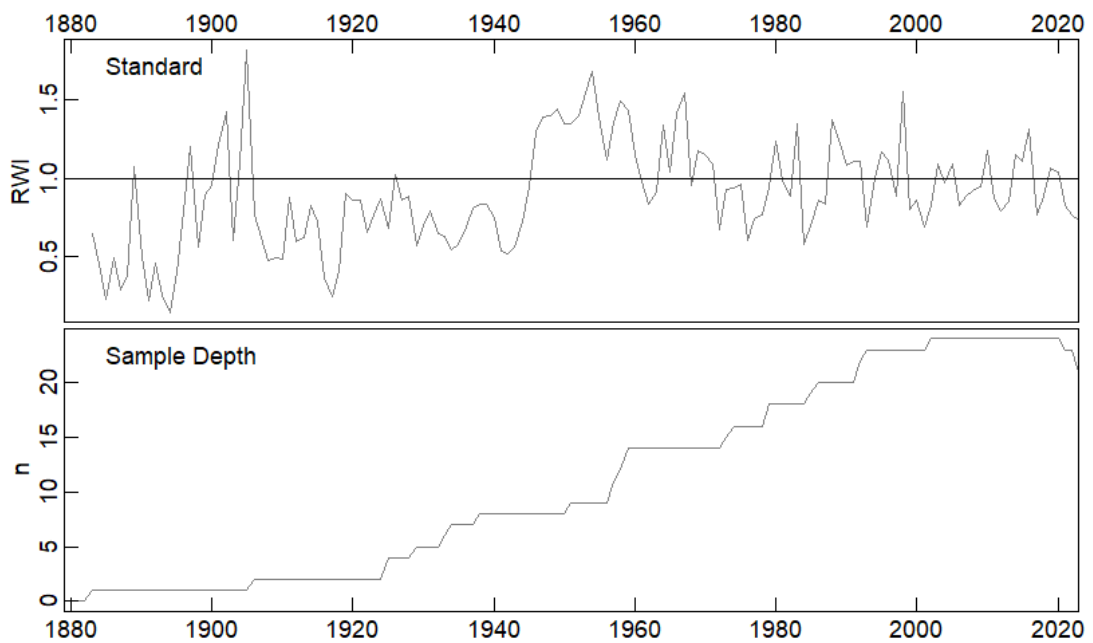
## Figura 5

*Cronologías maestras de las zonas incluidas en el presente estudio correspondientes a Z1, Z3, Z y Z5 (A, B, C y D respectivamente).*



**Figura 6**

*Cronología Maestra de TR\_Reg*



Las estadísticas completas se muestran en la tabla 1, revelando que en cada zona se tiene una correlación  $R_{bar}$  de 0.23 a 0.26 ( $p < 0.05$ ), el EPS varía entre 0.79 a 0.9, que es esta en el rango de lo aceptable para considerar que las cronologías son confiables. El AR1 o modelo de auto regresión de primer orden, muestra valores altos de 0.4 a 0.56 con un ( $p < 0.05$ ), indicando que el crecimiento radial del año actual, tiene una fuerte memoria biológica con el crecimiento de un año anterior (eventos anteriores

al crecimiento actual, afectan al ancho de anillos). Por otro lado, la sensibilidad media (MS), muestra valores entre 0.31 a 0.37, esto está dentro del rango de sensibilidad media (0.3-0.4), ósea que responden bien a eventos climáticos dominantes, mas no de manera determinante a cualquier fluctuación (Figura 7). Finalmente, los rangos de edad fueron desde 1883 al 2023 en su mayoría, y el mas pequeño fue desde 1937 al 2022 perteneciente a la Zona 1 (Z1)

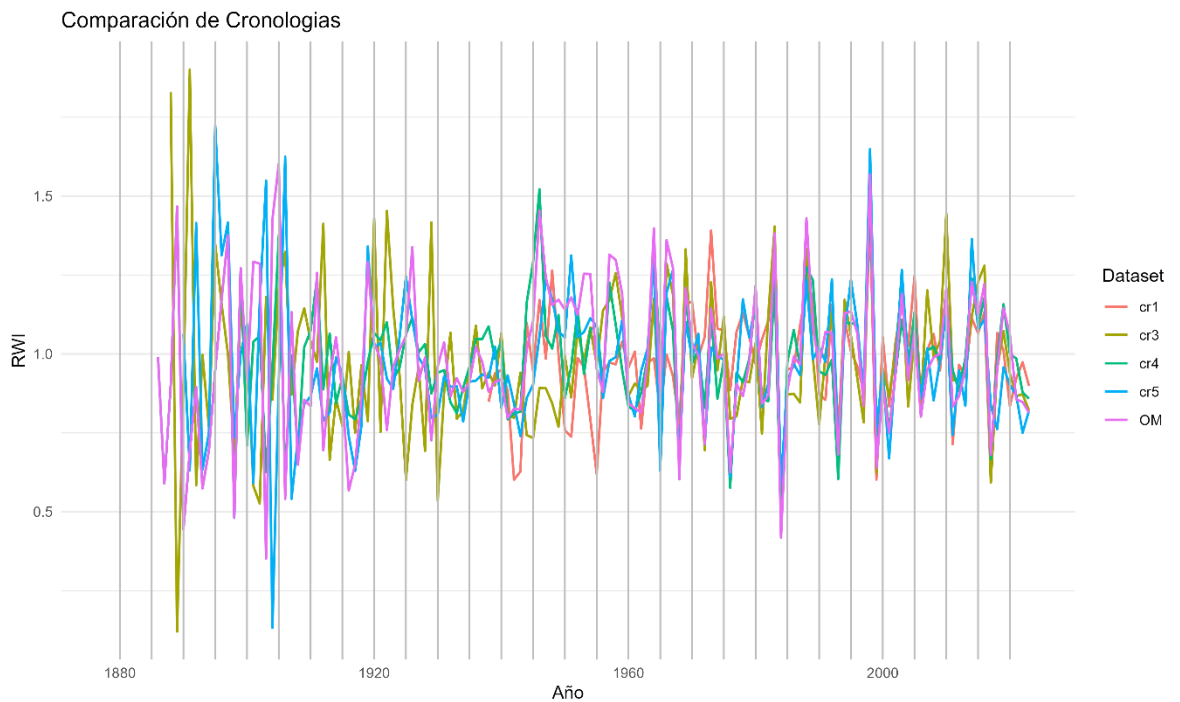
**Tabla 1**

*Estadísticos calculador con dplR para evaluar la calidad de las cronologías presentadas*

| ZONA | RANGO     | NUMERO DE ARBOLES | RBAR  | EPS   | AR1  | MS   | INTERCORR (STD. DEV) |
|------|-----------|-------------------|-------|-------|------|------|----------------------|
| Z1   | 1937-2022 | 16                | 0.229 | 0.79  | 0.56 | 0.31 | 0.34 (0.11)          |
| Z3   | 1884-2022 | 24                | 0.23  | 0.87  | 0.43 | 0.37 | 0.42 (0.13)          |
| Z4   | 1883-2022 | 21                | 0.25  | 0.908 | 0.43 | 0.31 | 0.40 (0.17)          |
| Z5   | 1889-2022 | 15                | 0.26  | 0.84  | 0.41 | 0.32 | 0.39 (0.16)          |
| REG  | 1883-2022 | 24                | 0.37  | 0.931 | 0.4  | 0.31 | 0.52 (0.13)          |

**Figura 7**

*Gráfico de líneas del índice de ancho de anillos (RWI) a nivel zonal y regional*



#### **4.2 Relaciones de Temperatura y Precipitación con el patrón de ancho de anillos**

La relación entre las variables climáticas temperatura y precipitación, con el ancho de anillos, evidencio alta correlación y significativa en cada zona y a nivel de región.

#### ***4.2.1 Zona 1***

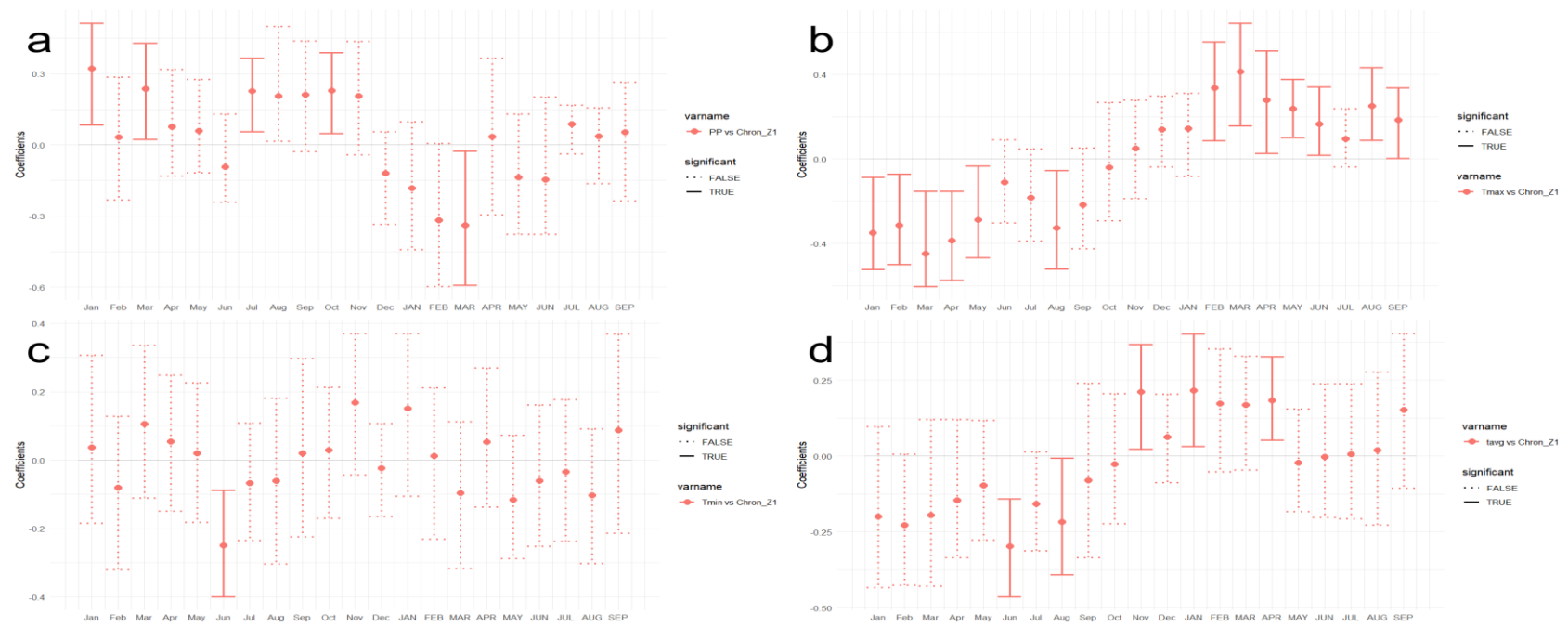
En la Zona 1, los arboles estan fuertemente influenciados por la precipitacion (Figura 8a) del verano previo, siendo significativo los meses de Enero y Marzo, tambien se ve afectado por posibles lluvias eventuales de Julio y Octubre. Se ve afectado de manera negativa por las lluvias del verano del año actual, siendo significativo el mes de Marzo.

En cuanto a las temperaturas, la temperatura maxima tiene un efecto claro, gran parte del verano del año previo al crecimiento tiene un efecto negativo al crecimiento radial, mientras que el año actual, un efecto positivo. Por otro lado, el frio invernal en esta zona tiene un efecto claramente negativo en el mes de Junio.

En terminos de temperatura promedio, el invierno previo y la primavera – verano actual, son favorables para el crecimiento en esta zona.

## Figura 8

Correlación del RWI de la Zona 1 y precipitación (a), temperatura máxima (b), temperatura mínima (c) y temperatura promedio (d)



### **4.2.2 Zona 3**

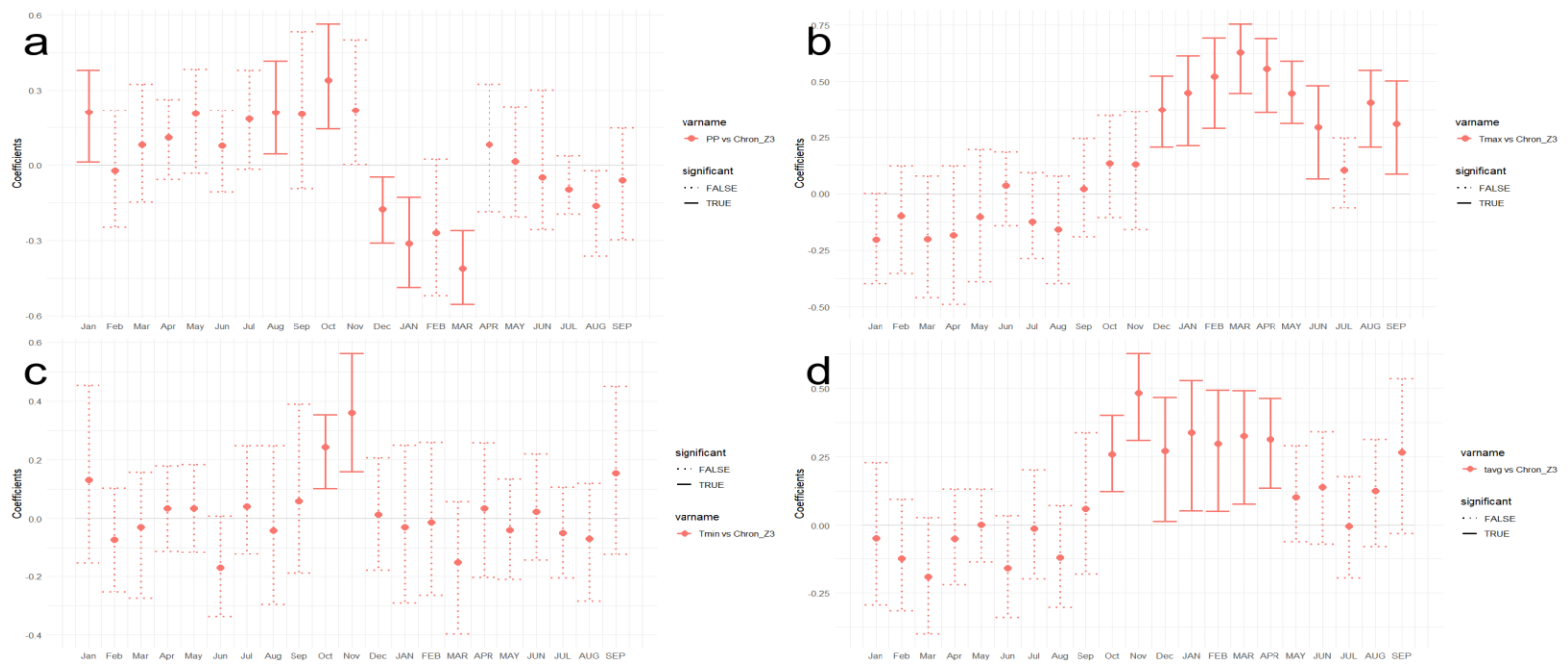
En esta zona, la precipitación del mes de enero del año previo al crecimiento, presento una relación positiva con el crecimiento radial, junto con lo que aparentemente son lluvias ocasionales de agosto y octubre. Para el verano del año de crecimiento actual, las precipitaciones de verano en general (diciembre, enero, marzo) fueron altamente correlativas y significativas, pero de manera inversa.

En cuanto a temperaturas, la temperatura máxima, en esta zona, el patrón de crecimiento solo se ve afectada fuertemente en el año actual, incluyendo todos los meses, a excepción del mes de Julio. La temperatura mínima no tiene relación inversa con el crecimiento, sin embargo, tiene relación positiva en la primavera (octubre y noviembre).

En general, la temperatura promedio, afecta de manera positiva al crecimiento radial en esta zona y en la temporada de crecimiento previa y actual que abarca la estación de primavera y verano (octubre – marzo) y un mes de otoño del año actual.

## Figura 9

Correlación del RWI de la Zona 3 y precipitación (a), temperatura máxima (b), temperatura mínima (c) y temperatura promedio (d)



#### **4.2.3 Zona 4**

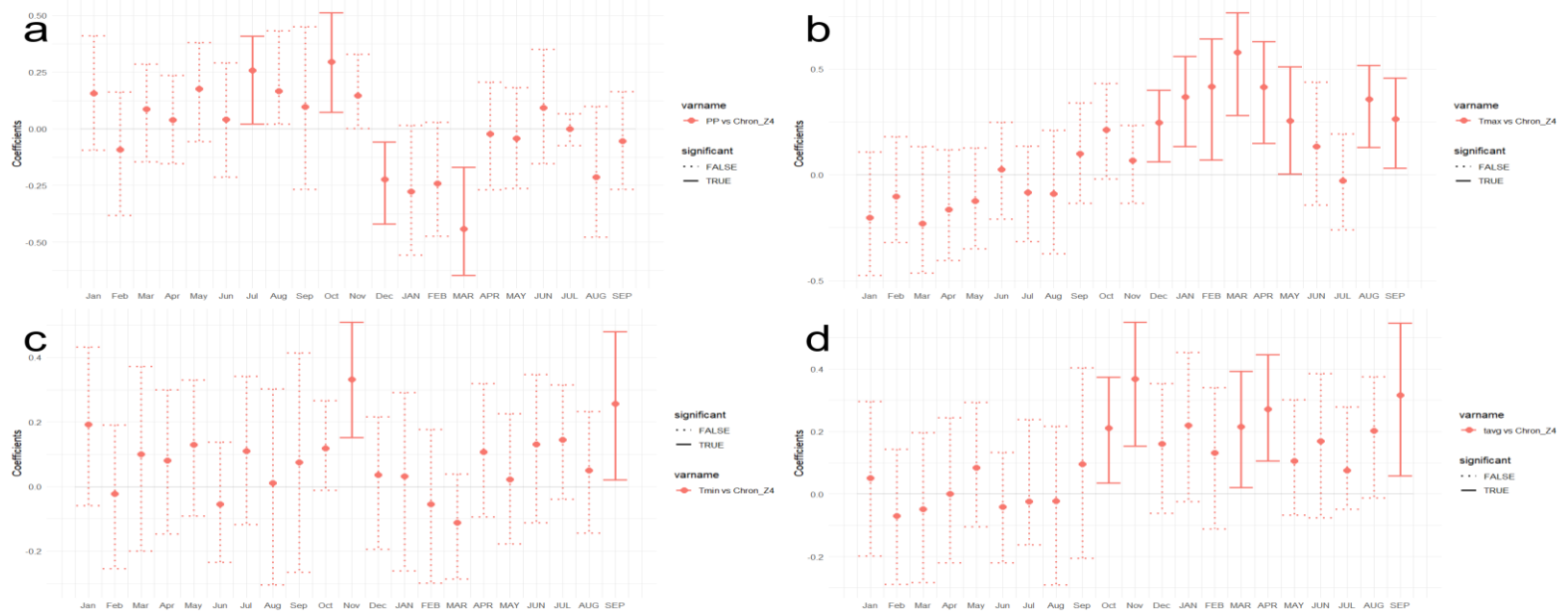
La Zona 4, la precipitación tiene una relación positiva con las lluvias ocasionales de julio y octubre del año previo al crecimiento, y una relación negativa con la lluvia de diciembre del año previo y marzo del año actual al crecimiento (englobando un verano).

Las temperaturas máximas tienen un efecto positivo en el crecimiento radial del año actual en todos los meses a excepción de junio y julio. Por otro lado, la temperatura mínima tuvo un efecto positivo en noviembre del año previo, evidenciando el aumento de temperatura para esta temporada.

En cuanto a la temperatura promedio, el aumento de temperatura de octubre y noviembre del año previo (primavera) favorecen positivamente al crecimiento radial, de la misma forma con el verano del año actual al crecimiento.

## Figura 10

Correlación del RWI de la Zona 4 y precipitación (a), temperatura máxima (b), temperatura mínima (c) y temperatura promedio (d)



#### **4.2.4 Zona 5**

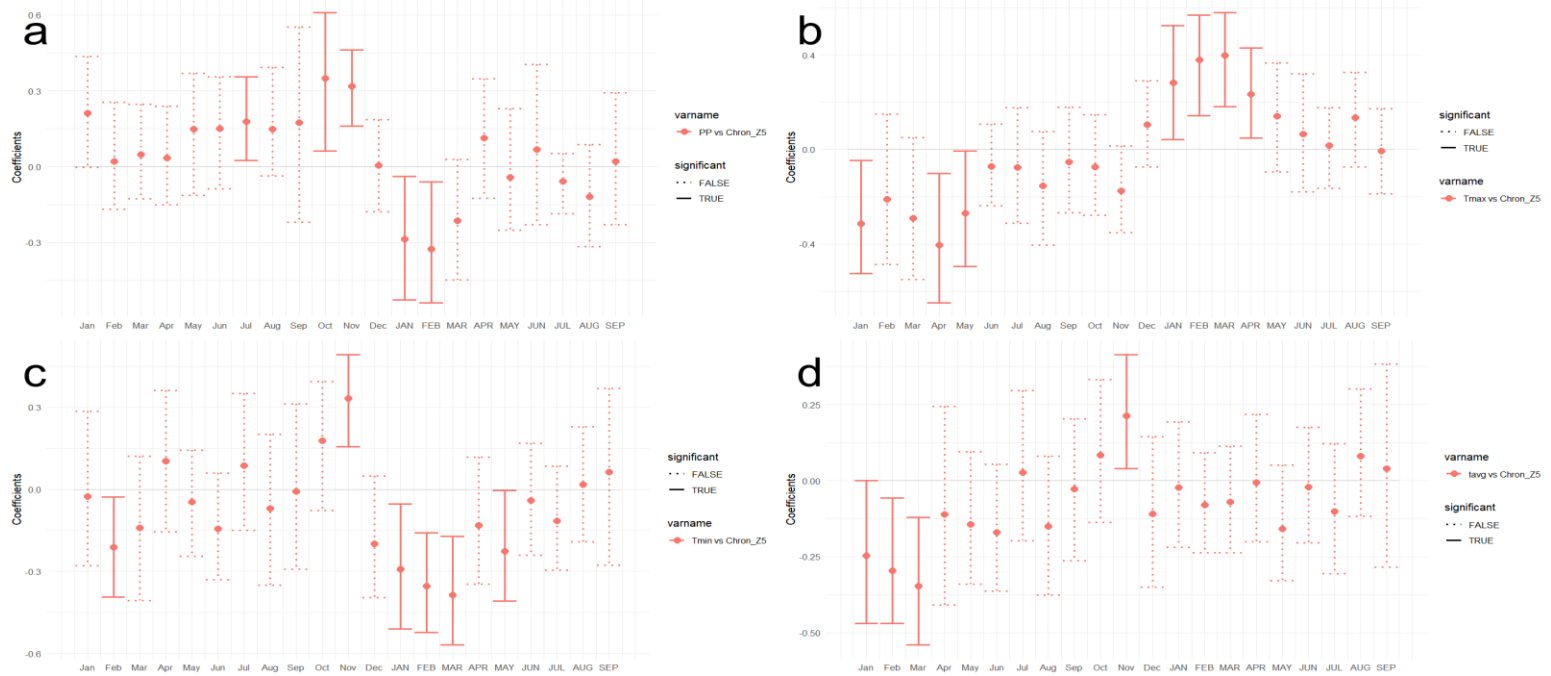
Para la Zona 5 (figura 11), la precipitación en enero del año previo tuvo un impacto positivo, pero no realmente significativo, mientras las lluvias espontáneas en julio favorecieron positivamente el crecimiento en el año previo. Por otro lado, las lluvias del año previo pertenecientes a octubre y noviembre tuvieron una alta correlación con el crecimiento radial. Y de manera inversa enero y febrero (verano actual) tuvo un efecto negativo con el crecimiento radial.

Para estas zonas, la temperatura máxima tuvo un efecto negativo en el verano previo y parte del otoño previo (enero, abril y mayo), y una relación fuertemente positiva en el verano actual (enero, febrero, marzo) y abril.

En términos de temperatura promedio, todos los meses del verano previo tuvieron un efecto negativo en el crecimiento, mientras que el mes de noviembre del año previo, tiene correlaciones positivas y altas en el crecimiento de los árboles en esta Zona.

## Figura 11

Correlación del RWI de la Zona 5 y precipitación (a), temperatura máxima (b), temperatura mínima (c) y temperatura promedio (d)



#### ***4.2.5 Región***

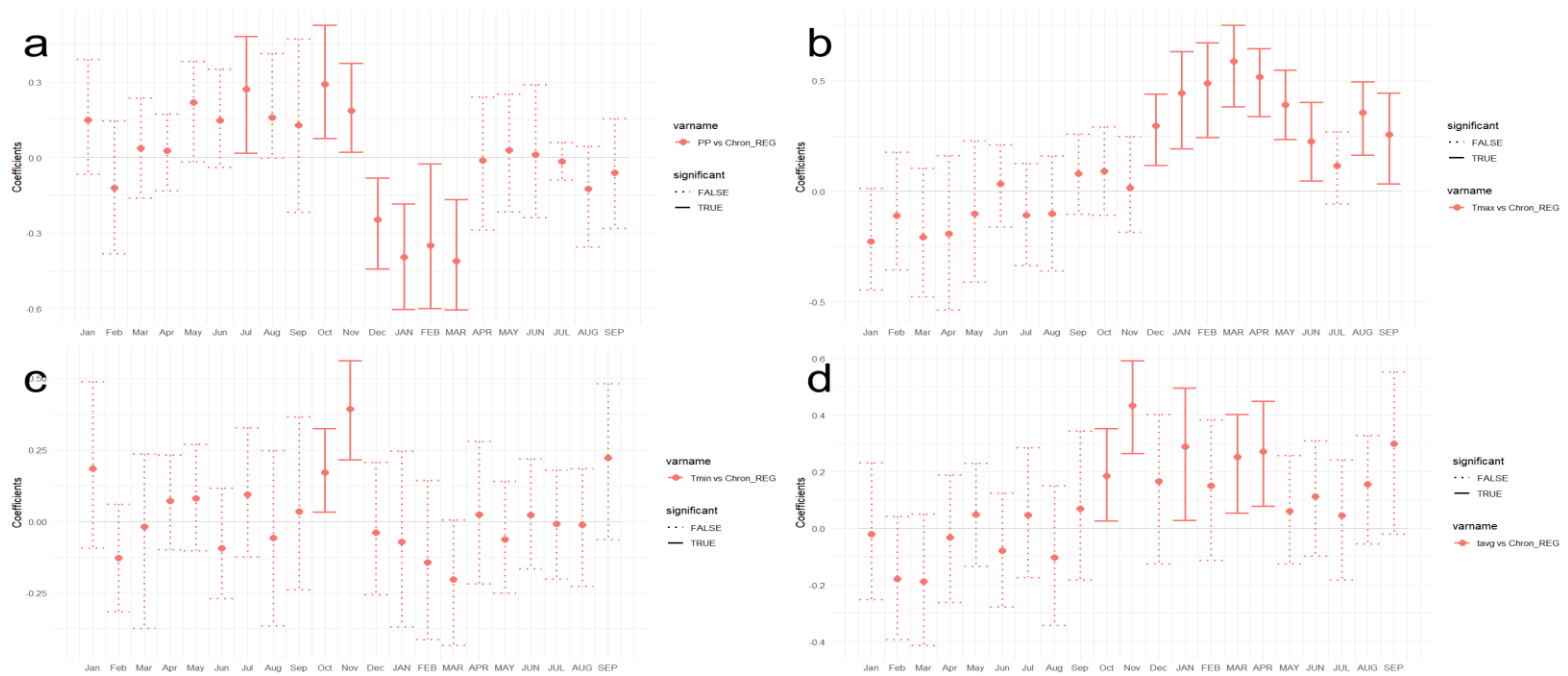
A nivel de región con los árboles seleccionados por su alta sincronía entre sí, presento una alta relación con la precipitación de los meses de Julio, octubre y noviembre del año previo, y una correlación inversa en las lluvias del verano actual (diciembre, enero, febrero y marzo).

En cuanto a las temperaturas, en la región Tacna, el efecto de la temperatura máxima del año actual de crecimiento, fue muy alto y significativo en todos los meses. Mientras que la temperatura mínima, favoreció solo en los meses de octubre y noviembre del año previo.

En la temperatura promedio, y concordancia con lo mencionado, los meses de octubre y noviembre del año previo y el verano del año actual, tienen una relación positiva con el crecimiento radial en la región.

## Figura 12

Correlación del RWI regional y precipitación (a), temperatura máxima (b), temperatura mínima (c) y temperatura promedio (d)



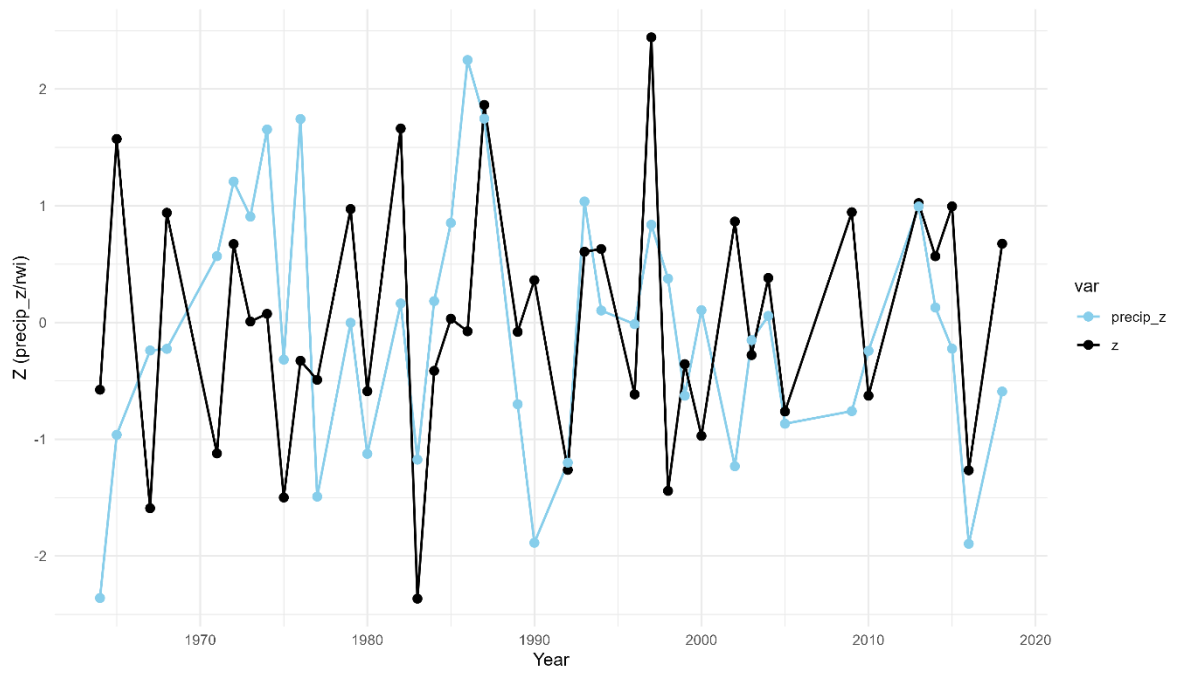
#### ***4.2.6 Análisis temporal entre variables climáticas y cronologías***

En el análisis temporal, se realizaron análisis de correlación temporal entre las épocas de crecimiento según los gráficos de correlación realizados con TreeClim, para corroborar el comportamiento temporal. En cuanto a la precipitación, se obtuvo una buena correlación con la precipitación acumulada desde octubre a enero, lo que correspondería a la mitad de un año completo, al probar con la sumatoria de todo un año hidrológico que comprendería desde el inicio de lluvias de octubre a marzo, hubo una correlación nula, mientras que el periodo previamente mencionado (figura 13), hubo un  $r=0.29$  con un  $p$  valor= $0.06$  (casi en el rango de la significancia de  $0.05$ ). Entonces para corroborar si hay una mayor relación entre picos y valles de cada serie temporal, se analizaron las banderas de la cronología hecho con el algoritmo de Hampel y para la precipitación con percentiles de 10 y 90 (secos y húmedos respectivamente).

Esto mostro que hay relación entre los años húmedos y secos (figura), pero de forma no significativa. Sin embargo, el análisis entre las banderas de Hampel de las cronologías y su relación con la precipitación, fue altamente positivo y significativo ( $r=0.67$ ,  $p=0.017$ ) esto muestra que la precipitación de los meses de octubre a enero, controla los valores atípicos del crecimiento radial, mas no controla explícitamente el crecimiento año a año (influye, pero no determina).

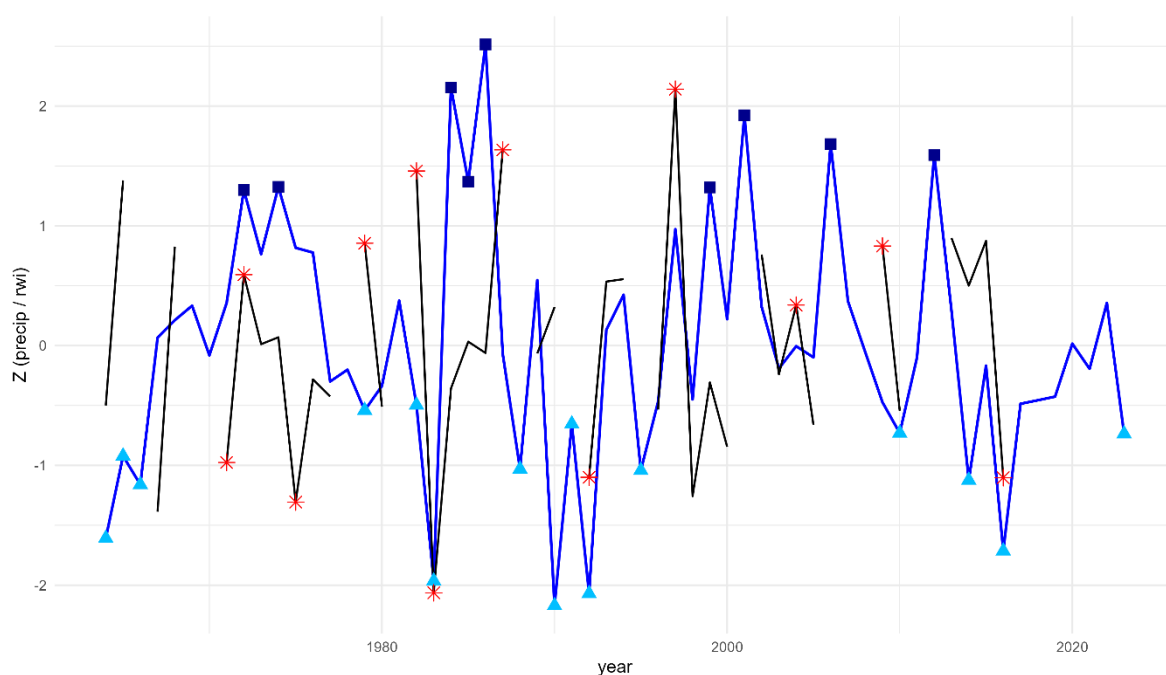
**Figura 13**

*Series temporales comparando cronología de ancho de anillos (línea negra) y precipitación acumulada del año de crecimiento (celeste).*



**Figura 14**

*Series temporales de flags de cronología de ancho de anillos (línea negra) y flags de precipitación acumulada del año de crecimiento (línea azul).*



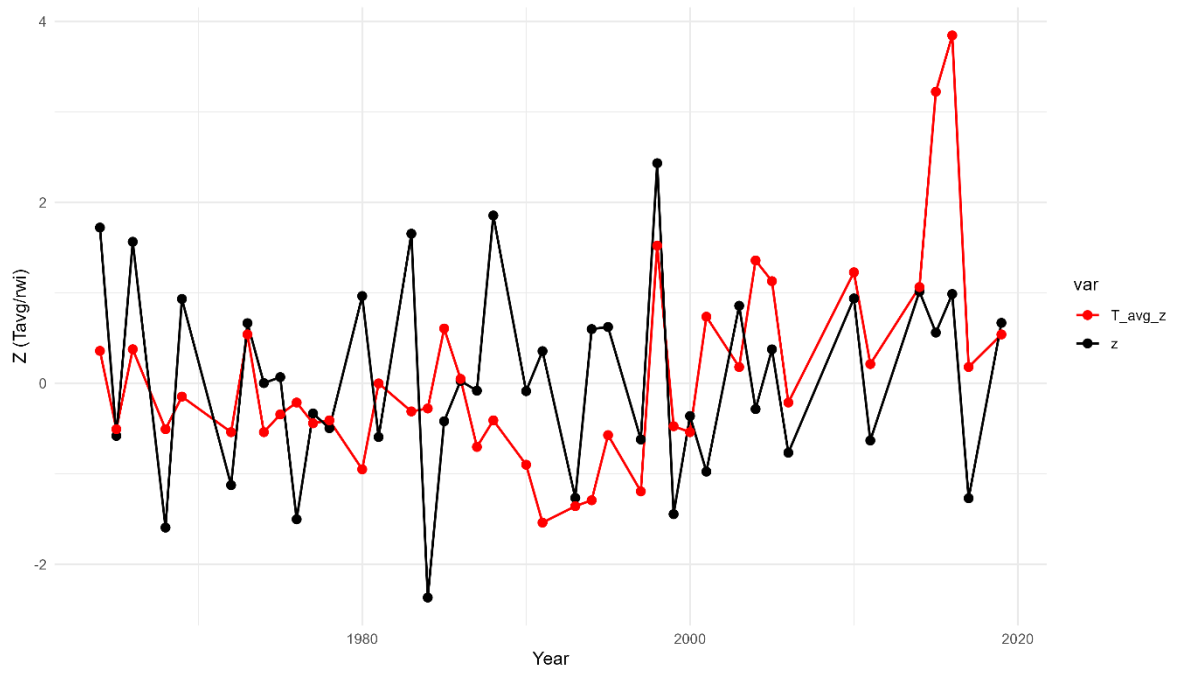
*Nota:* Símbolos cuadrados azul oscuro, corresponden a eventos muy húmedos, encima del percentil 90. Los triángulos celestes corresponden a eventos muy secos, debajo del percentil 10. Los asteriscos rojos pertenecen a valores atípicos de la cronología detectado por el algoritmo de Hampel.

En cuanto al factor temperatura, parece ser el mas dominante para el crecimiento radial de *Polylepis tarapacana* (Tabla 2). Al experimentar con la

temperatura promedio (figura 15) del periodo de crecimiento enero-marzo, se encontró una correlación media y significativa de  $r=0.29$  y  $p\text{-valor}=0.04$ . Sin embargo, al probar con la temperatura máxima (figura 16), alcanzo una muy alta correlación y altamente significativa ( $r=0.63$ ,  $p\text{-valor}=8.71E-06$ ). Lo que sugiere que es la temperatura máxima en el periodo de crecimiento es el principal modulador del patrón de ancho de anillos de esta especie.

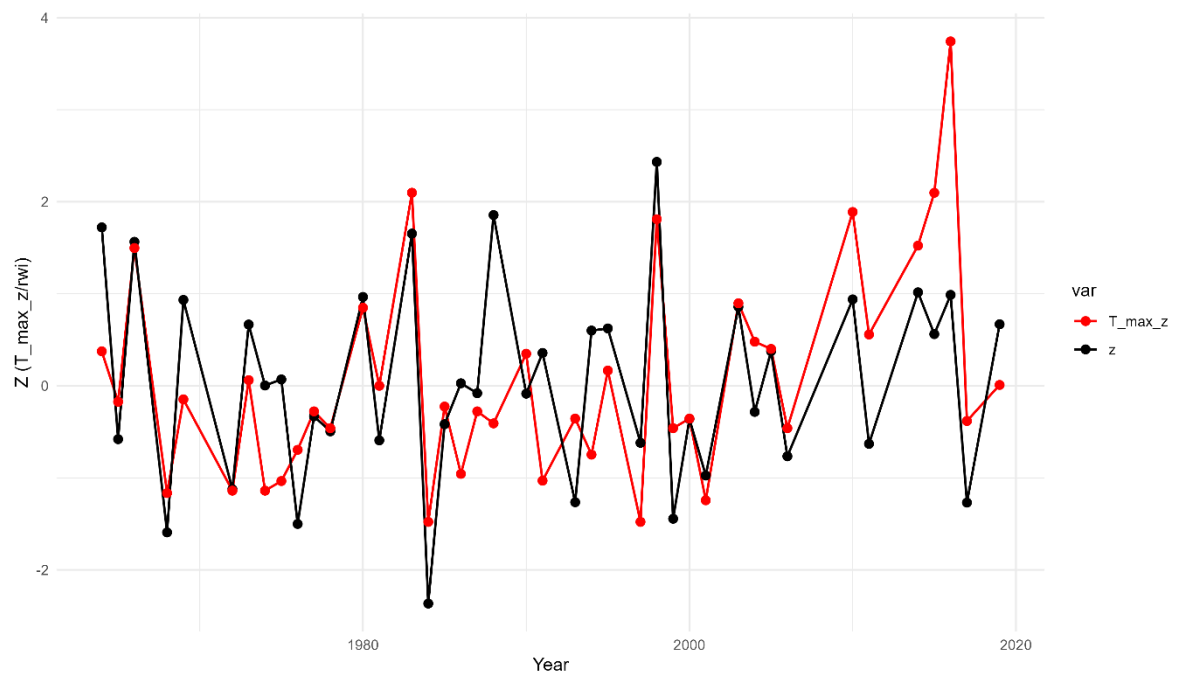
**Figura 15**

*Series temporales comparando cronología de ancho de anillos (línea negra) y temperatura promedio del año de crecimiento (línea roja).*



**Figura 16**

*Series temporales comparando cronología de ancho de anillos (línea negra) y temperatura máxima del año de crecimiento (línea roja).*



**Tabla 2**

*Estadísticos de correlación de series temporales de ancho de anillos y variables climáticas*

| <b>Relación</b> | <b>Experimento</b> | <b>n</b> | <b>coeficiente de correlación</b> | <b>p-valor</b> | <b>Intervalo de Confianza</b> |
|-----------------|--------------------|----------|-----------------------------------|----------------|-------------------------------|
| <b>PP_RWI</b>   | dry                | 10       | 0.22                              | 0.51           | -0.43-0.72                    |
|                 | wet                | 4        | -0.25                             | 0.61           | -0.88-0.69                    |
|                 | Hampel             | 10       | 0.67                              | 0.017          | 0.15-0.89                     |
|                 | normal             | 40       | 0.29                              | 0.06           | -0.01-0.55                    |
| <b>TMAX_RWI</b> | normal             | 40       | 0.63                              | 8.71E-06       | 0.40-0.78                     |
| <b>TAVG_RWI</b> | normal             | 40       | 0.31                              | 0.04           | 0.01-0.57                     |

### **4.3 Relación con Índices oceánico**

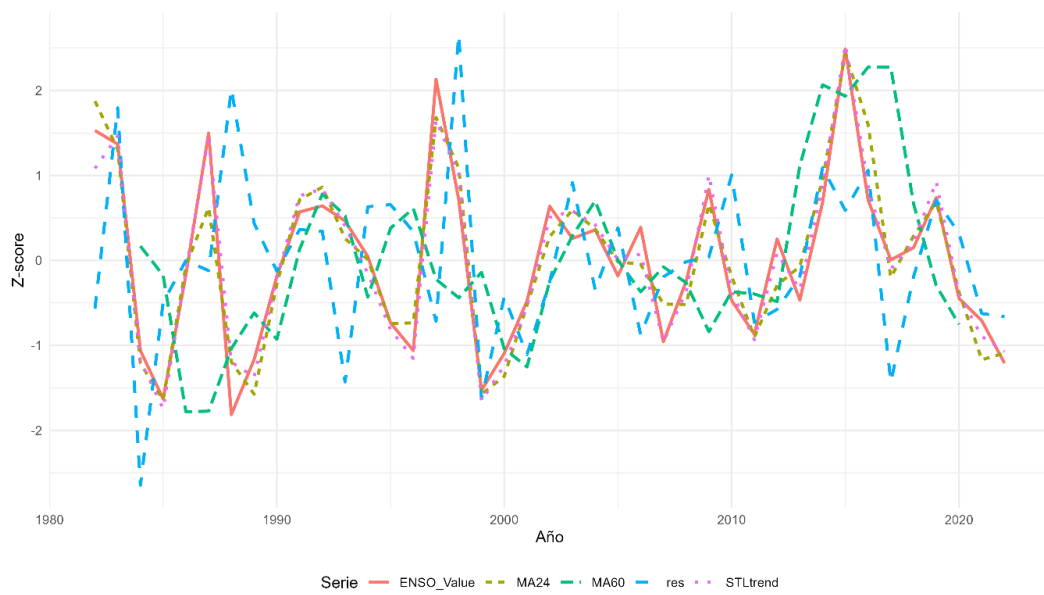
La influencia de las anomalías oceánicas, tuvieron relación con el patrón de ancho de anillos de *Polylepis tarapacana*, aunque no de manera contundente.

#### ***4.3.1 Influencia de temperatura superficial del océano pacifico Zona El Niño 3 (ENSO)***

De las 4 pruebas que se hicieron para relacionar la temperatura superficial del mar del pacifico en la zona el Niño 3, el suavizado que mayor correlación tuvo fue la de 2 años (MA24) que obtuvo un  $r=0.36$  con  $p<0.05$ . El suavizado a 5 años de amplitud, no capto ninguna relación  $r=0.02$ . Luego el suavizado STL, obtuvo buena correlación de igual manera  $r=0.33$  con  $p<0.05$ . Finalmente, los datos crudos de la temperatura superficial del mar, dieron un  $r=0.2$ . Por lo que la influencia plurianual de rangos de 1 a 2 años ENSO, parece ser la respuesta optima del patrón de ancho de anillos.

**Figura 17**

*Series temporales entre anomalías de la temperatura superficial del mar pacifico zona el Niño 3 (ENSO) y ancho de anillos estandarizado (Z-scores).*



Nota: ENSO\_Value son valores crudos (línea solida naranja), MA24 ajuste 2 años (guiones cortos verde oscuro), MA60 ajuste 5 años (punto guion verde claro), STLtrend (punteado rosa) y Z scores (res) de ancho de anillos (guiones celeste)

### 4.3.2 Influencia de Oscilación decadal del Pacifico (PDO)

Este índice tiene la más baja relación con el patrón de ancho de anillos con los suavizados realizados al índice PDO, la relación más alta que obtuvo fue con STL con un  $r=0.21$ . Mientras que el resto no paso de ese umbral. Sugiriendo que probablemente la influencia sea aún más retrasada o en momentos específicos de anomalías en conjunto con otras oscilaciones.

#### Figura 18

*Series temporales entre el índice de Oscilación decadal del Pacifico (PDO) y ancho de anillos estandarizado (Z-scores).*



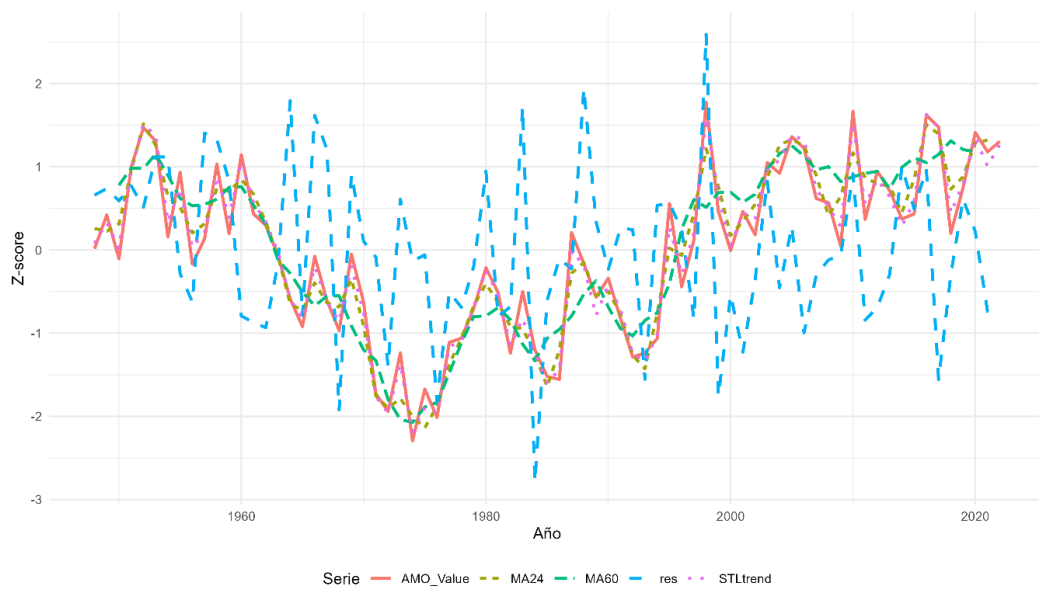
Nota: PDO\_Value son valores crudos (línea solida naranja), MA24 ajuste 2 años (guiones cortos verde oscuro), MA60 ajuste 5 años (punto guion verde claro), STLtrend (punteado rosa) y Z scores (res) de ancho de anillos (guiones celeste)

#### ***4.3.3 Influencia de la temperatura superficial del mar atlántico (AMO)***

Aunque los andes Tacneños se encuentren a más de 5 mil kilómetros de distancia del océano Atlántico, las anomalías que suceden ahí, tienen relación con el patrón del ancho de anillos (Figura 19). Los datos crudos presentaron la mayor relación con valores de  $r=0.247$  y  $p<0.05$ . Mientras que el suavizado STL, presento un  $r=0.21$  y  $p<0.05$ . Otro suavizado fue el MA24, que presento rastros de relación,  $r=0.19$ . El suavizado de 5 años MA60, presento igualmente rastros de relación con  $r=0.13$ .

**Figura 19**

*Series temporales entre anomalías de la temperatura superficial del mar atlántico (AMO) y ancho de anillos estandarizado (Z-scores).*



Nota: AMO\_Value son valores crudos (línea solida naranja), MA24 ajuste 2 años (guiones cortos), MA60 ajuste 5 años (punto guion), STLtrend (punteado) y Z scores (res) de ancho de anillos (guiones)

**Tabla 3**

*Correlación entre ancho de anillos y anomalías oceánicas suavizadas.*

| <b>Anomalía Oceánica</b> | <b>Suavizado</b> | <b>Correlación</b> | <b>n</b> |
|--------------------------|------------------|--------------------|----------|
| <b>ENSO</b>              | MA24             | 0.36               | 40       |
|                          | MA60             | 0.02               | 38       |
|                          | STLtrend         | 0.33               | 40       |
|                          | Crudo            | 0.2                | 40       |
| <b>PDO</b>               | MA24             | 0.146              | 135      |
|                          | MA60             | 0.009              | 134      |
|                          | STLtrend         | 0.21               | 140      |
|                          | Crudo            | 0.13               | 140      |
| <b>AMO</b>               | MA24             | 0.19               | 74       |
|                          | MA60             | 0.13               | 71       |
|                          | STLtrend         | 0.21               | 75       |
|                          | Crudo            | 0.247              | 75       |

## CAPÍTULO V

### DISCUSIÓN

#### 5.1 Medición y obtención del patrón de ancho de anillos

Se obtuvieron 4 cronologías de diferentes zonas que abarcan la totalidad de la distribución de *Polylepis tarapacana* en la región Tacna, y 1 cronología con los árboles mejores relacionados de toda la extensión del bosque del extremo austral peruano, en total usándose más de 140 árboles en este estudio. Se encontró una buena relación entre cada zona, coincidiendo con los estadísticos encontrados en diversos estudios pioneros desarrollados en esta especie en zonas cercanas al área de estudio del norte de Chile y Bolivia (Argollo et al., 2004; Morales et al., 2012; Moya & Lara, 2011; Solíz et al., 2009). Principalmente destacando que la correlación  $r_{bar} \sim 0.3$ , el MS tiende a ser 0.31 y el EPS tiene a 0.85. Aunque estos valores son relativamente bajos comparados con cronologías de otras latitudes y grupo vegetal como las coníferas (Gori, 2014; Loewe-Muñoz et al., 2024), ofrecen una buena respuesta conjunta a los estímulos ambientales interanuales de los eventos climáticos a nivel regional y a nivel global (relación con oscilaciones atmosféricas). Sin embargo, existen ligeras diferencias de zona en zona, por lo que las cronologías no son siempre lineales y difieren según la localidad en donde se encuentre, y es algo que asimismo coincide con la literatura que realizó una correlación entre series de diferentes localidades (Solíz et al., 2009). Esto es bien

explicado en muchos estudios y enfoques relacionados con la biología del árbol o el individuo (genética, fisiología, edad, etc.), al ser seres vivos van a tener una serie de interacciones con otros individuos que pueden crear estrés o beneficio a su crecimiento, por lo que no será expresado en las cronologías (Smith, 2008). Del mismo modo puede influir condiciones micro climáticas o condiciones aisladas de las zonas donde se encuentran los árboles, forzantes que se dan por ejemplo en condiciones de altura, tipos de suelo, temperaturas o precipitaciones aisladas favorecidas por convección (Wang et al., 2022). Por lo que sigue siendo un vacío de información los fragmentos “no correlacionados” entre las cronologías de *Polylepis tarapanaca*.

## **5.2 Relación Precipitación y temperatura en el patrón de ancho de anillos**

La relación entre la precipitación y el ancho de anillos es ligeramente variable en cada cronología de cada zona, respecto al año previo de crecimiento y año actual de crecimiento. Muestra una relación en algunas zonas en el mes de enero y en otras no, pero en su totalidad presentan relación con las primeras lluvias primaverales de octubre a noviembre del año previo. Por otro lado, todas las zonas presentaron una relación inversa entre la precipitación de verano (enero a marzo) del año de crecimiento. En este estudio se utilizó un rango que ocupa la mitad del ciclo hidrológico (octubre – enero) para evaluar el efecto interanual en series de tiempo. Esto mostró una relación media con el crecimiento radial, con un  $r=0.36$  casi significativo, no obstante, tiene una altísima sensibilidad a valores atípicos de

las cronologías, estos resultados se comparten y a la vez se discuten. En el norte de Chile en la región de Parinacota, que es frontera con la provincia de Tacna, se registra un comportamiento muy parecido, donde las precipitaciones influyen de manera positiva en el crecimiento, en los meses de enero y octubre del año previo y de manera inversa en el verano del año actual (Moya & Lara, 2011). No obstante, ligeras variaciones ocurren con las cronologías realizadas en Bolivia (centro y sur) y extremo norte de Argentina, se obtuvo correlaciones mucho más altas con la precipitación y abarcando mayores meses, de noviembre a febrero del año previo siendo altamente positivo con correlaciones  $r=0.67$  (Morales et al., 2012; Solíz et al., 2009). Podría deberse a que estas zonas están más cerca al desierto de atacama, zonas mucho más áridas que la región Tacna, donde su crecimiento está fuertemente limitado por la disponibilidad hídrica, que, según los estudios realizados, presentan precipitaciones extremadamente bajas entre 83 a 195 mm/año (Argollo et al., 2004), mientras que la serranía de Tacna tiene 390 mm/año en promedio.

En el caso de la relación entre las temperaturas y el patrón de ancho de anillos, las cronologías presentadas mostraron una fuerte relación con las temperaturas máximas del verano del año de crecimiento actual, desde diciembre hasta marzo, y parte del otoño (abril). También presentó relación inversa con el verano previo, pero solo en algunas zonas (1 y 5), sugiriendo que, en estas zonas, hay mayor influencia de los eventos del año previo (memoria biológica más fuerte), lo que puede sugerir que, en estas zonas, existe una mayor sensibilidad con el clima

que rige el crecimiento de estos árboles. Por otro lado, la temperatura mínima produjo una fuerte relación positiva en la primavera del año previo al crecimiento e inversa en el mes de junio del año previo al crecimiento (en la zona 1). Finalmente, la temperatura promedio, favorece solo en los meses del verano del año de crecimiento actual (enero a marzo). Esto es ampliamente compartido con los estudios realizados en *Polylepis tarapacana* (Argollo et al., 2004; Morales et al., 2012; Moya & Lara, 2011; Solíz et al., 2009), aunque estos estudios solo han trabajado con la temperatura promedio, en este estudio aparentemente es la temperatura máxima la que determina el crecimiento estricto de *Polylepis tarapacana* en la región Tacna, al tener un  $r=0.63$  con un  $p<0.001$ , en el análisis de la serie de tiempo. Que junto con el incremento de las temperaturas mínimas de invierno, crean una sinergia en la reactivación (octubre-noviembre) y aceleración del crecimiento radial (enero-marzo) (Rodríguez-Ramírez et al., 2022). Aunque la dinámica entre la precipitación y temperaturas del año previo y su influencia en el crecimiento radial de *Polylepis tarapacana*, se puede sugerir que esta especie tiene una muy buena gestión del recurso hídrico, en esta zona, por lo que está más sensible a la temperatura, sin embargo, esto es aún desconocido, ya que al ser seres vivos implica entrar en estudios ecológicos y ecofisiológicos del mismo árbol y monitorear las respuestas temporales a eventos específicos y su respuesta rezagada debido a su memoria biológica (Anderegg et al., 2015; Peltier et al., 2022).

### **5.3 Relación con Oscilaciones atmosféricas**

En este estudio, los análisis condujeron a relaciones claras entre las temperatura superficial del mar Pacífico y Atlántico, mientras que el índice decadal del Pacífico PDO, no mostró una relación significativa ni alta de manera inmediata, por lo que se necesitaría realizar mayores estudios y enfoques de baja frecuencia para entender el efecto del PDO sobre el patrón de ancho de anillos.

La relación ENSO con el ancho de anillos de *Polylepis tarapacana* ya es bien estudiado en los Andes centrales tropicales abarcando Bolivia, Chile y Argentina, por lo que este estudio amplía la serie de datos para monitorear y reforzar los efectos del ENSO en estos ámbitos. En cuanto al AMO, hay escasos estudios que lo relacionan con el ancho de anillos de *Polylepis tarapacana*, siendo este un gran aporte de la relación directa con la oscilación del Atlántico.

Las anomalías del ENSO y AMO influyen en la dinámica de precipitaciones y temperatura en muchas regiones, que indirectamente afectan al crecimiento radial de los árboles. Por ejemplo, la fase cálida del ENSO, genera lluvias anómalas en toda América y Oceanía, creando periodos muy lluviosos en el norte peruano y afectando al desarrollo de nubes y precipitaciones en el sur (Imfeld et al., 2021). Asimismo en la selva, los anillos responden bien a periodos cálidos del ENSO, ya que en esta zona también provoca sequías (Rodríguez et al., 2005). Por otro lado, el AMO, modula la tendencia de largo plazo de la humedad, de modo que fases cálidas, generan mayor transporte de humedad hacia las vertientes orientales de los Andes, afectando fuertemente a las lluvias del sistema “monzón sudamericano”

(Sulca et al., 2022), cuando AMO entra a una fase cálida, favorece la convección por lo tanto mayor precipitaciones en la vertiente oriental de los Andes, y en fase fría lo contrario (Martínez et al., 2015). Entre el ENSO y el AMO, (Pacífico y Atlántico), pueden interactuar mediante respuestas atmosfera – océano (An et al., 2021), la convección extra en el atlántico, genera anomalías en altura que actúan como un puente atmosférico, enviando señales hacia el Pacífico en periodos de días - meses.

Esas señales alteran vientos zonales y la termoclina del Pacífico (respuesta océano–atmósfera en meses–años), cambiando la estabilidad del sistema. Así, la AMO no crea ENSO, pero sí puede aumentar o disminuir la probabilidad, intensidad y “tipo” de eventos ENSO. Como ENSO y el transporte de humedad controlan la lluvia en los Andes, la AMO termina modulando indirectamente sequías y periodos húmedos en la cordillera (An et al., 2021) y a veces también por vías directas como la ITCZ (Zona de convergencia Inter – tropical) o el SALLJ (corriente en chorro de bajo nivel sudamericano).

## CAPÍTULO VI

### CONCLUSIONES

- Se logró obtener la medición de muestras de *Polylepis tarapacana* y obtener el patrón de ancho de anillos. Aunque las estadísticas ( $r_{\text{bar}} = 0.3$ ,  $MS = 0.31$ ,  $EPS = 0.85$ ) son menores que las de cronologías de coníferas en latitudes más altas, las cuatro cronologías y la cronología regional suficientemente robustas para detectar respuestas ambientales interanuales y señales climáticas a escala regional. Las diferencias locales y los fragmentos no correlacionados reflejan variación biológica y microclimática (edad, genética, competencia, topografía, suelo), por lo que el uso de redes de sitios y series largas es imprescindible para separar la señal climática de la “ruidosa” variabilidad individual.
- Se evaluó la relación entre las variables ambientales precipitación y temperatura y el patrón de ancho de anillos obtenidos. Se destaca que el crecimiento de *Polylepis tarapacana* en Tacna está controlado principalmente por la disponibilidad hídrica estacional (primeras lluvias octubre–noviembre,  $r=0.29$ ) y por temperaturas máximas del verano del año de crecimiento; la precipitación del verano actual dreña el crecimiento (relación inversa) mientras que temperaturas máximas de enero–marzo muestran un fuerte efecto positivo en la serie regional ( $r=0.63$ ), mientras que las temperaturas promedio obtuvieron un  $r=0.31$ . Estas relaciones

sugieren que, en esta región relativamente menos árida que zonas vecinas, la temperatura (especialmente máximas) modula fuertemente el uso del agua y la fenología, aunque la alta sensibilidad a valores atípicos y la memoria biológica local exigen estudios ecofisiológicos complementarios para confirmar mecanismos.

- Se logró determinar que oscilaciones atmosféricas influyen en el crecimiento radial de *Polylepis tarapacana* a través de correlaciones entre la temperatura superficial del mar y el patrón de ancho de anillos. ENSO muestra una huella clara ( $r=0.36$ ) y ya conocida sobre el ancho de anillos en los Andes centrales (efectos interanuales), mientras que la AMO aporta una señal valiosa ( $r=0.247$ ) y menos estudiada a escala multidecadal que puede modular la línea de base de humedad; el PDO no aparece significativo ( $r=0.15$ ) en escala inmediata en este estudio y requiere análisis de baja frecuencia adicionales. En conjunto, AMO y ENSO pueden interactuar vía puentes atmosféricos y modificación del estado medio del Pacífico, para alterar la probabilidad e intensidad de sequías/periodos húmedos en la cordillera, por lo que las atribuciones deben considerar ambas escalas (interanual y multidecadal) y sus interacciones.

## RECOMENDACIONES

El presente estudio ha dejado al descubierto una serie de vacíos de información sobre el crecimiento radial de esta especie y la serie de factores que pueden influir en el, desde perspectivas dendrocronológicas a perspectivas biológicas, las recomendaciones son las siguientes

- Se recomienda realizar estudios dendrocronológicos en nuestra región, basado en: gradientes altitudinales de una misma localidad, en la composición biológica acompañante, el estado de salud (enfermedades, defoliación, daños físicos), el tipo de sustrato y entre otros, para identificar patrones de crecimiento anómalos que pueden ayudar a clarificar las señales climáticas o simplemente implementar mediante la dendrocronología, vacíos de información respecto al crecimiento radial sometido a estas condiciones mencionadas.
- Otra recomendación sumamente importante y que varios autores pioneros de la dendrocronología de *Polylepis tarapacana* mencionan, es abarcar el aspecto eco fisiológico de esta especie, para identificar la dinámica de crecimiento radial de manera contundente y poder explicar con mayor solidez, la respuesta del patrón de ancho de anillos a las variables climáticas. Estudios la captación de agua, el flujo de savia, fotosíntesis (captura de carbono), transpiración, son tópicos candidatos potenciales.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- An, X., Wu, B., Zhou, T., & Liu, B. (2021). Atlantic Multidecadal Oscillation Drives Interdecadal Pacific Variability via Tropical Atmospheric Bridge. *Journal of Climate*, 34(13), 5543–5553. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0983.1>
- Anderegg, W. R. L., Hicke, J. A., Fisher, R. A., Allen, C. D., Aukema, J., Bentz, B., Hood, S., Lichstein, J. W., Macalady, A. K., McDowell, N., Pan, Y., Raffa, K., Sala, A., Shaw, J. D., Stephenson, N. L., Tague, C., & Zeppel, M. (2015). Tree mortality from drought, insects, and their interactions in a changing climate. *New Phytologist*, 208(3), 674–683. <https://doi.org/10.1111/nph.13477>
- Argollo, J., Soliz, C., & Villalba, R. (2004). Potencialidad dendrocronológica de *Polylepis tarapacana* en los Andes Centrales de Bolivia. *Ecología En Bolivia*, 39, 5–24. [http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1605-25282004000700002&nrm=iso](http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1605-25282004000700002&nrm=iso)
- Babst, F., Bodesheim, P., Charney, N., Friend, A. D., Girardin, M. P., Klesse, S., Moore, D. J. P., Seftigen, K., Björklund, J., Bouriaud, O., Dawson, A., DeRose, R. J., Dietze, M. C., Eckes, A. H., Enquist, B., Frank, D. C., Mahecha, M. D., Poulter, B., Record, S., ... Evans, M. E. K. (2018). When tree rings go

global: Challenges and opportunities for retro- and prospective insight.  
*Quaternary Science Reviews*, 197, 1–20.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2018.07.009>

Barichivich, J., Sauchyn, D. J., & Lara, A. (2009). Climate signals in high elevation tree-rings from the semiarid Andes of north-central Chile: Responses to regional and large-scale variability. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 281(3), 320–333.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2007.10.033>

Biondi, F., & Qeadan, F. (2008). A Theory-Driven Approach to Tree-Ring Standardization: Defining the Biological Trend from Expected Basal Area Increment. *Tree-Ring Research*, 64(2), 81–96. <https://doi.org/10.3959/2008-6.1>

Boza, T. E. E., & Kessler, M. (2022). A monograph of the genus *Polylepis* (Rosaceae). *PhytoKeys*, 203, 1–274.  
<https://doi.org/10.3897/phytokeys.203.83529>

Bradley, R. S. (2015a). Dating Methods II. In *Paleoclimatology* (3rd ed.). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-386913-5.00004-1>

Bradley, R. S. (2015b). Tree Rings. In *Paleoclimatology* (3rd ed.). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-386913-5.00013-2>

- Bunn, A. G. (2008). A dendrochronology program library in R (dpIR). *Dendrochronologia*, 26(2), 115–124. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.dendro.2008.01.002>
- Chang, P., & Zebiak, S. E. (2003). EL NIÑO AND THE SOUTHERN OSCILLATION | Theory. In J. R. Holton (Ed.), *Encyclopedia of Atmospheric Sciences* (pp. 719–724). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B0-12-227090-8/00149-4>
- Christie, D. A., Lara, A., Barichivich, J., Villalba, R., Morales, M. S., & Cuq, E. (2009). El Niño-Southern Oscillation signal in the world's highest-elevation tree-ring chronologies from the Altiplano, Central Andes. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 281(3), 309–319. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2007.11.013>
- Coleman, J. S. M., & Law, K. T. (2015). Meteorology. In *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*. Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.09492-6>
- Cook, E., Briffa, K., Shiyatov, S., Mazepa, V., & Jones, P. D. (1990). Data Analysis. In E. R. Cook & L. A. Kairiukstis (Eds.), *Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences* (pp. 97–162). Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/978-94-015-7879-0\\_3](https://doi.org/10.1007/978-94-015-7879-0_3)

- Crang, R., Lyons-Sobaski, S., & Wise, R. (2018). Wood: Economics, Structure, and Composition. In *Plant Anatomy: A Concept-Based Approach to the Structure of Seed Plants* (pp. 509–552). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-77315-5\\_15](https://doi.org/10.1007/978-3-319-77315-5_15)
- Crispín-DelaCruz, D. B., Morales, M. S., Andreu-Hayles, L., Christie, D. A., Guerra, A., & Requena-Rojas, E. J. (2022). High ENSO sensitivity in tree rings from a northern population of *Polylepis tarapacana* in the Peruvian Andes. *Dendrochronologia*, 71(November 2021), 125902. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2021.125902>
- Cuyckens, G. A. E., & Renison, D. (2018). Ecología y conservación de los bosques montanos de *Polylepis*: Una introducción al número especial. *Ecología Austral*, 28(1-bis), 157–162. <https://doi.org/10.25260/EA.18.28.1.1.766>
- Dean, J. S. (1997). *Dendrochronology BT - Chronometric Dating in Archaeology* (R. E. Taylor & M. J. Aitken (Eds.); pp. 31–64). Springer US. [https://doi.org/10.1007/978-1-4757-9694-0\\_2](https://doi.org/10.1007/978-1-4757-9694-0_2)
- Elias, S. A. (2018). Paleoclimatology. In D. A. Dellasala & M. I. Goldstein (Eds.), *Encyclopedia of the Anthropocene* (pp. 265–275). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809665-9.09752-4>
- Elias, S. A. (2021). Incremental Change Methods. In *Encyclopedia of Geology* (2nd

ed., Issue X). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-102908-4.00067-9>

Fritts, H. C. (1976). The Statistics of Ring-Width and Climatic Data. *Tree Rings and Climate*, 246–311. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-268450-0.50011-2>

Garreaud, R. (2009). The Andes Climate and Weather. *Adv. Geosci*, 22, 3–11. <https://doi.org/10.5194/adgeo-22-3-2009>

Garreaud, R., Vuille, M., & Clement, A. C. (2003). The climate of the Altiplano: observed current conditions and mechanisms of past changes. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 194(1), 5–22. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(03\)00269-4](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0031-0182(03)00269-4)

Gori, Y. (2014). *Stable isotope dendrochronology in stressed trees: insights into plant-pest interactions and physiological functions during tree life*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1320.6483>

Guibal, F., & Guiot, J. (2021). Dendrochronology. In G. Ramstein, A. Landais, N. Bouttes, P. Sepulchre, & A. Govin (Eds.), *Paleoclimatology* (pp. 117–122). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-24982-3\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-030-24982-3_8)

Guiot, J., & Daux, V. (2021). Vegetation-Atmosphere Interface: Tree Rings. In G. Ramstein, A. Landais, N. Bouttes, P. Sepulchre, & A. Govin (Eds.),

*Paleoclimatology* (pp. 197–203). Springer International Publishing.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-030-24982-3\\_16](https://doi.org/10.1007/978-3-030-24982-3_16)

Hastenrath, S. (2003). TROPICAL METEOROLOGY | Tropical Climates. In J. R. Holton (Ed.), *Encyclopedia of Atmospheric Sciences* (pp. 2338–2345). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B0-12-227090-8/00416-4>

Holmes, R. L. (1983). Computer-Assisted Quality Control in Tree-Ring Dating and Measurement. *Tree-Ring Bulletin*. <http://hdl.handle.net/10150/261223>

Hughes, M. K. (2011). Dendroclimatology in High-Resolution Paleoclimatology. In M. K. Hughes, T. W. Swetnam, & H. F. Diaz (Eds.), *Dendroclimatology: Progress and Prospects* (pp. 17–34). Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5725-0\\_2](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5725-0_2)

Hwang, D.-H., & Yoon, H.-J. (2023). Chapter 11 - Analysis of long-term sea level fluctuation patterns and influences of climatic indices around the Korean Peninsula through dimensionality reduction of altimeter data. In S. Vignudelli & N. H. Idris (Eds.), *Coastal Altimetry* (pp. 191–214). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91708-7.00008-0>

Imfeld, N., Sedlmeier, K., Gubler, S., Correa Marrou, K., Davila, C. P., Huerta, A., Lavado-Casimiro, W., Rohrer, M., Scherrer, S. C., & Schwierz, C. (2021). A

combined view on precipitation and temperature climatology and trends in the southern Andes of Peru. *International Journal of Climatology*, 41(1), 679–698. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/joc.6645>

Johnson, E. A., & Gutsell, S. L. (1994). *Fire Frequency Models, Methods and Interpretations*\*\*This review is dedicated to the memory of M.L. Heinselman . Bud Heinselman pioneered the first fire frequency study and it was his 1969 University of Minnesota seminar on his Boundary Waters Canoe Area s (M. Begon & A. H. Fitter (Eds.); Vol. 25, pp. 239–287). Academic Press. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0065-2504\(08\)60216-0](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0065-2504(08)60216-0)

Kessler, M. (2002). The „*Polylepis* problem“: Where do we stand? *Ecotropica*, 8, 97–110.

Lenters, J. D., & Cook, K. H. (1999). Summertime Precipitation Variability over South America: Role of the Large-Scale Circulation. *Monthly Weather Review*, 127(3), 409–431. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1999\)127<0409:SPVOSA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1999)127<0409:SPVOSA>2.0.CO;2)

Liang, S., & Wang, J. (Eds.). (2020). Chapter 16 - Precipitation. In *Advanced Remote Sensing (Second Edition)* (Second Edi, pp. 621–647). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815826-5.00016-7>

Loewe-Muñoz, V., Cachinero-Vivar, A. M., Camarero, J. J., Río, R. Del, Delard,

- C., & Navarro-Cerrillo, R. M. (2024). Dendrochronological Analysis of *Pinus pinea* in Central Chile and South Spain for Sustainable Forest Management. *Biology*, *13*(8). <https://doi.org/10.3390/biology13080628>
- López, V. L., Bottan, L., Martínez Pastur, G., Lencinas, M. V., Cuyckens, G. A. E., & Cellini, J. M. (2023). Characterization of *Polylepis tarapacana* Life Forms in the Highest-Elevation Altiplano in South America: Influence of the Topography, Climate and Human Uses. *Plants*, *12*(9). <https://doi.org/10.3390/plants12091806>
- Luckman, B. H. (2013). Dendroclimatology. *Encyclopedia of Quaternary Science: Second Edition*, 459–470. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53643-3.00354-X>
- Macek, P., Macková, J., & de Bello, F. (2009). Morphological and ecophysiological traits shaping altitudinal distribution of three *Polylepis* treeline species in the dry tropical Andes. *Acta Oecologica*, *35*(6), 778–785. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.actao.2009.08.013>
- Martinez, J. I., Obrochta, S., Yokoyama, Y., & Battarbee, R. W. (2015). Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO) forcing on the late Holocene Cauca paleolake dynamics, northern Andes of Colombia. *Climate of the Past Discussions*, *11*, 2649–2664. <https://doi.org/10.5194/cpd-11-2649-2015>

Molloy, S. L., Dreelin, E. A., & Rose, J. B. (2008). Extreme Weather Events and Human Health. In H. K. (Kris) Heggenhougen (Ed.), *International Encyclopedia of Public Health* (pp. 536–544). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-012373960-5.00389-0>

Morales, M. S., Christie, D. A., Villalba, R., Argollo, J., Pacajes, J., Silva, J. S., Alvarez, C. A., Llancabure, J. C., & Soliz Gamboa, C. C. (2012). Precipitation changes in the South American Altiplano since 1300 AD reconstructed by tree-rings. *Climate of the Past*, 8(2), 653–666. <https://doi.org/10.5194/cp-8-653-2012>

Moya, J., & Lara, A. (2011). Cronologías de ancho de anillos de quepmoa (*Polylepis tarapacana*) para los últimos 500 años en el Altiplano de la región superior de Arica y Parinacota, Chile. *Bosque (Valdivia)*, 32, 165–173. [http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0717-92002011000200007&nrm=iso](http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0717-92002011000200007&nrm=iso)

Olson, D., Dinerstein, E., Wikramanayake, E., Burgess, N., Powell, G., Underwood, E., D'amico, J., Itoua, I., Strand, H., Morrison, J., Loucks, C., Allnutt, T., Ricketts, T., Kura, Y., Lamoreux, J., Wettengel, W., Hedao, P., & Kassem, K. (2001). Terrestrial Ecoregions of the World: A New Map of Life on Earth. *BioScience*, 51, 933–938. <https://doi.org/10.1641/0006->

3568(2001)051[0933:TEOTWA]2.0.CO;2

Peltier, D. M. P., Anderegg, W. R. L., Guo, J. S., & Ogle, K. (2022). Contemporary tree growth shows altered climate memory. In *Ecology letters* (Vol. 25, Issue 12, pp. 2663–2674). <https://doi.org/10.1111/ele.14130>

Rodriguez-Caton, M., Andreu-Hayles, L., Morales, M. S., Daux, V., Christie, D. A., Coopman, R. E., Alvarez, C., Rao, M. P., Aliste, D., Flores, F., & Villalba, R. (2021). Different climate sensitivity for radial growth, but uniform for tree-ring stable isotopes along an aridity gradient in *Polylepis tarapacana*, the world's highest elevation tree species. *Tree Physiology*, *41*(8), 1353–1371. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpab021>

Rodríguez-Ramírez, E. C., Crispín-Delacruz, D. B., Ticse-Otarola, G., & Requena-Rojas, E. J. (2022). Assessing the Hydric Deficit on Two *Polylepis* Species from the Peruvian Andean Mountains: Xylem Vessel Anatomic Adjusting. *Forests*, *13*(5), 1–12. <https://doi.org/10.3390/f13050633>

Rodríguez, R., Mabres, A., Luckman, B., Evans, M., Masiokas, M., & Ektvedt, T. M. (2005). “El Niño” events recorded in dry-forest species of the lowlands of northwest Peru. *Dendrochronologia*, *22*(3), 181–186. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.dendro.2005.05.002>

Rojas, R., Flexas, J., & Coopman, R. E. (2022). Particularities of the highest

elevation treeline in the world: *Polylepis tarapacana* Phil. as a model to study ecophysiological adaptations to extreme environments. *Flora*, 292, 152076. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.flora.2022.152076>

Salzmann, N., Huggel, C., Rohrer, M., Silverio, W., Mark, B. G., Burns, P., & Portocarrero, C. (2013). Glacier changes and climate trends derived from multiple sources in the data scarce Cordillera Vilcanota region, southern Peruvian Andes. *The Cryosphere*, 7(1), 103–118. <https://doi.org/10.5194/tc-7-103-2013>

Schweingruber, F. H. (1988). Analysis of the materials. In *Tree Rings: Basics and Applications of Dendrochronology* (pp. 39–94). Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/978-94-009-1273-1\\_3](https://doi.org/10.1007/978-94-009-1273-1_3)

Schweingruber, F. H. (1993). Trees and Wood in Dendrochronology. In *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 01, Issue 01).

SENAMHI. (2010). Climas del Perú - Mapa de Clasificación Climática Nacional. In *Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú*. <https://www.senamhi.gob.pe/?p=mapa-climatico-del-peru>

Šesták, J. (2005). Chapter 13 - THERMOPHYSICAL EXAMINATION AND TEMPERATURE CONTROL. In J. Šesták (Ed.), *Science of Heat and Thermophysical Studies* (pp. 378–411). Elsevier Science.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-044451954-2/50013-8>

Shuman, B. N. (2021). Approaches to Paleoclimate Reconstruction. In D. Alderton & S. A. Elias (Eds.), *Encyclopedia of Geology (Second Edition)* (Second Edition, pp. 299–308). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102908-4.00174-0>

Silva, V. (2012). *Estudio dendrocronológico de una población de Polylepis rugulosa en los Andes semiáridos de Arica y Parinacota*. 38.

Smith, K. T. (2008). An organismal view of dendrochronology. *Dendrochronologia*, 26(3), 185–193. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2008.06.002>

Solíz, C., Villalba, R., Argollo, J., Morales, M. S., Christie, D. A., Moya, J., & Pacajes, J. (2009). Spatio-temporal variations in *Polylepis tarapacana* radial growth across the Bolivian Altiplano during the 20th century. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 281(3), 296–308. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2008.07.025>

Speer, J. (2010). *Fundamentals of Tree Ring Research*.

Stoffel, M., Luckman, B. H., Butler, D. R., & Bollschweiler, M. (2013). Dendrogeomorphology: Dating Earth-Surface Processes with Tree Rings. In *Treatise on Geomorphology* (Vol. 12). Elsevier Ltd.

<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374739-6.00326-2>

Sulca, J., Vuille, M., & Dong, B. (2022). Interdecadal variability of the austral summer precipitation over the Central Andes. *Frontiers in Earth Science, Volume 10-2022*. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.954954>

Timmermann, A., An, S.-I., Kug, J.-S., Jin, F.-F., Cai, W., Capotondi, A., Cobb, K. M., Lengaigne, M., McPhaden, M. J., Stuecker, M. F., Stein, K., Wittenberg, A. T., Yun, K.-S., Bayr, T., Chen, H.-C., Chikamoto, Y., Dewitte, B., Dommenges, D., Grothe, P., ... Zhang, X. (2018). El Niño–Southern Oscillation complexity. *Nature, 559*(7715), 535–545. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0252-6>

Ufimtsev, G. F. (2010). Geomorphological features of the Peruvian Andes. *Geography and Natural Resources, 31*(2), 183–191. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gnr.2010.06.015>

Wang, H., Ning, Y., Liu, C., Xu, P., & Zhang, W. (2022). Different Radial Growth Responses to Climate Change of Three Dominant Conifer Species in Temperate Forest, Northeastern China. *Frontiers in Forests and Global Change, Volume 4-*. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2021.820800>

Welsh, C., Smith, D. J., & Coulthard, B. (2019). Tree-ring records unveil long-term influence of the Pacific Decadal Oscillation on snowpack dynamics in the

Stikine River basin, northern British Columbia. *Hydrological Processes*, 33(5), 720–736. <https://doi.org/10.1002/hyp.13357>

Wigley, T. M. L., Briffa, K. R., & Jones, P. D. (1984). On the Average Value of Correlated Time Series, with Applications in Dendroclimatology and Hydrometeorology. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 23(2), 201–213. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1984\)023<0201:OTAVOC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1984)023<0201:OTAVOC>2.0.CO;2)

Zang, C., & Biondi, F. (2015). treeclim: an R package for the numerical calibration of proxy-climate relationships. *Ecography*, 38(4), 431–436. <https://doi.org/10.1111/ecog.01335>

Zhang, Y., Wallace, J. M., & Battisti, D. S. (1997). ENSO-like Interdecadal Variability: 1900–93. *Journal of Climate*, 10(5), 1004–1020. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1997\)010<1004:ELIV>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1997)010<1004:ELIV>2.0.CO;2)

Zhu, L., Cooper, D. J., Han, S., Yang, J., Zhang, Y., Li, Z., Zhao, H., & Wang, X. (2021). Influence of the Atlantic Multidecadal Oscillation on drought in northern Daxing'an Mountains, Northeast China. *Catena*, 198(October 2020). <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.105017>

## ANEXOS

### Anexo 1

#### *Variables y operacionalización*

| Variables  | Dimensiones                         | Definición conceptual  | Indicadores                     | Escala   | Técnicas o métodos  |
|--|-------------------------------------|--|---------------------------------|----------|---|
| <b>Variable independiente: Factores climáticos</b> | Precipitación media mensual         | Cualquier forma de agua líquida o sólida que cae desde la atmósfera a la superficie terrestre (Liang & Wang, 2020)                               | Precipitación media             | Continua | Estación meteorológica  |
|  | Temperatura ambiental media mensual | La temperatura es una cantidad física fundamental que mide la cantidad de frío y calor de algo o un entorno y determina su estado (Šesták, 2005) | Temperatura media               | Continua | Estación meteorológica  |
|  | Índice Oceánico de El Niño (ENSO)   | Es una fluctuación periódica de la temperatura de la superficie del mar y la presión del aire de la atmósfera                                    | Temperatura superficial del mar | Continua | Datos de la web de National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) |

|  |  |   |                  |          |                  |
|--|--|---|------------------|----------|------------------|
|  |  | suprayacente en todo el Océano Pacífico ecuatorial (Zhang et al., 1997)   |                  |          |                  |
|  | Índice Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) | Se describe a menudo como un patrón de variabilidad climática del Pacífico similar a El Niño de larga duración (Zhang et al., 1997)   |                  | Continua |                  |
| <b>Variable dependiente : Crecimiento radial</b> | Índice de ancho de anillos                   | Es una cronología homogénea y larga de ancho de anillos que se construye datando y procesando los anchos de anillos de muchos árboles en una región (Johnson & Gutsell, 1994) | Ancho de anillos | Continua | Dendrocronología |