

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Ambiental

Tesis

**Registro climático a través de anillos de crecimiento
de *Polylepis*, en los Andes Centrales del Sur de Perú**

Rosmery Lisbeth Lloclla Martinez

Para optar el Título Profesional de
Ingeniero Ambiental

Huancayo, 2025

Repositorio Institucional Continental
Tesis digital



Esta obra está bajo una Licencia "Creative Commons Atribución 4.0 Internacional" .

INFORME DE CONFORMIDAD DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

A : Decano de la Facultad de Ingeniería
DE : MARIANO SANTOS MORALES
Asesor de trabajo de investigación
ASUNTO : Remito resultado de evaluación de originalidad de trabajo de investigación
FECHA : 18 de Junio de 2025

Con sumo agrado me dirijo a vuestro despacho para informar que, en mi condición de asesor del trabajo de investigación:

Título:

Registro Climático a Través de Anillos de Crecimiento de *Polylepis*, en los Andes Centrales del Sur de Perú

Autor:

ROSMERY LISBETH LLOCCLA MARTINEZ – EAP. Ingeniería Ambiental

Se procedió con la carga del documento a la plataforma "Turnitin" y se realizó la verificación completa de las coincidencias resaltadas por el software dando por resultado 18 % de similitud sin encontrarse hallazgos relacionados a plagio. Se utilizaron los siguientes filtros:

- Filtro de exclusión de bibliografía SI NO
- Filtro de exclusión de grupos de palabras menores N° de palabras excluidas (40): SI NO
- Exclusión de fuente por trabajo anterior del mismo estudiante SI NO

En consecuencia, se determina que el trabajo de investigación constituye un documento original al presentar similitud de otros autores (citas) por debajo del porcentaje establecido por la Universidad Continental.

Recae toda responsabilidad del contenido del trabajo de investigación sobre el autor y asesor, en concordancia a los principios expresados en el Reglamento del Registro Nacional de Trabajos conducentes a Grados y Títulos – RENATI y en la normativa de la Universidad Continental.

Atentamente,

La firma del asesor obra en el archivo original
(No se muestra en este documento por estar expuesto a publicación)

ASESOR

Dr. Mariano Santos Morales

COASESORES

Dra. María Eugenia Ferrero

Ing. Edilson Jimmy Requena Rojas

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer al Proyecto N.º 039-2019-FONDECYT, «El Monzón de América del sur en los Andes centrales: registros del pasado para anticipar el futuro hidrológico regional», por la financiación realizada al proyecto, sin ello no hubiera sido posible la ejecución de esta investigación. A la Universidad Continental, por permitirme acceder a las instalaciones del laboratorio de Dendrocronología. Al Senamhi, por brindarme la información climática que requería para el proyecto y, por último, a la comunidad de Toldopampa, quienes nos permitieron ingresar al bosque.

Agradezco a Dios, por la sabiduría brindada, por los malos momentos que me ayudaron a ser más fuerte y mejor persona. Gracias por el apoyo a mis padres y hermanas que siempre me apoyan y ayudan a afrontar cada dificultad que se me presenta, mis abuelos, tías que me brindaron ayuda de diferentes formas y momentos en todo el proceso de mi educación.

A mi asesor, el Dr. Mariano Santos, por el apoyo y la oportunidad brindada de poder desarrollar esta investigación. Al Ing. Edilson Requena, investigador del laboratorio de Dendrocronología de la Universidad Continental y, a la Ing. Ginette Ticse, por su apoyo durante la investigación, por la paciencia que me brindaron en el proceso de tratamiento de muestras (lijado, fechado y procesamiento de datos). De la misma manera, agradecer al Dr. Ernesto Chanes y Dra. María Eugenia, por los consejos y la ayuda que me brindaron para desarrollar esta investigación.

Finalmente, a mi compañera de tesis del proyecto, Joali Sanchez, por la amistad y apoyo en todo el camino para el desarrollo de la tesis.

DEDICATORIA

A mis padres, hermanas, abuelos y tías, quienes me tuvieron paciencia y tolerancia para lograr mis objetivos, sin ellos no hubiese podido superar estas dificultades, gracias por su afecto y apoyo.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Asesor	iv
Agradecimientos.....	v
Dedicatoria	vi
Índice de contenidos.....	vii
Lista de tablas.....	x
Lista de figuras.....	xi
Resumen.....	xii
Abstract.....	xiii
Introducción	xiv
Capítulo I	16
Planteamiento del estudio.....	16
1.1. Planteamiento y formulación del problema	16
1.1.1. Planteamiento del problema.....	16
1.1.2. Formulación del problema	17
1.2. Objetivos	18
1.2.1. Objetivo general.....	18
1.2.2. Objetivos específicos	18
1.3. Justificación e importancia.....	18
1.4. Hipótesis de investigación.....	19
1.4.1. Hipótesis general.....	19
1.4.2. Hipótesis específicas	19
1.5. Hipótesis estadísticas	19
1.5.1. Hipótesis nula	19
1.5.2. Hipótesis alterna	20
1.6. Variables	20
1.6.1. Variable independiente	20
1.6.2. Variable dependiente	20
1.6.3. Operacionalización de variables	21
Capítulo II	22
Marco teórico	22
2.1. Antecedentes del problema	22
2.2. Bases teóricas	23
2.2.1. Dendrocronología	23
2.2.1.1. Principios de la dendrocronología.....	24

2.2.1.2. Aplicación de la dendrocronología	26
2.2.2. Especie en estudio.....	26
2.2.2.1. Género <i>Polylepis</i>	26
2.2.2.2. <i>Polylepis</i> en el Perú.....	27
2.2.2.3. Características de la especie <i>Polylepis Rodolfo-Vasquezii</i>	27
2.2.3. Anillos de crecimiento y clima	28
2.2.4. El Niño - oscilación del Sur (ENOS).....	29
2.3. Definición de términos	30
Capítulo III.....	32
Metodología	32
3.1. Método y alcance de la investigación	32
3.1.1. Método de la investigación	32
3.1.1.1. Método general	32
3.1.1.2. Método específico	32
3.1.1.3. Nivel de investigación.....	33
3.1.1.4. Tipo de investigación.....	33
3.2. Diseño de la investigación	33
3.3. Esquema de la investigación	34
3.4. Población y muestra	35
3.4.1. Población	35
3.4.2. Muestra	35
3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos	35
3.5.1. Área de estudio	35
3.5.2. Fitogeografía.....	35
3.5.3. Caracterización climática del área de estudio	36
3.5.4. Recolección de muestras.....	37
3.5.5. Colección de datos	37
3.6. Procesamiento y análisis de datos	37
3.6.1. Procesamiento de muestra.....	37
3.6.2. Construcción de la cronología	38
3.6.3. Estandarización.....	38
3.6.4. Curvas de crecimiento radial acumulado	39
3.6.5. Recopilación y análisis de datos meteorológicos.....	40
3.6.5.1. Datos meteorológicos.....	40
3.6.5.2. Serie climática de la temperatura de la superficie del mar.....	40
3.6.5.3. Correlación espacial	40

Capítulo IV	41
Resultados y discusión	41
4.1. Resultados del tratamiento y análisis de la información	41
4.1.1. Análisis de datos climáticos instrumentales.....	41
4.1.2. Cofechado de series dendrocronológicas.....	41
4.1.3. Cronología regional de ancho de anillos de la especie P. Rodolfo-Vasquezii.....	42
4.1.4. Cronologías individuales para las muestras provenientes del margen del río y la ladera del cerro.....	43
4.1.5. Relación entre el crecimiento radial de los árboles con el clima	45
4.1.6. Relación entre la cronología regional de P. Rodolfo-Vasquezii y las variaciones interanuales de temperatura y precipitación.....	47
4.1.7. Relación entre la cronología regional de P. Rodolfo-Vasquezii y las variaciones de las temperaturas superficiales del mar Pacífico tropical	48
4.1.8. Comparación entre el incremento radial acumulado de P. Rodolfo-Vasquezii que se encuentran al margen del río y en la ladera	49
4.2. Discusión de resultados.....	50
4.2.1. Cronología de ancho de anillos y serie climática.....	50
4.2.2. Relación entre clima y el crecimiento radial.....	51
4.2.3. Evolución de la variable climática	53
4.2.4. Crecimiento de los árboles al margen del río y en la ladera del cerro	54
4.2.5. Influencia del ENSO en el crecimiento de P. Rodolfo-Vasquezii	55
Conclusiones	56
Recomendaciones	58
Referencias	59
Anexos	63

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Operacionalización de variables	21
Tabla 2. Ubicación geográfica del área de estudio	35
Tabla 3. Características y estadísticos de las cronologías de ancho de anillos de P. Rodolfo- Vasquezii.	37
Tabla 4. Características de las estaciones meteorológica seleccionadas de precipitación y temperatura	41
Tabla 5. Características generales de las cronologías de P. Rodolfo-Vasquezii (datos obtenidos en el Cofecha)	42
Tabla 6. Matriz de consistencia	64
Tabla 7. Series ingresadas en la cronología (al margen del río)	67
Tabla 8. Series ingresadas en la cronología (a la ladera del cerro)	68

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de las regiones utilizadas para los distintos índices ENOS del Pacífico tropical.....	30
Figura 2. Esquema del trabajo de investigación	34
Figura 3. Área de estudio	36
Figura 4. Climograma de Walter-Lieth para la estación meteorológica de comas	36
Figura 5. Variación anual, cronología estándar de anillos y variación en R-bar y EPS	43
Figura 6. Cronología de ancho de anillo de P. Rodolfo-Vasquezii que se encuentran al margen del río (Vatlr) y en la ladera del cerro (Vatpen)	44
Figura 7. Estadísticos que evalúan la calidad de la cronología de Vatlr.....	44
Figura 8. Estadísticos que evalúan la calidad de la cronología de Vatpen.....	44
Figura 9. Coeficiente de correlación de Pearson y precipitación.....	45
Figura 10. Coeficientes de correlación de Pearson.....	46
Figura 11. Función de correlación basada en la cronología regional estándar	47
Figura 12. Relación entre los índices del ancho de anillo de P. Rodolfo-Vasquezii	47
Figura 13. Correlación temporal.....	48
Figura 14. Correlación espacial entre la cronología regional estándar de ancho de anillos de P. Rodolfo-Vasquezii y la temperatura superficial del mar.....	49
Figura 15. Curva de crecimiento de P. Rodolfo-Vasquezii entre el crecimiento radial y la edad de los árboles	50
Figura 16. Colecta de muestras dendrocronológicas de P. Rodolfo-Vasquezii	65
Figura 17. Lijado de muestras de P. Rodolfo-Vasquezii en el laboratorio de dendrocronología de la Universidad Continental	65
Figura 18. Fechado de muestras de P. Rodolfo-Vasquezii en el laboratorio de dendrocronología de la Universidad Continental	66

RESUMEN

A pesar de la enorme diversidad de especies arbóreas, los registros dendrocronológicos en los Andes tropicales son muy escasos. Por lo tanto, es necesario incrementar la búsqueda de nuevas especies arbóreas con alto potencial dendrocronológico en los Andes tropicales, incluyendo la Puna húmeda del Perú. *Polylepis Rodolfo-Vasquezii* es una especie arbórea que crece en los Andes centrales del Perú entre 4000 y 4400 m de altitud. El objetivo es estimar las variaciones climáticas para los últimos 150 años en los Andes centrales del Perú mediante los anillos de crecimiento de *P. Rodolfo-Vasquezii* y determinar cómo responde el crecimiento de los árboles a las variaciones climáticas comparando dos sitios diferentes: margen del río y ladera del cerro. En total, se muestrearon 31 árboles vivos en el departamento de Junín, provincia de Satipo, distrito de Pampa Hermosa, cercano al centro poblado de Santa Rosa de Toldopampa. Las cronologías fueron desarrolladas aplicando técnicas dendrocronológicas convencionales. La cronología regional cubre el periodo 1882-2020 (139 años) y está bien replicada desde 1945 hasta la actualidad (> 10 muestras). Las cronologías individuales de ladera y de margen de río cubren los periodos 1882-2020 y 1901-2020, respectivamente. Para determinar los principales factores climáticos que controlan el crecimiento de *P. Rodolfo-Vasquezii*, se compararon las cronologías con los registros locales de temperatura y precipitación. La temperatura de la estación de crecimiento (noviembre a mayo) parece ser el principal factor climático y modula las variaciones interanuales en el crecimiento de esta especie. Los árboles que crecieron en la ladera presentaron una mayor tasa de crecimiento promedio en comparación con los árboles del margen del río. Asimismo, los árboles de ladera presentaron mayor sensibilidad a las precipitaciones del periodo de crecimiento previo en relación con los árboles ubicados en el margen de río. El crecimiento de los árboles de ladera presentó mayor variabilidad en el crecimiento en comparación con los árboles que se encuentran en el margen de río.

La sensibilidad a las variaciones interanuales de temperatura destaca el potencial de *P. Rodolfo-Vasquezii* para proporcionar registros dendrocronológicos climáticamente sensibles en los Andes centrales. Sin embargo, los árboles creciendo en ambientes con mayor déficit hídrico, también estuvieron relacionados con las precipitaciones del periodo de crecimiento previo. Asimismo, el crecimiento de los árboles también estuvo asociado con las fluctuaciones de las temperaturas superficiales del mar Pacífico en el sector ENOS 1+2, indicando que *P. Rodolfo-Vasquezii* es un buen estimador de las variaciones de ENOS en ese sector del Pacífico.

Palabras claves: Andes centrales, ENOS, *Polylepis Rodolfo-Vasquezii*, variaciones climáticas

ABSTRACT

Despite the enormous diversity of tree species, dendrochronological records in the tropical Andes are very scarce. Therefore, it is necessary to increase the search for new tree species with high dendrochronological potential in the tropical Andes, including the humid Puna of Peru. *Polylepis Rodolfo-Vasquezii* is a tree species that grows in the central Andes of Peru between 4000 and 4400 m altitude. The objectives of this study were to estimate through the study of the growth rings of *P. Rodolfo-Vasquezii* the changes in climate variations for the last 150 years in the central Andes of Peru, and to determine how tree growth responds to climatic variations by comparing two different sites: river margin and hillside. A total of 31 live trees were sampled in the Junín department, Satipo province, Pampa Hermosa district near the Santa Rosa de Toldopampa population center. Chronologies were developed using conventional dendrochronological techniques. The regional chronology covers the period 1882-2020 (139 years) and is well replicated from 1945 to present (> 10 samples). The individual hillside and river margin chronologies cover the periods 1882-2020 and 1901-2020, respectively. To determine the main climatic factors controlling the growth of *P. Rodolfo-Vasquezii*, we compared our chronologies with local temperature and precipitation records. Growing season temperature (November to May) appears to be the main climatic factor and modulates interannual variations in the growth of this species. Trees growing on the hillside presented a higher average growth rate compared to trees on the river margin. Hillside trees were also more sensitive to rainfall during the previous growing season than trees located on the river margin. The growth of the hillside trees presented greater variability in growth compared to the trees located on the river margin.

The sensitivity to interannual temperature variations highlights the potential of *P. Rodolfo-Vasquezii* to provide climatically sensitive dendrochronological records in the Central Andes. However, trees growing in environments with higher water deficit were also related to precipitation during the previous growing season. Likewise, tree growth was also associated with fluctuations in Pacific sea surface temperatures in the ENSO 1+2 sector, indicating that *P. Rodolfo-Vasquezii* is a good estimator of ENSO variations in that sector of the Pacific.

Keywords: central Andes, climatic variations, ENSO, *Polylepis Rodolfo-Vasquezii*

INTRODUCCIÓN

Los impactos del calentamiento global son especialmente preocupantes en las regiones tropicales, donde la ocurrencia de eventos meteorológicos extremos se manifiesta con mayor intensidad en estos ambientes vulnerables ante la acción antrópica. Las regiones tropicales de América del Sur generan especial interés por sus características socioeconómicas, geográficas y ambientales.

Los Andes peruanos es el hábitat de una extraordinaria diversidad biológica y cultural, que abarcan las regiones fitogeográficas de Las Yungas, la Puna Húmeda y la Puna Xerofítica [1]. Muchas especies de *Polylepis ssp.* crecen en los Andes peruanos entre 1800 y 5100 m de altitud [2]. Algunos bosques de *Polylepis ssp.* representan las formaciones arbóreas de mayor altitud del mundo, alcanzando hasta 5000 m altitud. en los Andes húmedos y áridos, respectivamente [3]. Los bosques de *Polylepis ssp.* proporcionan servicios ecosistémicos a las comunidades locales de montaña, como la regulación del agua y la conservación de los nutrientes del suelo. Estos bosques también representan importantes refugios para la biodiversidad y un importante sumidero de carbono a gran altura [4].

En la Puna Húmeda de los Andes peruanos, las precipitaciones presentan una marcada estacionalidad con un prolongado intervalo seco de mayo a octubre. La afluencia de humedad desde el Océano Atlántico tropical y la cuenca del Amazonas está largamente modulada a escalas interanuales por el monzón de verano en América del Sur (SASM) y sus interacciones con El Niño - Oscilación del Sur (ENSO) y con otros forzantes de los Océanos Pacífico y Atlántico.

A partir de los cortos registros instrumentales (<40 años) no es posible alcanzar una visión de largo plazo de la variabilidad climática, de las tendencias en diferentes escalas temporales y de los períodos de retorno de eventos extremos. Sin embargo, el desarrollo de registros biofísicos de alta resolución a partir de los anillos de árboles permitirá caracterizar y entender la evolución climática en la región de estudio a escalas decenales y multicentenales.

Los árboles de *Polylepis Rodolfo-Vasquezii* crecen hasta 10 m de altura y presentan troncos retorcidos con el típico ritidoma de color marrón blanquecino a marrón rojizo. En un estudio previo desarrollado para la región de la Puna húmeda de los Andes peruanos se determinó su potencial dendrocronológico [5], indicando sus buenas características para estimar las variaciones climáticas mediante sus anillos de crecimiento. Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue el de estimar mediante el estudio de los anillos de crecimiento de la especie

P. Rodolfo-Vasquezii los cambios en las variaciones del clima para los últimos 150 años en los Andes del centro de Perú. Así también, determinar cómo responde el crecimiento de los árboles de *P. Rodolfo-Vasquezii* a las variaciones climáticas comparando dos sitios diferentes: margen del río y ladera del cerro. Esta información es muy útil para determinar cuál de los sitios presenta mejores características para desarrollar estudios dendrocronológicos y forestales.

La perspectiva temporal de largo plazo que se logra mediante el desarrollo de cronologías de ancho de anillos permite documentar el rango histórico de las variaciones del clima y contribuirá a predecir los cambios futuros en los Andes centrales del sur del Perú.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

1.1. Planteamiento y formulación del problema

1.1.1. Planteamiento del problema

Según el informe del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología de Perú (Senamhi) (1), durante los últimos años y por el efecto del calentamiento global, se ha perdido el 22 % de superficies de los glaciares de los Andes centrales del Perú. Esta disminución en la masa de glaciares implica una pérdida equivalente a 120 000 millones de metros cúbicos de agua, la cual afecta de manera considerable a las poblaciones locales que utilizan este recurso para el consumo, la agricultura, producción de energía eléctrica, minería y otras actividades económicas. Por lo tanto, resulta necesario entender los cambios climáticos pasados y presentes para predecir y contextualizar los cambios futuros a escalas locales, regionales y globales. Sin embargo, a pesar de las tendencias preocupantes del clima de los Andes centrales del Perú, la escasez y limitada longitud de los registros climáticos instrumentales disponibles (generalmente menos de 50 años de extensión) solo pueden ofrecer una visión limitada de variabilidad climática natural. Por lo tanto, se necesita una perspectiva de largo plazo y una escala espacial regional para documentar el rango histórico de las variaciones del clima y predecir los cambios futuros en los Andes centrales del Perú.

Los registros paleoambientales, tales como los anillos presentes en los árboles son aptos para el estudio del ambiente y el clima, permitiendo contar con variaciones interanuales que pueden ser extrapoladas a variaciones climáticas y, por lo tanto, disponer de registros climáticos en un largo periodo de tiempo (siglos a milenio) y con precisión anual (2). Si bien, los estudios dendrocronológicos han sido mayormente desarrollados en regiones de montañas, de clima

templado, como la región de la Patagonia, durante las últimas décadas se han incrementado los muestreos en las regiones tropicales y subtropicales de América del Sur, permitiendo el desarrollo de cronologías de ancho de anillos sensibles a las variaciones climáticas (3; 4; 5; 6; 7; 8).

Uno de los principales avances logrados en el desarrollo de la dendrocronología tropical ha sido mediante el empleo de la especie *Polylepis tarapacana* (9; 10). Esta especie se distribuye a lo largo del Altiplano de América del Sur (16° - 23° S) incluyendo el sector sur de Perú. Especies del género *Polylepis* (*P. Rodolfo-Vasquezii*, *P. regulosa* y *P. tarapacana*) presentes en Perú han demostrado tener anillos de crecimiento claramente demarcados y de formación anual, sensibles a la variabilidad climática y, por lo tanto, factibles de generar una red de anillos de árboles (11).

1.1.2. Formulación del problema

A. Problema general

¿Cómo responde el crecimiento de los árboles *P. Rodolfo-Vasquezii* a las variaciones climáticas en los Andes del centro de Perú durante los últimos 150 años, comparando dos sitios diferentes: margen del río y ladera del cerro?

B. Problemas específicos

- ¿Cuáles han sido los cambios en la temperatura y la precipitación en la región de estudio en los últimos 150 años?
- ¿Cómo se relaciona el crecimiento radial de *P. Rodolfo-Vasquezii*, en dos entornos diferentes, con las variaciones climáticas (temperatura y precipitación) y forzantes climáticos (ENSO)?
- ¿Qué cronología del ancho de anillos *P. Rodolfo-Vasquezii* se pueden desarrollar para representar las variables climáticas en cada sitio de estudio?
- ¿Qué diferencia existe en la respuesta del crecimiento a las variaciones climáticas entre los árboles de *P. Rodolfo-Vasquezii* ubicados al margen del río y en la ladera del cerro?

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Estimar las variaciones climáticas en los Andes del centro de Perú durante los últimos 150 años mediante el análisis de los anillos de crecimiento de *P. Rodolfo-Vasquezii* y su respuesta a los cambios en el clima en dos entornos diferentes.

1.2.2. Objetivos específicos

- Desarrollar una cronología regional de ancho de anillos de *P. Rodolfo-Vasquezii* en cada sitio de estudio: margen del río y ladera del cerro.
- Determinar la relación entre el crecimiento radial de los árboles de *P. Rodolfo-Vasquezii* con las variaciones de la temperatura superficial de mar (TMS) en el sector de pacífico tropical ENSO 1+2.
- Identificar mediante la cronología regional de ancho de anillos, los posibles cambios en la temperatura y precipitación ocurrido en los últimos 150 años.
- Comparar el crecimiento acumulado y la respuesta del crecimiento radial a las variaciones climáticas entre los árboles que se encuentran al margen del río y en la ladera.

1.3. Justificación e importancia

El crecimiento de diferentes especies de *Polylepis ssp.* en los Andes de Bolivia, Chile, Argentina e inclusive en algunos sitios al sur y centro del Perú, está controlado por las fluctuaciones de la temperatura y precipitación, por lo tanto, la especie *P. Rodolfo-Vasquezii* podría mostrar iguales resultados en el centro de los Andes de Perú.

La elaboración de cronologías de ancho de anillos de *P. Rodolfo-Vasquezii*, permite determinar cómo influye el clima en el crecimiento de estos árboles creciendo en diferentes ambientes de los Andes del centro de Perú. Asimismo, permite estimar los cambios en las variaciones climáticas ocurridos en los últimos 150 años. Por otra parte, a una escala local las características del sitio (como la pendiente asociada con las características del suelo), determinan en gran medida la velocidad del crecimiento y la sensibilidad del crecimiento a las fluctuaciones climáticas. Por lo tanto, identificar estas diferencias permite entender la influencia de otros factores no climáticos en el crecimiento de *P. Rodolfo-Vasquezii*.

La elección del área de estudio se basa en que los Andes de Perú presentan un gran vacío de información dendroclimática y requiere un intenso trabajo de colección de muestras dendrocronológicas para crear una red robusta de cronologías de ancho de anillos que pueda dar información climática a nivel regional. Estas cronologías proporcionarán nueva y valiosa información sobre el crecimiento de los árboles y el sistema climático en un área poco explorada.

1.4. Hipótesis de investigación

1.4.1. Hipótesis general

El crecimiento radial de *P. Rodolfo-Vasquezii* en los Andes del centro del Perú está influenciado por las variaciones climáticas, lo que permite utilizar esta especie como un indicador para estimar los cambios climáticos a lo largo de los últimos 150 años.

1.4.2. Hipótesis específicas

- Los árboles de *P. Rodolfo-Vasquezii* poseen un patrón común en su crecimiento radial por lo que permite desarrollar cronologías de ancho de anillos, tanto local como regional.
- Las variaciones en el ancho de los anillos de la especie *P. Rodolfo-Vasquezii*, se relaciona con las fluctuaciones anuales de la precipitación y la temperatura promedio de los meses de verano.
- La cronología regional de ancho de anillos de árboles en los Andes del centro de Perú refleja los cambios en temperatura y precipitación ocurridos en los últimos 150 años, asociados a variaciones en forzantes climáticos como el ENSO.
- El crecimiento de los árboles de la especie *P. Rodolfo-Vasquezii* ubicados en la ladera del cerro es más sensible a las variaciones climáticas que el de los árboles situados al margen del río, debido a las condiciones de crecimiento más extremas presentes en la ladera en comparación con el ambiente más favorable del margen del río.

1.5. Hipótesis estadísticas

1.5.1. Hipótesis nula

- H_0 : El crecimiento de *P. Rodolfo-Vasquezii* en los Andes del Perú no está controlado por las fluctuaciones de la temperatura y precipitación.

1.5.2. Hipótesis alterna

- H₁: Las variaciones climáticas de la temperatura y precipitación influye significativamente en el crecimiento de los anillos de los árboles de *P. Rodolfo-Vasquezii*.

1.6. Variables

1.6.1. Variable independiente

- Precipitación acumulada mensual (mm)
- Temperatura media mensual (°C)
- Temperatura superficial del mar (TSM) promedio mensual del Pacífico tropical, sector ENSO 1+2

1.6.2. Variable dependiente

- Índice de crecimiento del ancho de anillo anual de *P. Rodolfo-Vasquezii*
- Índice de crecimiento del ancho de anillo anual acumulado de *P. Rodolfo-Vasquezii*

1.6.3. Operacionalización de variables

Tabla 1. Operacionalización de variables

Tipo de variable	Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	indicador	Unidad de medida	Instrumento
Independiente	Precipitación acumulada mensual	Es la cantidad de agua procedente de la atmósfera hasta la superficie terrestre. Como la lluvia, llovizna, nieve, aguanieve y granizo.	Es el registro mensual de agua que cae en la atmósfera.	Climática	Total de precipitación mensual	Milímetro (mm)	Registro de la estación meteorológica del Senamhi.
	Temperatura media mensual	La temperatura es el nivel de calor existente en el aire de la atmósfera.	Es la temperatura media mensual del área de estudio.	Climática	Promedio de temperatura	Grados centígrados (°C)	Registro de la estación meteorológica del Senamhi.
	Temperatura superficial del mar promedio mensual del Pacífico tropical, sector ENSO 1+2	Es la temperatura existente en la superficie del sector Este del océano Pacífico tropical en el sector correspondiente a la región denominada El Niño-Oscilación del Sur 1+2 (N1-2).	Es la temperatura superficial del océano Pacífico tropical Este.	Climática	Anomalías de la temperatura superficial del mar	Índice adimensional	Registro de NOAA
Dependiente	Índice de crecimiento del ancho de anillos anual de <i>P. Rodolfo-Vasquezii</i> .	Los anillos de crecimiento proporcionan un registro anual que reflejan productividad del árbol.	Es el registro de la datación de un periodo de tiempo (anual) que indica el crecimiento de los árboles observado en la sección transversal.	Crecimiento	Ancho de anillos	Índice de crecimiento (adimensional)	Equipo de medición (velmex)
	Índice de crecimiento del ancho de anillos anual acumulados de <i>P. Rodolfo-Vasquezii</i> .	Los anillos de crecimiento proporcionan un registro anual que reflejan productividad del árbol.	Es el registro de la datación de un periodo de tiempo (anual) que indica el crecimiento acumulado de los árboles observado en la sección transversal.	Crecimiento	Ancho de anillos	Índice de crecimiento (adimensional)	Equipo de medición (velmex)

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes del problema

Los anillos de los árboles poseen la ventaja de registrar anualmente la variabilidad ambiental en la que se desarrollan los árboles y por ello son ampliamente usados para realizar reconstrucciones de la variabilidad climática en períodos que van de cientos a miles de años (2). La dendrocronología (la ciencia que estudia los anillos de crecimiento de los árboles) es aplicada en especies que presentan anillos definidos y un crecimiento radial influenciado por las variaciones climáticas.

Los Andes centrales de Perú se encuentran influenciados en gran medida por las variaciones climáticas ocasionadas por El Niño-Oscilación del Sur (ENSO), el cual produce una reducción en las precipitaciones durante los años de El Niño (12). Estas variaciones pueden ser registradas por las especies de árboles que sean sensibles a los cambios climáticos en estas regiones. Una de las especies que predomina en los Andes centrales son los árboles del género *Polylepis* que se encuentran a una altura entre los 3500 m y 5200 m [18]; este género, comprende unas 28 especies, entre ellas arbustos o árboles de 5 a 10 m de altura (*P. microphylla*, *P. pepeii*, *P. tarapacana*, *P. tomentalla subsp. nana*) y otras especies con una altura de hasta 25 m (*P. lanata*, *P. pautai*). Las especies de *Polylepis* se distribuyen en los Andes, desde Venezuela hasta el norte de Argentina y Chile, siendo Perú el país con mayor cantidad de especies (13).

Las condiciones donde se desarrollan los bosques de *Polylepis* se caracterizan por la relación con la temperatura, humedad y tipo de suelo; estos bosques están sujetos a fuertes fluctuaciones diurnas de temperatura de 20 °C a 30 °C. Estas especies crecen en la época

húmeda y relativamente más cálida (diciembre – marzo), su floración se da en época seca y fría (mayo – julio) (14).

En los Andes centrales de Bolivia, entre los 4000 y 5200 m de altura, se desarrollaron cuatro cronologías de ancho de anillos de *P. tarapacana*. Estas cronologías presentaron una extensión temporal variable en un rango entre los 98 y 705 años (9). Los autores pudieron establecer cómo los parámetros climáticos (precipitación y temperatura) controlan su crecimiento. También se realizó un estudio de *P. pepei* que crece entre 3700 a 4350 m de altura, el cual muestra que el crecimiento de los árboles está influenciado por la temperatura del verano, lo que indica que esta especie es adecuada para estudios paleoecológicos y paleoclimáticos en ambientes fríos y húmedos (15). En la investigación realizada del potencial dendroclimatológico de tres especies de *Polylepis* (*P. pepei*, *P. subsericans* y *P. regulosa*), cuyas muestras fueron tomadas cerca de Cusco y Arequipa, se obtuvo como resultado una correlación positiva entre la temperatura y el crecimiento de los árboles durante la estación de lluvia (diciembre – marzo) (16).

En un estudio reciente en la región de los Andes del centro del Perú, se determinó la presencia de anillos de crecimiento anuales claramente delimitados de la especie *P. Rodolfo-Vasquezii* y su relación con la temperatura de noviembre a mayo (3).

Estos estudios previos indican el alto potencial dendroclimático que presentan las especies de *Polylepis ssp.* en diferentes regiones de los Andes centrales y ayudarán a tener una perspectiva más amplia sobre la sensibilidad climática de la especie de *P. Rodolfo-Vasquezii* por estudiar bajo diferentes condiciones de sitio en los Andes del centro de Perú.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Dendrocronología

La palabra dendrocronología deriva del griego *dendron* que significa árbol, *crono* - tiempo y *logos* - conocimiento o ciencia. Por lo tanto, la dendrocronología es la ciencia que utiliza los anillos de los árboles o arbustos fechados en su año exacto de formación, para analizar los patrones temporales y espaciales de procesos físicos y culturales. Mediante la asignación de años calendario a cada secuencia de anillos y al análisis de los patrones de crecimiento de las series dendrocronológicas, es posible interpretar los factores que influyen en el crecimiento de uno o de un conjunto de árboles en un sitio en particular (17).

2.2.1.1. Principios de la dendrocronología

La dendrocronología está gobernada por un conjunto de principios, que es necesario considerar a la hora de realizar una investigación dendrocronológica.

A. Principio de uniformidad

Este principio establece que los procesos físicos y biológicos que vinculan los procesos ambientales actuales con los patrones de crecimiento de los árboles debieron operar en el pasado. Por lo que, al conocer la relación entre el clima y el crecimiento de los árboles en los siglos XX – XXI, se puede reconstruir el clima de periodos previos a la existencia de registros instrumentales a partir de los anillos de los árboles.

B. Principio del factor limitante

En este principio se destaca la existencia de factores que limitan el crecimiento de los árboles. Estos factores pueden ser la humedad del suelo, temperatura y precipitaciones, como también pueden ser factores antrópicos, biológicos, etc.

C. Principio de amplitud ecológica

Este principio establece que una especie arbórea puede crecer y reproducirse en un determinado rango de hábitat, denominado amplitud ecológica (18).

Por ejemplo, el cedro (*Cedrela odorata*) es una especie ampliamente distribuida en América del sur y crece en una amplia gama de hábitats. Por tanto, el cedro tiene una gran amplitud ecológica. Por el contrario, *P. Rodolfo-Vasquezii* crece en zonas restringidas en los Andes del centro de Perú. Por tanto, esta especie tiene una amplitud ecológica reducida. Este principio es importante porque los árboles que son más utilizados para la dendrocronología se encuentran a menudo cerca de los límites de su rango de distribución latitudinal, longitudinal y altitudinal.

D. Principio de selección de sitio

La selección del sitio de muestreo implica en limitar el espacio de muestreo, teniendo en cuenta que las muestras están afectadas de manera similar por un conjunto de factores limitantes, a su vez que los árboles seleccionados den la información que se requiere en la investigación. Por ejemplo, si se requiere estudiar las sequías, la selección de sitio tendría que ser un lugar donde los árboles se encuentren en lugares secos, ya que es probable que esto afecte en el crecimiento de los árboles. Mientras que si lo que se desea reconstruir son las temperaturas, se deberían buscar sitios fríos como en las zonas templadas y frías o en las zonas elevadas (18).

E. Principio de sensibilidad

En la observación de los anillos del árbol se puede observar la limitante que pudo tener en su crecimiento con respecto a los factores ambientales, el cual se da con la medición de los anillos. El crecimiento del anillo dependerá del factor ambiental de ese periodo de crecimiento (18).

F. Principio del fechado cruzado

Es el principio más importante de la dendrocronología, ya que su aplicación asegura la correcta asignación de años a cada anillo. El ancho de cada anillo anual debe cruzarse entre todos los radios y con los distintos árboles del sitio, esto es posible debido a que las condiciones ambientales del lugar de muestreo son iguales o similares, el cual limita el ancho de los anillos en la mayoría de los árboles y las fluctuaciones de un año a otro producen variaciones sincronizadas en la estructura de los anillos. La datación cruzada al hacer coincidir el patrón del ancho de los anillos ayuda a determinar los anillos ausentes o falsos presentes, y de esta manera se puede llegar a la cronología que más concuerde en la secuencia de crecimiento de un árbol con los otros, dando un fechado más preciso (18).

G. Principio de replicación

La replicación de muestras extraídas de un árbol, así como su extracción de distintos árboles, permite realizar comparaciones con la variabilidad entre árboles y entre grupo de árboles, las mediciones brindan información sobre los factores del sitio y el factor que controla su crecimiento, estas al ser cruzadas, se comparan entre varias muestras las cuales fueron fechadas de forma independiente y se verifica que no tengan ninguna inconsistencia entre sí, para brindar una información más confiable [22].

H. Principio del crecimiento agregado del árbol

Este principio establece que los factores que limitan al crecimiento del árbol, ya sea natural o por intervención humana puede «descomponerse». De modo que se pueda expresar en términos matemáticos el crecimiento de los anillos del árbol (R) en un año (t), teniendo en cuenta estos compuestos por varios factores:

$$R_t = A_t + C_t + \delta D1_t + \delta D2_t + E_t$$

Donde:

R_t : crecimiento del ancho de anillos en un determinado año.

A_t : tendencia de la edad relativa de crecimiento a causa de los procesos normales de envejecimiento fisiológico.

C_t : el clima que sucedió durante ese año.

$\delta D1_t$: ocurrencia de los factores de perturbación endógenos, relativo al propio árbol como individuo.

$\delta D2_t$: ocurrencia de factores de perturbación exógenos, dicho de otro modo, aquellos distribuidos extremos que afectan un grupo importante de árboles.

E_t : error aleatorio, por aquellos procesos que no están considerados a causa de la influencia de otros factores.

2.2.1.2. Aplicación de la dendrocronología

La dendrocronología se aplica en varios campos de la ciencia, ya que como se menciona, los anillos contienen información de muchos factores, los cuales pueden ser recuperados y analizados convenientemente, lo que permite realizar estudios y análisis de procesos ecológicos, geomorfológicos, climatológicos, arqueológicos, entre otros (17).

Dos de las subdisciplinas más utilizadas de la dendrocronología son la dendroclimatología y la dendroecología.

A. Dendroclimatología

Utiliza la información de los anillos ya fechados para realizar estudios del clima presente y pasado (19).

B. Dendroecología

Utiliza los anillos de crecimiento para ver los cambios en el entorno local en lugar del clima (19), así como los fenómenos relacionados a la dinámica de bosques como las infestaciones con insectos, aparición de plagas, aumento de población de animales, efectos de la actividad humana, etc.

2.2.2. Especie en estudio

2.2.2.1. Género *Polylepis*

Los bosques de *Polylepis* suelen crecer en zonas de difícil acceso, y para poder llegar a ellas, en su mayoría, se realiza largas caminatas. Este género también es conocido como

queñua, queuna, Q'eñua, quenuina, queñial, cceuna, okenhüa, quinca, chapra, impaya, manzanita, sacha, etc. (20). Cuenta con aproximadamente 35 especies que se distribuyen desde Venezuela hasta el noroeste de Argentina a lo largo de la cadena de montañas de los Andes, y alcanza su límite sur de distribución en las sierras de Córdoba, en el centro de Argentina.

2.2.2.2. *Polylepis* en el Perú

Los bosques de *Polylepis* están establecidos principalmente en ambientes de altura, tanto de la cordillera occidental, oriental y los valles interandinos de todo el territorio peruano a una altitud promedio entre 1800 hasta 5100 m (13).

El rango de precipitación donde se establecen los bosques de *Polylepis* es amplio y varía entre 250 hasta 2000 mm anuales, donde más del 70 % de las lluvias se concentran entre tres y siete meses, indicando su alta resistencia a las sequías, sin embargo, en algunas ocasiones requiere un buen nivel de humedad en el suelo para poder desarrollarse (20).

2.2.2.3. Características de la especie *Polylepis Rodolfo-Vasquezii*

A. Hábitat

Esta especie se encontró en la comunidad de Santa Rosa de Toldopampa y dentro del área de protección Pui-Pui, a una altura aproximada de 4000 – 4400 m de altitud, acompañada de árboles menos abundantes del género *Gynoxis*, *Escallonia*, *Hesperomeles* y *Clethra* (21).

B. Descripción botánica

- **Nombre científico:** *Polylepis Rodolfo-Vasquezii*
- **Familia botánica:** *Rosaceae*
- **Nombre común:** *Quinual, queñua, ingua, kewiña*

C. Características botánicas y fisonómicas

- **Altura:** árboles de hasta 10 m

- **Tallo:** tienen troncos generalmente torcidos, con ritidoma corto, de color pardo blanquecino a pardo rojizo.

- **Hojas:** son compuestas, alternas e imparipinadas, agrupadas hacia los extremos de las ramas dispuestas en grupos de tres, trifoliadas, de 20 mm de largo; folíolos sésiles y articulados al pecíolo, mayormente pelosos al envés, elípticos, 11-12 x 4.8-5 mm, ápice emarginado, con una muesca de 1 mm de ancho y 0.5 mm de profundidad; las hojas tienen un par de estípulas fusionadas alrededor del pecíolo formando una vaina hirsuta

de 5-7 x 3-4 mm; pecíolos canalizados, 11-12 mm de largo, extremo apical con tricomas dendríticas filamentosas unicelulares, agrupados en una hebra de 0,2 x 0,2 mm, los márgenes del pecíolo tienen tricomas glandulares claviformes multicelulares en grupos de tres.

- **Inflorescencia:** axilares, una por cada hoja de una flor. Flores de 17 mm de largo; pedicelos ligeramente hirsutos de 4 x 0.5 mm con dos brácteas ligeramente híspidas de 4 x 3 mm; 3 sépalos pilosos en el envés, glabros en el haz, dos de ellos iguales, erectos, estrechos, elípticos y cóncavos de 4,5 x 2,7 mm, uno es diferente elíptico, convexo, con ápice agudo revoluto en la anthesis de 5 x 3 mm; androceo con 3-5 pares de estambres (primer par de 3 mm, segundo par de 4 mm, tercer par de 5 mm, cuarto par de 6 mm y quinto par de 7 mm), anteras dorsifixadas de 1,2 x 1 mm, lanuginosas; gineceo de 14,5-15 mm de largo, ovario inferior de 4-5 x 2-3 mm, estigma irregularmente fimbriado de 2 x 0,6-1 mm, con pequeñas laminillas.
- **Frutos:** aquenios de 6 x 3 mm, indehiscentes, fuertemente hirsutos, con tres crestas ligeramente aplanadas; con una sola semilla.

D. Descripción organoléptica

La madera de *P. Rodolfo-Vasquezii* presenta una albura y duramen no diferenciado, el color más común es esta especie es un marrón amarillento, con una textura fina.

E. Descripción macroscópica

El anillo de crecimiento en esta especie es distinguible, su delimitación se ve fácilmente por la presencia de pares celulares más gruesos presentes al final de los anillos (3).

2.2.3. Anillos de crecimiento y clima

El anillo de crecimiento se forma por el *cambium vascular*, generando madera temprana que se forma al comienzo de cada estación de crecimiento y en periodos de rápido crecimiento radial y madera tardía que se forma hacia el final de temporada, esto delimita el límite del anillo y debido al contraste notorio se puede ver en la mayoría de las secciones transversales.

En algunas especies se forman anillos falsos, el cual es un anillo con límites definidos y supuestamente completo formando en una etapa de crecimiento que no corresponde al periodo anual completo, también existen anillos ausentes en algunos individuos, los cuales logran

identificarse solamente mediante la datación cruzada, al comparar con otras series de ancho de anillos que sí presentan el anillo.

Los anillos sensibles son aquellos que muestran una gran variabilidad en su ancho de año a año, reflejando las fluctuaciones ambientales, principalmente climáticas, que afectan el crecimiento del árbol. Por otra parte, los anillos complacientes son aquellos que muestran poca variabilidad en su ancho de año a año, indicando que las condiciones de crecimiento del árbol son relativamente constantes y no limitadas por variaciones climáticas.

Para los estudios climáticos, los árboles sensibles son el objetivo porque es probable que su variación de anillos refleja mejor las variaciones climáticas que los árboles complacientes. El clima es el principal factor limitante que imparte la variabilidad en el crecimiento de un año a otro y que, por lo tanto, hace posible la datación cruzada (22).

2.2.4. El Niño - oscilación del Sur (ENOS)

Existen varios índices utilizados para monitorear el Pacífico tropical, todos ellos basados en anomalías de la temperatura superficial del mar (TSM) promediadas en una región determinada. Por lo general, las anomalías se calculan considerando como base un periodo mayor o igual a 30 años. Los índices más utilizados para definir los fenómenos del El Niño y La Niña son El Niño 3.4 y El Niño oceánico (ONI). Los números de las regiones Niño 1, 2, 3 y 4 corresponden con las identificaciones asignadas a las rutas de los barcos que atravesaron esta región. Los datos de estos barcos permitieron rescatar los registros históricos de El Niño hasta 1949.

ENOS es una fluctuación natural de las TSM y la presión superficial del aire del océano Pacífico tropical entre el este y oeste. Este fenómeno natural es uno de los principales forzantes de la variabilidad climática interanual en la tierra. El Niño y La Niña son las fases cálida y fría de ciclo ENOS, y tienen un profundo impacto en el clima regional y mundial mediante patrones de gran escala y alcance, conocidos como teleconexiones atmosféricas.

La región de El Niño 1+2 (0°-10°S, 90°-80° O) es la más pequeña y la más oriental de las regiones del ENOS, y corresponde a la región de la costa de Sudamérica donde El Niño fue reconocido por primera vez por las poblaciones locales. El Niño 1+2 tiende a tener la mayor varianza de los índices de TSM del ENOS. La región del Niño 3 (5° N-5° S, 150°-90° O) fue en su momento el principal objetivo de seguimiento y predicción de El Niño, pero las investigaciones aprendieron más tarde que la región clave para las interacciones acopladas entre el océano y la atmósfera para el ENOS se encuentra más al oeste [27]. Por lo tanto, El Niño 3.4

y el ONI se convirtieron en los índices favoritos para definir los eventos de El Niño y La Niña. Las anomalías de El Niño 3.4 (5° N- 5° S, 170° - 120° O) pueden considerarse como una representación de la media de las TSM ecuatorial a lo largo del Pacífico, desde la línea divisoria hasta la costa sudamericana. El Niño 3.4 suele utilizar una media móvil de 5 meses, y los fenómenos de El Niño o La Niña se definen cuando las TSM de El Niño 3.4 superan $\pm 0.4^{\circ}$ C durante un período de seis meses o más, El índice Niño 4 (5° N- 5° S, 160° E – 150° O) capta las anomalías de la TSM en el Pacífico ecuatorial central. Esta región tiende a tener menos varianza que otras regiones de El Niño.

Es importante detectar que para algunas regiones como, por ejemplo, la costa del Ecuador y Perú, los cambios que ocurren en las condiciones del océano de la atmósfera en la región Niño 1+2 suele repercutir más directamente que los de la región Niño 3.4.

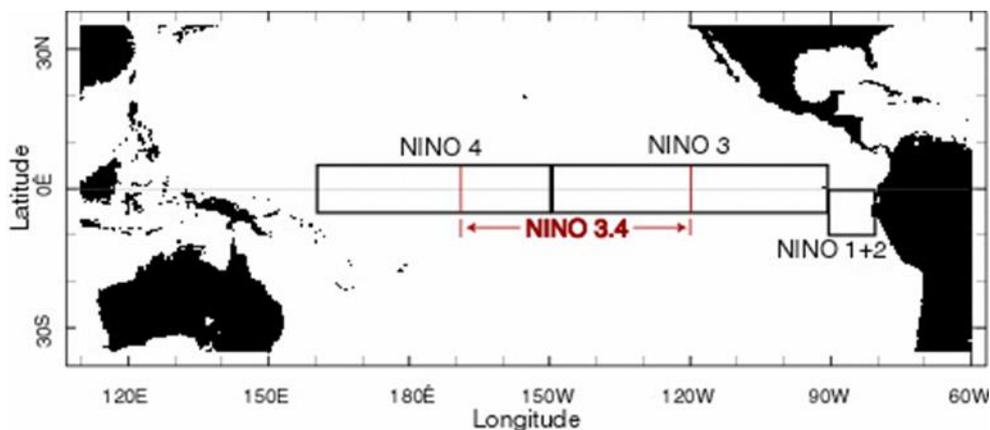


Figura 1. Esquema de las regiones utilizadas para los distintos índices ENOS del Pacífico tropical. Niño 1+2: 0° - 10° S, 90° - 80° O; Niño 3: 5° N- 5° S, 150° - 90° O; Niño 3.4: 5° N- 5° S, 170° - 120° O, Niño 4: 5° N- 5° S, 160° E- 150° O.

Imagen extraída de National Centers for Environmental information NOAA (National Oceanic and atmospheric administration)

2.3. Definición de términos

- **Cambio climático:** Cambios sustantivos de largo plazo de los patrones y parámetros climáticos. Estos cambios pueden ser naturales, por ejemplo, mediante las variaciones del ciclo solar, o pueden resultar por las influencias de la intervención humana, debido principalmente a la quema de combustibles fósiles como el carbón, el petróleo y el gas.
- **Cofechado:** Es un método que realiza un control de calidad de los datos de un conjunto de mediciones de anillos de árboles, verificando las dataciones cruzadas entre las series de mediciones e indicando posibles problemas de datación o de medición. Identifica las partes de las series de anillos de árboles que pueden tener errores de dataciones o errores importantes de medición (23).

- **Registros paleoclimáticos:** Estos registros se obtienen a partir de archivos ambientales o históricos, los cuales representan fuentes de información que pueden ser usadas para estimar las condiciones ambientales del pasado por cientos, miles y cientos de miles de años (24). Sin embargo, dependiendo del tipo de registro se puede obtener diferente tipo de información ambiental. Esto depende de las señales climáticas que detecte cada tipo de archivo, para el caso de los anillos de los árboles, la señal climática capturada tiene una frecuencia interanual, decadal y hasta centenal (18).

- **Anillo de crecimiento:** Bandas concéntricas compuestas por distintos tamaños de células, que genera la madera temprana y madera tardía.

- **Cronología:** Serie obtenida de varias series de anillos de cada muestra datadas y expresadas en función de una escala temporal absoluta o relativa.

- **Cofecha:** Programa con el que, mediante los archivos de medición de cada radio de una muestra, compara estadísticamente el fechado de estas muestras correlacionándolas sucesivamente en segmentos de 50 años con un traslape de 25 años (25).

- **Cofechado:** Ayuda en el control de calidad estadística de las medidas del ancho de anillo de un conjunto de muestras de árboles.

- **Velmex:** Equipo que sirve para medir el ancho de anillo en cada una de las muestras.

CAPÍTULO III METODOLOGÍA

3.1. Método y alcance de la investigación

3.1.1. Método de la investigación

Siguiendo los métodos tradicionalmente utilizados en dendrocronología (18), en esta investigación se desarrollaron dos cronologías de ancho de los anillos de la especie *P. Rodolfo-Vasquezii* de dos ambientes diferentes. A partir de estas cronologías se estableció la relación que existe entre la precipitación y temperatura con el crecimiento radial mediante la medición de los anillos de crecimiento anuales. Además de comparar el crecimiento de los árboles que crecen en el margen del río y la ladera del cerro.

3.1.1.1. Método general

El método general de la investigación fue científico. Fue un estudio empírico, ya que relacionó variables cuantitativas como el crecimiento de los árboles con precipitación y temperatura.

3.1.1.2. Método específico

El método específico del estudio fue inductivo-deductivo. Porque primero se llevó a cabo un análisis inductivo mediante la observación y comparación de las muestras en el margen del río y la ladera del cerro, este análisis buscó identificar patrones comunes de crecimiento. Posteriormente se aplicó un enfoque deductivo basado en las observaciones iniciales, se formuló la hipótesis y un mejor análisis.

3.1.1.3. Nivel de investigación

La investigación fue de nivel correlacional, tuvo por finalidad establecer la relación del crecimiento de los anillos con la precipitación y la temperatura. Asimismo, fue comparativa porque se describe el crecimiento entre los árboles de dos unidades ambientales diferentes.

3.1.1.4. Tipo de investigación

El tipo de estudio fue aplicado, porque las variables por estudiar son la precipitación y temperatura que influyen en el crecimiento de los anillos de *P. Rodolfo-Vasquezii*. Y la temperatura de la superficie del mar (TSM) de la región ENSO 1+2, con el crecimiento radial de *P. Rodolfo-Vasquezii*.

3.2. Diseño de la investigación

La investigación realizada fue no experimental, ya que no se manipula la variable dependiente e independiente.

3.3. Esquema de la investigación

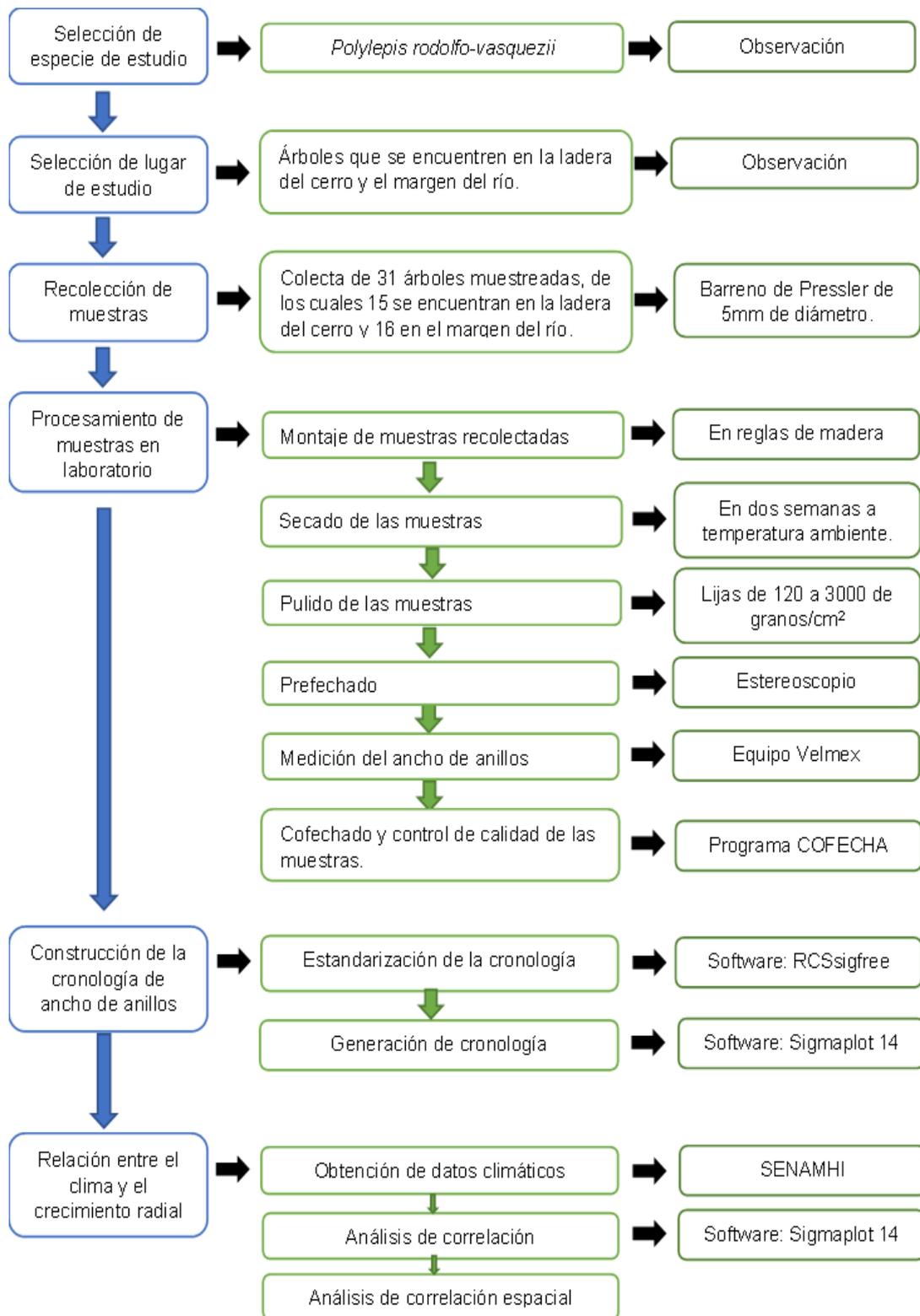


Figura 2. Esquema del trabajo de investigación

3.4. Población y muestra

3.4.1. Población

La población estuvo conformada por los árboles de *P. Rodolfo-Vasquezii* distribuidos en el centro poblado de Santa Rosa de Toldopampa.

3.4.2. Muestra

Se seleccionaron 31 árboles, de las cuales 16 se encontraban en la margen del río y los otros 15 árboles en la ladera del cerro contiguo.

3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

3.5.1. Área de estudio

El área de estudio estuvo ubicada en el departamento de Junín, provincia de Satipo, distrito de Pampa Hermosa cercana al centro poblado de Santa Rosa de Toldopampa.

Tabla 2. Ubicación geográfica del área de estudio

Coordenadas geográficas		Coordenadas UTM		Altitud (m s. n. m.)
Longitud	Latitud	Norte	Este	
74° 56' 26.02'' O	11° 27' 28.14'' S	8733397.98 m	506483.01 m	4174

3.5.2. Fitogeografía

El lugar de estudio pertenece florísticamente a la provincia biogeográfica de la Puna (3), a su vez se encuentra en la zona de vida de bosque pluvial-Montano tropical (bp-MT) (26).

Las primeras muestras extraídas fueron al margen del río, el cual se encuentra en una quebrada rocosa. El otro bosque se ubica en la ladera del cerro, ocupa un terreno con topografía accidentada como se muestra en la imagen (**Figura 3**).

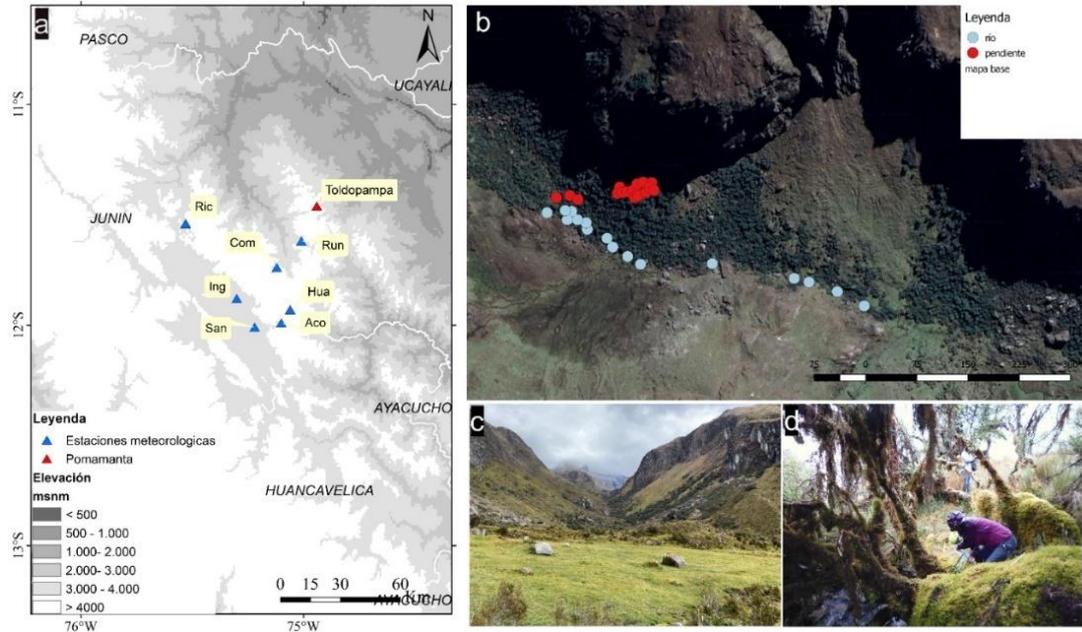


Figura 3. Área de estudio

(a) Mapa de los Andes del centro del Perú mostrando la ubicación geográfica del área de muestreo dendrocronológico (triángulo rojo) y las estaciones meteorológicas (triángulos azules) utilizadas en este estudio. (b) Imagen satelital, donde se identifican la posición geográfica de cada árbol muestreado; los círculos de color rojo representan a los árboles muestreados sobre la ladera del cerro y los círculos celestes sobre el margen del río. (c) Muestra el bosque donde se encuentran los árboles muestreados. (d) Árbol muestreado al margen del río.

3.5.3. Caracterización climática del área de estudio

Para la caracterización climática del área de estudio, se usaron los datos del Senamhi de la estación meteorológica de Comas, ubicado a unos 61 km de distancia aproximadamente con respecto al área de estudio. La temperatura media anual registrada es de 8.4 °C y una precipitación anual total de 939.2 mm, presenta déficit hídrico durante junio y la recarga hídrica se produce entre diciembre a marzo, lo cual corresponde a un 60 % aproximadamente (Figura 4).

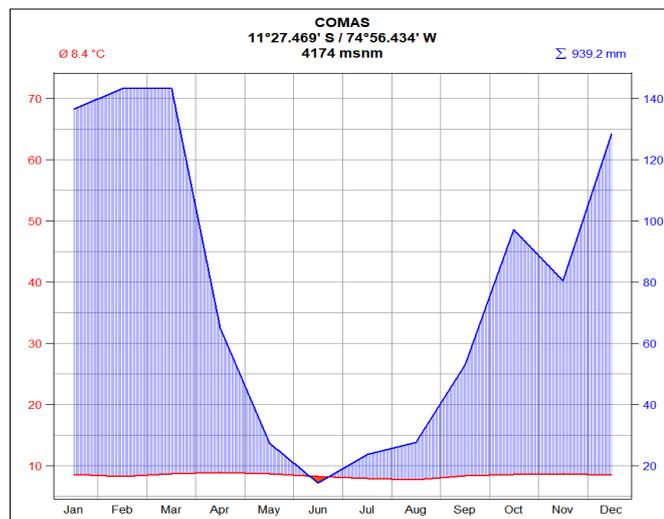


Figura 4. Climograma de Walter-Lieth para la estación meteorológica de comas
Datos del Senamhi de 1994 - 2014

3.5.4. Recolección de muestras

Las muestras fueron recolectadas el 17 de junio del 2021, teniendo en cuenta su ubicación, se muestrearon 16 árboles en el margen del río y 15 árboles en la ladera del cerro contiguo. De cada árbol se extrajeron dos muestras como mínimo, teniendo un total de 30 series para el margen de río y 31 series para la ladera del cerro. Las muestras fueron tomadas en el fuste principal de los árboles a la altura del pecho (1.30 m), utilizando un barreno de incremento de Pressler de 5 mm y en la mayoría de los casos se obtuvo un radio con médula. Por último, la muestra extraída fue colocada en sorbetes, los cuales fueron sellados y etiquetados con un código y posteriormente guardados en un portaplanos.

Tabla 3. Características y estadísticos de las cronologías de ancho de anillos de *P. Rodolfo-Vasquezii*.

Sitio	Código	N.º árboles		N.º total de radios	N.º total de radios medidos	N.º series cofechadas	Periodo (años)		Años
		Vivos	Muertos				Inicio	Final	
Margen del río	Vatlr	16	0	32	30	27	1901	2020	120
Ladera del cerro	Vatpen	15	0	31	31	26	1882	2020	139
Todos	Vat	31	0	63	61	53	1882	2020	139

3.5.5. Colección de datos

Para realizar la colecta de datos se usó un cuaderno de campo en el cual se anotó el diámetro del fuste principal y altura total del árbol. Y para determinar la posición geográfica y coordenadas UTM de los árboles se usó un GPS (Tabla 7 y 8).

3.6. Procesamiento y análisis de datos

3.6.1. Procesamiento de muestra

Las muestras fueron montadas en reglas de madera, se identificó la zona de muestreo con un código de tres letras («Vat»). se rotuló un código de tres letras para identificar el rodal. A los árboles que se encontraron al margen del río se les asignó el código «lr» («Vatlr»), mientras que, para los árboles que se encontraban en la ladera del cerro se les asignó el código «pen» («Vatpen»). A cada muestra se le asignó un número y a cada serie medida (dos por árbol) se identificó con una letra «a» o «b» (e.g. «Vatpen01a»). Se completó la identificación de la muestra con el nombre del lugar y la fecha de recolección. Una vez montadas las muestras, se dejaron secar a temperatura ambiente aproximadamente por dos semanas, posteriormente, fueron pulidas con lijas de granulometría de densidad creciente de 120 a 3000 granos/cm² para obtener una correcta visualización de las delimitaciones de los anillos de crecimiento.

Las muestras fueron fechadas visualmente haciendo uso del estereoscopio, desde el anillo más cercano a la corteza hasta la médula. A cada uno de estos anillos se le asignó un año calendario, correspondiendo el anillo pegado a la corteza al 2020. Según la convención de Shulman (27), indica que para el hemisferio sur, donde la temporada de crecimiento ocurre durante dos años calendarios, se le asigna a cada anillo de árbol el año calendario correspondiente al año en que comenzó su crecimiento radial. Si el anillo comenzó a formarse en el 2000 y finaliza en el 2001, el año asignado correspondería al 2000. En este caso, las muestras fueron colectadas el 17 de junio del 2021, el último anillo completo sería en el periodo 2019-2021, por ello se le asignó el 2020 como último año. Luego, el ancho de los anillo de crecimiento fueron medidos y digitalizados con un equipo de medición Velmex con un micrómetro con precisión de 0.001 mm, el cual está conectado a una platina deslizable acoplada a una computadora.

Las mediciones obtenidas fueron insertadas al programa Cofecha (25), para la verificación de posibles errores en el proceso de fechado visual de las muestras, para lograr identificar anillos falsos o ausentes. Cada serie de crecimiento se comparó estadísticamente por segmentados de 50 años con un traslape de 25 años, obteniendo los datos que se muestran en la **tabla 3**. El nivel crítico de confianza al 95 % para un $N = 50$ es de 0.328 (28).

3.6.2. Construcción de la cronología

A partir de las mediciones de los anillos de crecimiento de las 61 muestras, se construyeron las cronologías que representan las variaciones interanuales de crecimiento radial de los árboles, eliminando las variables biológicas que son propias de su crecimiento (e. g. la edad biológica) y las variables que no son comunes en el crecimiento de los árboles como efectos de micrositio, características del suelo, distribución, competencia con plantas vecinas, etc.

3.6.3. Estandarización

Para poder realizar la estandarización se usó el programa RCSsigFree_v45 disponible en la siguiente página web (<https://www.geog.cam.ac.uk/research/projects/dendrosoftware/>). La función de la estandarización es eliminar las variaciones que no guardan relación con los factores climáticos, removiendo la varianza que se da por los factores biológicos, como la edad biológica de los árboles. De esta manera, se maximiza la señal de alta frecuencia; es decir, variaciones interanuales, generalmente asociadas a factores climáticos, mientras que elimina las tendencias de largo plazo asociadas a factores no climáticos.

De esta manera, cada serie individual fue estandarizada y ajustada utilizando una curva exponencial negativa o una regresión lineal. Aquí los índices de crecimiento son calculados para cada año mediante el cociente entre el valor medido y el valor de la serie de ajuste para el mismo año. La serie resultante tiene media igual a uno, y una varianza relativamente homogénea a lo largo de toda la serie. Esto permite promediar los índices estandarizados de las muestras en una única cronología de ancho de anillos. Cuando se elimina la tendencia de la edad biológica, también puede perderse parte de la varianza relacionada con señal climática, lo que provoca una distorsión de la tendencia en la serie de índices resultante (29). Para evitar esto, la cronología estándar se desarrolló utilizando el procedimiento Signal Free (29; 30).

La calidad de la cronología se midió mediante los siguientes parámetros: sensibilidad media (SM), la expresión de la señal de la población (EPS) y la correlación media entre series (R-bar). El EPS mide la fuerza de la señal común en la cronología comparando una cronología de muestra finita con una cronología hipotética que ha sido replicada infinitamente. Aunque no existe un nivel de significación para el EPS, el valor superior a 0.85 se acepta generalmente como un buen nivel de fidelidad de la señal común entre los árboles (31). El R-bar es el promedio de los coeficientes de correlación que resultan de la comparación de todos los pares posibles de segmentos de una longitud determinada entre todas las series de ancho de anillos que integran una cronología (32). El R-bar varía de 0 a 1, los valores bajos indican una falta de crecimiento común, mientras más alto sea el valor más fuerte será la señal común, por lo tanto, menos varianza que representa menos ruido en la serie de *P. Rodolfo-Vasquezii* (32).

3.6.4. Curvas de crecimiento radial acumulado

Para la construcción de la curva de crecimiento radial acumulado se utilizó el programa AGE (Programa de crecimiento de los árboles por edad), que forma parte de la Biblioteca de Programas Dendrocronológicos (25), para realizar el análisis se utilizaron los testigos (muestras obtenidas con el barrenado) de *P. Rodolfo-Vasquezii*, el programa AGE calcula el crecimiento acumulado y promedio por individuo y testigos, teniendo en cuenta su edad biológica o la edad cronológica del testigo. El ancho de los anillos de un testigo fechado al año calendario o al de formación se los promedia, obteniendo la tasa anual de crecimiento cronológico por testigo. Por otro lado, si los anillos son promediados con base en su edad biológica se obtiene la tasa anual del crecimiento biológico, en este sentido, el primer anillo de crecimiento que incluye la médula y la primera banda de crecimiento leñoso secundario, se le asigna la edad 1.

3.6.5. Recopilación y análisis de datos meteorológicos

3.6.5.1. Datos meteorológicos

Se recopilaron registros mensuales de precipitación y temperatura de ocho estaciones meteorológicas ubicadas por encima de los 3000 m s. n. m. en los Andes del centro del Perú y las que se encuentran más cerca de la zona donde se extrajo las muestras, entre los 11° y 12° S. Solo se consideraron los registros de las estaciones con menos del 10 % de datos faltantes y aquellas estaciones que cuentan con más de 25 años de datos climáticos. Con el objetivo de identificar las variables climáticas y las estaciones mejor relacionadas con el crecimiento de los árboles, se calculó el coeficiente de correlación entre la precipitación y temperatura de cada estación meteorológica con la cronología de ancho de anillos utilizando una plantilla de Excel donde se calcula el coeficiente de correlación de la precipitación y temperatura con el ancho de anillo estandarizada de *P. Rodolfo-Vasquezii*.

3.6.5.2. Serie climática de la temperatura de la superficie del mar

Para determinar la influencia de El Niño - oscilación del Sur (ENOS) en el crecimiento de *P. Rodolfo-Vasquezii*, se descargaron los datos de las anomalías de la temperatura de la superficie del mar reconstruida (SST) de la base de datos que se encuentran en la página (<https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/enso/sst>) de El Niño 1+2 (0-10° S, 90° W-80° W), con los índices mensuales que van de 1982 hasta 2020.

3.6.5.3. Correlación espacial

Para la evaluación espacial se consideraron los datos de SST con el ancho de anillos para el periodo de crecimiento de septiembre – mayo del periodo 1981 – 2020 ($p < 0.001$) en KNMI *Climate explorer* (<https://climexp.knmi.nl/start.cgi>).

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultados del tratamiento y análisis de la información

4.1.1. Análisis de datos climáticos instrumentales

De las ocho estaciones que se consideraron (tabla 4), los datos de las estaciones de Acopalca y Huaytapallana solo cuenta con 8 y 9 años, respectivamente, de registro meteorológico, los cuales no son suficiente para analizar las tendencias y relacionar con el crecimiento de los árboles. De las seis estaciones restantes, la que presenta mejor correlación tanto con la temperatura como con la precipitación es la estación meteorológica de Comas. Por lo tanto, esta fue la estación que se utilizó para los sucesivos análisis.

Tabla 4. Características de las estaciones meteorológica seleccionadas de precipitación y temperatura

Estación	Latitud(S)	Longitud (W)	Elevación (m s. n. m.)	Periodo Pp	Periodo T°
Runatullo	11° 37' 5.2''	75° 0' 44.1''	3473	1967 – 2022	2000 – 2022
Comas	11° 44' 52.6''	75° 7' 48.4''	3603	1967 – 2022	1994 – 2022
Ingenio	11° 52' 30.8''	75° 17' 47.9''	3373	1963 – 2022	2000 – 2022
Ricran	11° 32' 24.05''	75° 31' 38.20''	3674	1965 – 2021	2001 – 2021
Santa Ana	12° 0' 34.4''	75° 13' 17.74''	3293	1992 – 2018	1992 – 2018
Acopalca	11° 59' 14.36''	75° 6' 12.68''	3897	2013 – 2022	2013 – 2022
Huaytapallana	11° 55' 36''	75° 3' 42''	4684	2013 – 2021	2013 – 2021
Huayao	12° 2' 24.7''	75° 19' 13.8''	3321	1950 – 2014	1950 – 2014

4.1.2. Cofechado de series dendrocronológicas

En la tabla 5, se muestran los resultados del control de calidad de las mediciones de ancho de anillos realizados en el programa Cofecha, con un nivel de correlación de 0.328 a un 95 % de significancia.

Tabla 5. Características generales de las cronologías de *P. Rodolfo-Vasquezii* (datos obtenidos en el Cofecha)

Estadísticos	Vat	Vatlr	Vatpen
Número de árboles	28 árboles que es el 90 % del total de árboles muestreados.	15 árboles que es el 48 % del total de árboles muestreados.	13 árboles que es el 41 % del total de árboles muestreados.
Número de series	53	27	26
Serie	139 años	120 años	139 años
Intervalo de tiempo	1882 – 2020	1901 – 2020	1882 – 2020
Total de anillos en la serie	3016	1691	1325
Total de anillos fechados comprobados	2997	1679	1287
Intercorrelación de la serie	0.510	0.489	0.521
Sensibilidad media (SM)	0.331	0.313	0.353
EPS	0.943	0.907	0.926
R-bar	0.354	0.344	0.375

*Vat: código de todas las muestras analizadas

*Vatlr: código de las muestras extraídas del margen del río

*Vatpen: código de las muestras extraídas de la ladera del cerro

4.1.3. Cronología regional de ancho de anillos de la especie *P. Rodolfo-Vasquezii*

La cronología regional de *P. Rodolfo-Vasquezii*, compuesta por 53 radios, por un período de 139 años (1882 al 2020), sin embargo, se encuentra robustamente replicada desde 1944 (>10 árboles; figura 5b). Los estadísticos comúnmente utilizados en dendrocronología para evaluar la calidad de los registros de anillos de árboles, indican que la cronología de *P. Rodolfo-Vasquezii* es de buena calidad.

El EPS promedio de la serie es 0.943, por encima del umbral de calidad de 0.85, en la cronología desde 1941 es más robusta. El R-bar promedio de las 53 series, es de 0.354, indicando una buena señal común entre las series que integran la cronología.

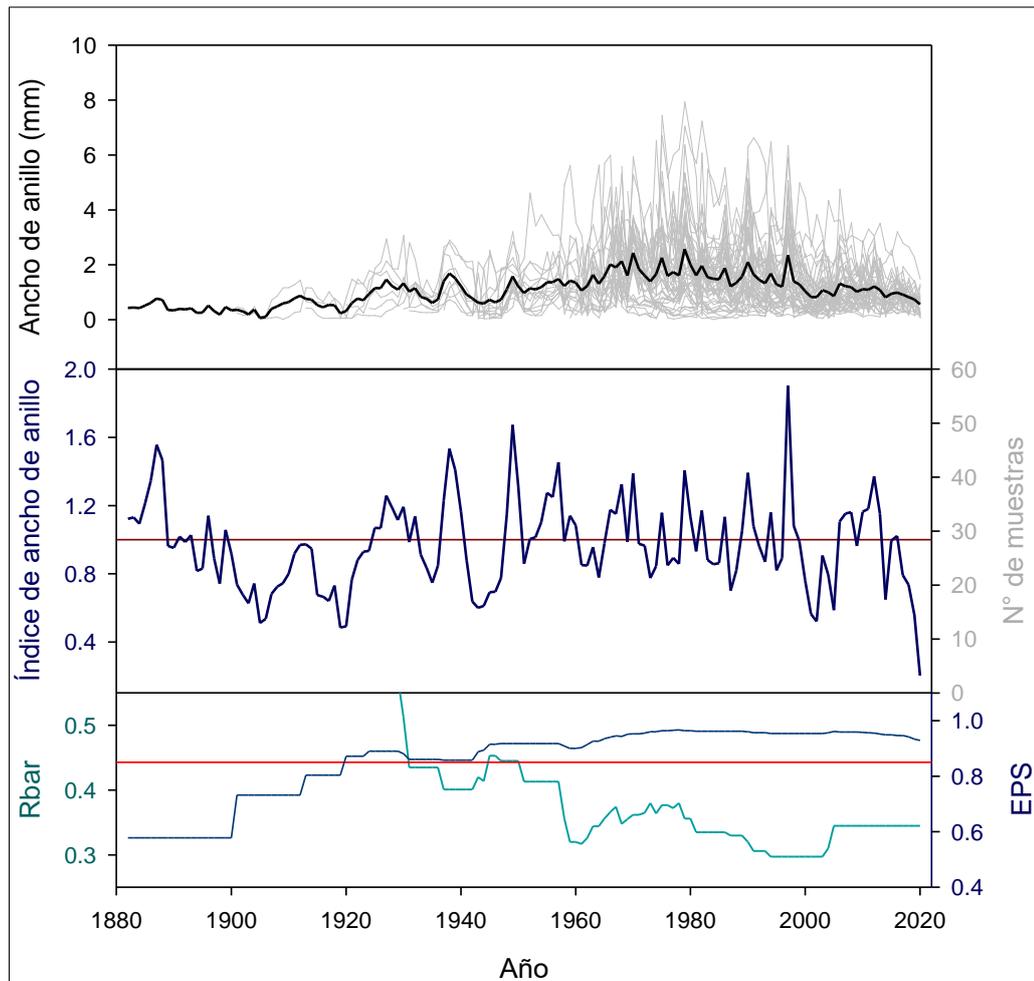


Figura 5. (a) Variación anual del ancho de anillos (líneas plomas) con la media (línea negra), (b) cronología estándar de anillos y (c) variación en $R\text{-bar}$ y EPS

4.1.4. Cronologías individuales para las muestras provenientes del margen del río y la ladera del cerro

La cronología final obtenida para los árboles que se encuentran en el margen del río cubre un periodo de 120 años (1901 – 2020) y tiene 27 series, mientras que los que se encuentran en la ladera del cerro cubre un periodo de 139 años (1882 – 2020) y tiene 26 series (tabla 3). En la figura 6 se observa que los árboles que se encuentran en el margen del río (Vatlr) presenta una réplica adecuada ($N > 10$ series) a partir de 1945, mientras que en la ladera del cerro (Vatpen) es a partir de 1970.

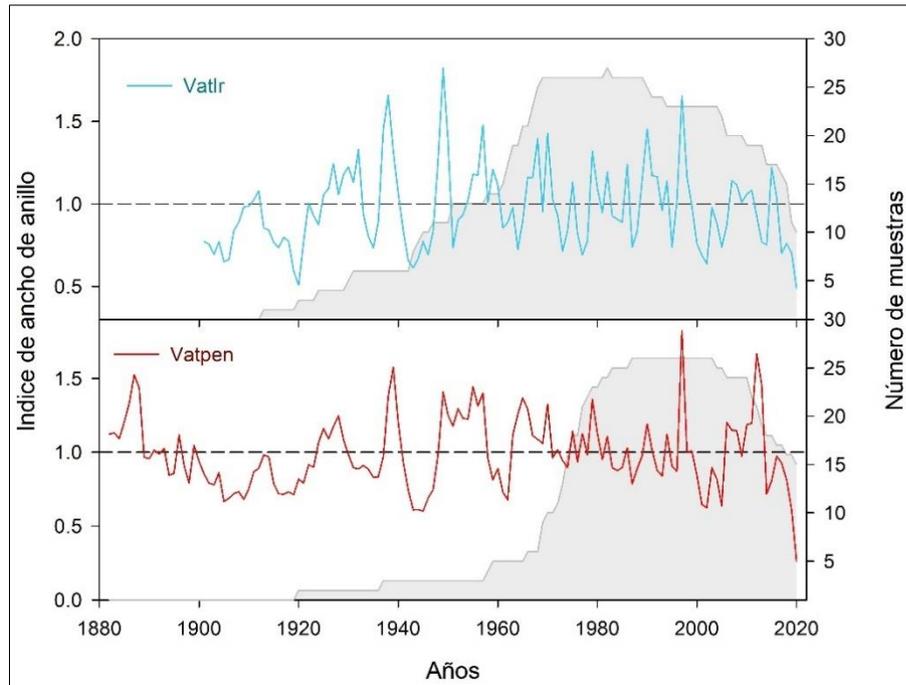


Figura 6. Cronología de ancho de anillo de *P. Rodolfo-Vasquezii* que se encuentran al margen del río (Vatlr) y en la ladera del cerro (Vatpen)

El EPS promedio de Vatlr es de 0.907, superior al umbral de 0.85, por lo tanto, el EPS indica que la cronología es de buena calidad a partir de 1945. El R-bar promedio de las 27 series es de 0.354, indicando una alta señal común entre las series (figura 7).

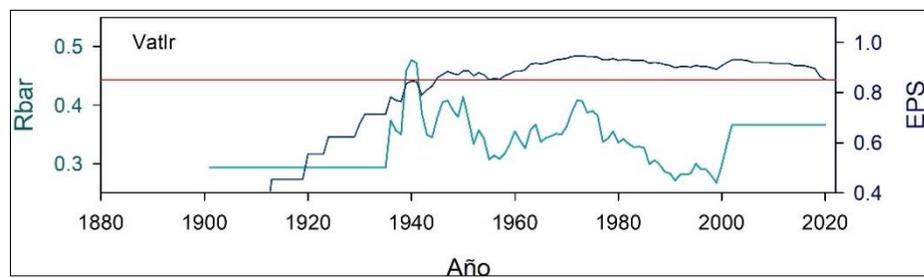


Figura 7. Estadísticos que evalúan la calidad de la cronología de Vatlr

El EPS promedio de Vatpen es de 0.926, superior al umbral de 0.85 por lo tanto el EPS indica que la cronología es de buena calidad a partir de 1970. El R-bar promedio de las 26 series, es de 0.375, indicando una alta señal común entre las series (figura 8).

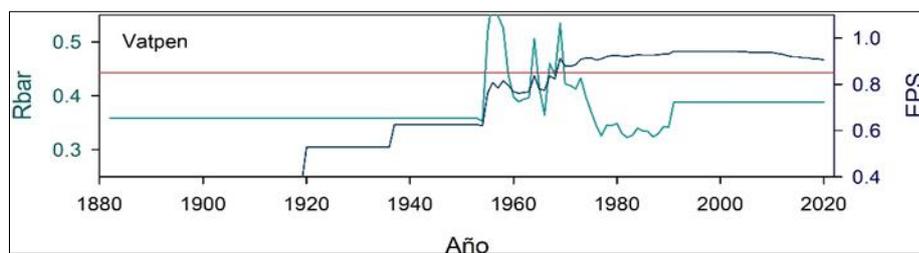


Figura 8. Estadísticos que evalúan la calidad de la cronología de Vatpen

4.1.5. Relación entre el crecimiento radial de los árboles con el clima

En la figura 9 se muestra la correlación mensual entre el crecimiento radial de los árboles muestreados (cronología regional) con la temperatura media mensual y la precipitación total entre 1994 – 2014. El crecimiento de *P. Rodolfo-Vasquezii* muestra relaciones positivas con la temperatura durante la mayoría de los meses analizados, siendo significativo para septiembre del año de crecimiento previo (t-1) y de abril y mayo para el periodo de crecimiento actual (t) como se observa en la figura 9b. Mientras que las precipitaciones presentan una relación negativa en julio del periodo de crecimiento previo (t-1) (figura 9a).

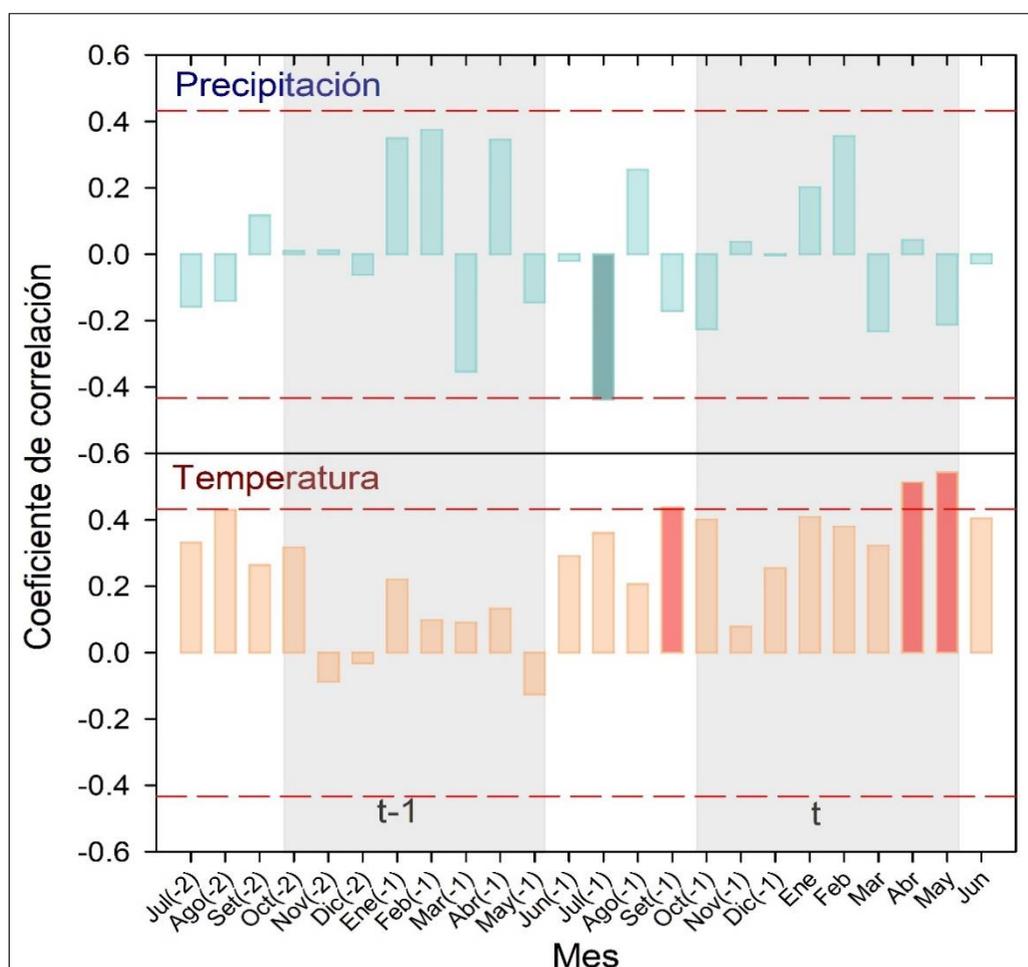


Figura 9. (a) Coeficiente de correlación de Pearson entre la cronología de anillo de *P. Rodolfo-Vasquezii* y la temperatura (color naranja) y (b) la precipitación (color celeste) para el período 1994-2014. Las líneas discontinuas de color rojo representan el nivel de significancia del 95 %. El sombreado de color plomo indica la temporada de crecimiento previo (t-1) y actual (t) sugeridas para *P. Rodolfo-Vasquezii*

En la figura 10 se observan las correlaciones mensuales entre el crecimiento radial de los árboles provenientes del margen del río y de la ladera del cerro, con la temperatura media mensual y la precipitación total mensual entre los años 1994-2014. El crecimiento de *P. Rodolfo-Vasquezii* que se encuentra en la margen del río (lr) mostró relaciones positivas con la

temperatura durante la mayoría de los meses analizados, siendo significativo para abril y mayo del periodo de crecimiento actual (t) como se observa en la figura 10b. Mientras que las precipitaciones de julio del periodo de crecimiento previo (t-1) y mayo del período de crecimiento actual (t) presentaron correlaciones negativas (figura 10a).

El crecimiento de los árboles ubicados en la ladera del cerro (pen) también mostró relación positiva con la temperatura, siendo significativas durante abril y mayo del periodo actual (t) y en agosto correspondiente al año calendario (t-2) previo al periodo de crecimiento (figura 10d). Además, el crecimiento se relacionó positivamente con las precipitaciones del periodo de crecimiento previo, siendo significativa la correlación durante abril (figura 10c).

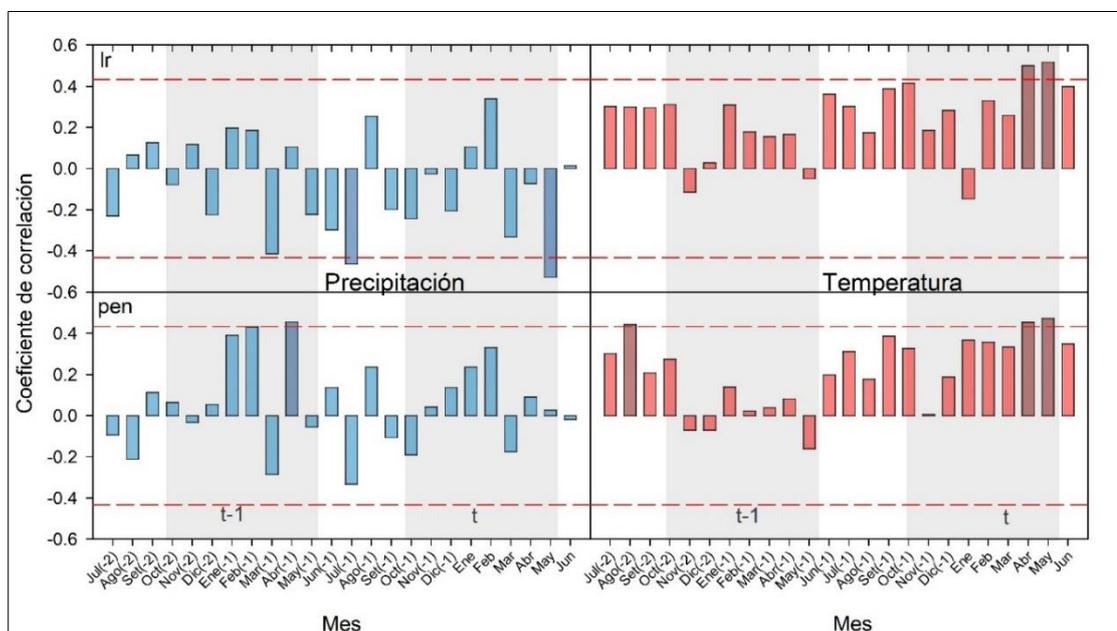


Figura 10. (a) Coeficiente de correlación de Pearson entre la cronología de anillo de *P. Rodolfo-Vasquezii* del margen del río (lr) y la precipitación. (b) Coeficiente de correlación de Pearson entre la cronología de anillo de *P. Rodolfo-Vasquezii* del margen del río (lr) y la temperatura. (c) Coeficiente de correlación de Pearson entre la cronología de anillo de *P. Rodolfo-Vasquezii* de la ladera del cerro (pen) y la precipitación. (d) Coeficiente de correlación de Pearson entre la cronología de anillo de *P. Rodolfo-Vasquezii* de la ladera del cerro (pen) y la temperatura. Período 1994-2014. Las líneas discontinuas de color rojo representan el nivel de significancia del 95 %. El sombreado de color plomo indica la temporada de crecimiento previo y actual sugeridas para *P. Rodolfo-Vasquezii*.

La Temperatura Superficial del Mar del Pacífico Tropical de la región Niño 1+2 y el crecimiento de *P. Rodolfo-Vasquezii* están positivamente correlacionadas desde julio previo a la temporada de crecimiento hasta junio del año corriente de formación de anillos, siendo significativas en agosto a octubre, diciembre a febrero y abril a mayo (figura 11). Estos periodos abarcan la temporada alta de ENSO (noviembre – marzo), cuando los eventos cálidos y fríos suelen madurar en el Pacífico ecuatorial.

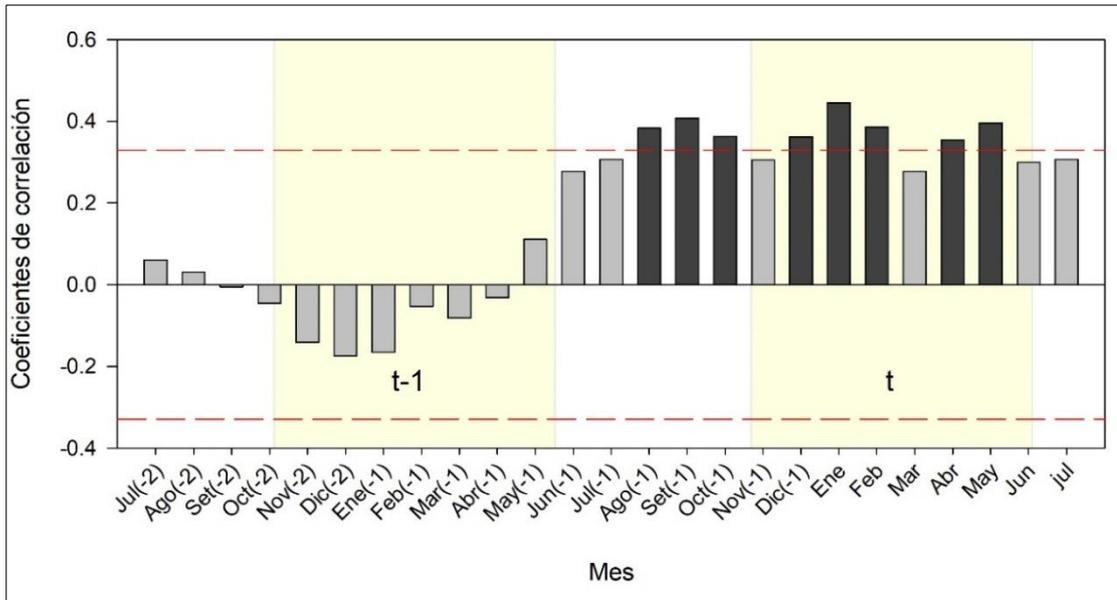


Figura 11. Función de correlación basada en la cronología regional estándar que muestra las relaciones del crecimiento radial de *P. Rodolfo-Vasquezii* con la Temperatura Superficial del Mar del sector este del Pacífico tropical Niño 1+2, desde el año previo de formación de anillo de crecimiento al actual para el periodo 1982-2020. Las líneas horizontales segmentadas indican la significancia estadística al 95 % nivel de confianza. Las barras verticales amarillas indican la estación de crecimiento previa y corriente de *P. Rodolfo-Vasquezii*.

4.1.6. Relación entre la cronología regional de *P. Rodolfo-Vasquezii* y las variaciones interanuales de temperatura y precipitación

En la figura 12 se puede observar la comparación entre el índice de crecimiento del ancho de anillos y la temperatura de la estación meteorológica de Comas. La correlación entre ambas variables es de 0.46 para el periodo 1994-2014. La evolución de la temperatura estimada mediante los anillos de los árboles indica que las condiciones de temperatura fueron mayor a la media en los periodos de 1888-1892, 1925-1932, 1952-1960 y 1966-1970, y menor a la media en los periodos de 1900-1923, 1941-1947 y 1999-2005.

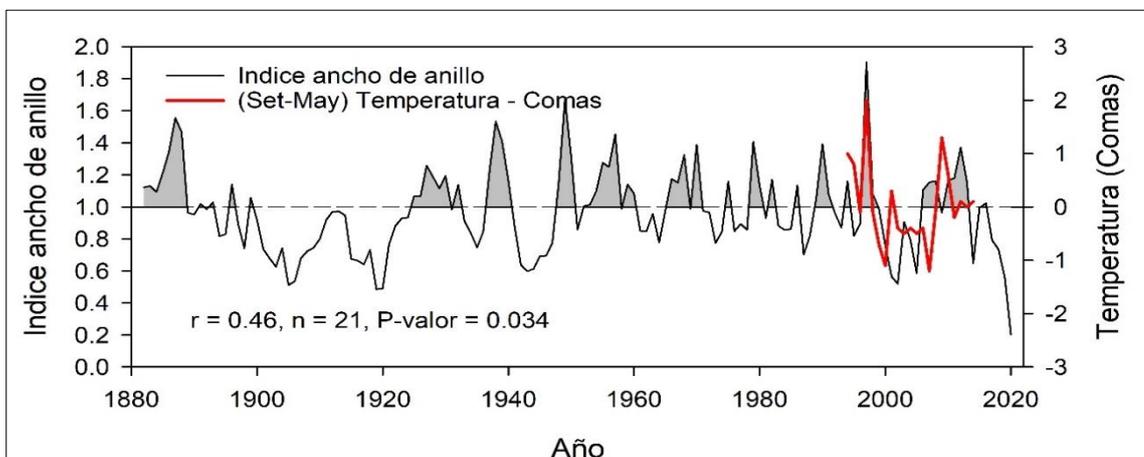


Figura 12. Relación entre los índices del ancho de anillo de *P. Rodolfo-Vasquezii* (línea negra) abarcan de 1882 al 2020, la temperatura media de la estación meteorológica de Comas (línea roja), la parte sombreada muestra la temperatura mayor a la media.

La figura 13 muestra la comparación entre las variaciones en el crecimiento de los árboles *P. Rodolfo-Vasquezii* y las TSM- ENOS 1+2 de septiembre a mayo. Se puede observar una relación positiva y significativa para el periodo de 1982-2020 ($r = 0.45$; $P = 0.004$; figura 13), en particular, se destaca la fuerte asociación durante El Niño de 1997, caracterizado por un alto crecimiento de los árboles asociados con el aumento de la TSM.

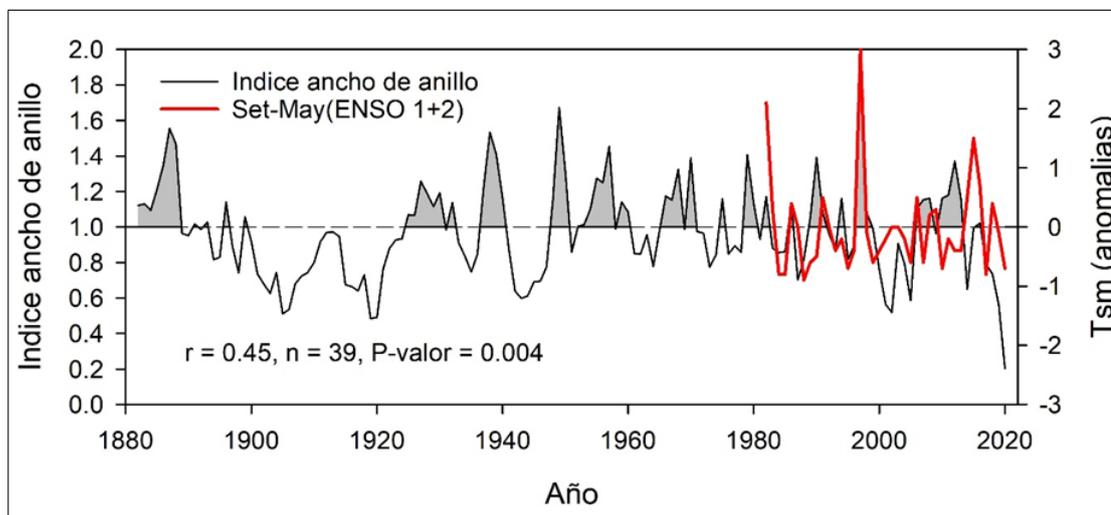


Figura 13. Correlación temporal

4.1.7. Relación entre la cronología regional de *P. Rodolfo-Vasquezii* y las variaciones de las temperaturas superficiales del mar Pacífico tropical

La figura 14 muestra patrones de correlación entre la cronología de ancho de anillos de *P. Rodolfo-Vasquezii* y la temperatura superficial del mar (TSM) globales y espacialmente grilladas, promediadas para la estación corriente de primavera-verano-otoño (septiembre-mayo) para el periodo 1981-2020. Se encontraron correlaciones significativamente positivas entre el registro de ancho de anillos y los datos de TSM de septiembre a mayo sobre la región del océano Pacífico ecuatorial de 80 a 140° O de longitud y 5° N 15° S de latitud aproximadamente. Los coeficientes de correlación significativos fueron mayores en el sector de El Niño 1+2 (~80° O a 100° O y 5° N a 15°S, $r > 0.4$).

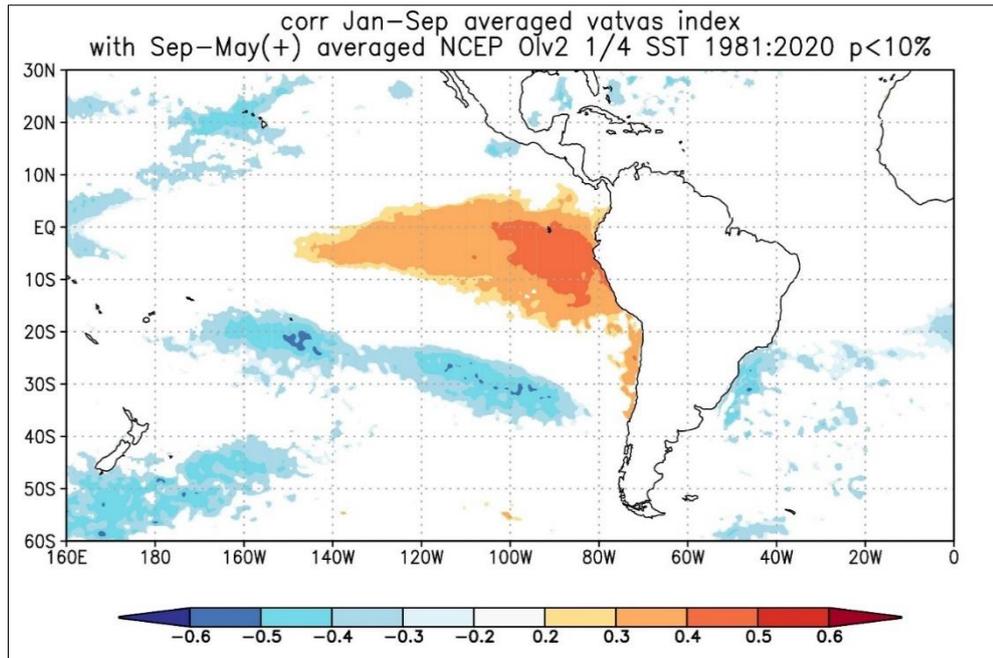


Figura 14. Correlación espacial entre la cronología regional estándar de ancho de anillos de *P. Rodolfo-Vasquezii* y la temperatura superficial del mar (TSM) espacialmente grillada de $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ promediada para septiembre a febrero para el intervalo 1982-2020. El sitio de la cronología de ancho de anillo se indica con el círculo amarillo y los campos coloreados representan los coeficientes de correlación de Pearson significativos ($p < 0.10$)

4.1.8. Comparación entre el incremento radial acumulado de *P. Rodolfo-Vasquezii* que se encuentran al margen del río y en la ladera

En la figura 15 se observa el crecimiento radial acumulado de las muestras extraídas de los árboles que se encuentran al margen del río (color celeste) y en la ladera del cerro (color rojo). Aquí se observa que los árboles de la ladera presentaron un crecimiento acumulado promedio (ver líneas oscuras en la figura 15) mayor que los árboles de la margen de río. También, se observó que los árboles de la ladera presentaron un mayor rango de variación en el crecimiento acumulado que los árboles de la ladera.

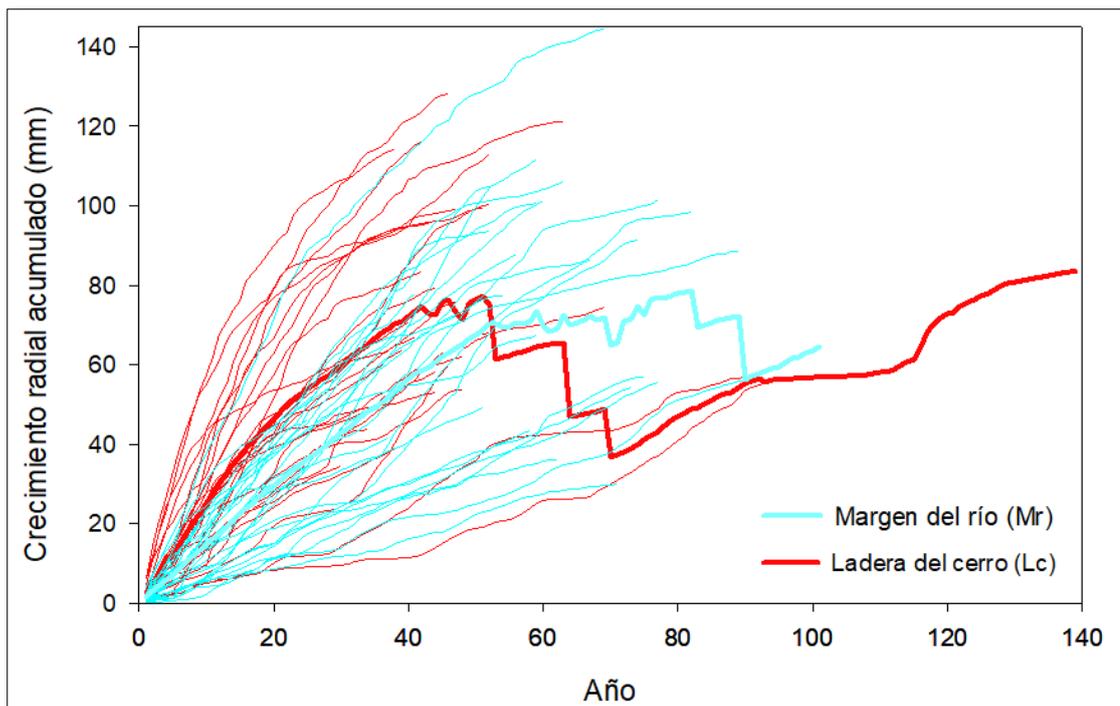


Figura 15. Curva de crecimiento de *P. Rodolfo-Vasquezii* entre el crecimiento radial y la edad de los árboles que se encuentran al margen del río (color celeste) y los que se encuentran en la ladera del cerro (color rojo)

4.2. Discusión de resultados

4.2.1. Cronología de ancho de anillos y serie climática

Este trabajo presenta la cronología de ancho de anillos de *P. Rodolfo-Vasquezii* con una extensión de 139 años para los Andes centrales del Perú en la Puna ($11^{\circ}27'28.14''$ S – $74^{\circ}56'26.02''$ O). Los resultados indican que *P. Rodolfo-Vasquezii* presenta anillos anuales claramente delimitados. Esto ha sido previamente observado en el estudio de Requena-Rojas et al. (3), donde señalan la delimitación de los anillos por la presencia de fibras achatadas con paredes celulares más gruesas al final del crecimiento. La formación de anillos anuales estaría indicando la respuesta a la estacionalidad climática presente en la Puna húmeda (3).

Para el desarrollo de la cronología de ancho de anillos se pudo utilizar el 90 % de los árboles muestreados (28 de un total de 31 árboles). Este hecho se debió a que el resto de las series medidas que no integraron la cronología, presentaron anomalías en el crecimiento tales como presencia de anillos comprimidos y cicatrices de quemadura, las cuales no permitieron lograr una correcta datación de las muestras. Estas características se repiten también en bosques de *Polylepis australis*, en las sierras de Córdoba, Argentina (33).

La cronología de *P. Rodolfo-Vasquezii* del presente estudio tiene una extensión de 139 años que cubre el período (1882 – 2020), con una SM de 0.33 y la intercorrelación entre las 53

series de 0.51, indicando una alta variabilidad y fuerte señal común en el crecimiento de los árboles que integran la cronología. Los estadísticos de R-bar promedio y EPS, indican que la cronología es de buena calidad con una fuerte señal común en el ancho de anillos entre los árboles y bien representada. De la misma manera, los estadísticos de los árboles que se encuentran al margen del río y los que se encuentran en la ladera del cerro son similares, aunque más consistentes y robustos estos últimos, reflejando también la buena calidad de ambas cronologías. Los valores de los estadísticos de las cronologías aquí reportados son similares a los que están documentados para otras especies de *Polylepis* (6; 34).

4.2.2. Relación entre clima y el crecimiento radial

El crecimiento de los anillos de *P. Rodolfo-Vasquezii* tanto de ladera como de margen de río, esta modulada principalmente por las variaciones de la temperatura durante el periodo de crecimiento actual, principalmente al final del período entre abril y mayo. Los árboles que crecieron sobre la ladera presentaron algunas diferencias en la respuesta. En este sentido, las temperaturas de agosto, previo al periodo de crecimiento, también influyó de manera positiva sobre el crecimiento. Por otra parte, la precipitación muestra una relación negativa con el crecimiento de los árboles para julio del periodo de crecimiento previo, esto también coincide con el período anual de bajas precipitaciones.

Se observan algunas diferencias importantes entre la respuesta del crecimiento a las lluvias entre los árboles de ladera y margen de río. Para los árboles que se encuentran al margen del río, se ve que junio del periodo de crecimiento actual y julio para el periodo de crecimiento previo afectan negativamente al crecimiento. Mientras que para los árboles que se encuentran en la ladera del cerro, se relacionaron de manera positiva con las lluvias durante abril del periodo previo de crecimiento. Estas diferencias podrían estar asociadas a la presencia de una menor disponibilidad hídrica en el ambiente de ladera, lo cual permitiría que los árboles creciendo en este ambiente tengan una mayor sensibilidad a las precipitaciones que los árboles creciendo en la margen de río.

En síntesis, la variable más fuertemente relacionada con el crecimiento se identifica para la temperatura durante los meses del período actual de crecimiento. Estos resultados se podrían atribuir a que la temperatura durante estos meses determina el inicio y la finalización del crecimiento del anillo, consistente con la respuesta del crecimiento a la temperatura reportada por Requena-Rojas (3) para la misma especie. En la Puna húmeda las condiciones de humedad son elevadas, por lo que las lluvias no estarían siendo un factor limitante para el crecimiento en este ambiente. Sin embargo, se puede observar un efecto positivo sobre el crecimiento de los árboles que crecen en la ladera cuando aumentan las lluvias de la estación

de crecimiento previa. Las relaciones positivas más altas obtenidas se dan en abril y mayo, finales del período de crecimiento, indicando que el máximo crecimiento de *P. Rodolfo-Vasquezii* estaría concentrado durante la estación donde las lluvias empiezan a descender. Finalmente, las lluvias de la estación de crecimiento previa son importantes para el crecimiento en los árboles ubicados en las laderas, ambientes con menor disponibilidad hídrica respecto a los que se encuentran en la margen de río.

Aquí resulta interesante destacar cómo la dendrocronología permite entender cómo las condiciones climáticas afectan el crecimiento de los árboles en diferentes regiones. En la Puna semiárida de los Andes, donde las lluvias son escasas y estacionales, el crecimiento de los árboles está más estrechamente ligado a las precipitaciones, como lo demuestran los estudios de Morales et al. (4), y Rodríguez-Catón (35). La disponibilidad de agua durante la temporada de lluvias determina la capacidad de los árboles para crecer y desarrollar nuevos anillos. En contraste, en la Puna húmeda, donde las lluvias son más abundantes y constantes, la temperatura se convierte en un factor crítico. En estas regiones, la temperatura estaría influyendo en la tasa metabólica de los árboles y en procesos fisiológicos como la fotosíntesis y la respiración (36). Las temperaturas más cálidas pueden extender la temporada de crecimiento y aumentar la actividad biológica de los árboles, lo que resulta en un mayor crecimiento anual. Esta diferencia en los factores limitantes del crecimiento de los árboles entre las dos regiones resalta la importancia de considerar múltiples variables climáticas al estudiar y comparar registros dendrocronológicos en distintas áreas. Además, estas diferencias pueden proporcionar información valiosa sobre cómo los cambios climáticos futuros podrían afectar los ecosistemas de montaña de manera diversa dependiendo de sus características climáticas y geográficas específicas.

En un estudio reciente, Locosselli et al. (37) analizaron la relación entre temperatura, disponibilidad de agua, y longevidad de los árboles en las tierras bajas tropicales. En estos ambientes, las tasas de crecimiento y la longevidad de los árboles están fuertemente correlacionadas con la temperatura. Las temperaturas más altas aceleran el metabolismo de los árboles, lo que puede llevar a un crecimiento más rápido, pero también a una menor longevidad debido al estrés térmico y al aumento de las tasas de respiración. Se ha observado una reducción pronunciada en la longevidad de los árboles a temperaturas medias anuales por encima de 25,4 °C. Esto se debe a que las temperaturas más altas aumentan las demandas de evaporación y transpiración, lo que puede llevar a un estrés hídrico, incluso en ambientes donde la humedad es alta.

Por el contrario, en las tierras altas tropicales como es el caso de la Puna húmeda, las temperaturas medias anuales son pronunciadamente inferiores al umbral crítico de temperatura media de las tierras bajas. La estación meteorológica de Comas, ubicada a 61 km del área de estudio, registra un valor medio anual de 8.4 °C, por lo que se esperaría que las mayores temperaturas que se registran y se proyectan a nivel global, y en particular en las tierras altas, puedan, en primera instancia, favorecer el crecimiento de *P. Rodolfo-Vazquesii*. Sin embargo, el impacto positivo del aumento de la temperatura puede estar limitado por otros factores climáticos. Con el aumento de la temperatura, la evapotranspiración también aumentará, lo que puede llevar a un mayor estrés hídrico incluso en regiones húmedas. Esto podría contrarrestar los beneficios del aumento de la temperatura, afectando negativamente la dinámica (establecimiento, crecimiento y mortalidad) del bosque. Por consiguiente, resulta crucial continuar monitoreando los bosques *P. Rodolfo-Vazquesii* para observar cómo responden a las variaciones climáticas actuales y futuras. Esto incluye tanto estudios de campo como el uso de tecnologías de alta resolución como dendrómetros automáticos y teledetección.

4.2.3. Evolución de la variable climática

El ancho de los anillos de crecimiento de *P. Rodolfo-Vazquesii* se correlaciona bien con las temperaturas de septiembre a mayo, lo que convierte a estos anillos en buenos indicadores de la temperatura durante este periodo. Los anillos de crecimiento permiten extender el registro de temperatura de la estación de Comas desde 1994 hasta 1882, más de 100 años hacia el pasado. El mayor crecimiento observado en 1997 se corresponde con las condiciones cálidas de septiembre a mayo de 1997-1998. Esto subraya cómo los periodos cálidos pueden favorecer el crecimiento radial de *P. Rodolfo-Vazquesii*.

Este registro histórico es crucial para entender las tendencias a largo plazo en el clima de la región y cómo han afectado a los ecosistemas locales. De esta manera, proporcionan una línea de base valiosa para evaluar los impactos del cambio climático en la región. Al comparar los anillos de crecimiento con las temperaturas actuales y proyectadas, se pueden hacer inferencias sobre cómo podrían responder los bosques a futuras variaciones climáticas. Esto es particularmente relevante en áreas como la Puna húmeda, donde los datos meteorológicos históricos son limitados (3). La Puna húmeda, con su clima particular y especies endémicas como *P. Rodolfo-Vazquesii*, proporciona un laboratorio natural para estudiar los efectos del clima en los ecosistemas de altura. Los hallazgos pueden ser aplicables a otras regiones montañosas y contribuir a una comprensión más amplia de la ecología de montañas. Los anillos de crecimiento pueden ser utilizados para monitorear los cambios en el clima de manera continua y de esta manera informar las estrategias de manejo y conservación de los bosques de la Puna húmeda, ayudando a mitigar los efectos negativos del cambio climático. Los resultados

subrayan la importancia de la dendrocronología en la investigación climática y ecológica. Fomentar más estudios en otras especies y regiones puede proporcionar una imagen más completa de las respuestas de los bosques a las variaciones climáticas. a su vez, estos resultados son de gran utilidad para educar al público y a los tomadores de decisiones sobre la importancia de los bosques de altura y la necesidad de su conservación en el contexto del cambio climático.

4.2.4. Crecimiento de los árboles al margen del río y en la ladera del cerro

Dentro de un mismo bosque, las condiciones de sitio pueden variar significativamente, lo cual puede influir en el crecimiento de los árboles. En el estudio realizado, se observaron diferencias en el crecimiento radial de *P. Rodolfo-Vazquesii* dependiendo de su ubicación, específicamente al margen del río y en la ladera del cerro. Las muestras obtenidas de árboles ubicados al margen del río mostraron un crecimiento radial menor en comparación con las muestras de árboles en la ladera del cerro. Esto sugiere que, a pesar de la mayor disponibilidad de agua cerca del río, otros factores pueden estar limitando el crecimiento en esta zona. Los árboles en la ladera del cerro presentaron un mayor crecimiento radial. Este resultado indica que la temperatura es un factor más importante para el crecimiento de estos árboles que la disponibilidad de agua per se. Aunque la carga hídrica no parece ser un factor limitante al margen del río, se evidenció un efecto hídrico positivo sobre el crecimiento de los árboles en la ladera. Esto puede estar relacionado con un mejor balance entre el agua disponible y la absorción de nutrientes en el suelo.

En ambas ubicaciones, la temperatura parece jugar un rol crucial en el crecimiento de los árboles. En la ladera, donde las temperaturas pueden ser ligeramente más altas debido a la mayor exposición solar, los árboles muestran un mayor crecimiento. La diferencia en el crecimiento también puede deberse a la variación en la disponibilidad de nutrientes y la estructura del suelo entre el margen del río y la ladera. Los suelos en la ladera pueden ser más ricos en nutrientes debido a la erosión y deposición, facilitando un mejor crecimiento radial. La hidrología local también puede influir. En la margen del río, los suelos pueden estar más saturados, lo que puede limitar la oxigenación de las raíces y, por ende, el crecimiento. En la ladera, la percolación del agua puede ser más eficiente, proporcionando suficiente humedad sin saturar el suelo.

Al planificar la reforestación, se debe considerar la ubicación de los árboles para maximizar su crecimiento. Las laderas con buena exposición solar y suelos bien drenados pueden ser más favorables para el establecimiento de *P. Rodolfo-Vazquesii*. Las diferencias en el crecimiento radial de *P. Rodolfo-Vazquesii* entre el margen del río y la ladera del cerro resaltan la importancia de factores como la temperatura, la disponibilidad de nutrientes y la

hidrología del suelo. Estos resultados proporcionan una mejor comprensión de las condiciones óptimas para el crecimiento de esta especie y pueden informar estrategias de manejo y conservación más efectivas.

4.2.5. Influencia del ENSO en el crecimiento de *P. Rodolfo-Vasquezii*

Los resultados obtenidos sobre la relación entre las temperaturas superficiales del mar (TSM) en el sector del Pacífico ENOS 1+2 y el crecimiento de los árboles en los Andes centrales aportan una dimensión importante a la comprensión de cómo los fenómenos climáticos globales influyen en los ecosistemas locales. Las TSM en el sector del Pacífico ENOS 1+2 de septiembre a mayo están estrechamente vinculadas al crecimiento de los árboles durante el período de comparación de 1982-2020. ENOS 1+2 afecta las temperaturas superficiales en los Andes centrales. Durante las fases positivas de ENOS 1+2, las TSM aumentan, lo que a su vez debido a las teleconexiones océano-atmósfera, eleva las temperaturas locales en la región de estudio. Cuando ENOS 1+2 está en fase positiva, las temperaturas más altas favorecen el crecimiento de *P. Rodolfo-Vazquesii*, lo que se refleja en anillos de crecimiento más anchos.

Los anillos de crecimiento de *P. Rodolfo-Vazquesii* no solo reflejan las temperaturas locales, sino también las condiciones climáticas más amplias relacionadas con ENOS. Esto permite usar estos anillos como indicadores de variaciones climáticas globales y regionales, por lo que puede ser considerado un buen registro para reconstruir las variaciones pasadas del ENOS 1+2. Entender la relación entre ENOS y el crecimiento de los árboles ayuda a mejorar los modelos predictivos sobre cómo los cambios en los fenómenos climáticos globales pueden afectar los ecosistemas de montaña en el futuro.

CONCLUSIONES

1. En este estudio fue posible desarrollar dos cronologías locales y una regional de ancho de anillos de la especie *P. Rodolfo-Vasquezii* que cubre el periodo 1882-2019, el cual muestra cambios significativos en las condiciones climáticas durante los últimos 139 años, evidenciando un aumento en la temperatura y variaciones en la precipitación que impactan en su crecimiento.
2. El crecimiento radial de *P. Rodolfo-Vasquezii*, de la localidad de Toldopampa, Puna húmeda del Perú, está regulado de manera positiva por las variaciones de temperatura de la estación de crecimiento.
3. Los anillos de los árboles de *P. Rodolfo-Vasquezii* muestran relación con las variaciones de las temperaturas superficiales del mar en el sector Pacífico ENOS 1+2. Reflejando la influencia sobre el clima local de un fenómeno de variabilidad climática de gran escala como es el ENOS. La vinculación de las TSM del Pacífico ENOS 1+2 con el crecimiento de *P. Rodolfo-Vasquezii* en los Andes centrales subraya la importancia de considerar tanto los factores climáticos locales como globales en el estudio de los ecosistemas de montaña. Estos hallazgos no solo mejoran nuestra comprensión del pasado climático, sino que también proporcionan herramientas valiosas para predecir y manejar los impactos futuros del cambio climático.
4. El crecimiento radial de *P. Rodolfo-Vasquezii* es un buen estimador de las variaciones de la temperatura de setiembre a mayo. Permitiendo extender el registro de temperatura de la estación de Comas desde 1994 al 1882, más de cien años hacia el pasado. La relación entre la temperatura de setiembre a mayo y el crecimiento radial de *P. Rodolfo-Vasquezii* es un indicador potente de las condiciones climáticas pasadas y presentes. Estos hallazgos no solo extienden el registro climático de la región, sino que también proporcionan una herramienta valiosa para futuras investigaciones y estrategias de manejo.
5. El crecimiento de los árboles presentó algunas diferencias dependiendo del sitio donde se establecieron: los árboles de las laderas presentaron un rango amplio de crecimiento y mostraron un crecimiento acumulado promedio mayor que los árboles establecidos en la margen de río. La temperatura resultó el factor limitante en el crecimiento de todos los árboles del sitio estudiado. Sin embargo, los árboles de ladera también mostraron una relación positiva con las lluvias de la estación previa de crecimiento. Esto indica que, en sitios con menor disponibilidad hídrica como las laderas, las lluvias también pueden jugar

un papel importante regulando el crecimiento de los árboles. La interacción entre temperatura, evapotranspiración y estrés hídrico en la Puna húmeda es compleja y requiere una consideración cuidadosa en el contexto del cambio climático. Comprender estas dinámicas es esencial para la conservación y manejo efectivo de estos ecosistemas únicos.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda realizar estudios fenológicos, para poder ampliar los conocimientos sobre el crecimiento de las *P. Rodolfo-Vasquezii* en el Perú.
2. Al momento de montar las muestras, se recomienda utilizar una cola de madera, para que las muestras queden más fijas y no se salguen a la hora de lijarlas.
3. Se recomienda que, para el análisis del incremento radial acumulado, las muestras sean extraídas de árboles vivos.
4. Realizar estudios anatómicos de las especies de *Polylepis ssp.* para tener mayor conocimiento de la formación de los anillos.

REFERENCIAS

1. **Senamhi: Idesep.** *Cambio climático.* 2020.
http://idesep.senamhi.gob.pe/portalidesep/idesep_tema_cambio_climatico_disponibilidad_hidrica.jsp.
2. **BONINSEGNA et al.** *Dendroclimatological reconstructions in South America. A review,* *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 281(3-4), pp. 210-228, oct. 2009, DOI: 10.1016/j.palaeo.2009.07.020.
3. **REQUENA, E. J.; MORALES, M.; VILLALBA, R.** *Dendroclimatological assessment of *Polylepis rodolfo-vasquezii*: A novel *Polylepis* species in the Peru highlands.* *Dendrochronologia*, vol. 62, pp. 125-722, 2020, DOI: 10.1016/j.dendro.2020.125722.
4. **MORALES, M. S.; VILLALBA, R.; GRAU, H. R.; PAOLINI, L.** *Rainfall-controlled tree growth in high-elevation subtropical treelines.* *Ecology*, 85(11), pp. 3080-3089, 2004, DOI: 10.1890/04-0139.
5. **FERRERO, M. E.; VILLALBA, R.; DE MEMBIELA, M.; RIPALTA, A.; DELGADO, S.; PAOLINI, L.** *Tree-growth responses across environmental gradients in subtropical Argentinean forests.* *Plant Ecology*, 214(11), pp. 1321-1334, 2013, DOI: 10.1007/s11258-013-0254-2.
6. **JESÚS, M.; ESPINOZA, P.; JANET, G.; GUILLEN, I.; MORALES, M. S.; ARISMÉNDIZ, R. R.** *Potencialidad de *Cedrela odorata* (Meliaceae) para estudios dendrocronológicos en la selva central del Perú.* vol. 62, pp. 783-793, 2014.
7. **FERRERO, M. E.; VILLALBA, R.; RIVERA, S. M.** *An assessment of growth ring identification in subtropical forests from northwestern Argentina.* *Dendrochronologia*, 32(2), pp. 113-119, 2014, DOI: 10.1016/j.dendro.2014.01.003.
8. **LAYME-HUAMAN, E. T.; FERRERO, M. E.; PALACIOS-LAZARO, K. S.; REQUENA-ROJAS, E. J.** **Cedrela nebulosa*: A novel species for dendroclimatological studies in the montane tropics of South America.* *Dendrochronologia*, vol. 50, pp. 105-112, 2018, DOI: 10.1016/j.dendro.2018.06.004.
9. **ARGOLLO, J.; SOLIZ, C.; VILLALBA, R.** *Potencialidad dendrocronológica de *Polylepis tarapacana* en los Andes centrales de Bolivia.* *Ecología en Bolivia*, 39(1), pp. 5-24, 2004.
10. **MORALES, M. S. et al.** *Precipitation changes in the South American Altiplano since 1300 AD reconstructed by tree-rings.* *Climate of the Past*, 8(2), pp. 653-666, 2012, DOI: 10.5194/cp-8-653-2012.

11. **REQUENA-ROJAS, E. J.; MORALES, M.; VILLALBA, R.** *Dendroclimatological assessment of *Polylepis rodolfo-vasquezii*: A novel *Polylepis* species in the Peru highlands.* *Dendrochronologia*, vol. 62. 2020, DOI: 10.1016/J.DENDRO.2020.125722.
12. **VUILLE, M.; KEIMIG, F.** *Interannual variability of summertime convective cloudiness and precipitation in the central Andes derived from ISCCP-B3 data.* *Journal of Climate*, 17(17), pp. 3334-3348, 2004.
DOI: 10.1175/1520-0442(2004)017<3334:IVOSCC>2.0.CO;2.
13. **MENDOZA, W.; CANO, A.** *Diversidad del género *Polylepis* (Rosaceae, Sanguisorbeae) en los Andes peruanos.* *Revista Peruana de Biología*, 18(2), pp. 197-200, 2011, DOI: 10.15381/rpb.v18i2.228.
14. **SCHMIDT-LEBUHN, A. N.; KESSLER, M.; KUMAR, M.** *Promiscuity in the Andes: Species relationships in *Polylepis* (Rosaceae, Sanguisorbeae) based on AFLP and morphology.* *Systematic Botany*, 31(3), pp. 547-559, 2006.
DOI: 10.1600/036364406778388629.
15. **ROIG, F., FERNANDEZ, M., GARECA, E., ALTAMIRANO, S., MONGE, S.** *Estudios dendrocronológicos en los ambientes húmedos de la puna boliviana.* 2024.
https://www.researchgate.net/publication/242385108_ESTUDIOS_DENDROCRONOLOGICOS_EN_LOS_AMBIENTES_HUMEDOS_DE_LA_PUNA_BOLIVIANA_DENDROCHRONOLOGICAL_STUDIES_IN_THE_HUMID_PUNA_ENVIRONMENTS_OF_BOLIVIA.
16. **JOMELLI, V. et al.** *Analysis of the Dendroclimatic Potential of *Polylepis pepeii*, *P. subsericans* and *P. rugulosa* In the Tropical Andes (Peru-Bolivia).* *Tree-Ring Research*, 68(2), pp. 91-103, 2012, DOI: 10.3959/2011-10.1.
17. **MERINO, E. G.** *La dendrocronología: métodos y aplicaciones.* vol. 6, 2009.
18. **FRITTS, H. C.** *Dendrochronology and Dendroclimatology.* *Tree Rings and Climate*, pp. 1-54, 1976, DOI: 10.1016/B978-0-12-268450-0.50006-9.
19. —. *Dendroclimatology and dendroecology.* *Quaternary Research*, 1(4), pp. 419-449, 1971, DOI: 10.1016/0033-5894(71)90057-3.
20. **PRETLL CHICLOTE, E.; OCOÑA VIDAL, D.; JON JAP, R.** *Apuntes sobre algunas especies forestales nativas.* 1985.
21. **VALENZUELA, L.; VILLALBA, I.** *A new species of *Polylepis* (Rosaceae) from Peru Una nueva especie de *Polylepis* (Rosaceae) para Perú.* *Arnaldia*, 22(2), pp. 329-338, 2015.
22. **SPEER, J. H.** *Fundamentals of Tree-Ring Research.* 2024.
https://www.researchgate.net/publication/259466472_Fundamentals_of_Tree_Ring_Research.

23. **HUGHES, M. K.** *Climate from Tree Rings*. Cambridge University Press, 1982. DOI: 10.1017/CBO9780511760006.
24. **EYSTEIN, J.; OVERPECK, J.; BRIFFA, K.; DUPLESSY, J.; JOOS, F.; MASSON-DELMOTTE, V.; OLAGO, D.; OTTO-BLIESNER, B.; PELTIER, R.; RAHMSTORF, S.; RAMESH, R.; RAYNAUD, D.; RIND, D.; SOLOMINA, O.; VILLALBA, R.** *Climate Change 2007 the Physical Science Basis*. 59(8). New York, 2007. DOI: 10.1256/wea.58.04.
25. **HOLMES, R. L.** *Computer-Assisted Quality Control in Tree-Ring Dating and Measurement Item Type Article Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement*. *Tree-ring Bulletin*, vol. 43, 1983.
26. **ALANYA, V.** *Estructura dendroecológica de *Polylepis**. Universidad Nacional del Centro del Perú [Tesis para optar el título profesional de ingeniero forestal y ambiental], 2020.
27. **SCHULMAN, E.** *Dendroclimatic Changes in Semiarid America*. 2024. https://books.google.com.pe/books?printsec=frontcover&vid=LCCN56063655&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false.
28. **GRISSINO-MAYER, H. D.** *Evaluating crossdating accuracy: a manual and tutorial for the computer program Cofecha*. 57(2), pp. 205-221, 2001.
29. **MELVIN, T. M.** *Historical Growth Rates and Changing Climatic Sensitivity of Boreal Conifers May*. pp. 1-248, 2004.
30. **MELVIN, T. M.; BRIFFA, K. A.** *Signal-free, approach to dendroclimatic standardisation*. *Dendrochronologia*, 26(2), pp. 71-86, 2008. DOI: 10.1016/j.dendro.2007.12.001.
31. **WIGLEY et al.** *On the Average Value of Correlated Time Series, With Applications in Dendroclimatology and Hidrometeorology*. 1984.
32. **BRIFFA, K. R.** *Interpreting High-Resolution Proxy Climate Data — The Example of Dendroclimatology, Analysis of Climate Variability, 0500*. pp. 77-94, 1999, DOI: 10.1007/978-3-662-03744-7_5.
33. **MARICEL P. I.; MARCELO, P.** *Relación clima-crecimiento radial de *Polylepis australis* en un gradiente altitudinal en las Sierras Grandes de Córdoba*. Argentina, 2018.
34. **MOYA, J.; LARA, A.** *Cronologías de ancho de anillos de queñoa (*Polylepis tarapacana*) para los últimos 500 años en el Altiplano de la región de Arica y Parinacota, Chile*. *Bosque*, 32(2), pp. 165-173, 2011, DOI: 10.4067/S0717-92002011000200007.
35. **RODRIGUEZ-CATON, M. et al.** *A 300-year tree-ring $\delta^{18}O$ -based precipitation reconstruction for the South American Altiplano highlights decadal hydroclimate teleconnections*. *Commun Earth Environ*, 5(1), 2024, DOI: 10.1038/s43247-024-01385-9.

36. —. *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 Physiol*, 41(8), pp. 1353-1371, 2021, DOI: 10.1093/treephys/tpab021.
37. **LOCOSSELLI et al.** *La relación entre temperatura, disponibilidad de agua, y longevidad de los árboles en las tierras bajas tropicales*. 2024.

ANEXOS

Anexo 1. Matriz de consistencia

Tabla 6. Matriz de consistencia

Problema de Investigación	Objetivos	Hipótesis	Variables	Metodología
<p>General</p> <p>¿Cómo responde el crecimiento de los árboles <i>P. Rodolfo-Vasquezii</i> a las variaciones climáticas en los Andes del centro del Perú durante los últimos 150 años, comparando dos sitios diferentes: margen del río y ladera del cerro?</p> <p>Específicos</p> <ul style="list-style-type: none"> • ¿Cuáles han sido los cambios en la temperatura y la precipitación en la región de estudio en los últimos 150 años? • ¿Cómo se relaciona el crecimiento radial de <i>P. Rodolfo-Vasquezii</i>, en dos entornos diferentes, con las variaciones climáticas (temperatura y precipitación) y forzantes climáticos (ENSO)? • ¿Qué cronología del ancho de anillos <i>P. Rodolfo-Vasquezii</i> se pueden desarrollar para representar las variables climáticas en cada sitio de estudio? • ¿Qué diferencia existe en la respuesta del crecimiento a las variaciones climáticas entre los árboles de <i>P. Rodolfo-Vasquezii</i> ubicados al margen del río y en la ladera del cerro? 	<p>General</p> <p>Estimar las variaciones climáticas en los Andes del centro de Perú durante los últimos 150 años mediante el análisis de los anillos de crecimiento de <i>P. Rodolfo-Vasquezii</i> y su respuesta a los cambios en el clima en dos entornos diferentes.</p> <p>Específicos</p> <ul style="list-style-type: none"> • Desarrollar una cronología regional de ancho de anillos de <i>P. Rodolfo-Vasquezii</i> en cada sitio de estudio: margen del río y ladera del cerro. • Determinar la relación entre el crecimiento radial de los árboles de <i>P. Rodolfo-Vasquezii</i> con las variaciones de la temperatura superficial de mar (TMS) en el sector de pacífico tropical ENSO 1+2. • Identificar mediante la cronología regional de ancho de anillos, los posibles cambios en la temperatura y precipitación ocurrido en los últimos 150 años. • Comparar el crecimiento acumulado y la respuesta del crecimiento radial a las variaciones climáticas entre los árboles que se encuentran al margen del río y en la ladera. 	<p>General</p> <p>El crecimiento radial de <i>P. Rodolfo-Vasquezii</i> en los Andes del centro Perú está influenciado por las variaciones climáticas, lo que permite utilizar esta especie como un indicador para estimar los cambios climáticos a lo largo de los últimos 150 años.</p> <p>Específicas</p> <ul style="list-style-type: none"> • Los árboles de <i>P. Rodolfo-Vasquezii</i> poseen un patrón común en su crecimiento radial por lo que permite desarrollar cronologías de ancho de anillos, tanto local como regional. • Las variaciones en el ancho de los anillos de la especie <i>P. Rodolfo-Vasquezii</i>, se relaciona con las fluctuaciones anuales de la precipitación y la temperatura promedio de los meses de verano. • La cronología regional de ancho de anillos de árboles en los Andes del centro de Perú refleja los cambios en temperatura y precipitación ocurridos en los últimos 150 años, asociados a variaciones en forzantes climáticos como el ENSO. • El crecimiento de los árboles de la especie <i>P. Rodolfo-Vasquezii</i> ubicados en la ladera del cerro es más sensible a las variaciones climáticas que el de los árboles situados al margen del río, debido a las condiciones de crecimiento más extremas presentes en la ladera en comparación con el ambiente más favorable del margen del río. 	<p>Independiente</p> <ul style="list-style-type: none"> • Precipitación acumulada mensual (mm) • Temperatura media mensual (°C) • Temperatura Superficial del Mar (TSM) promedio mensual del Pacífico tropical, sector ENSO 1+2 <p>Dependiente</p> <ul style="list-style-type: none"> • Índice de ancho de anillo anual de <i>P. Rodolfo-Vasquezii</i>. • Índice de crecimiento del ancho de anillo anual acumulado de <i>P. Rodolfo-Vasquezii</i>. 	<p>Tipo: Aplicada</p> <p>Nivel: Correlacional</p> <p>Diseño de la investigación: No experimental</p> <p>Población: Árboles de <i>P. Rodolfo-Vasquezii</i> distribuidas en el centro poblado de Santa Rosa de Toldopampa.</p> <p>Muestra: 31 árboles muestreados de <i>P. Rodolfo-Vasquezii</i>.</p>

Anexo 2. Evidencia del trabajo de campo y laboratorio



Figura 16. Colecta de muestras dendrocronológicas de P. Rodolfo-Vasquezii



Figura 17. Lijado de muestras de P. Rodolfo-Vasquezii en el laboratorio de dendrocronología de la Universidad Continental



Figura 18. Fechado de muestras de P. Rodolfo-Vasquezii en el laboratorio de dendrocronología de la Universidad Continental

Anexo 3. Datos de campo de la colecta de muestra

Tabla 7. Series ingresadas en la cronología (al margen del río)

Código	Diámetro (mm)	Altura total (m)	Coordenada geográfica	
			Longitud	Latitud
Vat01a	257.83	5.14	74°56.311'O	11°27.503'S
Vat01c	257.83	5.14		
Vat02b	187.80	3.55	74°56.336'O	11°27.495'S
Vat02a	187.80	3.55		
Vat03a	219.63	4.1	74°56.361'O	11°27.487'S
Vat03b	219.63	4.1		
Vat04a	267.38	7	74°56.357'O	11°27.486'S
Vat05a	324.68	4.3	74°56.379'O	11°27.494'S
Vat06d	248.28	4.2	74°56.434'O	11°27.469'S
Vat06a	248.28	4.2		
Vat06c	248.28	4.2		
Vat08a	273.75	3.8	74°56.509'O	11°27.469'S
Vat08b	273.75	3.8		
Vat09a	356.51	3.5	74°56.514'O	11°27.456'S
Vat10a	366.06	6.5	74°56.511'O	11°27.449'S
Vat10b	366.06	6.5		
Vat11b	251.46	4.5	74°56.539'O	11°27.424'S
Vat11a	251.46	4.5		
Vat13a	203.72	4.5	*	*
Vat13b	203.72	4.5		
Vat14a	194.17	4.5	*	*
Vat14b	194.17	4.5		
Vat15a	111.41	3.2	74°56.561'O	11°27.446'S
Vat15b	111.41	3.2		
Vat16b	226.00	4	74°56.552'O	11°27.427'S
Vat17a	372.42	7.5	74°56.567'O	11°27.428'S
Vat17b	372.42	7.5		

Tabla 8. Series ingresadas en la cronología (a la ladera del cerro)

Código	Diámetro (mm)	Altura total (m)	Coordenada geográfica	
			Longitud	Latitud
Vat12a	264.20	7	*	*
Vat12b	264.20	7		
Vat19a	214.70	-	74°56.548'O	11°27.415'S
Vat19b	214.70	-		
Vat20a	298.50	6.5		*
Vat20b	298.50	6.5	*	
Vat22c	178.25	4.2		
Vat22b	178.25	4.2	74°56.498'O	11°27.410'S
Vat22d	178.25	4.2		
Vat23b	216.45	4	*	*
Vat23a	216.45	4		
Vat24a	261.01	6	*	*
Vat24b	261.01	6		
Vat25a	273.75	6	*	*
Vat25b	273.75	6		
Vat26a	235.55	3.6	*	*
Vat26b	235.55	3.6		
Vat27a	267.38	5	*	*
Vat27b	267.38	5		
Vat28a	168.70	3.8	*	*
Vat28b	168.70	3.8		
Vat29b	311.94	4.8	*	*
Vat30a	254.65	6	*	*
Vat30c	254.65	6		
Vat31a	235.55	6	*	*
Vat31b	235.55	6		