

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA AMBIENTAL**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:
INGENIERA E INGENIERO AMBIENTALES**

**TEMA:
DENDROCLIMATOLOGÍA TROPICAL SOBRE LA REGIÓN
AMAZÓNICA: MERA, PASTAZA**

**AUTORES:
LISSETH MARIANELA CARLOSAMA MEJÍA
MADISON EDUARDO HERRERA CARRIÓN**

**TUTOR:
MARÍA SHEILA FABIOLA SERRANO VINCENTI**

Quito, agosto de 2019

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros Lisseth Marianela Carlosama Mejía con documento de identificación N° 172482370-1 y Madison Eduardo Herrera Carrión con documento de identificación N° 171884890-4, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación intitulado: DENDROCLIMATOLOGÍA TROPICAL SOBRE LA REGIÓN AMAZÓNICA: MERA, PASTAZA, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: INGENIERA E INGENIERO AMBIENTALES, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



.....

Lisseth Marianela Carlosama Mejía

C.I.: 1724823701



.....

Madison Eduardo Herrera Carrión

C.I.:1718848904

Agosto, 2019

DECLARATORÍA DE COAUTORÍA DE LA DOCENTE TUTORA

Yo declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el Trabajo Experimental, DENDROCLIMATOLOGÍA TROPICAL SOBRE LA REGIÓN AMAZÓNICA: MERA, PASTAZA realizado por Lisseth Marianela Carlosama Mejía y Madison Eduardo Herrera Carrión, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana, para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, agosto 2019



.....
María Sheila Fabiola Serrano Vincenti

C.I.: 1710267574

DEDICATORIA

Dedicado a mis padres Marco & Marlene por darme la oportunidad de estudiar y a mi hermana Taty por su apoyo y compañía incondicional en cada uno de mis logros y etapas de mi vida. Por no permitirme vencer en las situaciones difíciles y ser esa energía extra que a veces se necesita para continuar el camino.

Con amor, Lisseth

*A todas las personas que cuenten con algún tipo de limitación física o discapacidad,
nada es imposible mientras no se intente.*

*“Hay quienes ven la naturaleza como algo ridículo y deforme
y aún hay otros que ni siquiera la ven.
Pero, a los ojos del hombre con imaginación
la naturaleza es la imaginación misma.
Como el hombre es, así ve.”*

Goleman D., 2010

A mis amados abuelos, Luz Ibelia Sánchez (+) y sr. Don Francisco Aureliano Carrión (+) que nos cuidan desde lo más alto, por sus enseñanzas que perdurarán para siempre. Gloria Piedad Panchi y Luis Oswaldo Herrera, que me vieron crecer y me han guiado desde muy pequeño, por ser un ejemplo de amor perpetuo.

A mi madre, Alba Lucero Carrión, mujer trabajadora, por toda tu paciencia, dedicación y tiempo en formarme como un hombre de bien.

A mi padre, Luis Eduardo Herrera, hombre emprendedor, por tu infinita e incansable lucha día a día, por darnos el pan de cada día y la educación.

A mis hermanos, Elvis, Alex, Mónica y Pablo, las personas que más amo en el mundo, por su apoyo en este arduo y duro camino, por sus consejos y por ser mis ejemplos a seguir.

A toda mi querida familia, mi pilar fundamental.

A Lisseth Marianela Carlosama, mujer fuerte, por tu apoyo incondicional.

Madison Eduardo Herrera Carrión

AGRADECIMIENTOS

Quiero iniciar agradeciendo a la Universidad y a la carrera por ofrecernos la oportunidad de experimentar esta gran aventura que comúnmente suelen llamarla “tesis”. A todos quienes nos colaboraron para poder llevar a cabo este trabajo de investigación que no solo me permitió adquirir conocimientos y experiencia, sino que a lo largo de su elaboración tuve la suerte de conocer a grandes personas.

Agradezco a Danny Vargas, por su acompañamiento durante todo el tiempo de ejecución de este trabajo, por convertirse en nuestro co-tutor y en ese amigo que nos compartía sus experiencias y sobre todo nos brindaba esas palabras de aliento oportunas para no rendirnos y continuar, sin importar el día ni la hora, sabíamos que podíamos contar con él.

A nuestra tutora Sheilita, no sólo por su tiempo y su ayuda técnica y académica, sino también por mostrarme lo increíble que es la investigación y acompañarme a dar mis primeros pasos dentro de ella.

Al Dr. Marco Cerna por ayudarnos en las salidas de campo, al Dr. Darwin Pucha y la Ing. Vicky Moncada por darnos la apertura en sus laboratorios de dendrocronología y por todos los conocimientos compartidos, a Arnulfo Carlosama por brindarme su tiempo y compañía mientras estuve en Puyo haciendo trámites, a Dayana y Byron por su amistad y colaboración, a la Flia. Coronel Carrión y Herrera Carrión por su acogida.

Finalmente, quiero agradecer a mi compañero de “tesis”, Madison. Nada de esto hubiese sido posible sin tus aportes, han sido largas horas sin dormir en las últimas semanas, muchos momentos y anécdotas inolvidables a lo largo de todo el recorrido,

días de alegría, de tristeza y otros cuantos de preocupaciones y estrés, un sin número de emociones compartidas que siempre recordaré. Agradezco de todo corazón tu paciencia y tu comprensión, creo sin duda alguna que logramos ser un gran equipo.

Gracias también a mis amigas y amigos de curso, por todo el apoyo recibido a lo largo de la carrera y por todas las experiencias compartidas. A mi profe Vicky Costa por convertirse en una amiga, quien no sólo me impartió sus conocimientos sino que también me brindaba consejos y además me dio la oportunidad de tener una pequeña experiencia laboral.

Gracias a mis tías: Anita Mejía y a Sara Carlosama por animarnos a seguir estudiando y a no decaer, por estar pendiente de toda la familia y apoyarnos sobre todo en los momentos difíciles, gracias a Dios y a la Santísima Virgen, sin su bendición no hubiese sido fácil iniciar el camino.

Liseth Marianela Carlosama Mejía

Agradezco infinitamente a la Universidad Politécnica Salesiana por todo el apoyo brindado en mi desarrollo profesional, a la directora de la Carrera de Ingeniería Ambiental, Dra. Karina Pazmiño, por su gran trabajo, al Club Ambiental UPS que ha sido un espacio de desarrollo a nivel personal y profesional junto con el Dr. Carlos Jumbo y mi amigo Ronald Correa hemos dejado los primeros pasos para forjar un buen grupo y sea este cada vez más destacado con cada generación venidera.

A mi querida tutora Fis. Sheila Serrano por brindarme tan espléndida oportunidad, por abrirme las puertas al mundo científico y por inspirarme a investigar desde mis primeros años en la universidad.

A mi gran amigo Danny Vargas, por ser la mente maestra detrás de todas estas investigaciones, por mostrarme que existen aún muchas cosas por investigar sobre todo en nuestra tan querida Amazonía ecuatoriana que es tan poco explorada pero tan explotada, que nunca pierdas ese gran don de cuestionarte cada cosa.

A Lazlo Palcsu, Marjan Temovski y Elemer Laslo colegas del ICER por su interés y visión del potencial de investigación que tiene el Ecuador. A Dr. Marco Cerna, Ing. Frank Lugo, Andrés Reinoso, etc., por apoyarnos en cada exhaustiva exploración.

Al Dr. Darwin Pucha-Cofrep, Prof. Dr. Achim Braüning e Ing. Victoria Moncada por sus enseñanzas en esta hermosa ciencia llamada *dendroclimatología*.

Al Dr. Walter Palacios, Dr. Carlos Cerón e Ing. Jaime Peña por apoyarnos en la identificación de especies tropicales de la Amazonía y por mostrarme cuán misterioso es el dominio amazónico.

Agradezco infinitamente a mis dos grandes amigos de la Universidad, Johnny Martínez y Andrés Reinoso, que me ayudaron desde un inicio y me acompañaron en grandes aventuras. A Jefferson Pantoja, Kevin Valladares, y Joe Constante, por apoyarnos durante toda la carrera. A Juan Valdez y Evelyn Manobanda por apoyarme a desarrollar otras investigaciones. A Byron Troya y Dayana Jiménez buenos amigos que encontramos en esta aventura y a todos mis amigos y amigas quienes hicieron de estos años de universidad los más amenos y divertidos.

Madison Eduardo Herrera Carrión

RESUMEN

La Dendroclimatología es la ciencia que infiere climas pasados a través de los árboles, mediante el análisis del ancho de sus anillos, convirtiéndose así en testigos silenciosos sobre eventos y cambios que ha sufrido el ambiente a través del tiempo. La escasez de datos climáticos históricos reduce el entendimiento de su comportamiento en el pasado y limitan el desarrollo de modelos climáticos que permitan comprender los efectos de un cambio climático.

En la presente investigación se colectaron 128 núcleos de madera de 16 familias y 21 especies de árboles tropicales ubicados en el cantón Mera, Pastaza para evaluar el potencial de sus anillos de crecimiento como indicadores climáticos mediante el uso de técnicas dendrocronológicas. Luego de efectuar una caracterización de especies forestales se procedió a la medición del ancho de crecimiento de los anillos, generando cronologías que finalmente fueron calibradas con registros climáticos históricos provenientes de las estaciones meteorológicas cercanas al área de investigación.

En las cronologías desarrolladas la especie *Cedrela odorata* reporta anillos anuales y el factor de estrés que activa su latencia cambial es la precipitación en los meses de abril-mayo en el trimestre de lluvias más fuerte dentro del área de investigación. Se halló también coeficientes de respuesta significativos con las temperaturas mínimas en junio y a finales de año con la evaporación y humedad relativa, mismos que al parecer están asociados con el régimen bimodal de lluvias en esta zona.

Palabras clave: paleoclimatología, dendroclimatología tropical, *Cedrela odorata*, anillos de crecimiento, cronología, estaciones meteorológicas, Amazonía.

ABSTRACT

Dendroclimatology studies past climates through trees by analyzing the width of its rings, thus becoming silent witnesses about events and changes in the environment over time. The scarcity of instrumental data reduces our understanding of the climate and its past behavior, hindering the development of climate models capable of detecting a climate change.

In the present investigation, 128 tree cores from 16 tropical families and 21 species located in the Canton of Mera, Pastaza were collected to evaluate their tree-rings potential as climatic indicators through the use of dendrochronological techniques. First, a characterization of forest species was carried out. Then, the width of the rings was measured generating chronologies that were finally calibrated with historical climate records from the meteorological stations near the research area.

From the developed chronologies, *Cedrela odorata* sp. reported annual rings and its trigger factor for cambial dormancy is the precipitation in the months of April-May, coinciding with the strongest quarterly rainy season within the research area. Significant response coefficients were also found with the minimum temperatures in June and at the end of the year with evaporation and relative humidity, which are apparently associated with the bimodal rainfall regime in this area.

Keywords: paleoclimatology, tropical dendroclimatology, *Cedrela odorata*, tree rings, chronology, meteorological stations, Amazon basin.

TABLA DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	5
2.1. Objetivo General	5
2.2. Objetivos Específicos	5
3. MARCO TEÓRICO	6
3.1. Paleoclimatología	6
3.2. Dendrocronología.....	6
3.3. Dendroclimatología	7
3.4. Dendroclimatología tropical.....	9
3.5. Formación de anillos de crecimiento.....	11
3.5.1. Técnicas de análisis de anillos de crecimiento.....	13
3.5.1.1. Sistema de medición de anillos de crecimiento.....	14
3.5.1.2. Análisis a través de imágenes.....	14
3.5.1.3. Isótopos estables.....	15
3.6. El clima en la Amazonía ecuatoriana	15
4. MATERIALES Y MÉTODOS	18
4.1. Materiales	18
4.2. Área de investigación	18
4.2.1. Clima local	21
4.3. Métodos dendrocronológicos	22

4.3.1.	Toma de muestras de núcleos de madera.....	22
4.3.2.	Identificación de especies forestales	24
4.3.3.	Tratamiento de muestras	26
4.3.3.1.	<i>Pegado y lijado</i>	26
4.3.4.	Medición y estandarización de ancho de anillos.....	27
4.3.4.1.	<i>Sistema de medición LINTAB</i>	27
4.3.4.2.	<i>Sistema de medición CDendro & Coorecorder</i>	30
4.3.5.	Sincronización.....	31
4.4.	Monitoreo en campo del clima	31
4.4.1.	Datos de temperatura superficial del mar.....	36
4.5.	Relaciones entre el clima local y los anchos de anillos.....	36
4.6.	Consideraciones éticas.....	37
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	38
5.1.	Selección e identificación de potenciales especies forestales con formación de anillos.....	38
5.1.1.	Especies forestales con potencial dendrocronológico.....	39
5.2.	Cronologías generadas con técnicas dendroclimáticas.....	41
5.2.1.	Trayectorias de crecimiento	41
5.2.2.	Cronología de anillos de árboles	43
5.3.	Descripción climática del área de investigación	46
5.3.1.	Análisis de los datos meteorológicos y variabilidad climática	48
5.4.	Cronologías calibradas con datos climáticos.....	53
5.4.1.	Interacciones climáticas: influencia climática en el ancho de anillo ...	53

5.4.2.	Cronología y análisis de señales periódicas	59
5.5.	Reconstrucción climática.....	61
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	64
6.1.	Conclusiones.....	64
6.2.	Recomendaciones	65
7.	BIBLIOGRAFÍA	66
8.	ANEXOS	75
9.	GLOSARIO	81

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Principios básicos de la Dendrocronología.....	7
Figura 2. Métodos de análisis utilizados para dendroclimatología	8
Figura 3. Mapa con las localizaciones de estudios de árboles tropicales en todos los continentes y climas	10
Figura 4. Estructura de un núcleo de madera del género Cedrela.....	12
Figura 5. Anillos de crecimiento en muestras del género Cedrela.....	13
Figura 6. Técnicas de análisis de anillos de crecimiento.	14
Figura 7. Ubicación geográfica de El Niño.....	17
Figura 8. Índice de Niño Oceánico (ONI) con los eventos muy fuerte, fuertes, moderados y débiles.....	17
Figura 9. Mapa de descripción del sitio de estudio.....	19
Figura 10. Delimitación de transectos.....	20
Figura 11. Gráfico de precipitación y temperatura en el bosque húmedo	21
Figura 12. Barreno Pressler y sus partes	22
Figura 13. Métodos para la toma de núcleos de madera	23
Figura 14. Métodos para identificar muestras botáni.....	25
Figura 15. Ejemplo de información recolectada en el libro de campo.....	25
Figura 16. Tratamiento de las muestras	26
Figura 17. Métodos de medición y obtención de datos de anillos de crecimiento.....	27
Figura 18. Identificación de anillos de crecimiento	28
Figura 19. Cuadro de configuración de TSAPWin.	28
Figura 20. Registro del crecimiento de anillos medidos en LINTAB 6.....	29
Figura 21. Interfaz de usuario en CDendro-CooRecorder	30
Figura 22. Monitoreo de variables climáticas en el área de investigación.....	32

Figura 23. Interpolación de datos faltantes	34
Figura 24. Estacionalidad de la precipitación media mensual de las estaciones meteorológicas.	36
Figura 25. Especies forestales encontradas en los sitios de estudio.....	39
Figura 26. Trayectorias de crecimiento de los árboles tropicales en función de su diámetro de crecimiento y edad.	42
Figura 27. Histograma de las edades máximas de las especies tropicales encontradas con formación de anillos	43
Figura 28. Cronologías del índice de ancho de anillo.....	45
Figura 29. Mapa de precipitaciones anuales	47
Figura 30. Mapa de temperaturas medias anuales	48
Figura 31. Series en el tiempo para cada una de las variables climáticas de la estación meteorológica DAC-Shell (período 1981 - 2018) junto con los índices de Oscilación Niño (ONI) ilustradas con ENSO 3.4.	49
Figura 32. Series en el tiempo para cada una de las variables climáticas de la estación meteorológica M0008-Puyo (período 1965 - 2018) junto con los índices de Oscilación Niño (ONI) ilustradas con ENSO 3.4	51
Figura 33. Series en el tiempo para cada una de las variables climáticas de datos interpolados CRU (período 1965 - 2018) junto con los índices de Oscilación Niño (ONI) ilustradas con ENSO 3.4	51
Figura 34. Coeficientes de correlación y respuesta de <i>C. odorata</i> con temperatura mensual media y precipitación.....	53
Figura 35. Coeficientes de correlación y respuesta de <i>C. odorata</i> con temperatura mensual máxima, mínima y humedad relativa.....	54

Figura 36. Coeficientes de correlación y respuesta de <i>C. odorata</i> con evaporación y ENSO 3.4	54
Figura 37. Funciones de respuesta móvil a partir de la cronología de ancho de anillo de <i>Cedrela odorata</i>	55
Figura 38. Coeficientes de correlación y respuesta de <i>Protium</i> sp., con temperatura mensual media y precipitación.....	57
Figura 39. Coeficientes de correlación y respuesta de <i>Protium</i> sp., con temperatura máxima, mínima y humedad.....	57
Figura 40. Coeficientes de correlación y respuesta de <i>Protium</i> sp., con la evaporación	58
Figura 41. Funciones de respuesta móvil a partir de la cronología de ancho de anillo de <i>Protium</i> sp.	58
Figura 42. Series de índices de ancho de anillos (RWI) y espectro wavelet con <i>Cedrela odorata</i> y <i>Protium</i> sp.....	60
Figura 43. Reconstrucción climática de precipitaciones para los meses abril-mayo con la cronología de <i>Cedrela odorata</i>	62
Figura 44. Reconstrucción climática de la temperatura con la cronología de <i>Cedrela odorata</i>	63

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Materiales y equipos utilizados.....	18
Tabla 2. Estaciones meteorológicas, datos disponibles y porcentaje de utilidad de los datos	33
Tabla 3. Datos registrados de temperatura y precipitación (promedios mensuales) en los sitios de estudio	35
Tabla 4. Parámetros de correlación entre las estaciones meteorológicas y los registros climáticos obtenidos en el sitio de estudio.....	35
Tabla 5. Índices analizados para cada sitio de investigación.....	38
Tabla 6. Análisis de la formación de anillos en las especies encontradas, clasificadas por familia, género y especie	40
Tabla 7. Resumen estadístico del ancho de anillos	43

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Códigos utilizados para el análisis dendroclimático en R.....	76
Anexo 2. Permiso de investigación.....	79
Anexo 3. Permiso de movilización	80

1. INTRODUCCIÓN

La corta duración y la escasez de registros climáticos instrumentales continuos en el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) hacen que la reconstrucción del clima pasado sea muy reducida en el Ecuador, limitando así el estudio de comportamientos atmosféricos pasados que proporcionen mejores herramientas para una mejor toma de decisiones con respecto al cambio climático, impactos y adaptación (Espinoza et al., 2009; Armenta Porras, 2016; Campozano, Célleri, Trachte, Bendix, & Samaniego, 2016).

De hecho, la escases de series climatológicas continuas perjudican las investigaciones y hacen que por ejemplo las evidencias de un cambio climático, mostradas desde un punto de vista estadístico, sean detectadas de forma tardía en el Ecuador.

A manera de ilustración, Cáceres, Mejía & Ontaneda (1998) confirmaban las tendencias crecientes de la temperatura media anual sobre todo en la región interandina, a través del estudio de quince estaciones meteorológicas distribuidas entre las regiones Costa y Sierra. Sin embargo, debido a la falta de toma de datos meteorológicos en forma sistemática en la Región Amazónica y al ruido existente en ciertas series temporales, las conclusiones eran limitadas y se recomendaba continuar con estudios más exhaustivos.

Por consiguiente, ante escenarios dónde prima la escases de datos meteorológicos continuos que permitan determinar tendencias de cambios en el comportamiento climático surge la Paleoclimatología, que tiene por objeto el estudio de los climas pasados, permitiendo la reconstrucción del clima sobre épocas anteriores al desarrollo de los instrumentos de medición, mismos que apenas abarcan

una fracción insignificante de tiempo ($<10^{-7}$ años) en comparación a la historia climática de la Tierra (Bradley & Elias, 2015).

La Paleoclimatología emplea una diversidad de técnicas para su estudio (ej. núcleos de hielo, espeleotemas, sedimentos lacustres y marinos, entre otros) pero una de las más robustas y extendidas en el mundo son las reconstrucciones paleoclimáticas efectuadas con los anillos de los árboles denominada Dendroclimatología que brinda información ambiental continua y con resolución anual (Hughes, Swetnam, & Diaz, 2011).

Este tipo de reconstrucciones climáticas benefician a varios sectores de la sociedad, empezando con la comunidad científica al aportar con información inédita sobre la zona de estudio. Posteriormente, cuando los datos generados son interpretados y comunicados apropiadamente hacia la población, permiten adoptar medidas oportunas de adaptación y mitigación, buscando así reducir los impactos negativos.

A pesar de la evolución actual y avance del estado del arte en materia Dendroclimática en toda América del Sur, en Ecuador son limitadas las publicaciones al respecto, a pesar de que por su ubicación geográfica y biodiversidad es altamente vulnerable a los cambios en temperatura y precipitación (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2017).

En este marco, una de las regiones con mayor biodiversidad en el país es la Amazónica (Vimeux, Sylvestre, & Khodri, 2009; Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2017), misma que cuenta con especies forestales nativas y relativamente longevas entre los 200 años y muy rara vez mayores a 500 años (Martínez-Ramos & Alvarez-Buylla, 1998; Brien, Schöngart, & Zuidema, 2016).

Adicionalmente, los bosques tropicales de la Amazonía tienen importantes funciones ambientales tales como la termorregulación del clima, captación y almacenamiento de CO₂ atmosférico y son el hábitat de una amplia biodiversidad (Gomes, Vieira, Salomão, & ter Steege, 2019), razones suficientes para justificar el estudio del comportamiento del dominio amazónico (García, Villalba, Araguas, & Rozanski, 1998).

Con estos antecedentes nace el presente trabajo experimental que es parte del Proyecto de Investigación titulado: “*Reconstrucción Paleoclimática en la Región Amazónica del Ecuador, basada en: anillos de árboles y espeleotemas*”, proyecto que se realiza en conjunto entre la Carrera de Ingeniería Ambiental de la Universidad Politécnica Salesiana (UPS) y el Centro de Investigación en Climatología de los Isótopos y Medio Ambiente (ICER, por sus siglas en inglés).

La investigación se llevó a cabo inicialmente con una revisión bibliográfica de los sistemas kársticos en la Región Amazónica, ubicando las áreas con mayor presencia de rocas calizas solubles ya que las mismas son un indicador de la presencia de cavernas (cuevas) con espeleotemas (Dreybrodt, Gabrovšek, & Romanov, 2005; Constantin, Toulkeridis, Moldovan, Villacís, & Addison, 2018).

Como resultado, se ubicaron áreas con presencia de cuevas en topografía kárstica en la región Amazónica. En la Provincia de Pastaza se situaron las cuevas del Río Anzú conocidas como: “Unión de los Continentes” (01° 24.4’ S, 78° 2.7’ W), “Garganta del Dino” (01° 25.5’ S, 78° 2.4’ W), “Copa del Mundo” (01° 24.3’ S, 78° 2.6’ W) y en la Provincia de Morona Santiago la cueva “De las Cascadas” (02° 38.8’ S, 78° 11.8’ W).

Luego de su evaluación, se decidió efectuar el trabajo únicamente en las cuevas de Mera, Pastaza *Unión de los Continentes* y *Garganta del Dino* y en el presente estudio se hará alusión únicamente a estas zonas.

Es importante señalar que los sitios de estudio se eligieron de esta manera cerca de las cuevas para brindar un complemento en la reconstrucción paleoclimática efectuada por el otro equipo de investigadores del ICER mediante espeleotemas. La dendroclimatología permite comprender y calibrar las señales climáticas con registros históricos meteorológicos de la zona, sobre todo en las últimas décadas gracias a su resolución anual.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo General

Realizar una reconstrucción Dendroclimatológica en el cantón Mera, Provincia de Pastaza, a través del análisis del crecimiento del ancho de anillos de especies forestales tropicales con el fin de demostrar que son indicadores que registran la señal climática a lo largo del tiempo.

2.2. Objetivos Específicos

1. Seleccionar e identificar potenciales especies de árboles tropicales útiles para su uso en dendroclimatología.
2. Utilizar técnicas dendrocronológicas y generar cronologías.
3. Calibrar cronologías con datos climáticos de las estaciones meteorológicas cercanas al área de investigación.

3. MARCO TEÓRICO

3.1. Paleoclimatología

Es el estudio del clima pasado, este se ha convertido en una herramienta fundamental para la adquisición de datos en el estudio de las transiciones entre diferentes estados climáticos, incluidos los eventos abruptos.

Las condiciones climáticas pasadas se conservan en archivos naturales: espeleotemas, núcleos de hielo, anillos de los árboles, entre otros (National Oceanic and Atmospheric Administration, 2019a), cada uno de estos contienen una señal climática de interés inmersa en “ruido” debido a efectos no influenciados por el clima (Cronin, 2009).

De hecho, la mayoría de los modelos y pronósticos climáticos se basan en datos obtenidos a través de estos archivos geológicos, terrestres, glaciológicos, biológicos e históricos informando así sobre la variabilidad de centenas a miles de años contra la cual se pueden comparar los cambios recientes y evaluar si son inusuales o no (Masson-Delmotte et al., 2013; Bradley & Elias, 2015).

Todas estas investigaciones paleoclimáticas desarrolladas hasta la actualidad se basan en el estudio del clima y sus fenómenos actuales, siguiendo como base el principio de *uniformismo* establecido por James Hutton en 1875, el cual supone que los procesos naturales actuales se comportan de la misma manera que en el pasado en base a las observaciones científicas actuales, en otras palabras, se puede afirmar que “*el presente es la clave del pasado*” (Elias & Mock, 2013).

3.2. Dendrocronología

Es la ciencia que estudia los anillos de crecimiento de los árboles y su relación con las condiciones naturales en las que se desarrollan. Esta permite

determinar la edad aproximada de la madera y también es considerada una herramienta sumamente útil para poder comprender eventos climáticos naturales o antropogénicos ocurridos en el pasado (Giraldo, 2012; Pereyra, Inga, Santos, & Rodríguez, 2014). Para analizar la información que guardan los anillos de crecimiento en los árboles, Fritts (1976) establece una serie de principios necesarios al momento de iniciar una investigación dendrocronológica, puntualizados a continuación en la Figura 1.

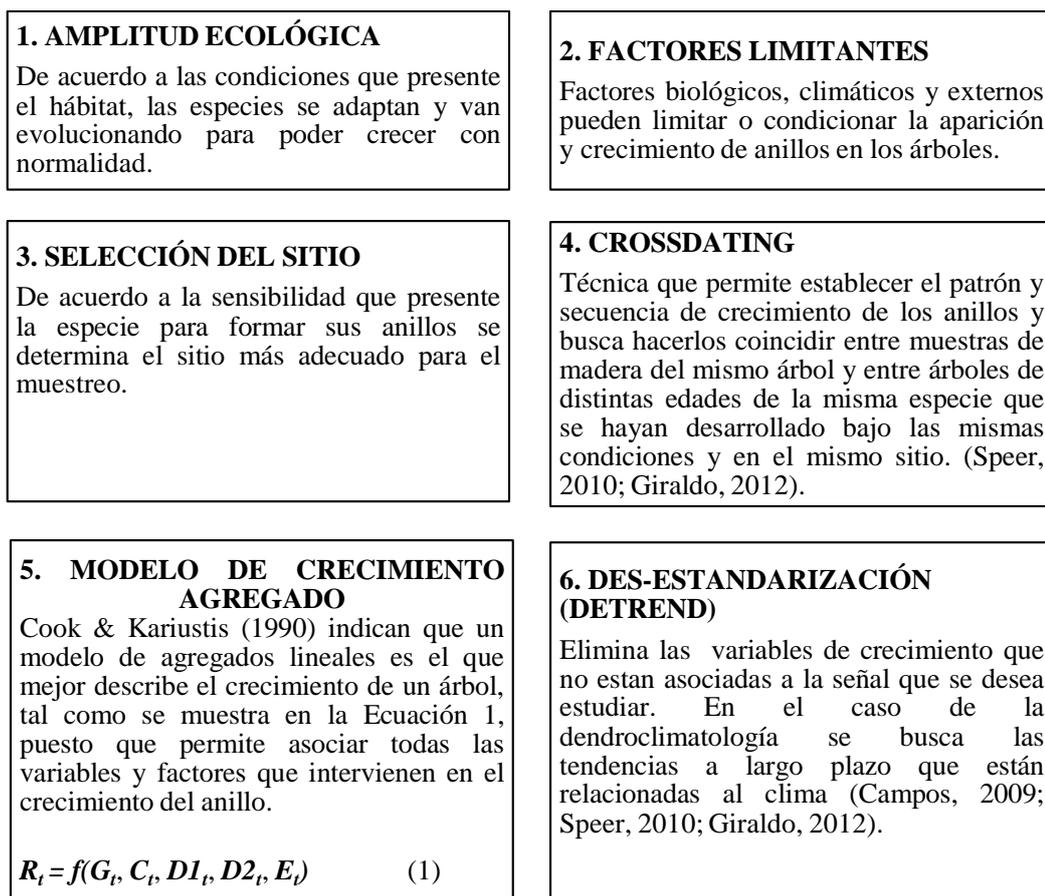


Figura 1. Principios básicos de la Dendrocronología

Fuente: Carlosama L. & Herrera M., (2019)

3.3.Dendroclimatología

Es una aplicación de la dendrocronología y se la define como la ciencia que permite reconstruir el clima del pasado a través del análisis de los anillos de los árboles; para lograr dicha reconstrucción primero se debe conocer el ancho de los

anillos de los árboles para luego compararlos estadísticamente con los datos históricos meteorológicos y así finalmente poder establecer el comportamiento del clima pasado (Fritts, 1976). Para desarrollar una reconstrucción climática Speer (2010) señala que se debe tomar en cuenta los árboles sensibles al clima y con una gran variedad de edades, mientras más longevo es el árbol se obtendrá una reconstrucción más amplia, por ello se debe considerar algunos aspectos detallados en la Figura 2.

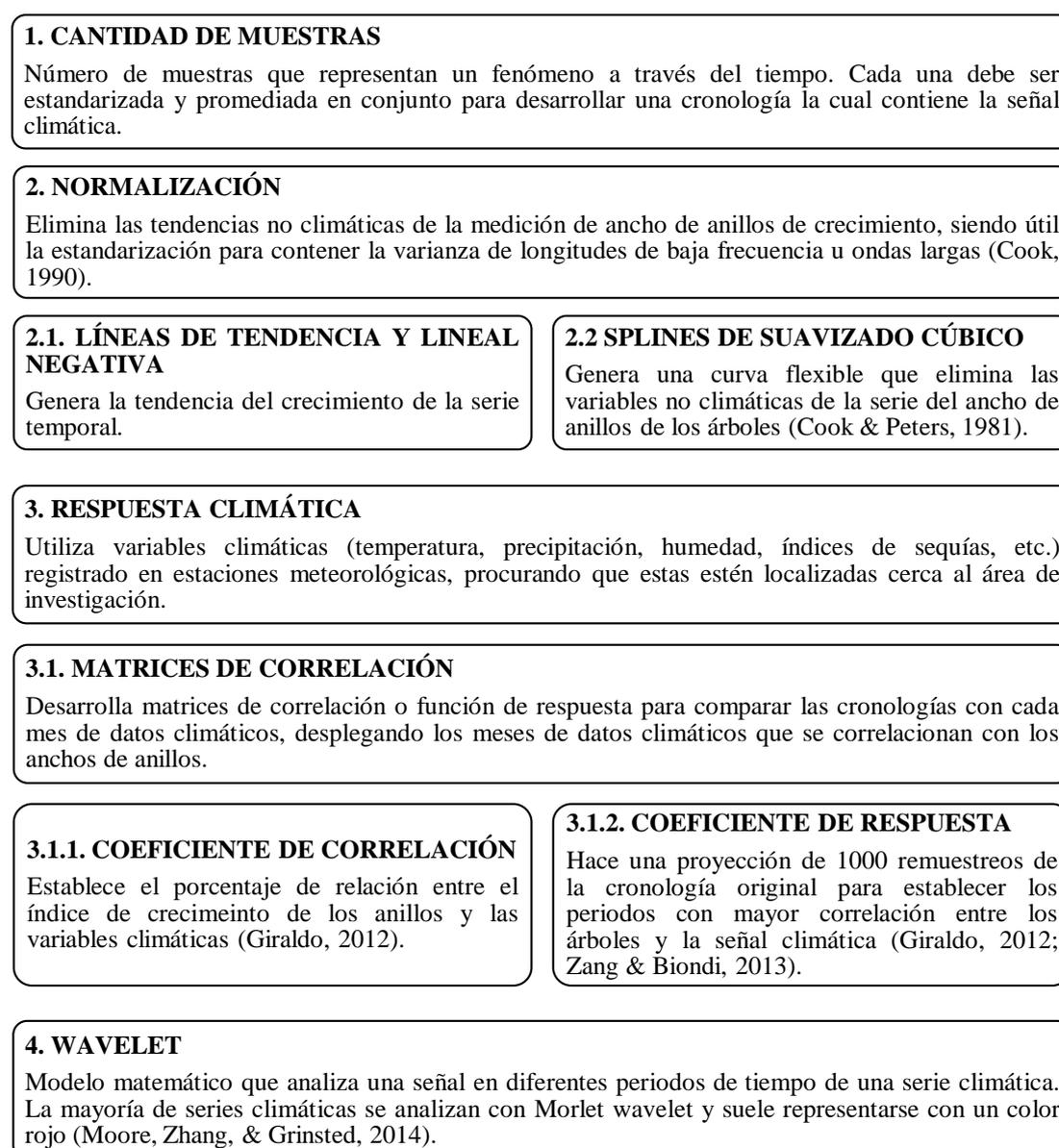


Figura 2. Métodos de análisis utilizados para dendroclimatología

Fuente: Carlosama L. & Herrera M., (2019)

3.4.Dendroclimatología tropical

La formación de anillos, así como su datación e interpretación ha sido satisfactoriamente aplicada y reconocida en el Hemisferio Norte debido a la presencia de marcadas estaciones que coadyuvan a la pérdida del follaje y por ende a la marcación de anillos en el fuste.

Para el caso de los trópicos, debido a la mínima variación en la temperatura se mantuvo el concepto de que los árboles en esta parte del mundo no están sujetos a ningún estrés climático y por ende la formación de anillos sería nula. Sin embargo, un gran número de publicaciones dendrocronológicas, en especial las lideradas por Worbes (2002) sugieren que muchas especies de árboles en los trópicos tienen la capacidad de formar anillos, tanto por variaciones en temperatura o por cambios en el balance hídrico (Cook, 1990; Worbes & Nin, 2002; Elias & Mock, 2013), siendo así moderadamente más sensibles a las lluvias (los años secos reducen el crecimiento) y la temperatura (los años calientes reducen el crecimiento) (Brienen et al., 2016).

Actualmente se han confirmado más de 230 especies de árboles de 46 familias distintas en zonas tropicales de todos los continentes, con formación de anillos anuales (Figura 3), siendo cinco familias las más destacadas con especies que forman anillos: Fabaceae, Meliaceae, Malvaceae, Bignoniaceae, Combretaceae y las cinco especies más utilizadas: *Tectona grandis*, *Terminalia superba*, *Cedrela odorata*, *Tripochiton scleroxylon* y *Macrolobium acaciifolium* (Brienen et al., 2016).

En el Ecuador se han desarrollado investigaciones dendroclimatológicas con diversas especies forestales, por ejemplo en la Provincia de Santa Elena usando la especie *Guazuma ulmifolia* (Suntaxi, 2010), en el Yasuní se utilizó la especie

Cedrela odorata (Nacimba, 2015), en el sur del Ecuador se ocupó *Cedrela Montana*, *Maclura tinctoria* y *Bursera graveolens* (Pucha-Cofrep, Peters, & Bräuning, 2015; Pucha-Cofrep, 2016), en el Parque Nacional Podocarpus se trabajó con *Tabebuia chrysantha*, *Alnus acuminata* y *Prumnopitys montana* (Bräuning & Burchardt, 2006) y en el Parque Nacional “El Cajas” con *Polylepis reticulata* (Pacheco, 2015).

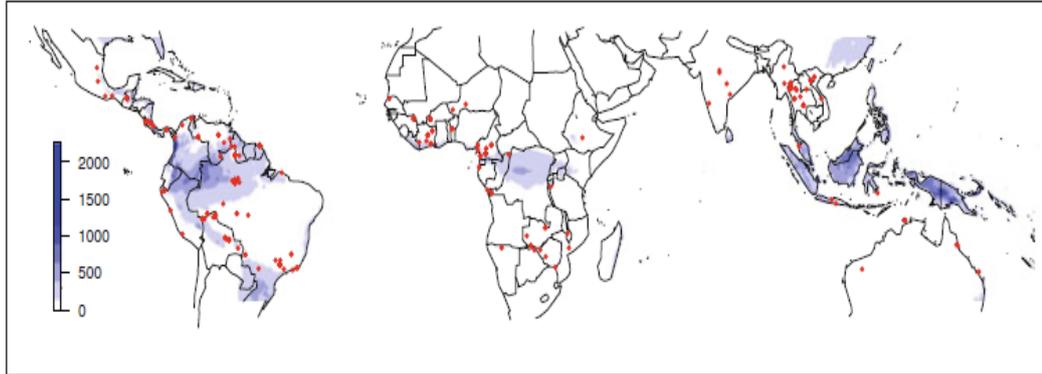


Figura 3. Mapa con las localizaciones de estudios de árboles tropicales en todos los continentes y climas (puntos rojos). El color azul de fondo muestra sitios con humedades muy elevadas (2000 mm de precipitación promedio anual) y con una estacionalidad limitada en las lluvias.

Fuente: Brienen, Schöngart, & Zuidema (2016)

En los trópicos existe un promedio de edad de los árboles entre los 200 a 500 años, aunque por métodos de datación por radiocarbono se revelan edades de árboles que superan los 1000 años, pero esto aún sigue en un debate científico (Chambers, Higuchi, & Schimel, 1998). Hasta la actualidad no se logran cronologías muy largas debido a diversas causas como la alta tasa de putrefacción de la materia orgánica por la existencia de microorganismos en el suelo lo que conlleva a una mala conservación de individuos longevos (Speer, 2010). De igual manera los árboles grandes se ven afectados en gran medida por la fragmentación debido a las influencias de la turbulencia eólica, la desecación y la infestación por lianas, que son efectos comunes cerca del borde de los bosques (Gomes et al., 2019). Finalmente la deforestación, que a inicios de 1970 propició la tala indiscriminada de especies

forestales maderables en la Amazonía (Espinoza et al., 2009), teniendo como objetivo el aprovechamiento de árboles longevos como es el caso de los cedros en la Amazonía ecuatoriana al proveer una de las maderas más finas para la ebanistería, motivo por el cual se los consideró en peligro de extinción llegando a estar en veda mediante el Acuerdo Ministerial Nro. 167, publicado en el registro Oficial Nro. 18 del 08 de febrero del 2007; por tal motivo se pueden encontrar los registros más viejos de árboles de cedro de más de 500 años en las iglesias de Quito (Palacios, 2016).

3.5. Formación de anillos de crecimiento

La madera de los árboles se caracteriza por la formación de capas durante el período de crecimiento. En una sección transversal de un tronco se representan estas como una serie de anillos concéntricos, cada uno formado por secuencias de células grandes de pared delgada (madera temprana) y células de pared gruesa más compactas y densas (madera tardía) (Meinzer, Lachenbruch, & Dawson, 2011; Goldstein & Santiago, 2016).

Los límites de los anillos de los árboles se forman cuando las celdas del cambium en los troncos se encuentran en períodos de dormancia. En latitudes medias y altas el principal desencadenante detrás de la latencia cambial y la formación de anillos es la variación estacional en las horas de duración del día y la temperatura (Fritts, 1976). Un cambio abrupto en el tamaño de celda entre las células formadas en último lugar de un anillo y celdas formadas en primer lugar de la siguiente, marca el límite entre los anillos anuales (Bradley & Elias, 2015), como se observa en la Figura 4.

En las zonas extra-tropicales, la evapotranspiración excede las lluvias durante varias semanas en el año, influyendo un estrés hídrico estacional que da como resultado una muda completa de hojas (caducifolio), o simplemente un cambio de hojas en un período corto (brevi-caducifolio), de esa manera cuando los árboles se encuentran desprovistos de hojas la actividad variante del cambium se detiene y forma una capa distinta de madera; existen además factores de estrés abiótico que conduce a la formación de anillos anuales debido a la inundación estacional por las condiciones anóxicas en las raíces lo que induce a la caída de hojas (Brienen et al., 2016).

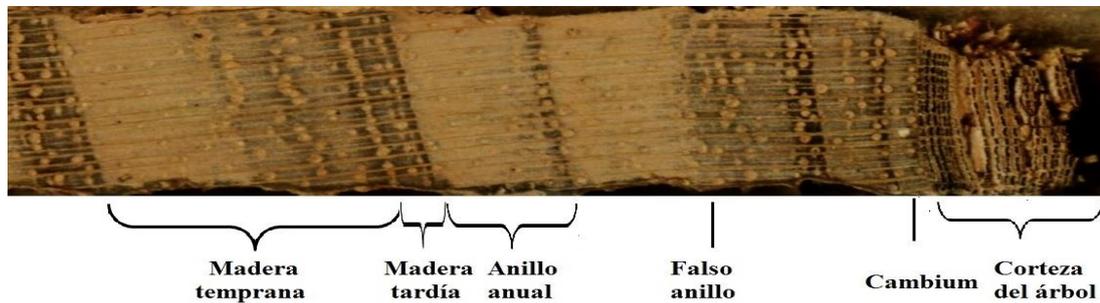


Figura 4. Estructura de un núcleo de madera del género Cedrela.

Fuente: Carlosama L. & Herrera M., (2019).

El ancho, densidad o composición isotópica de cada anillo está en función de múltiples factores entre estos: especie, edad, disponibilidad de nutrientes y un conjunto amplio y complejo de factores climáticos (luz solar, precipitación, humedad, temperatura, entre otros) que los árboles registran en los anillos de crecimiento almacenados durante centenares o miles de años en función de la edad del árbol (Bradley & Elias, 2015).

En ocasiones los árboles producen anillos falsos o bandas de crecimiento intra – anuales que pueden confundirse con la transición real de la madera temprana y tardía como se observa en la Figura 5, esto debido a que el árbol se encuentra en

condiciones severas antes de culminar la temporada de crecimiento y esto puede llevar a producir células de pared gruesa dentro de una capa de crecimiento anual, dificultando la observación de donde termina el crecimiento real de un anillo y fácilmente conlleva a errores en la datación; esta situación se resuelve con el principio de *crossdating* que ayuda a establecer una secuencia y patrón de crecimiento de los anillos (Giraldo, 2012).

Así también en algunos árboles en años extremos pueden no producir una capa de crecimiento anual, ser discontinuos o simplemente ser tan delgados que son indistinguibles en la madera tardía (anillos faltantes) (Bradley & Elias, 2015).

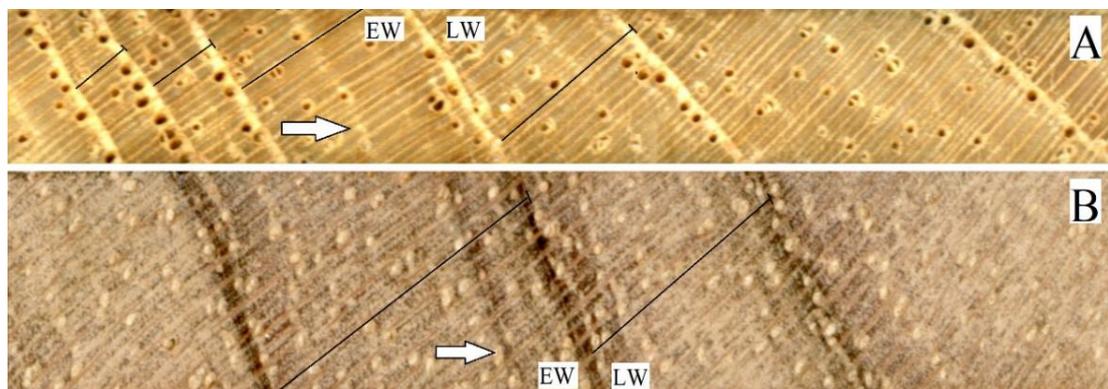


Figura 5. Anillos de crecimiento en muestras del género *Cedrela*, A) Anillo falso (flecha) dentro de la madera temprana (EW) y B) anillos ocultos (flecha) dentro de la madera temprana (EW). La porosidad en ambas muestras son conductos de resina y las fibras diagonales entre anillo y anillo (líneas negras) muestran las direcciones de los radios de crecimiento, (LW) = madera tardía.

Fuente: Carlosama L. & Herrera M., (2019).

3.5.1. Técnicas de análisis de anillos de crecimiento

Para analizar el ancho de los anillos de crecimiento existen diferentes métodos y equipos que permiten medirlos. Estas técnicas de datación pueden ser destructivas, es decir que para su análisis se requiere fragmentar la muestra tomada del árbol o lastimar al árbol propiamente y las no destructivas que mantienen la muestra de barrenos o disco transversal intactos (Campos, 2009; Bräuning, 2019). En la Figura 6 se presenta las técnicas más utilizadas.

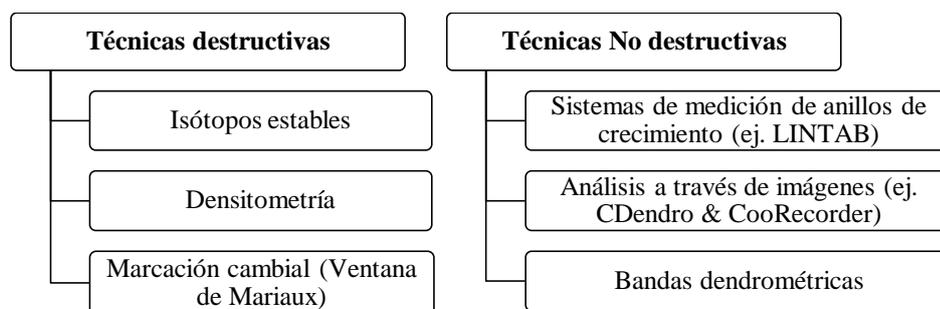


Figura 6. Técnicas de análisis de anillos de crecimiento.

Fuente: Carlosama L. & Herrera M., (2019).

3.5.1.1. Sistema de medición de anillos de crecimiento

La mayoría de sistemas de medición están compuestos por una parte móvil y una parte óptica que consiste en un estereoscopio conectado a una manivela que permite movilizar la muestra para poder observar y contabilizar los anillos. El sistema de medición más utilizado es LINTAB que cuenta con una precisión de 0,01 a 0,001 mm dependiendo la exactitud con la que cuente el equipo; el lente del microscopio cuenta con una cruz que debe alinearse al borde del anillo y seguir la dirección del radio para realizar la medición a lo largo de toda la muestra (Speer, 2010).

3.5.1.2. Análisis a través de imágenes

Esta técnica utiliza las imágenes de una muestra escaneada y realiza la medición de forma automática en un software que detecta manual o automáticamente el ancho de anillos. La principal desventaja que presenta este tipo de análisis es que las imágenes deben tener una resolución mayor a 1200 puntos por pulgadas (dpi, por sus siglas en inglés) y el software puede omitir anillos o a su vez reconocer falsos anillos por lo tanto requiere que el dendrocronólogo esté muy atento a realizar correcciones en la medición y corroborar con la muestra física; los programas más

conocidos en medición a través de imágenes digitales son CDendro & CooRecorder y WinCell (Speer, 2010; Bräuning, 2019).

3.5.1.3. Isótopos estables

Consisten en el análisis de isótopos de Carbono (^{14}C), Oxígeno (^{18}O) e Hidrógeno (^2H). Estos elementos son asimilados por los árboles de la atmósfera (C) y del agua (O y H) a través del proceso de fotosíntesis y se retienen en la pared celular. Analizar este tipo de datos permite conocer la manera en la que el árbol asimila los componentes en función de las condiciones de su entorno (McCarroll & Loader, 2004).

Para la datación exacta de los anillos por radiocarbono (^{14}C) se procede a la digestión de la celulosa contenida en el anillo a analizar (extracción de Soxhlet) y se mide en un espectrómetro de masas (AMS) para finalmente correlacionar los valores obtenidos con una curva de calibración de radiocarbono (Roing, 2000; Hughes et al., 2011; Zúñiga, 2012).

3.6. El clima en la Amazonía ecuatoriana

Sudamérica es una masa continental que está atravesada por el Ecuador y tiene una extensión desde 10° N hasta los 55° S mostrando climas tropicales y extra-tropicales influenciados por factores regionales como la Cordillera de los Andes y los bosques lluviosos de la Cuenca Amazónica, así como por variaciones climáticas debido a los océanos que la rodean (Sylvestre, 2009), obteniendo de esta manera una relación entre las anomalías de la temperatura superficial del mar (SST, por sus siglas en inglés), asociadas con El Niño-Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés), la Oscilación decenal del Pacífico (DOP, por sus siglas en inglés) y la Oscilación del Atlántico Norte (NAO, por sus siglas en inglés) (Vimeux et al., 2009).

La cuenca amazónica ocupa una superficie que va desde los Andes hasta el Océano Atlántico y está conformada por siete países de los cuales el Ecuador ocupa solamente el 2% (Espinoza et al., 2009). La presencia de la cordillera de los Andes genera un efecto barrera que exige que el aire húmedo ascienda, generando mayor concentración de vapor de agua en las estribaciones, las zonas costeras presentan una estacionalidad con tres a cuatro meses de lluvia mientras que en la Amazonía las precipitaciones están presentes todo el año con un breve incremento en los meses de marzo y abril (García et al., 1998).

Ecuador y Perú son fuertemente afectados por el Niño-Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés) aumentando los valores de precipitación anual y la intensidad de los vientos en las zonas costeras. Este fenómeno se produce por un movimiento de las aguas cálidas a través del Océano Pacífico eliminando las olas frías mismas que aportan nutrientes (García et al., 1998).

Se considera el ENSO un fenómeno cíclico que presenta dos fases: una cálida y una fría conocida como “La Niña” que es el resultado del movimiento de los vientos alisios que desplazan el agua caliente hacia el Océano Pacífico Occidental (García et al., 1998). De acuerdo a la región oceanográfica en la que se presente la variación de temperatura del mar existen diferentes denominaciones de Niño, en la Figura 7 se describen las dos regiones que generalmente afectan al Ecuador.

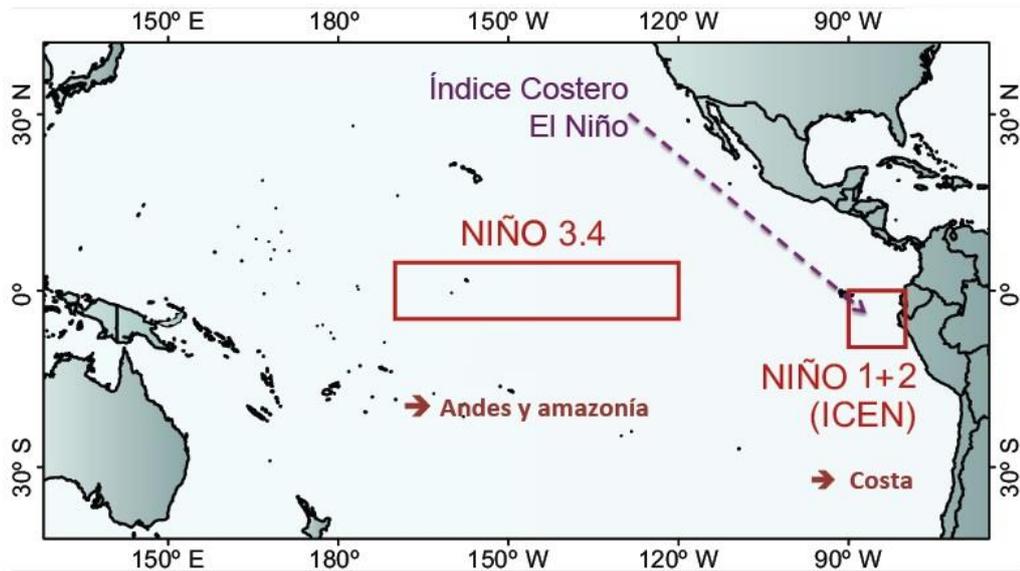


Figura 7. Ubicación geográfica de El Niño

Fuente: Modificado de Takahashi (2016)

La región Niño 3.4 estima valores de la temperatura superficial del mar (SST, por sus siglas en inglés) y se reporta un evento ENSO cuando los valores superan un umbral de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ durante tres meses consecutivos medidos en una región denominada 3.4 en los cuadrantes $5^{\circ}\text{N} - 5^{\circ}\text{S}$, $170^{\circ}\text{W} - 120^{\circ}\text{W}$ (National Oceanic and Atmospheric Administration, 2019b), este valor es conocido como el Índice del Niño Oceánico (ONI, por sus siglas en inglés) (Figura 8).

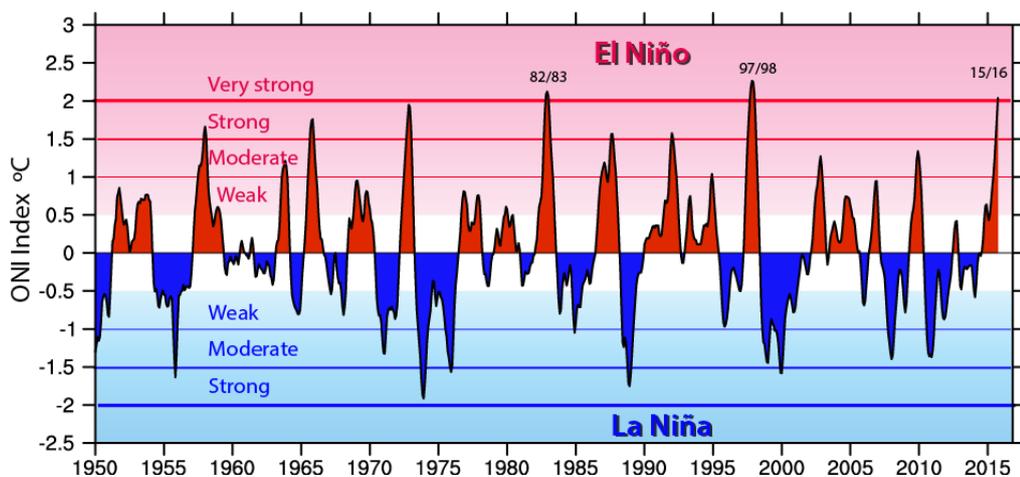


Figura 8. El Índice de Niño Oceánico (ONI) muestra fases cálidas (rojas) “El niño” y frías (azules) “La niña”. Se indican los eventos muy fuerte (very strong), fuertes (strong), moderados (moderate) y débiles (weak).

Fuente: Modificado de Trenberth (2019).

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Materiales

La investigación se dividió en tres fases, la primera de campo para la toma de muestras, una segunda de laboratorio para el tratamiento de las muestras y una tercera de análisis dendroclimatológico, todas estas detalladas en la Tabla 1.

Tabla 1

Materiales y equipos utilizados

MATERIALES	EQUIPOS Y PROGRAMAS
	FASE DE CAMPO
Barreno Pressler	GPS
Podadora aérea	Microscopio portable
Sorbetes	Sensores de temperatura
Libreta de campo	Colector de agua lluvia
Porta muestras	
Aceite lubricante y anticorrosivo para acero	
Prensas (Tabla triplex tamaño A3)	
	FASE DE LABORATORIO
Soportes de madera de 50x1cm	Estereoscopio
Pegamento blanco	Escaner A3
Lijas Nro.: 240, 360, 400, 500, 600, 1000, 1200, 1500, 2000, 2500 y 4000	Lintab 6
	TSAPWin
	FASE DE ANÁLISIS
	CDendro & Coorecorder
	R, language and environment for statistical computing
	WeeButtonRF
	ArcGIS
	InfoStat
	CurveExpert Professional
	Past3

Fuente: Carlosama L. & Herrera M., (2019).

4.2. Área de investigación

Este estudio se llevó a cabo en la zona kárstica de la región amazónica del Ecuador entre los ríos Anzú y Pastaza, en el bosque húmedo localizado dentro del bio-corredor entre los Parques nacionales “Sangay” y “Llanganates” (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2015a). El área cubre un gradiente altitudinal de 1100 a 1300

m de altitud. Comprende las Cuevas: “Unión de los continentes” y “Garganta del Dino” que están ubicadas a 9.5 km del cantón Mera, en la colonia 24 de Mayo ilustrado en la Figura 9.

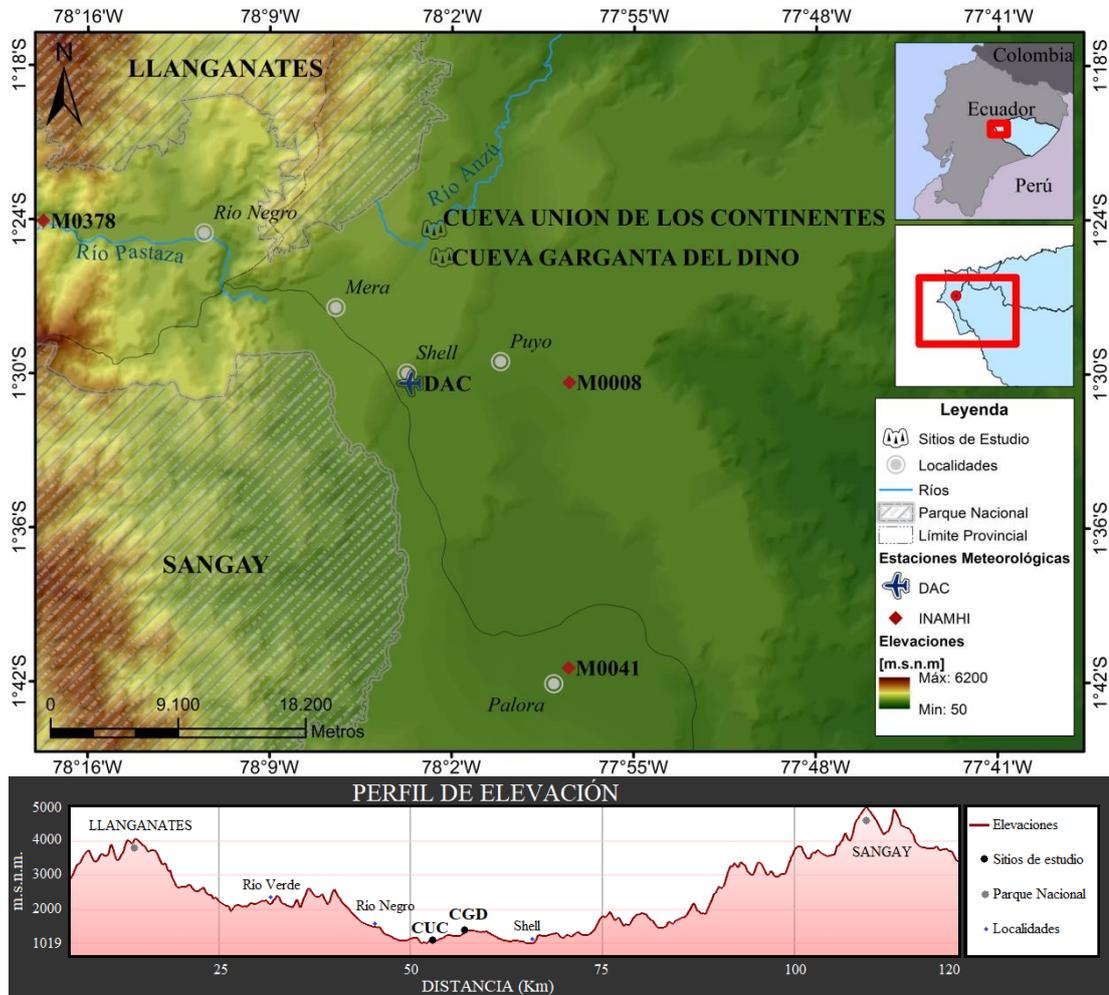


Figura 9. Mapa de descripción del sitio de estudio junto con la ubicación de localidades y estaciones meteorológicas más cercanas en coordenadas PSAD56 zona 17S. Se señalan las cuevas "Unión de Los Continentes" (CUC) y "Garganta del Dino" (CGD) localizadas en un bosque húmedo. Al noroeste se encuentra el Parque Nacional "Llanganates" y al suroeste el Parque Nacional "Sangay". En la parte inferior el perfil de elevaciones.

Fuente: Carlosama L. & Herrera M., (2019).

Una vez definidas las áreas de estudio, se ejecutaron dos exploraciones entre los meses de febrero y marzo de 2019 para la selección de especies con posible potencial dendroclimatológico usando la metodología de muestreo para bosques tropicales y desarrollo de cronologías de Stahle (1999)

Se empezó el trabajo efectuando una caracterización de las especies forestales presentes en los alrededores de las cuevas basado en la metodología sugerida de 0,1 ha de (Cámara Artigas & Díaz del Olmo, 2013; Cerón, 2015). En las proximidades de las cuevas se delimitó por medio del método cuantitativo para análisis de vegetación transectos en “zig – zag”, que consistieron en extender una soga de 50 m de largo y medir 2,5 m a cada lado, generando un área total por transecto de 250 m². Cada uno se replicó en línea hasta completar cuatro transectos (1000 m² = 0,1 ha), buscando abrir trochas (senderos) y procurando siempre realizarlo a través de árboles con tronco grueso.

Se realizaron ocho transectos en total (4 en los alrededores de cada cueva) como se muestra en la Figura 10, evitando zonas con pendientes y con visibles rastros de tránsito de personas ya que estos son indicios de posible tala de especies forestales, disminuyendo así las probabilidades de encontrar árboles longevos.

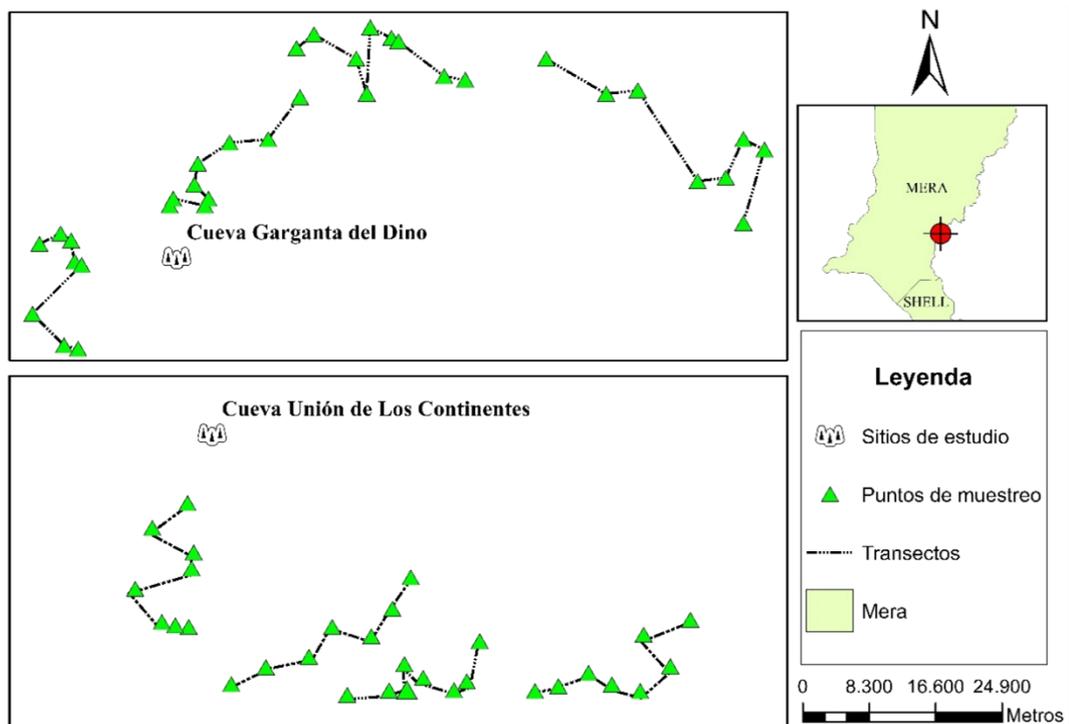


Figura 10. Delimitación de transectos para la toma de núcleos de madera en los alrededores de las cuevas.

Fuente: Carlosama L. & Herrera M., (2019).

4.2.1. Clima local

El área de investigación está ubicada en un bosque húmedo de la Amazonía ecuatoriana donde las precipitaciones están presentes durante todo el año. En la Figura 11 se presentan la pluviosidad y temperaturas de las dos estaciones meteorológicas más cercanas al sitio de estudio: M0008 ubicada en Puyo perteneciente al Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) y DAC ubicada en el Aeropuerto “Río Amazonas” de Shell monitoreada por la Dirección de Aviación Civil (DAC).

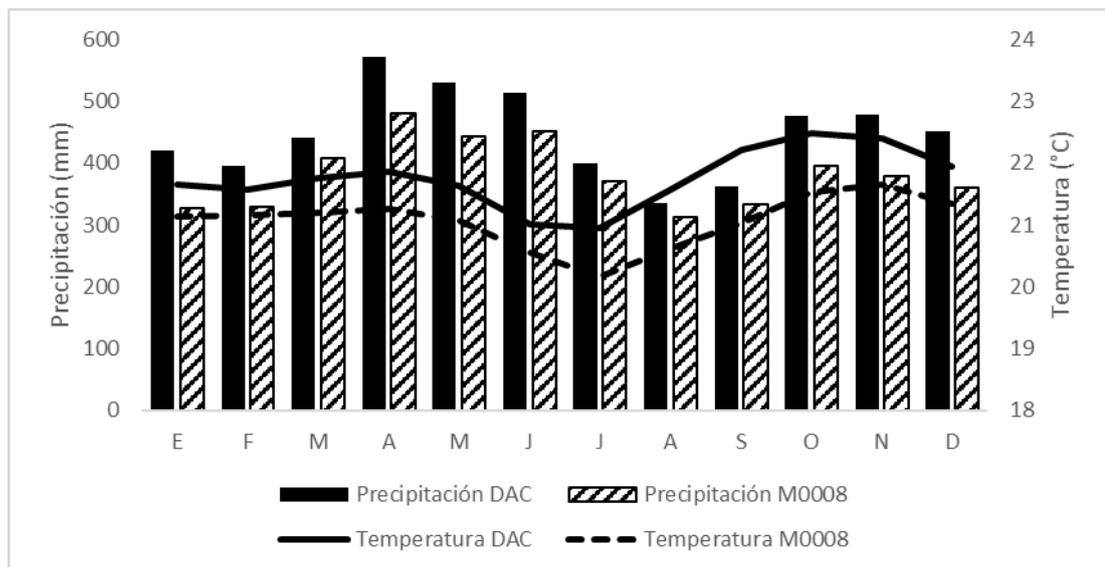


Figura 11. Gráfico de precipitación y temperatura en el bosque húmedo, tomados de las estaciones meteorológicas de DAC-Shell (1981 - 2018) y M0008-Puyo (1965 - 2018).

Fuente: Carlosama L. & Herrera M., (2019).

La precipitación media anual local es de 5372 mm con un régimen bimodal, generalmente presente en valles protegidos (Campozano et al., 2016), con dos períodos de lluvias altas durante abril-junio y octubre-diciembre y dos períodos de lluvias bajas durante enero-marzo y julio-septiembre modulados por la evolución de la Zona de Convergencia Intertropical (ITCZ, por sus siglas en inglés) y el aire húmedo de la Cuenca Amazónica (García et al., 1998; Espinoza et al., 2009;

Campozano et al., 2018). En lo referente a temperatura, esta muestra poca variabilidad en el transcurso del año con una media anual de 21.7 °C.

4.3. Métodos dendrocronológicos

4.3.1. Toma de muestras de núcleos de madera

Se recolectaron muestras en los alrededores de las cuevas “Unión de los Continentes” y “Garganta del Dino”. Durante el muestreo se procuró tomar muestras de árboles que presenten fuste con diámetro amplio y grueso. Las muestras fueron recolectadas con un barreno Pressler marca *Haglöf 3-Thread .200* medida 20” L x 0.200” (500 mm de largo por 5,15 mm de diámetro) (Figura 12) colocando el barreno a una altura a nivel del pecho de 1.3 m, procurando formar un ángulo recto (Figura 13A).

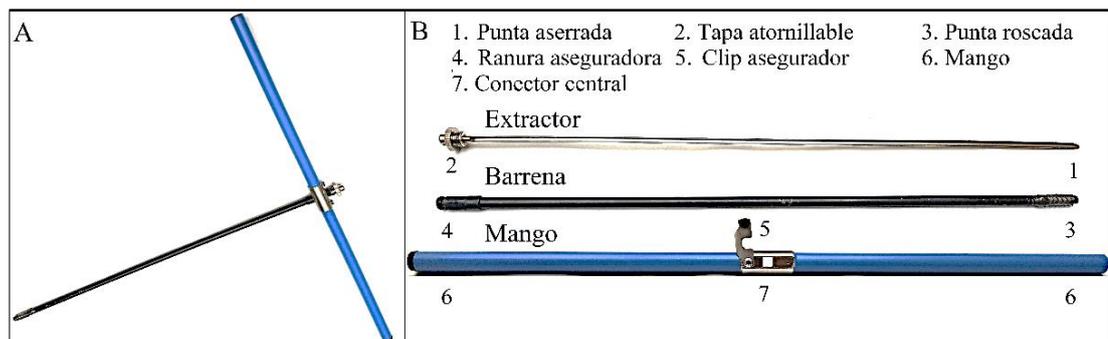


Figura 12. A) Barreno Pressler y B) Partes

Fuente: Carlosama L. & Herrera M., (2019).

Se tomaron como mínimo dos muestras por cada árbol; la primera en sentido norte a sur y la segunda de este a oeste (Figura 13B). Una vez traspasado el árbol se tapó el final del agujero para que la corteza no vaya a salirse y con ayuda del extractor se obtuvo el núcleo del árbol e inmediatamente se guardó la muestra en sorbetes perforados previamente para facilitar su transporte (Figura 13C-E). Para retirar el barreno se giró en contra de las manecillas del reloj (Phipps, 1985; Gutierrez-Garcia & Ricker, 2014; Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2015b;

Pucha-Cofrep, 2019). Una de las partes más difíciles en la toma de muestras es la introducción de la punta roscada en la corteza dura y firme de ciertos árboles, ej.: árboles del género *Inga*.

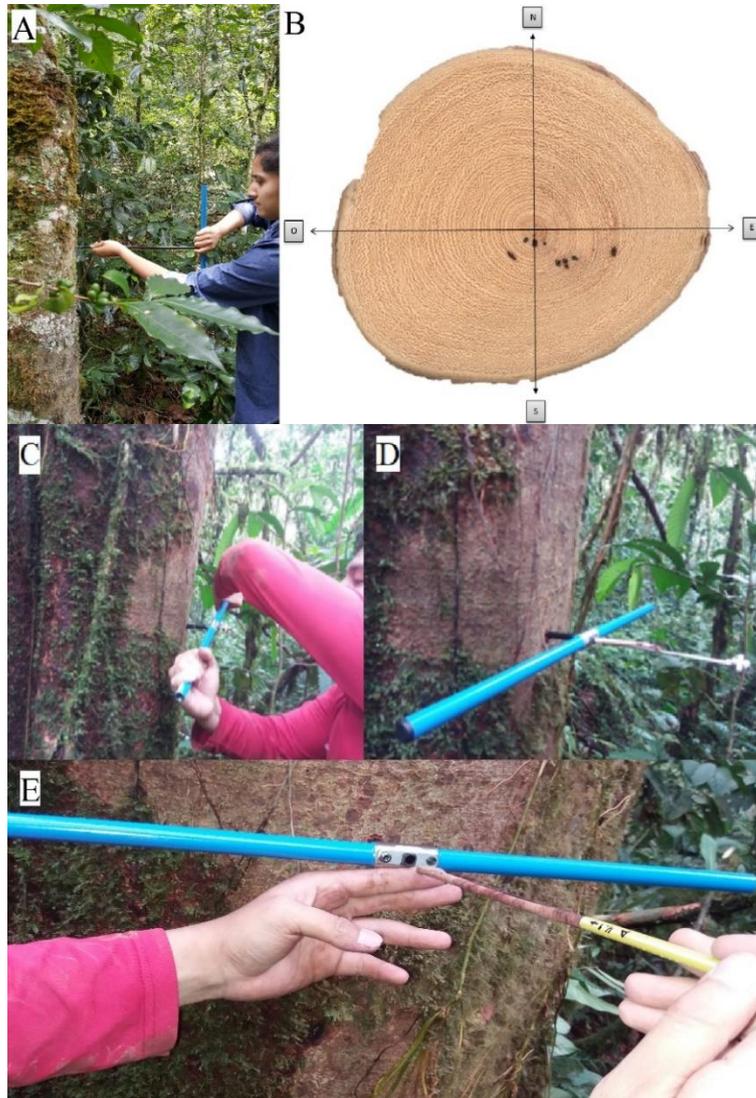


Figura 13. Métodos para la toma de núcleos de madera: A) posición correcta del barreno B) direcciones de la toma de muestras con el barreno en un disco de madera de árbol *Inga* sp. C) inserción del barreno en el árbol, D) introducción de la barra extractora y E) almacenamiento de la muestra en un sorbete previamente perforado.

El cuidado de los árboles después de la extracción del núcleo de madera con el barreno es un tema que aún se encuentra en discusión sobre si es una técnica invasiva para el árbol (Grissino-Mayer, 2003; Wunder et al., 2013). Por consiguiente, como medida de cautela se utilizó musgo creciente en el mismo fuste del árbol para cubrir el agujero de la perforación y se selló con pequeñas ramas para

prevenir el ingreso de insectos o microorganismos que coadyuven a la putrefacción de los árboles por la alta tasa de humedad existente en la zona.

Existen investigaciones mucho más rigurosas que utilizan un método más destructivo, el cual se basa en la obtención de secciones transversales a manera de discos provenientes de los fustes de árboles vivos (en otras palabras talar el árbol), debido a que provee al investigador un mayor campo de observación de los anillos de crecimiento y facilita de gran manera la identificación tanto de anillos falsos como faltantes (Pereyra et al., 2014).

4.3.2. Identificación de especies forestales

Para cada árbol con ayuda de una podadora aérea (tubos extensibles con gancho cortador) que logra una altura de 12 m aproximadamente, se tomaron muestras botánicas de ramas con flores y frutos para la identificación taxonómica (Figura 14A). Posteriormente las muestras fueron almacenadas y prensadas en papel periódico y tablas triplex (tamaño A3) siguiendo la metodología descrita por Cerón (2005) (Figura 14B). A continuación, las muestras se secaron a 60°C durante 48 horas en una cámara de calor y de secado con convección forzada marca BINDER modelo FD 23 – 20 L de los laboratorios de la carrera de Ingeniería Ambiental de la Universidad Politécnica Salesiana (Figura 14C), esto con el fin de evitar que las muestras se degraden por acción de microorganismos descomponedores (hongos o bacterias).

Finalmente, con las muestras secas se realizó la identificación en los herbarios Reinaldo Espinoza de la Universidad Nacional de Loja con el Ing. Jaime Peña, Alfredo Paredes (QAP) de la Universidad Central del Ecuador con ayuda del Biól. Carlos Cerón quien tiene una gran experiencia sobre especies forestales en la

Amazonía y en el Herbario Nacional del Ecuador (QCNE) con el Ing. Walter Palacios experto en la familia Meliaceae (Figura 14D).

Solo en el caso de árboles con altura mayor a 12 m la colecta botánica no se realizó. Por consiguiente, se tomaron muestras de cortezas o resinas para ser posteriormente identificadas.



Figura 14. Métodos para identificar muestras botánicas: A) toma de muestra botánica con podadora aérea (en la foto: Biól. Marco Cerna), B) prensado, C) secado e D) identificación taxonómica (en la foto: Ing. Jaime Peña).

La información concerniente a las características visibles de cada árbol fue registrada en un libro de campo para su control y posterior tabulación (Figura 15).

LIBRO DE CAMPO			
Fecha:	13 de marzo de 2019	Hora:	11:40
Lugar:	Cueva Garganta del Dino		
Transecto:	7		
Código (muestra):	A7.6	Código (contra-muestra):	AC7.6
Familia:	Moraceae	Código de colección biológica:	HERRERA 25
Nombre científico:	Ficus	Determinador:	Biol. Marco Cerna
Nombre común:	Cauchillo		
Descripción:	Madera suave y blanca, presencia de latex (resina blanca)		
Altura (m):	22	PAP (m):	1,45
Longitud:	829535 E		
Latitud:	9842389 N	DAP (m):	0,461549335
Altitud (m.s.n.m):	1266		
Tipo de muestra:	Barreno y muestra para analizar ADN		
Observaciones:	Toma de muestra a los 3,20 metros y toma de contramuestra 10 cm más arriba, árbol ubicado al filo de la pendiente.		

Figura 15. Ejemplo de información recolectada en el libro de campo para un árbol del género Ficus.

Una vez identificadas las muestras, se calcularon los índices de Simpson y de Shannon en el programa estadístico PAST 3.24 (Hammer, Harper, & Ryan, 2001). Estos índices indican la probabilidad de saber si dos individuos colectados al azar pertenecen a la misma especie o a especies diferentes.

4.3.3. Tratamiento de muestras

4.3.3.1. Pegado y lijado

Una vez tomadas todas las muestras se procedió a montarlas en soportes de madera contruidos de acuerdo a las dimensiones de la barra extractora del barreno (50 x 2,5 x 1,5 cm y con un canal central de 0,3cm de profundidad) previamente engomados. Para el pegado del núcleo de madera primero se observó en los extremos de la muestra, que las fibras estén en dirección vertical, es decir perpendicular a la base del soporte como se observa en la Figura 16 (Pucha-Cofrep, 2019).

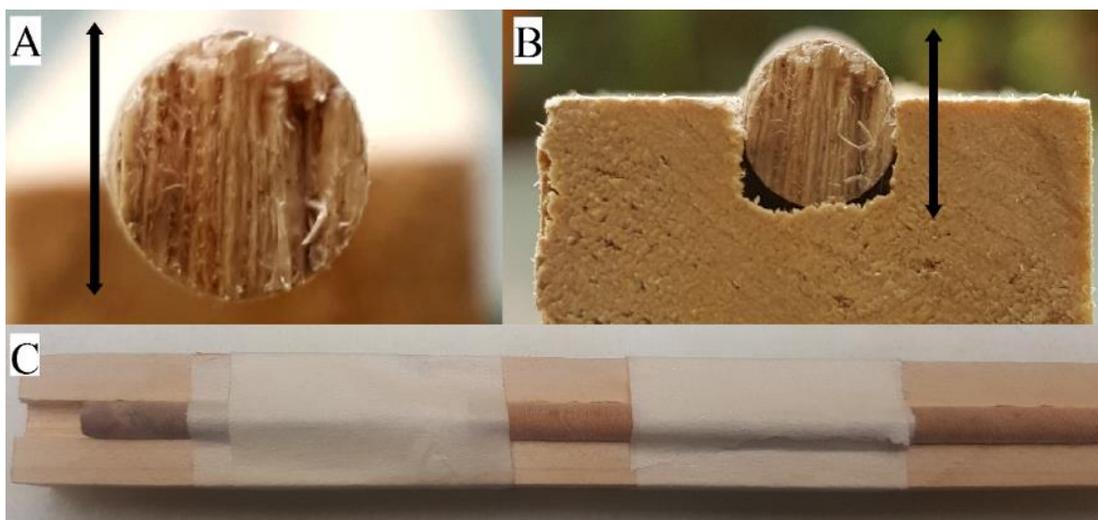


Figura 16. Tratamiento de las muestras: A) fibras verticales de la muestra, B) pegado de la muestra en el soporte de madera y C) Fijación de la muestra con ayuda de cinta adhesiva.

En el lijado, primero se inició con las lijas más abrasivas que son los números 150 - 240 de acuerdo a la dureza que presente la madera y posteriormente se aumentó de número desde la 360 hasta llegar a la 4000, de esta manera se obtuvo un lijado y pulido óptimo para poder ser medidas (Phipps, 1985; Pucha-Cofrep, 2019).

4.3.4. Medición y estandarización de ancho de anillos

En la Figura 17 se muestran los métodos utilizados en la presente investigación para la medición de anillos de crecimiento que fueron complementados mediante las técnicas dendrocronológicas tradicionales descritas en el manual de Phipps (1985).

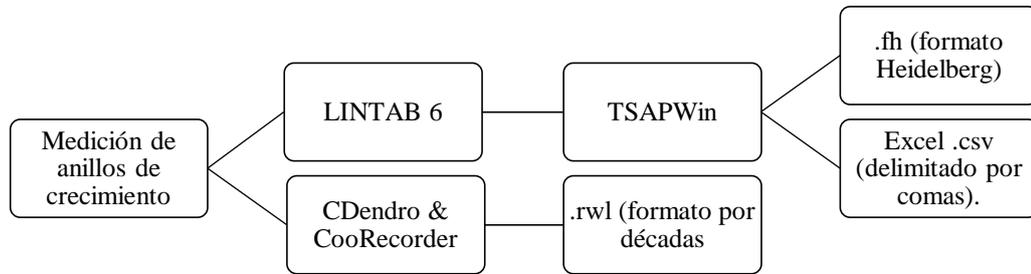


Figura 17. Métodos para la medición y obtención de datos de anillos de crecimiento.

Fuente: Carlosama L. & Herrera M., (2019).

4.3.4.1. Sistema de medición LINTAB

Para la medición de los anillos se utilizó el equipo LINTAB 6 marca RINNTECH del Laboratorio de Dendrocronología de la Carrera de Ingeniería Forestal de la Universidad Nacional de Loja.

Como se muestra en la Figura 18 se identificaron y señalaron los anillos de cada núcleo de madera, para ello es importante reconocer el patrón de formación del anillo de acuerdo a cada especie encontrada (Pucha-Cofrep, 2019). Para señalar los anillos se estableció el centro o la médula, es decir la parte media de la muestra y posterior a ello se ubicó el primer anillo y se marcó con “0”, luego se siguió señalando los siguientes anillos, cada 10 anillos contados se colocó el número correspondiente o a su vez se realizó una línea un poco más pronunciada.

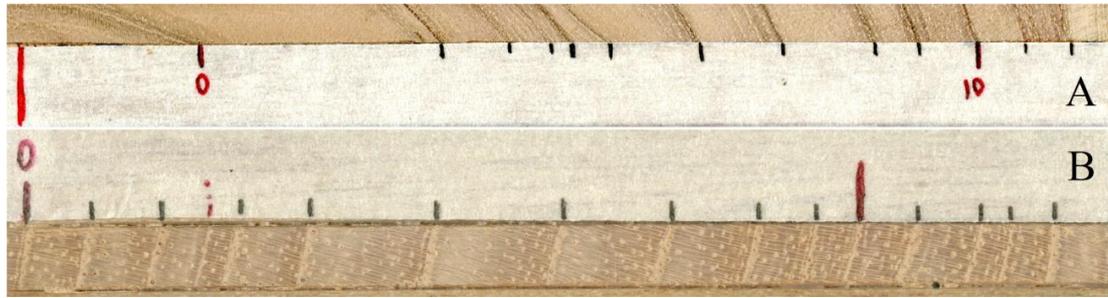


Figura 18. Identificación de anillos de crecimiento: A) identificación de la médula (línea roja prolongada), marcación del anillo inicial con un cero “0”, marcación de anillos de crecimiento anuales (líneas negras cortas) e identificación por décadas y B) identificación del anillo inicial de la misma manera, marcación de anillos de crecimiento anual (líneas negras cortas) e identificación por décadas (líneas rojas prolongadas).

Una vez marcados todos los anillos en la muestra se procedió con la medición, primero llenando los campos de información en TSAPWin donde solicita el número o código de la muestra, sitio de estudio, nombre del proyecto, año de muestreo y el nombre de la persona que realizó la medición, tal como se muestra en la Figura 19.

Header	Location	Dates	Tree	Timber	Math	Images	Comments	Bibliography	Archeology	Geography	Forestry	User defined
Keycode	Project	Location	Species	Length	DateBegin	DateEnd						
A5.4D	Salesiana	Los Continentes		0	2019	2019						
Keycode:	A5.4D	Location:	Los Continentes	Key number:	A5.4D							
Project:	Salesiana											
Species code:	Sp. name:											
Tree no.	Length:	0	Data type:	Ringwidth	Dated:	Dated						
Radius no.	Pith:		Unit:	1/100 mm	Date begin:	2019						
Core no.	Sapwood:	rings	Series type:	Single curve	Date end:	2019						
Stem disk no.	Waldkante:		Series starts with:	Ringwidth	Series ends with:							
Comment:	Medido por Lisseth											

Figura 19. Cuadro de configuración de TSAPWin.

La codificación utilizada fue A o AC para indicar si era muestra o contra-muestra respectivamente seguido de un número del 1 al 8 que indica el número de transecto, luego se colocó un punto y se acompañó de otro número que indica el número de árbol, finalmente se colocó otra letra más ya sea D o Iz que señala la

dirección en la que se realizó la medición desde el centro hacia la derecha o izquierda según sea el caso.

Posteriormente se procedió a medir con una precisión de 0.001 mm., empezando por el anillo “0” y se continuó midiendo cada anillo marcado de acuerdo a la dirección de los radios. Finalizada la medición de cada núcleo de madera, en la pantalla del computador se obtuvieron series en el tiempo para el ancho de los anillos de crecimiento como se presenta en la Figura 20.

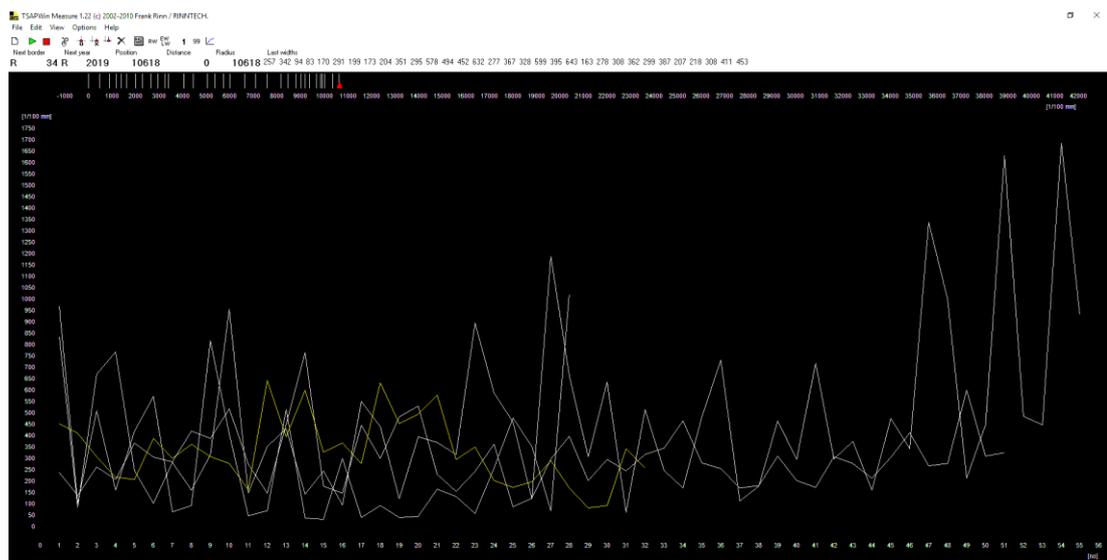


Figura 20. Registro del crecimiento de anillos medidos en LINTAB 6.

Los datos medidos del ancho de los anillos de cada uno de los núcleos de madera fueron almacenados en formato fh Heidelberg.

Finalizada la observación y análisis de cada uno de los núcleos de madera, siguiendo la metodología de Worbes (2002); se clasificó de acuerdo a la facilidad que presenta cada muestra para identificar los anillos de crecimiento asignándoles una simbología representada por + y -. Al hablar de facilidad de identificación de anillos, nos referimos específicamente, si se pudieron distinguir ya sea a simple vista como en el estereoscopio a través del análisis dendrocronológico de algunas

características que presenta la estructura de la madera como por ejemplo el cambio de color entre albura y duramen, la presencia de poros y la dirección de los radios.

4.3.4.2. Sistema de medición CDendro & CooRecorder

Cada muestra fue digitalizada en un scanner EPSON marca EXPRESSION 10000 XL tamaño A3 de los laboratorios de Dendrocronología de la Universidad Nacional de Loja, en modo profesional. La resolución utilizada para la mayoría de las muestras fue de 2400 dpi excepto en los casos en los que las muestras superaron los 40 cm de largo donde se utilizaron resoluciones de 1200 dpi.

El uso del software de análisis de imágenes CDendro y CooRecorder Version 9.3.1 (Figura 21).

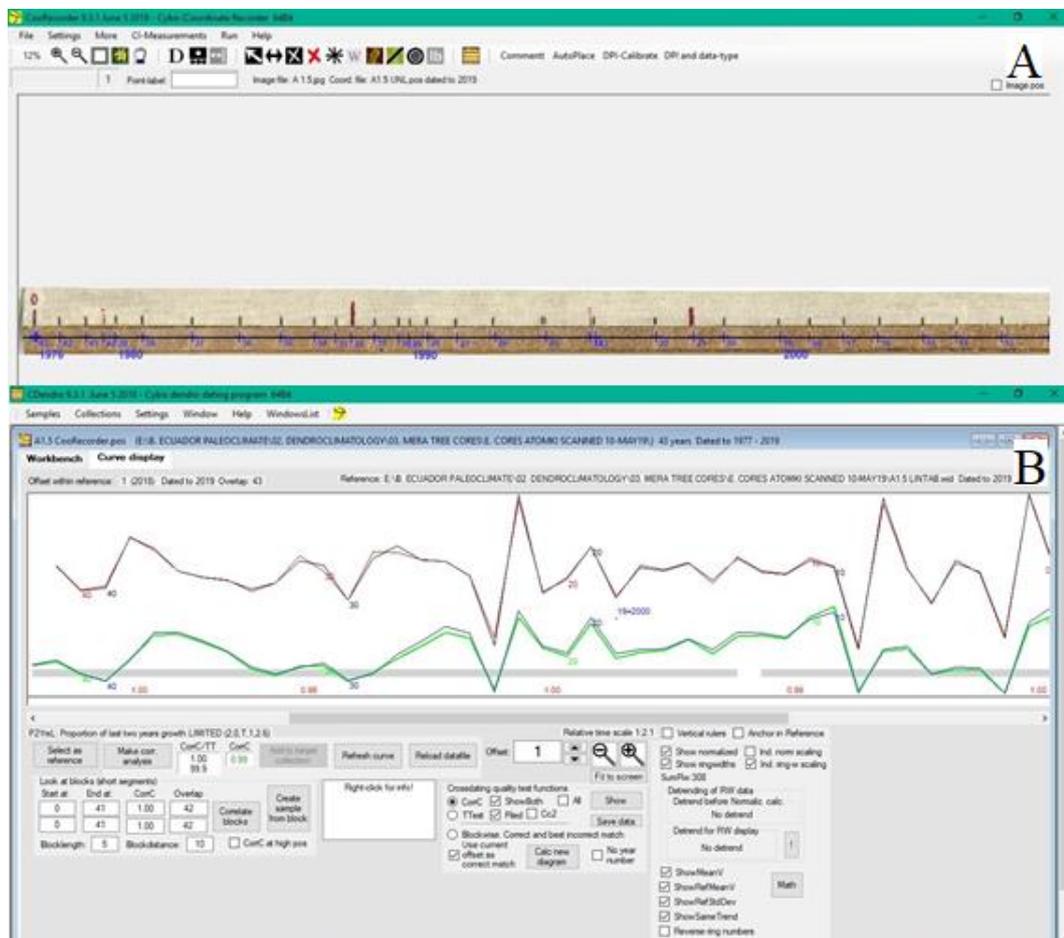


Figura 21. Interfaz de usuario en CDendro-CooRecorder: A) Medición de anillos en *Cedrela odorata* y B) Correlación con el ancho de anillos obtenidos en LINTAB 6 (línea verde).

Permite además de medir el grosor de anillos de forma indirecta, el manipular, sincronizar y elaborar colecciones agrupadas por especies de árboles en formato *rwl*, para su posterior análisis estadístico y calibración climática. Las imágenes escaneadas usadas tuvieron una resolución entre 1200-2400 dpi, disminuyendo así el error en las mediciones (Cybis Elektronik, 2010).

4.3.5. Sincronización

Terminadas las mediciones de todas las muestras obtenidas se realizó una sincronización de las mismas, el propósito de la sincronización es cuadrar la tendencia de crecimiento e ir eliminando los anillos falsos o a su vez aumentar anillos que no se hayan identificado y no están medidos.

La medición de los anillos que no estuvieron señalados se realizó con ayuda del estereoscopio y una regla, el valor obtenido se multiplicó por cien para poder añadirlo en el software. Todas las modificaciones se fueron registrando en una libreta de apuntes y en un cuadro de comentarios que el programa permite abrir para cada anillo medido.

Al terminar la sincronización los datos modificados se guardaron en formato *.flh*, y como libros de Excel en formato separado por comas *.csv* para poder continuar con los análisis restantes.

4.4. Monitoreo en campo del clima

En el presente estudio se monitorearon los parámetros climáticos de temperaturas y precipitaciones del área de investigación. Para las temperaturas, se utilizaron sensores marca *iButton*, los cuales registraron los datos en intervalos de 3600 segundos (1 hora), ubicando cada sensor en los alrededores de los transectos a 2 m por encima del nivel del suelo, protegidos mediante un escudo de radiación

pasivo (radiation shield) de la humedad, radiación solar y otras fuentes de calor irradiado reflejado que puedan alterar las mediciones (Figura 22A).

Para la precipitación se utilizó un colector de agua lluvia de diámetro de 4” (10,16 cm) el cual registró los datos mensuales de precipitación. Para su ubicación se siguió la guía de referencia IAEA/GNIP (2014) colocándose a 1.5 m sobre el suelo llenado con aceite de parafina para evitar evaporación y lejos de fuentes naturales que puedan obstruir su captación (Figura 22B).



Figura 22. Monitoreo de variables climáticas en el área de investigación A) ubicación del sensor en el transecto Cueva Garganta del Dino y B) colector de agua lluvia con aceite de parafina.

Ambos instrumentos registraron datos desde el 02 de febrero hasta el 09 de junio de 2019. Una vez registrados los datos del sensor de Temperatura, se descargaron utilizando el software WeeButtonRF. A su vez el agua lluvia recolectada mensual fue separada del aceite de parafina utilizando pipetas automáticas y medidas en embudos de separación (100 – 500 ml) en el laboratorio de Química de la Universidad Politécnica Salesiana.

A continuación, previa solicitud al Instituto Nacional de Meteorología e Hidrológica (INAMHI) y a la Dirección de Aviación Civil (DAC), se obtuvieron los registros históricos de precipitación, temperaturas (máxima, mínima y media),

humedad relativa y evaporación, mensual de 9 estaciones meteorológicas cercanas al área de investigación.

También se utilizaron los datos climáticos interpolados de temperaturas medias y precipitación para la zona de estudio del conjunto de datos de la Unidad de Investigación Climática (CRU, por sus siglas en inglés) TS Versión 4.03 Interfaz Google Earth (Harris, Jones, Osborn, & Lister, 2014). En la Tabla 2 se describe todos los registros históricos climáticos.

Tabla 2

Estaciones meteorológicas, datos disponibles y porcentaje de utilidad de los datos

Datos Meteorológicos							
Código	Nombre	Latitud	Longitud	Altitud (m.s.n.m.)	Datos disponibles	% datos válidos	Periodo de Tiempo
DAC	Aeropuerto "RÍO AMAZONAS" Shell	01° 29.8' S	78° 02.7' W	1056	Precipitación	100	1981-2018
					T media	100	1981-2018
					T máxima	100	1981-2018
					T mínima	100	1981-2018
					Nubosidad	100	1981-2018
					Humedad	100	1981-2018
M0008	PUYO	01° 30.3' S	77° 57.4' W	956	Precipitación	99,38	1965-2018
					T media	99,54	1965-2018
					T mínima	96,6	1965-2018
					T máxima	96,45	1965-2018
					Evaporación	90,28	1965-2018
					Humedad	99,54	1965-2018
M0041	SANGAY (P. SANTA ANA)	01° 41.5' S	77° 57.5' W	880	Precipitación	89,39	2004-2014
					T media	94,97	1967-2014
					T mínima	89,93	1967-2014
					T máxima	90,28	1967-2014
M0378	RÍO VERDE	01° 24' S	78° 17.7' W	1529	Precipitación	88,99	1951-2016
M1040	MACAS SAN ISIDRO – DOMONO	02° 13.7' S	78° 7.5' W	1110	Precipitación	83,33	2008-2015
					T media	92,86	2009-2015
					T mínima	84,38	2008-2015
					T máxima	75	2008-2015
M0501	MENDEZ	02° 42.1' S	78° 18.2' W	665	Precipitación	86,86	1935-2015
M0189	GUALAQUIZA	03° 23.9' S	78° 34.6' W	750	Precipitación	97,44	1977-2015
					T media	98,68	1978-2015
					T mínima	96,32	1982-2015
					T máxima	98,04	1982-2015

M0497	LOGROÑO	02° 37.3' S	78° 13.3' W	653	Precipitación	98,46	1977-2014
M1265	SAN JOSÉ DE MORONA	02° 52.5' S	77° 39.9' W	200	Precipitación	41,67	2014-2015
					T media	33,33	2014-2015
					T mínima	37,5	2014-2015
					T máxima	37,5	2014-2015
CRU1	-	01° 25' S	78° 25' W	-	Precipitación	100	1901-2018
					T media	100	1901-2018
CRU2	-	01° 25' S	77° 75' W	-	Precipitación	100	1901-2018
					T media	100	1901-2018
CRU3	-	01° 75' S	78° 25' W	-	Precipitación	100	1901-2018
					T media	100	1901-2018
CRU4	-	01° 75' S	77° 75' W	-	Precipitación	100	1901-2018
					T media	100	1901-2018

Nota. La estación meteorológica **M1265** se descarta por contar con un porcentaje de datos válidos menores al 50% además de que sólo cuenta con un rango de tiempo de un año.

Fuente: Carlosama L. & Herrera M., (2019).

Debido a la existencia de datos incompletos en las estaciones meteorológicas del INAMHI se procedió a realizar una interpolación con función *spline* para ser completados como se muestra en la Figura 23.

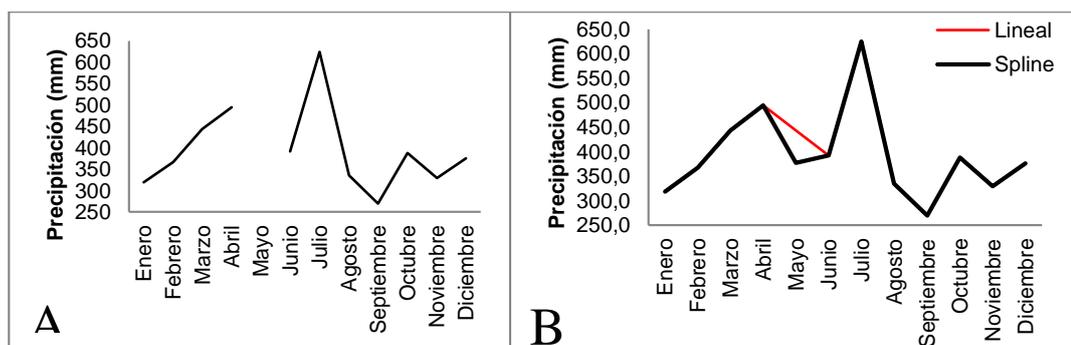


Figura 23. Interpolación de datos de precipitación faltantes de la estación meteorológica M0008-Puyo para el año 2002 A) Datos incompletos y B) Datos completados con función lineal vs. spline.

Finalmente, los registros históricos se correlacionaron con los parámetros monitoreados en el área de investigación.

Las medias mensuales de precipitación y temperatura de las estaciones correlacionadas con las series de datos de clima local monitoreado (Tabla 3) mostrando así que las estaciones con mayor correlación son: DAC-Shell, M0008-Puyo y CRU 2 (Tabla 4), mismas que cumplen con una estacionalidad bimodal tal

como se visualiza en la Figura 24 y se hará referencia solo a estas en adelante para el desarrollo de las calibraciones de señales climáticas con los anillos de los árboles.

Tabla 3

Datos registrados de temperatura y precipitación (promedios mensuales) en los sitios de estudio

Fecha	Sensores (°C)	Colector (mm)
Febrero 2019	19,3	-
Marzo 2019	19,4	511,14
Abril 2019	19,7	533,22
Mayo 2019	19,3	533,35

Fuente: Carlosama L. & Herrera M., (2019)

Las estaciones: M0041-Sangay, M1040-Macas, M0497-Logroño, M0501-Mendez y M0189-Gualaquiza tienen una estacionalidad similar (Figura 24). Sin embargo, estas fueron descartadas debido a su bajo coeficiente de correlación con las estaciones M0008-Puyo, DAC-Shell y CRU así como por su lejanía.

Tabla 4

Parámetros de correlación entre las estaciones meteorológicas y los registros climáticos obtenidos en el sitio de estudio

#	Código	Coefficiente de correlación r con precipitación	Coefficiente de correlación r con temperatura	Distancia (km)	Registros disponibles (Período de tiempo/años)	Precipitación media anual (mm)	Temperatura media anual (°C)
1	DAC	1.00	1.00	0	1981 - 2018 / 37	5372	21.9
2	M0008	0.92	0.87	10	1965 - 2018 / 53	4589	21.3
3	M0041	0.58	0.88	24	1967 - 2014 / 47	3551	22.0
4	M0378	0.06	-	30	1951 - 2016 / 65	3018	-
5	M1040	0.61	0.86	82	2008 - 2015 / 7	3175	20.6
6	M0497	0.57	-	125	1977 - 2014 / 37	1904	-
7	M0501	0.62	-	137	1935 - 2015 / 80	2185	-
8	M0189	0.65	0.66	220	1977 - 2015 / 38	1888	22.8
9	CRU1*	0.77	0.72	-	1965 - 2018 / 53	1553	15.1
10	CRU2*	0.80	0.80	-	1965 - 2018 / 53	4257	23.4
11	CRU3*	0.78	0.64	-	1965 - 2018 / 53	1555	14.5
12	CRU4*	0.70	0.72	-	1965 - 2018 / 53	4067	23.7

*El período de datos de CRU 1 – 4 se utilizaron de 1965 a 2018 debido a que los datos interpolados de años anteriores en el modelo no registran una variabilidad.

Fuente: Carlosama L. & Herrera M., (2019).

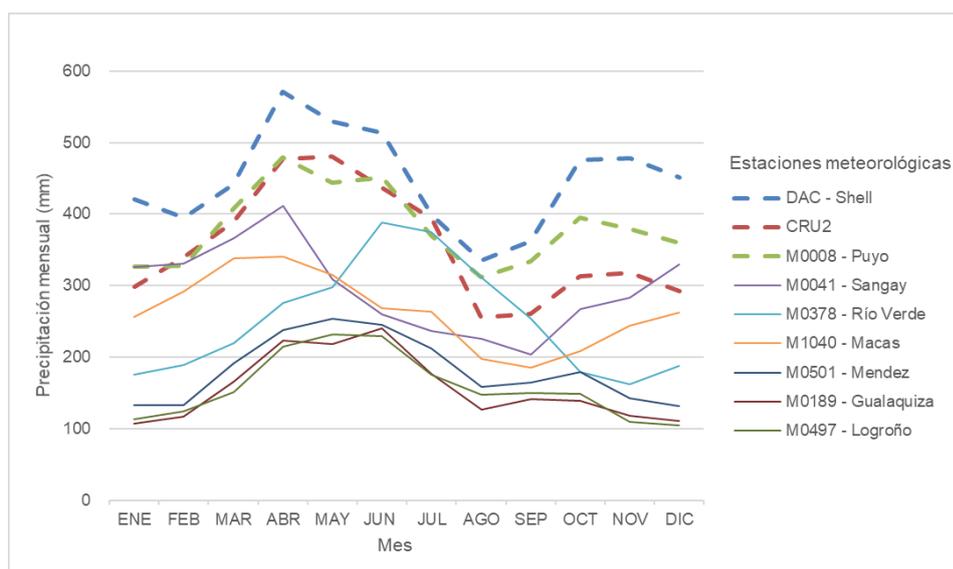


Figura 24. Estacionalidad de la precipitación media mensual de las estaciones meteorológicas.

4.4.1. Datos de temperatura superficial del mar

Se descargaron los datos de ENSO 3.4 y 1 + 2 de la base de datos de la página oficial de la (National Oceanic and Atmospheric Administration, 2019a) que cuenta con un registro desde el año de 1870 hasta la actualidad.

4.5. Relaciones entre el clima local y los anchos de anillos

Para la estadística de la serie de anchos de anillos se utilizaron paquetes para análisis dendroclimáticos de software libre de la biblioteca de programas para dendrocronología en R (dplR) y calibración dendroclimática (bootRes) dentro del entorno de programación estadística R 3.6.0 (R Core Team, 2013).

En el paquete dplR se determinó la tendencia de cada serie por medio del método “destandardización interactiva” con la función *Detrend*, ajustándose a un *spline suavizado de Friedman* (regresión lineal multi variable) (Friedman, 1984), con una frecuencia del 50% en un período de 24 años y se desarrolló las *cronologías* de los valores medios de los anchos de anillo de cada árbol muestreado con la función *Chron*, mediante una media robusta de Tukey para minimizar los valores atípicos (Bunn, 2008, 2010).

Para la evaluación del efecto del clima en el ancho de anillos (calibración climática) se utilizó en el paquete *bootRes* las funciones: *dendroclim* y *mdcc*, para analizar la función de respuesta y correlación siendo una secuencia de coeficientes calculados entre la cronología previamente realizada con las variables climáticas mensuales (Zang & Biondi, 2013) con los datos de temperatura (máx., med., mín.), precipitación y humedad relativa de las estaciones meteorológicas DAC-Shell, M0008-Puyo y CRU con coeficientes de significancia $p < 0.01$, $p < 0.05$ y $p < 0.1$. Solo se graficaron funciones de respuesta (Moving Response Function) mediante la rutina *mdcc* cuando se mostraron coeficientes de respuesta significativos.

Finalmente, el cambio de los dominios de frecuencia a lo largo de las cronologías de índice de ancho de anillos fue desarrollado por un análisis de Morlet-Wavelet (Zhang, Moore, & Grinsted, 2014) a través de las funciones del *dplR*: *Morlet* y *Wavelet.plot*.

Mayor detalle se presenta en el Anexo 1, mismo que despliega las rutinas en R efectuadas para el análisis dendroclimatológico.

4.6. Consideraciones éticas

Dentro del presente trabajo se realizaron los trámites respectivos para los permisos de investigación con la entidad ambiental competente de la Provincia de Pastaza, tanto para la toma de muestras de barreno como muestras botánicas, con el permiso del Ministerio del Ambiente del Ecuador (MAE), código **AC-FLO-DPAP/MAE-2019-003** (Anexo 2). Al finalizar toda la colección de muestras se tramitó la guía de movilización de especímenes de flora y fauna silvestre desde la zona de estudio hasta los laboratorios de la Universidad Politécnica Salesiana, **Nro. DPAP-UPN-VC-2019-019** (Anexo 3).

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se presentan los resultados obtenidos del análisis de núcleos de madera de especies tropicales en Mera, Pastaza.

5.1. Selección e identificación de potenciales especies forestales con formación de anillos

En total se recolectaron muestras de 64 árboles, 30 en los alrededores de la cueva “Unión de los Continentes” y 34 en los alrededores de la cueva “Garganta del Dino” obteniendo un total de 128 muestras de núcleos de madera.

Se lograron identificar 50 muestras que corresponden a 16 familias y 21 especies, las 14 muestras restantes se denominaron morfo especies como lo indica Pérez (2014) y de acuerdo a las características taxonómicas (hojas, corteza y núcleos de madera) que presenta cada una, se agruparon en diferentes tipos de morfo especie (ej.: Morfo especie 1, morfo especie 2, etc.) (Figura 25B).

Para la estadística botánica se determinaron tres índices (Tabla 5) dominancia y diversidad de Simpson y diversidad de Shannon. En nuestra área de investigación se obtuvo una dominancia sumamente baja de especies, pero una diversidad muy alta.

Tabla 5

Índices analizados para cada sitio de investigación

Índices	Cueva Unión de los Continentes	Cueva Garganta del Dino
Individuos	30	34
Dominancia de Simpson (D)	0,09	0,08
Simpson (1-D)	0,91	0,92
Shannon (H)	2,59	2,87

Fuente: Carlosama L. & Herrera M., (2019).

5.1.1. Especies forestales con potencial dendrocronológico

Se encontró un total de 16 familias, de las cuales las familias con mayor número de árboles fueron Fabaceae con 20 individuos (10 especies, incluidas las no identificadas), Meliaceae con 8 individuos (pertenecientes a 3 especies) y Burseraceae con 6 individuos (2 especies) (Figura 25A). De las 21 especies encontradas (incluidas morfo especies), las especies con mayor número de individuos son: *Inga* sp., *Protium* sp., y *Cedrela odorata* con 9, 5 y 4 árboles respectivamente.

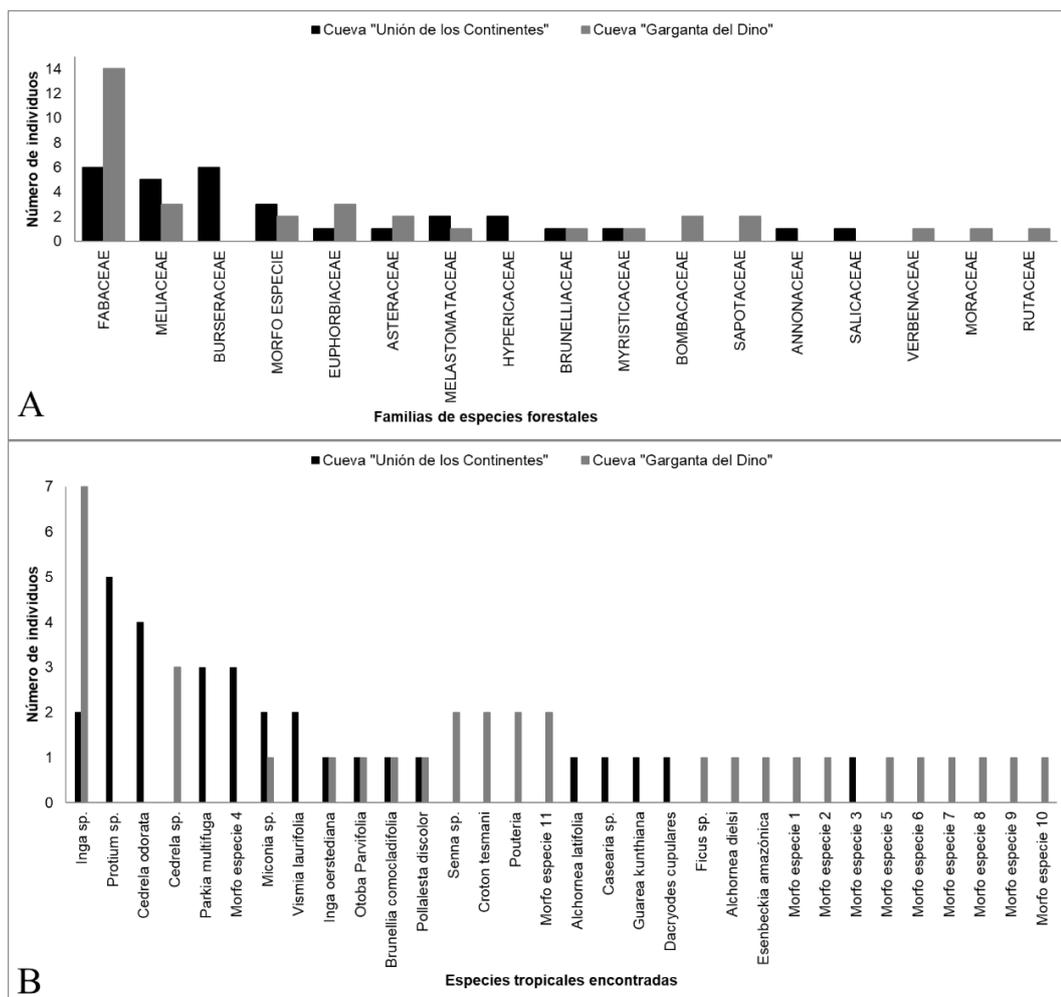


Figura 25. Especies forestales encontradas en los sitios de estudio clasificadas taxonómicamente por A) Familias y B) Especies

En la Tabla 6 se detalla la formación de anillos en cada una de las especies encontradas. Del total de las 16 familias encontradas se determinaron 9 especies que

forman anillos de crecimiento visibles, estas especies pertenecen a las familias: Bombacaceae, Burseraceae, Brunelliaceae, Fabaceae, Melastomataceae, Meliaceae y Rutaceae, de las cuales cuatro muestras de *Cedrela odorata* son las que registra mayor porcentaje de formación de anillos visibles (++) junto con tres muestras de *Cedrela* sp., y dos muestras que están consideradas dentro del grupo morfo especies.

Tabla 6

Análisis de la formación de anillos en las especies encontradas, clasificadas por familia, género y especie

N.	Familia	Género	Especie	Código	Formación de anillos ¹		
1	Annonaceae	Morfo especie	Morfo especie 3	A5.7	+ -		
2	Asteraceae	Pollalesta	<i>Pollalesta discolor</i>	A4.3	--		
				A8.2	--		
3	Bombacaceae	Morfo especie	Morfo especie 10	A7.9	--		
				A8.3	+ -		
4	Brunelliaceae	Morfo especie	Morfo especie 11	A8.5	++		
				A5.8	+ -		
5	Burseraceae	Brunellia	<i>Brunellia comocladifolia</i>	A7.4	++		
				A1.4	--		
6	Euphorbiaceae	Dacryodes	<i>Dacryodes cupulares</i>	A4.2	+ -		
				Protium	<i>Protium</i> sp.	A5.2	+ -
						A5.3	+ -
		A5.5	+ -				
		Alchornea	<i>Alchornea dielsi</i>	A5.6	+ -		
				A3.7	+ -		
A4.4	--						
Croton	<i>Alchornea latifolia</i>	A2.5	--				
		<i>Croton tesmani</i>	A2.7	--			
			A7.1	++			
7	Fabaceae	Morfo especie	Morfo especie 5	A7.3	--		
				Morfo especie 7	A7.7	+ -	
					Morfo especie 8	A7.8	--
						Morfo especie 9	A2.6
		Inga	<i>Inga</i> sp.		A2.2		--
				A2.3	--		
				A4.1	++		
				A5.1	+ -		
		Parkia	<i>Parkia multifuga</i>	A7.5	--		
				A8.1	--		
				A8.4	--		
				A8.8	--		
				<i>Inga oerstediana</i>	A6.3	--	
					A8.7	+ -	
A4.5	A4.6	A4.7	--				
			--				

		Senna	<i>Senna</i> sp.	A2.4	--
				A3.2	--
8	Hypericaceae	Vismia	<i>Vismia laurifolia</i>	A1.8	--
				A5.4	+ -
9	Melastomataceae	Miconia	<i>Miconia</i> sp.	A1.6	--
				A1.7	+ -
				A8.6	++
10	Meliaceae	Cedrela	<i>Cedrela odorata</i>	A1.5	++
				A6.1	++
				A6.2	++
				A6.7	++
			<i>Cedrela</i> sp.	A3.3	++
				A3.4	++
				A3.8	++
		Guarea	<i>Guarea kunthiana</i>	A1.3	--
11	Moraceae	Ficus	<i>Ficus</i> sp.	A7.6	+ -
12	Morfo especies	Morfo especie 1		A2.8	+ -
		Morfo especie 2		A3.1	+ -
		Morfo especie 4		A6.4	++
				A6.5	++
				A6.6	+ -
13	Myristicaceae	Otoba	<i>Otoba parvifolia</i>	A1.2	--
				A2.1	+ -
14	Rutaceae	Esenbeckia	<i>Esenbeckia amazónica</i>	A3.6	++
15	Salicaceae	Casearia	<i>Casearia</i> sp.	A1.1	--
16	Sapotaceae	Pouteria	<i>Pouteria</i> sp.	A 3.9	++
				A3.5	--
17	Verbenaceae	Morfo especie	Morfo especie 6	A7.2	+ -

¹ La simbología “+ +” llevan las muestras en las que el patrón de crecimiento está bien definido y se puede diferenciar con claridad, “+ -” para aquellas muestras en las que los anillos pueden verse por la variación de color en la madera, pero no se distingue un patrón de crecimiento específico, y finalmente “- -” para muestras en las que no se visibiliza la presencia de anillos

Fuente: Carlosama L. & Herrera M., (2019).

5.2. Cronologías generadas con técnicas dendroclimáticas

5.2.1. Trayectorias de crecimiento

Las reconstrucciones de las relaciones de tamaño para determinar la edad, muestran una gran variación dentro de las especies (Figura 26, A-B) existiendo variación de tamaños entre los árboles de similar edad incluyendo etapas jóvenes. Por ejemplo, dentro de la especie *Cedrela odorata*, las edades de los árboles de 41 y 44 años tienen un diámetro entre 360 y 620 mm, así también se encontró un ejemplar de 520 mm con una edad de 63 años. Entre especies (Figura 26C) como un caso

excepcional entre los dos árboles más longevos encontrados no existió gran variación de tamaños ni edad.

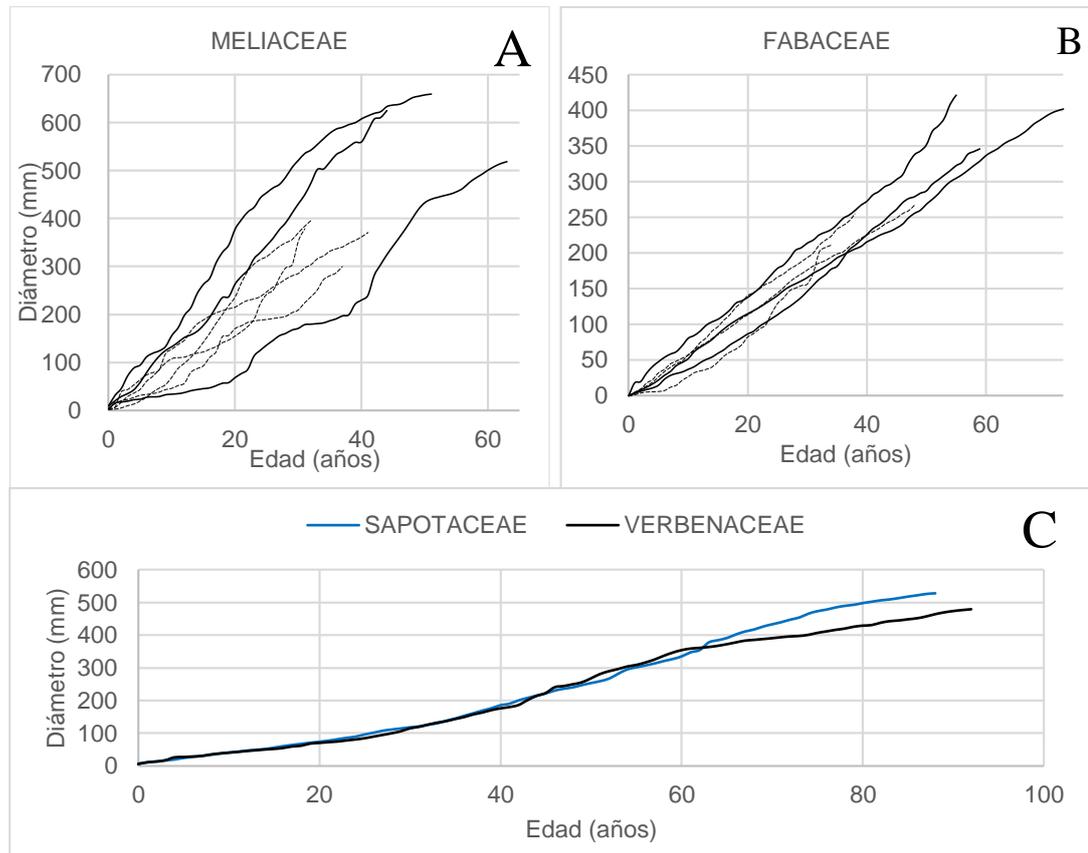


Figura 26. Trayectorias de crecimiento de los árboles tropicales en función de su diámetro de crecimiento y edad: A) y B) muestran las familias individuales para Meliaceae en su mayoría *Cedrela odorata* y Fabaceae en su mayoría *Inga* sp., se muestra las especies más longevas (líneas continuas) y especies más jóvenes (líneas entrecortadas) y C) Muestra trayectorias medias de las dos especies más longevas encontradas.

Como resultado se puede indicar que el diámetro de un árbol no está directamente relacionado con la edad. Esta gran variación en las tasas de crecimiento es muy común en los árboles tropicales (Brienen et al., 2016).

La Figura 27 muestra el rango de edades encontradas de las especies tropicales en Mera, Pastaza con formación de anillos que registra una media de edad de apenas 51 años, siendo las edades comprendidas entre 31-60 años las más frecuentes.

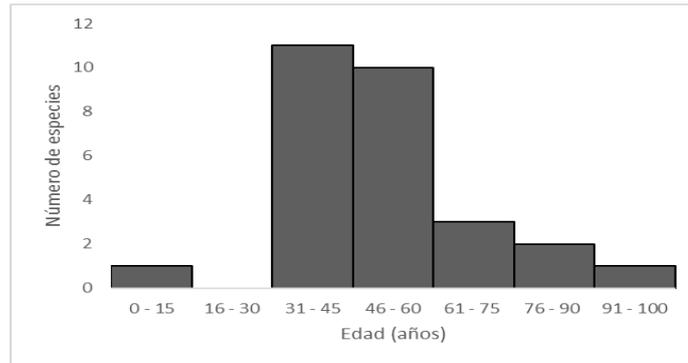


Figura 27. Histograma de las edades máximas de las especies tropicales encontradas con formación de anillos, mediante el conteo de anillos anuales de crecimiento.

5.2.2. Cronología de anillos de árboles

La reconstrucción de la cronología del sitio de estudio utilizó dos especies forestales: *Cedrela odorata* 4 árboles/12 núcleos y *Protium* sp., 2 árboles/5 núcleos debido a la formación distintiva de anillos anuales y por ser especies previamente utilizadas en dendroclimatología tropical (Zuidema, Brienen, & Schöngart, 2012; Pereyra et al., 2014; Baker et al., 2015; Nacimba, 2015; Inga & del Valle, 2017), en el resto de la investigación se referirá únicamente a estas.

Las estadísticas cronológicas de estas dos especies se resumen en la Tabla 7. La mayoría de árboles fueron jóvenes con edades medias comprendidas entre los 30-40 años, alcanzando el árbol más longevo 63 años.

Tabla 7

Resumen estadístico del ancho de anillos

Parámetro	<i>C. odorata</i>	<i>Protium</i> sp.
No. De árboles/núcleos	4/12	2/5
Período de tiempo	1956 – 2019 (63 años)	1962 – 2019 (57 años)
Longitud media de la serie (años)	43	39
Ancho de anillo medio (mm)/SD	0.53 ± 0.41	0.36 ± 0.19
Sensibilidad media	0.50	0.35
Auto-correlación de 1° orden	0.40	0.32
Rbar.WT ¹ /Rbar.BT ²	0.72/0.25	0.09/0.13
EPS medio ³	0.53	0.35

¹ Rbar.WT: Media de correlación inter-series del mismo árbol. ² Rbar.BT: Media de correlación inter-series entre árboles. ³ EPS: Señal de población expresada (sin detrend).

Fuente: Carlosama L. & Herrera M., (2019).

La *Cedrela odorata* muestra un ancho medio de anillos de 0.53 mm, una correlación inter-series del mismo árbol de 72%, una correlación inter-series entre árboles de 25% y una sensibilidad media del 50%. *Protium* sp., presentó un ancho medio de anillos menor de 0.36 mm, una correlación inter-series del mismo árbol de 9%, una correlación inter-series entre árboles de 13% y una sensibilidad media del 35%. Las dos especies muestran una auto-correlación de primer orden baja (*C. odorata* = 0.40 y *Protium* sp. = 0.32) lo que refleja que las especies responden a factores ambientales que sucedieron durante la temporada actual de crecimiento en el que se tomaron las muestras (2018), siendo resultados similares a los encontrados en *Cedrela montana* por Pucha-Cofrep (2016), excepto los valores de ancho de anillo medio debido a que reporta valores cuatro veces mayores.

En el caso del EPS, *Cedrela odorata* y *Protium* sp., presentan valores de 0.53 y 0.35 respectivamente. En estudios dendrocronológicos se utiliza generalmente un EPS de 0.85, siendo esta una de las medidas más comunes de la solidez de una reconstrucción. Sin embargo, este valor al parecer ha sido mal interpretado desde su publicación original en el artículo de (Wigley, Briffa, & Jones, 1984). De hecho, Buras afirma que después de una cuidadosa interpretación del EPS en el documento original, se puede decir que este "es una medida de qué tan bien representa una muestra finita de datos de anillos de árboles y cronología de población infinita, pero no necesariamente indicará si una cronología de anillos de árboles es adecuada para la reconstrucción del clima" (Buras, 2017).

Por lo tanto, la evaluación de la validez de una reconstrucción dendrocronológica no debe basarse únicamente en el valor de 0.85 de EPS, y se deben usar otras métricas complementarias, como los coeficientes de correlación de

crecimiento climático (bootstrapping), transfer functions entre otros, incorporados en el paquete dplR y bootRes en R y presentados en las siguientes figuras.

La Figura 28 presenta las cronologías de las especies *Cedrela odorata* y *Protium* sp., donde se aprecia el desarrollo relativamente joven de 63 y 57 años respectivamente.

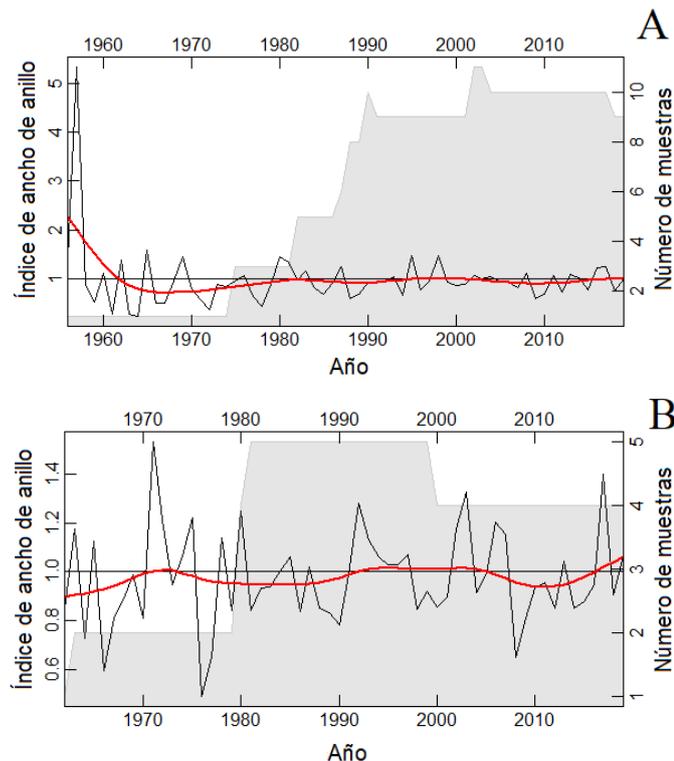


Figura 28. Cronologías del índice de ancho de anillo. A) Cronología de *Cedrela odorata* (línea negra) B) Cronología de *Protium* sp. La línea roja muestra las tendencias en la serie temporal usando una función Spline suavizado de 24 años. Las áreas grises muestran el número de muestras utilizadas para la cronología.

De hecho, la presencia de árboles relativamente jóvenes en las zonas tropicales ha sido ampliamente documentada, lo cual hace que reconstrucciones dendroclimáticas sean relativamente cortas en esta parte del mundo en comparación a las efectuadas en mayores latitudes. A manera de ilustración, la cronología efectuada en el árbol de teca *Tectona grandis* en Indonesia (415 años) sigue siendo una de las más largas en los trópicos (Brienen et al., 2016), mientras que en mayores latitudes se han efectuado cronologías en árboles mayores a 5000 años en pino *Pinus*

longaeva o en ciprés *Cupressus dupreziana* de 2400 años (Abdoun, Jull, Guiball, & Thinon, 2005). Para cronologías de *Cedrela odorata* efectuadas en Bolivia y Perú, estas han alcanzado 308 y 122 años respectivamente (Brienen et al., 2016; Inga & del Valle, 2017), que de igual manera siguen siendo relativamente jóvenes. Es importante resaltar que esta investigación es una de las primeras realizadas en un bosque húmedo de la parte central de la Amazonía ecuatoriana (Mera) y cuya finalidad era la evaluación de especies tropicales con potencialidad dendroclimatológica. Reconstrucciones más extensas requieren un mayor tiempo de exploración e identificación de bosques con las especies de interés.

5.3.Descripción climática del área de investigación

Mera registra una concentración de precipitaciones altas con un promedio de 5372 mm anuales. En la Figura 29 se observa que los transectos sobre los que se realizó el estudio se encuentran en una zona que presenta aproximadamente el doble de precipitaciones en comparación con la estación M0378-Río Verde ubicada al noroeste de Mera a una altura que oscila entre 2000 a 3500 m.s.n.m., que registra 3018 mm anuales y en relación a la estación M0041-Sangay que se encuentra ubicada hacia el sur, que registra 3551 mm anuales. Los valores de precipitación son mayores pese a encontrarse a una altura comprendida entre 1100 a 1300 m.s.n.m., de hecho esta zona en Mera ha sido catalogada como una de las más húmedas en la cuenca del Amazonas (Liu & Colinvaux, 1985).

La alta pluviosidad en este valle se debe a que la Cordillera de los Andes eleva el aire húmedo de la Amazonía favoreciendo su condensación, por lo que las precipitaciones aumentan en las laderas hacia el este. Sin embargo, las pendientes en el lado de sotavento (hacia el Oeste Tungurahua) permanecen más secas; adicionalmente la complejidad en la topografía del terreno así como el reciclaje de

vapor de agua inducen también en la variabilidad espacial de lluvias (Victoria, Martinelli, Mortatti, & Richey, 1991; Laraque, Ronchail, Cochonneau, Pombosa, & Guyot, 2007).

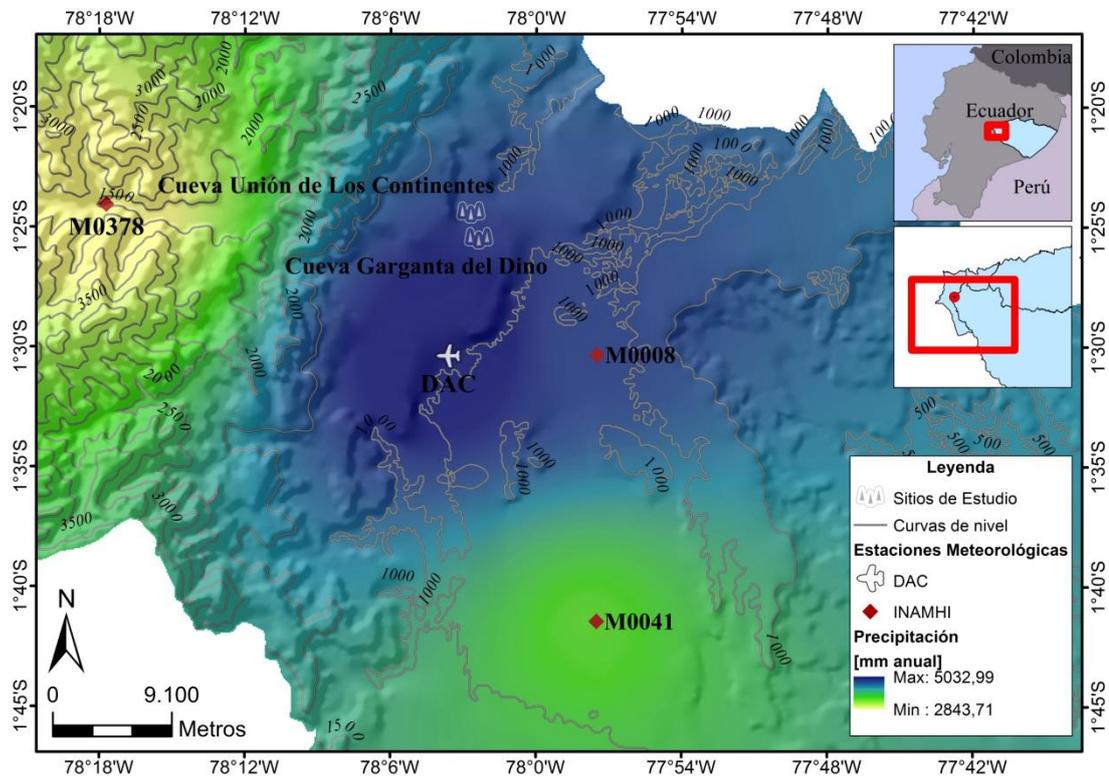


Figura 29. Mapa de precipitaciones anuales obtenidas a partir de los datos de las estaciones meteorológicas cercanas a la zona de estudio.

Fuente: Carlosama L. & Herrera M., (2019).

En cuanto a la diferencia de temperaturas, en la Figura 30 se observa que existe una relación directa entre la temperatura y las elevaciones (Espinoza et al., 2009). Sin embargo, la variación de temperatura entre los sitios de estudio (1000-1300 m.s.n.m.) y las estaciones meteorológicas de DAC-Shell (1043 m.s.n.m.) y M0008-Puyo (936 m.s.n.m.) es mínima ya que no supera 1°C; esto podría deberse a los altos niveles de pluviosidad y humedad de la zona que generan inercia térmica (Serrano et al., 2012), creando tasas de evaporación altas capaces de absorber el calor, lo que ocasiona que la zona de estudio sea más húmeda, lluviosa y fría comparada con sus alrededores.

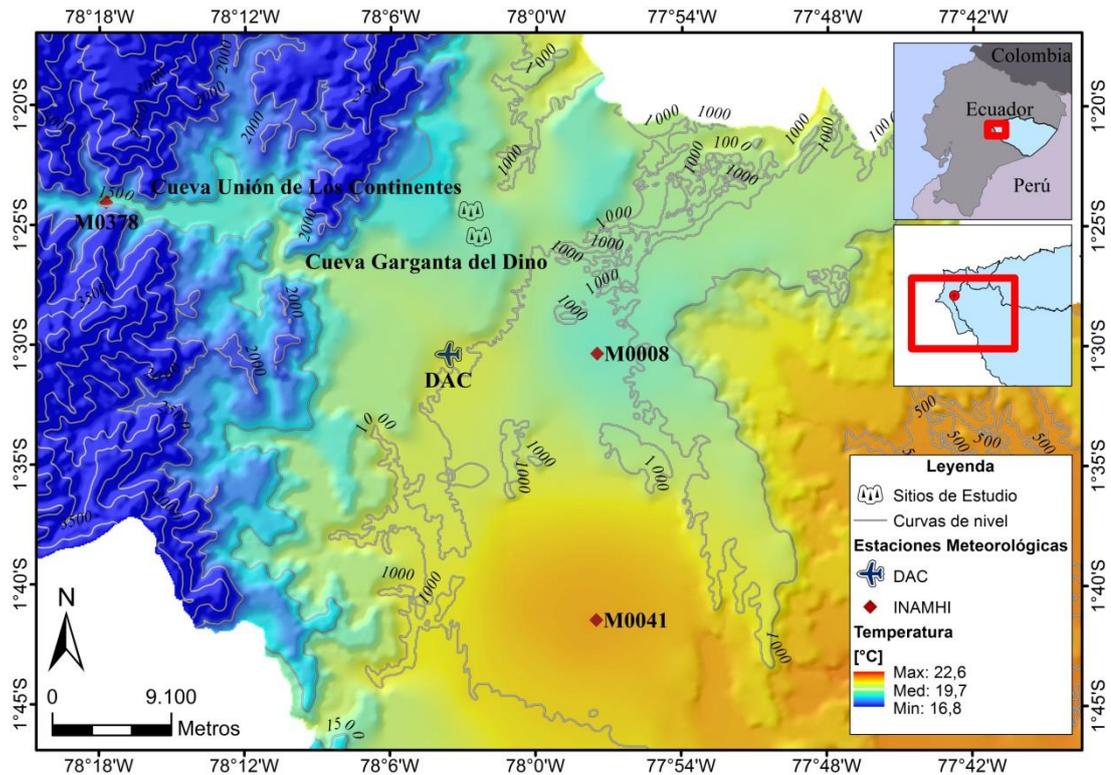


Figura 30. Mapa de temperaturas medias anuales obtenidas con datos de las estaciones meteorológicas cercanas a la zona de estudio.

Fuente: Carlosama L. & Herrera M., (2019).

5.3.1. Análisis de los datos meteorológicos y variabilidad climática

Debido a que es importante identificar cuáles son los principales factores que pueden cambiar el clima, se describe a continuación la variabilidad climática de la zona. Para el efecto se realizaron gráficos del comportamiento del clima durante el período de existencia de datos climáticos para cada una de las estaciones meteorológicas cercanas al área de investigación junto con las anomalías del ENSO 1+2 y ENSO 3.4 que muestran el Índice de Oscilación del Niño en períodos mensuales como se muestran en la Figura 31, Figura 32 y Figura 33, con el fin de verificar si las anomalías de las oscilaciones de los eventos extremos del Niño tienen influencia en las series climáticas. Adicionalmente en cada variable climática se indica las líneas de tendencia y R^2 para los períodos de tiempo (1965-2018 y 1981-2018).

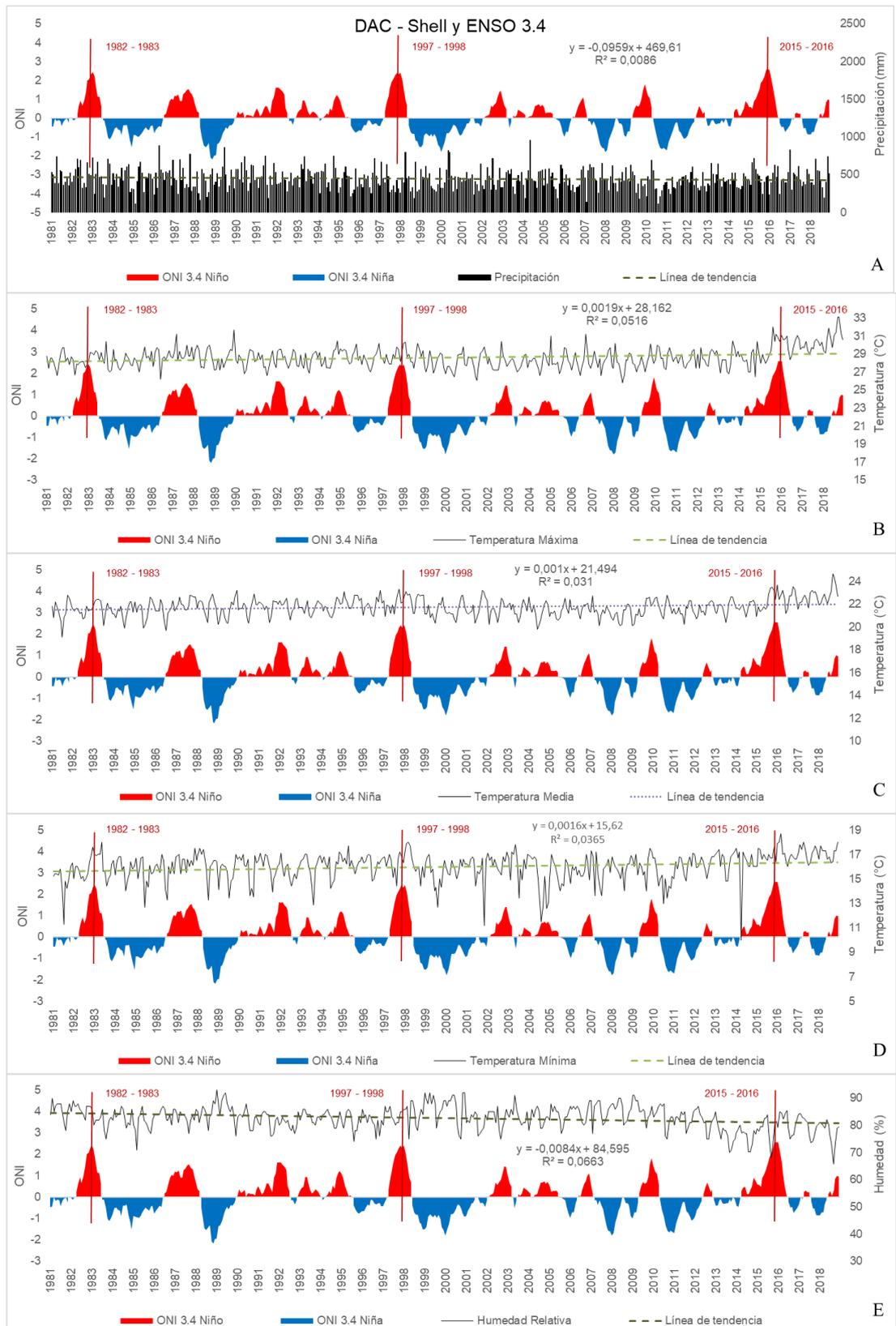
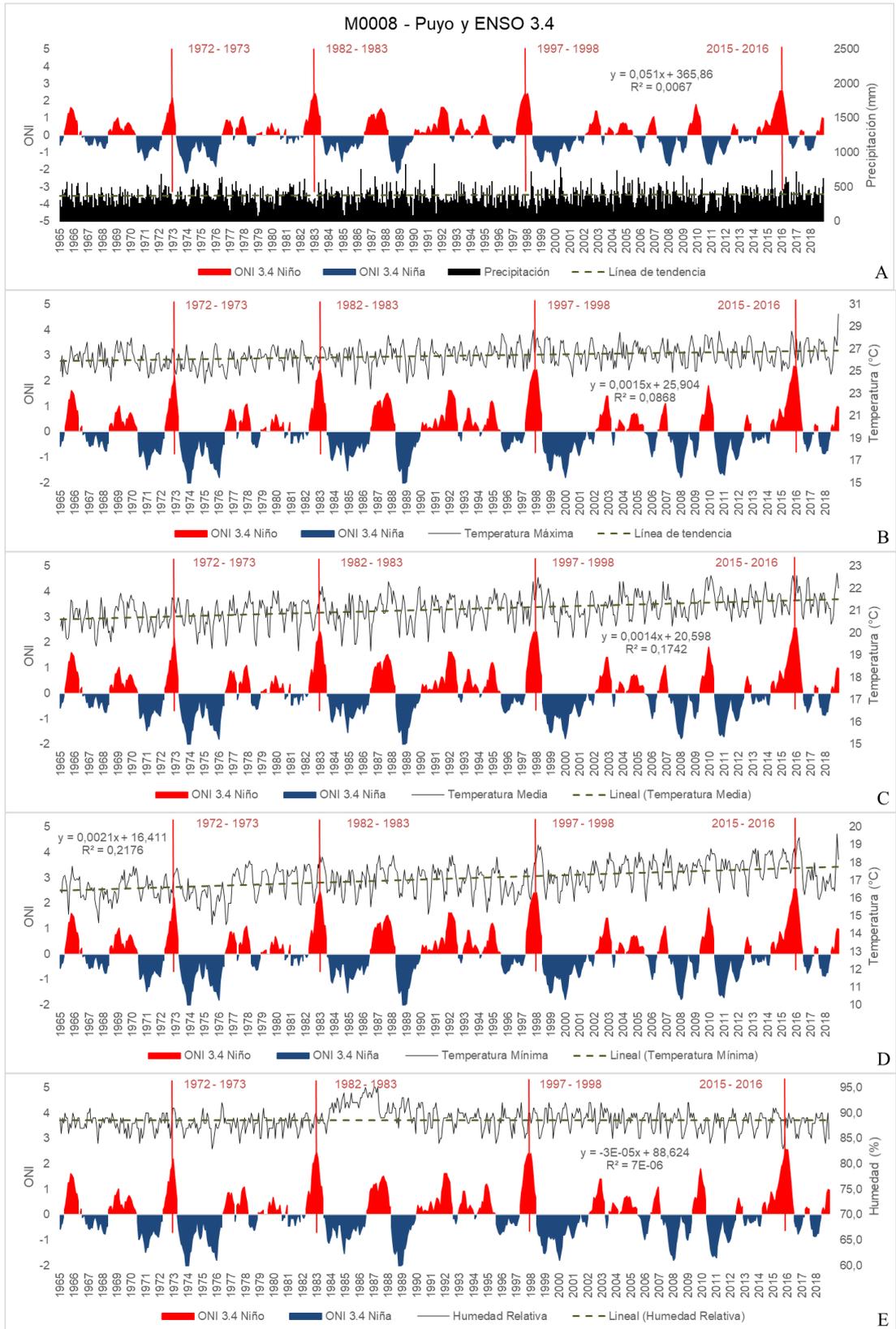


Figura 31. Series en el tiempo para cada una de las variables climáticas de la estación meteorológica DAC-Shell (período 1981 - 2018) junto con los índices de Oscilación Niño (ONI) ilustradas con ENSO 3.4, se muestran los Niños muy fuertes (1982 – 1983), (1997 – 1998) y (2015 – 2016): A) Precipitación, B) Temperatura máxima, C) Temperatura media, D) Temperatura mínima, E) Humedad relativa. Los fenómenos Niño se representan con áreas en rojo y Niña con áreas en azul.



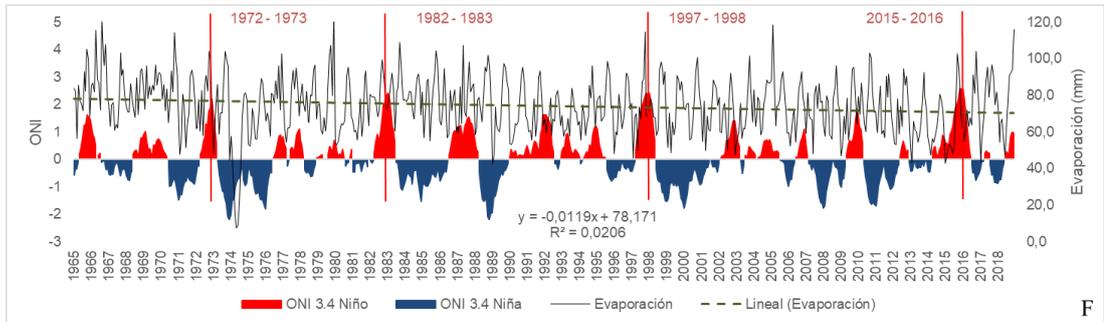


Figura 32. Series en el tiempo para cada una de las variables climáticas de la estación meteorológica M0008-Puyo (período 1965 - 2018) junto con los índices de Oscilación Niño (ONI) ilustradas con ENSO 3.4, se muestran los Niños muy fuertes (1982 – 1983), (1997 – 1998) y (2015 – 2016): A) Precipitación, B) Temperatura máxima, C) Temperatura media, D) Temperatura mínima, E) Humedad relativa, F) Evaporación. Los fenómenos Niño se representan con áreas en rojo y Niña en azul.

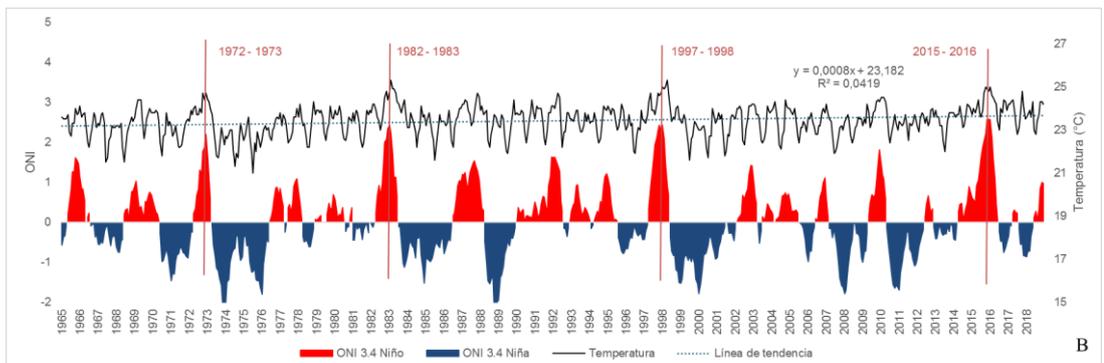
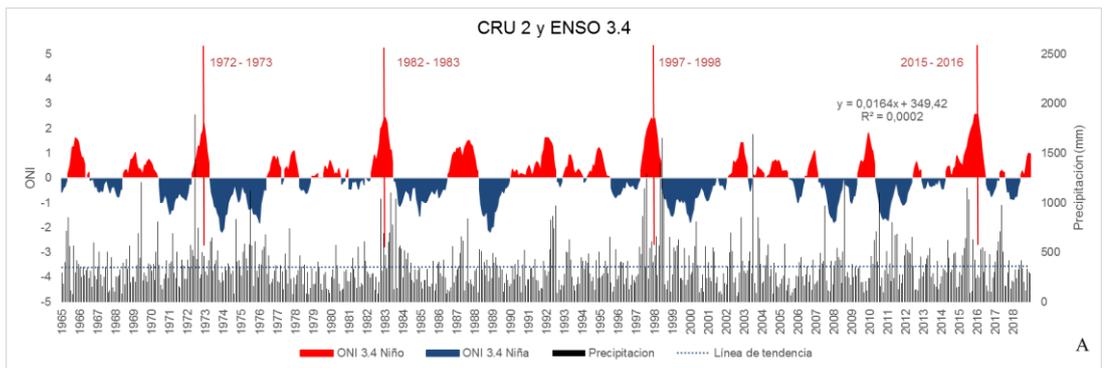


Figura 33. Series en el tiempo para cada una de las variables climáticas de datos interpolados CRU (período 1965 - 2018) junto con los índices de Oscilación Niño (ONI) ilustradas con ENSO 3.4, se muestran los Niños muy fuertes (1982 – 1983), (1997 – 1998) y (2015 – 2016): A) Precipitación, B) Temperatura media. Los fenómenos Niño se representan con áreas en rojo y Niña con áreas en azul.

En lo que respecta a las precipitaciones, debido a la alta variabilidad y estacionalidad marcada que presenta el área de investigación no se encuentra una relación con el fenómeno ENSO (Figura 31A, Figura 32A y Figura 33A), de igual manera se encuentra una ligera tendencia a la disminución (Armenta Porras, 2016; Campozano et al., 2018). En cuanto a las temperaturas tampoco se evidencia relación con ENSO, sin embargo, se puede observar un ligero efecto de cambio climático en

las temperaturas máximas (temperatura registrada a medio día) ya que se evidencia una ligera tendencia al incremento de 0,0019 °C/año (Figura 31B) y 0,0015 °C/año (Figura 32B) resultando relativamente baja. Mientras que en las temperaturas mínimas la tendencia es un tanto más marcada 0,0016 °C/año (Figura 31D) y 0,0021 °C/año (Figura 32D), reflejando de esta manera un ligero cambio climático, que puede estar sumado al efecto de islas de calor urbana debido a que ambas estaciones meteorológicas se encuentra dentro de zonas urbanas (INEC, 2010). El análisis con las temperaturas medias aunque produce resultados interesantes, no se utiliza para cambio climático, debido a que promedia los efectos (IPCC, 2014).

En cuanto a los datos de humedad y evaporación, la estación M0008 – Puyo presenta un “lag de humedad” después fenómeno del Niño del periodo 1982 – 1983 (Figura 32E) pero esto no se reproduce en las demás variables climáticas, de igual manera los valores de evaporación también pueden atribuirse al efecto islas de calor por crecimiento urbano (la presencia de asfalto en las vías disminuye la humedad generada por la evapotranspiración de las plantas), es decir que aún no se puede afirmar que estos datos climáticos se vean afectados por ENSO 3.4 o ENSO 1 + 2.

De manera general entre todas las variables climáticas se evidencia en los últimos años menos evaporación, menos humedad y más temperatura (máx., med., y mín.) que se lo puede relacionar tanto a un efecto de cambio climático moderado, como debido al aumento de población y efecto de isla de calor urbana. De todas maneras, pese a presentar un ligero incremento no se puede afirmar que sean por efecto de cambio climático debido a que estadísticamente los valores encontrados en las ecuaciones y R^2 no son estadísticamente significativos debido a que el análisis se realizó con datos mensuales.

Por ello se concluye que los efectos de las anomalías de las oscilaciones del Niño no tienen gran relación con la variabilidad climática del bosque húmedo, sino más bien factores externos del sitio. Las figuras de las anomalías con ENSO 1 + 2 resultaron ser similares a las de ENSO 3.4 siendo de igual manera estadísticamente no significativas (figuras no mostradas).

5.4. Cronologías calibradas con datos climáticos

5.4.1. Interacciones climáticas: influencia climática en el ancho de anillo

Para la especie *Cedrela odorata* se encontraron correlaciones significativas (Figura 34, Figura 35 y Figura 36) entre el índice de ancho de anillo con los datos mensuales de: temperaturas media, mínima y máxima, precipitación, humedad relativa, evaporación y ENSO 3.4.

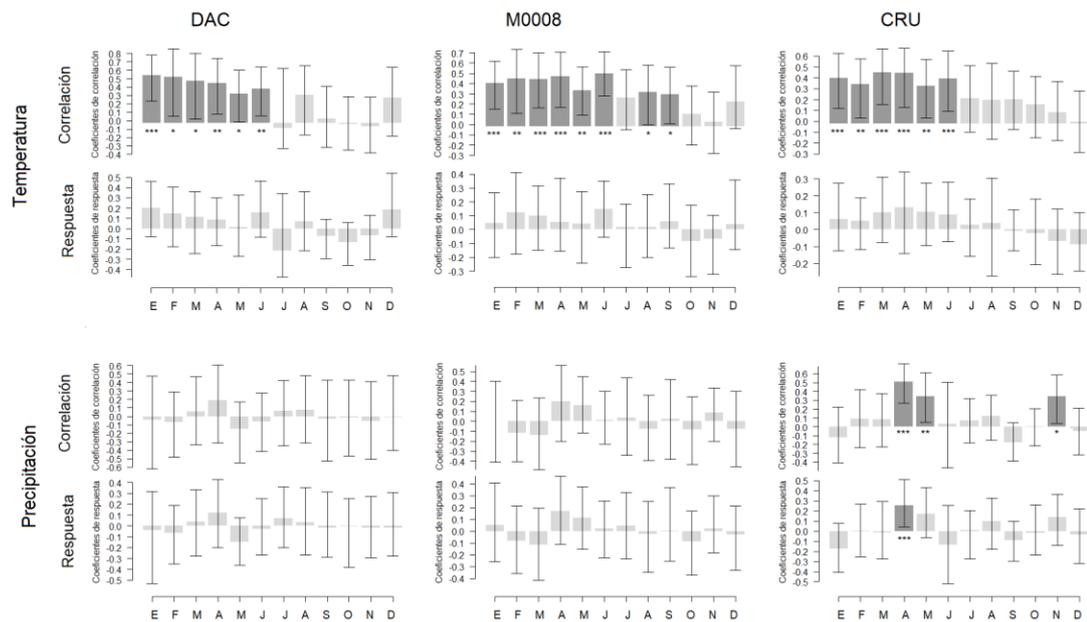


Figura 34. Coeficientes de correlación y respuesta de *C. odorata*, cronologías de ancho de anillo de árbol con temperatura mensual media y precipitación para las estaciones DAC - Shell (1981 – 2018), M0008 - Puyo (1965 - 2018) y CRU (1965 - 2018). Las barras más oscuras muestran un coeficiente significativo en $p < 0.1$ (*), $p < 0.05$ (**) y $p < 0.01$ (***). Las líneas representan el intervalo de confianza de 95%.

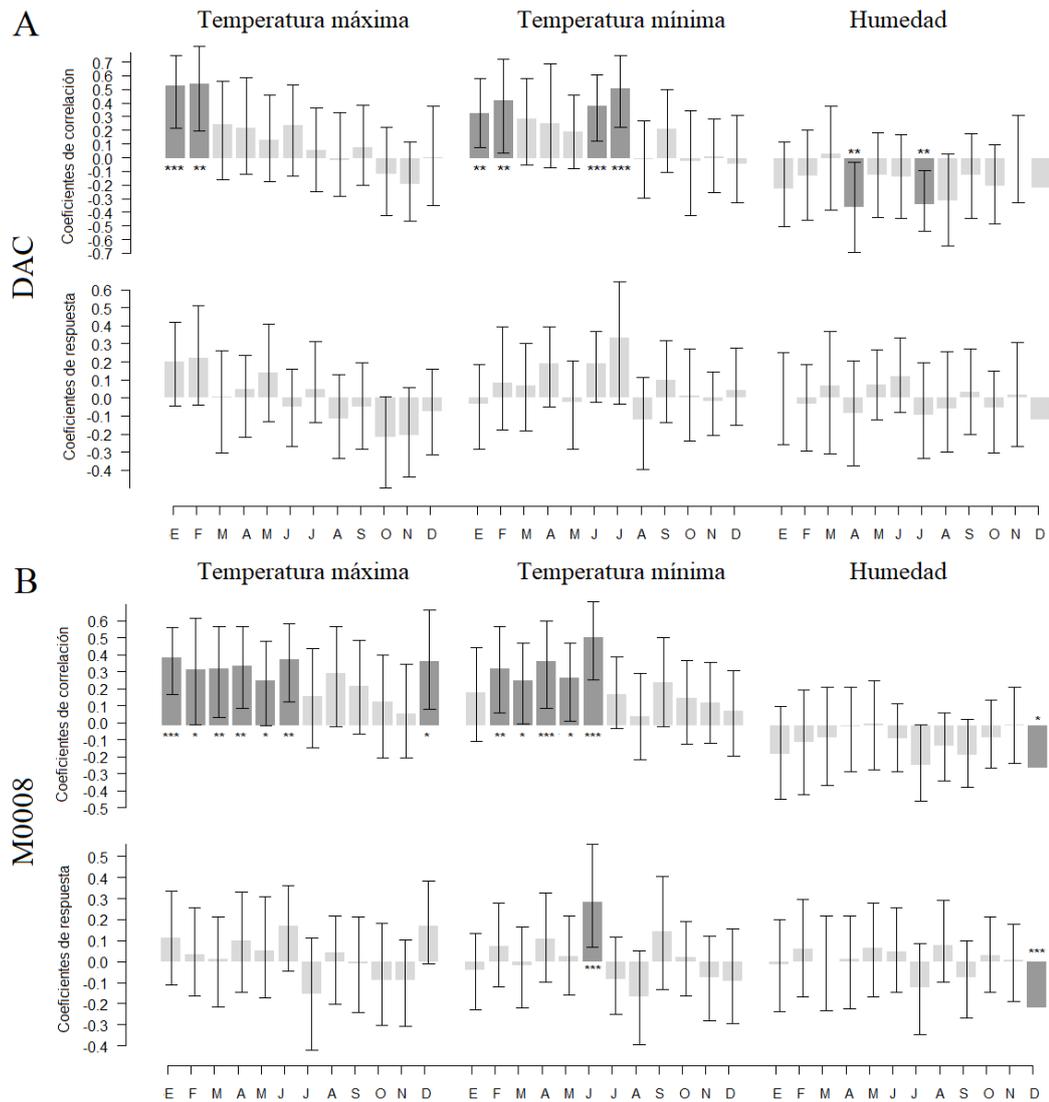


Figura 35. Coeficientes de correlación y respuesta de *C. odorata*, cronologías de ancho de anillo de árbol con temperatura mensual máxima, mínima y humedad relativa: A) DAC - Shell (1981-2018) y B) M008 - Puyo (1965-2018). Las barras más oscuras muestran un coeficiente significativo en $p < 0.1$ (*), $p < 0.05$ (**) y $p < 0.01$ (***). Las líneas representan el intervalo de confianza de 95%.

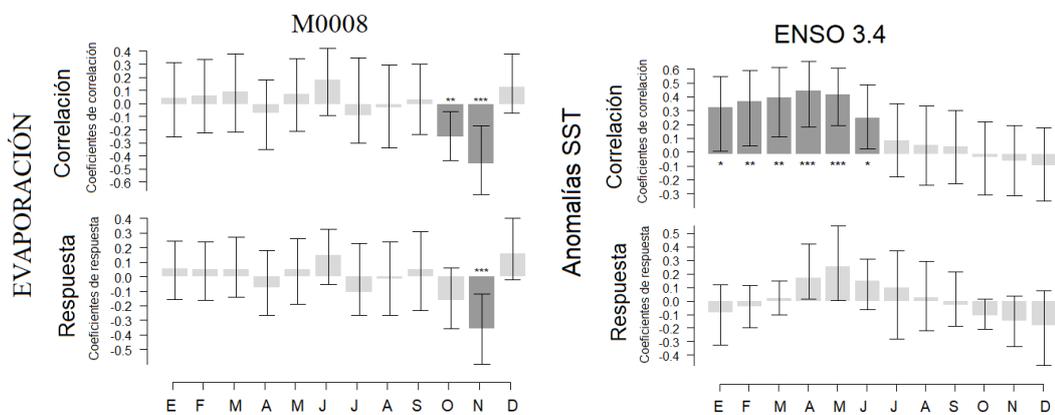


Figura 36. Coeficientes de correlación y respuesta de *C. odorata*, cronologías de ancho de anillo de árbol con evaporación y ENSO 3.4 con la estación DAC - Shell (1981 - 2018) y M008 - Puyo (1965 - 2018). Las barras más oscuras muestran un coeficiente significativo en $p < 0.1$ (*), $p < 0.05$ (**) y $p < 0.01$ (***). Las líneas representan el intervalo de confianza de 95%.

A pesar que las correlaciones en muchos de los casos son significativas no son el factor causante de una latencia cambial. Por ello, se encontraron que únicamente los factores climáticos con coeficientes de respuesta significativos son la precipitación en el mes de abril-mayo y noviembre con CRU, temperatura mínima en junio con M0008 - Puyo, evaporación en noviembre y humedad relativa en diciembre, ambos con coeficiente de respuesta negativo también con M0008 – Puyo.

En función del análisis anterior se calcularon las funciones de respuesta móvil solo con las variables climáticas que resultaron significativas ($p < 0.01$) para los coeficientes de respuesta. En la Figura 37A se observan los coeficientes de respuesta altos para noviembre, seguido de los meses de abril-mayo. En la Figura 37B para las temperaturas mínimas se observa una respuesta muy significativa en el mes de junio y en la Figura 37C se muestran las respuestas negativas para la humedad en diciembre, finalmente en la Figura 37D se observa las respuestas negativas para noviembre.

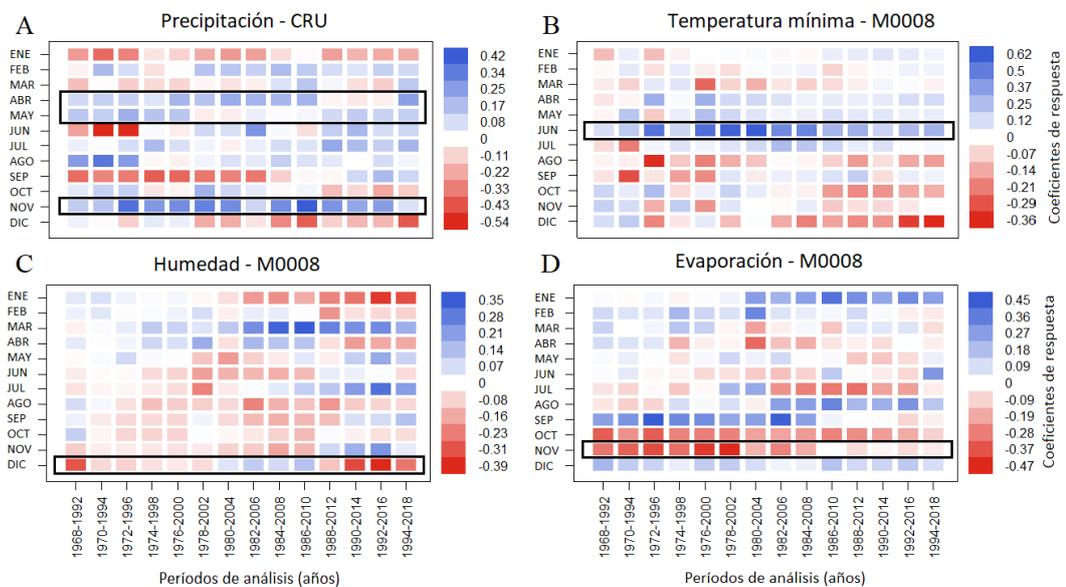


Figura 37. Funciones de respuesta móvil a partir de la cronología de ancho de anillo de *Cedrela odorata* y datos climáticos: A) Precipitación mensual de CRU (período 1965 – 2018), B) – D) Temperatura mínima, Humedad relativa y Evaporación mensual de M0008 – Puyo (período 1965 - 2018). El cálculo se realizó repetidamente para períodos de tiempo de 25 años con un coeficiente de significancia $p < 0.01$.

Los coeficientes de respuesta significativos para el crecimiento de *Cedrela odorata* obtenidos para la precipitación (positivos en abril-mayo) y de evaporación (negativos en noviembre) obedecen a los periodos de mayores precipitaciones de abril-junio y octubre-diciembre en esta zona ubicada en los flancos de la cordillera Real, entre los Parques Nacionales Llanganates y Sangay. La estacionalidad de la lluvia esta modulada por la Zona de Convergencia Intertropical (ITCZ) y el aire húmedo propio de la cuenca del Amazonas (Garcia et al., 1998; Campozano et al., 2016).

El coeficiente de respuesta positivo para el crecimiento en el mes de junio para la temperatura mínima parece obedecer al descenso en la temperatura que acompaña a la reducción de las lluvias en los meses de Junio-Septiembre capturado en las series temporales por las estaciones DAC - Shell y M0008 - Puyo (Figura 35 y Figura 37B) propias de este régimen bimodal (Laraque et al., 2007).

Finalmente, respecto al coeficiente negativo para la humedad relativa en diciembre-enero, estos meses se ubica en el segundo descenso en precipitación sin cambios significativos en la temperatura (Figura 35 y Figura 37C) factor que permite que el vapor de agua propio del bosque húmedo aumente la humedad relativa del aire, acrecentando la saturación e intensificando las probabilidades de precipitación, incrementando el balance hídrico en la zona (Ahrens & Henson, 2018).

Para *Protium* sp., se encontraron menor número de correlaciones entre el ancho de anillos y los factores meteorológicos siendo estos: temperatura media, temperatura mínima, humedad y evaporación. No se hallaron correlaciones significativas con la temperatura máxima y ENSO (Figura 38, Figura 39 y Figura 40).

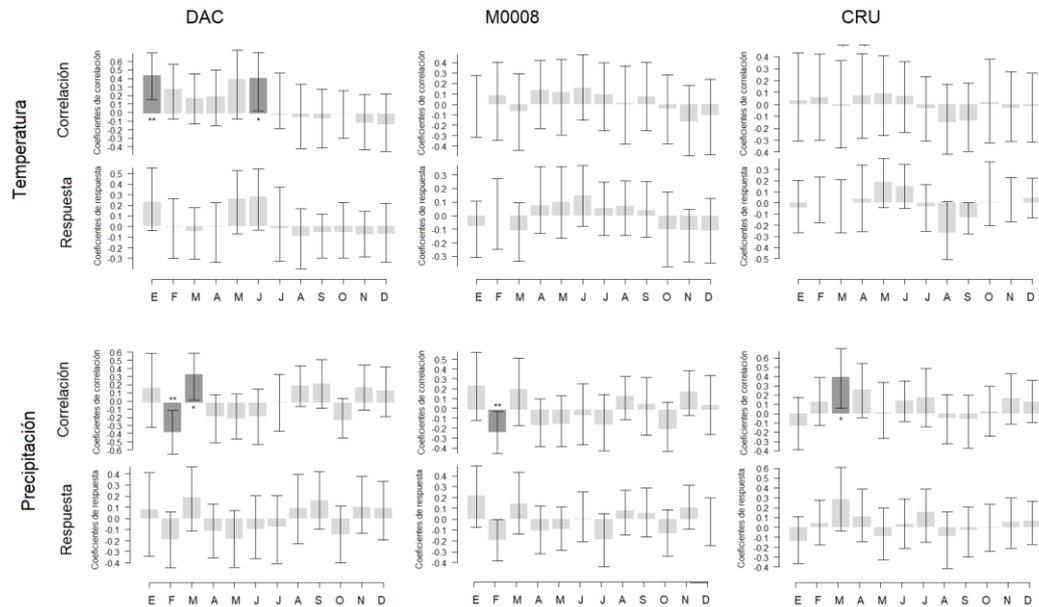


Figura 38. Coeficientes de correlación y respuesta de *Protium* sp., cronologías de ancho de anillo de árbol con temperatura mensual media y precipitación para las estaciones DAC - Shell (1981 – 2018), M0008 - Puyo (1965 - 2018) y CRU (1965 - 2018). Las barras más oscuras muestran un coeficiente significativo en $p < 0.1$ (*), $p < 0.05$ (**) y $p < 0.01$ (***). Las líneas representan el intervalo de confianza de 95%.

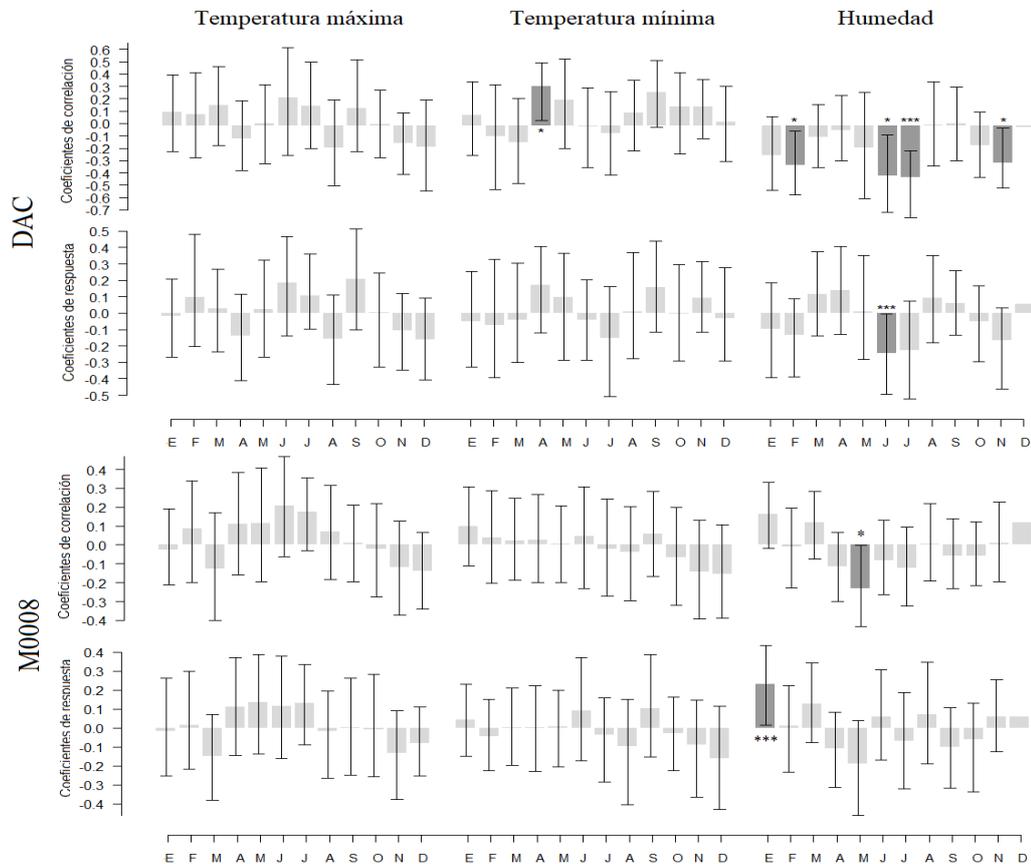


Figura 39. Coeficientes de correlación y respuesta de *Protium* sp., cronologías de ancho de anillo de árbol con temperatura máxima, mínima y humedad para las estaciones DAC - Shell (1981 – 2018), M0008 - Puyo (1965 - 2018). Las barras más oscuras muestran un coeficiente significativo en $p < 0.1$ (*), $p < 0.05$ (**) y $p < 0.01$ (***). Las líneas representan el intervalo de confianza de 95%.

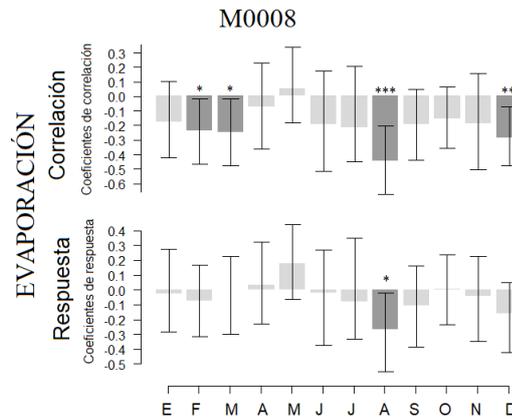


Figura 40. Coeficientes de correlación y respuesta de *Protium* sp., cronologías de ancho de anillo de árbol con la evaporación para la estación M0008. Las barras más oscuras muestran un coeficiente significativo en $p < 0.1$ (*), $p < 0.05$ (**) y $p < 0.01$ (***). Las líneas representan el intervalo de confianza de 95%. Los coeficientes de correlación y respuesta para ENSO 3.4 no son significativos (gráfica no mostrada).

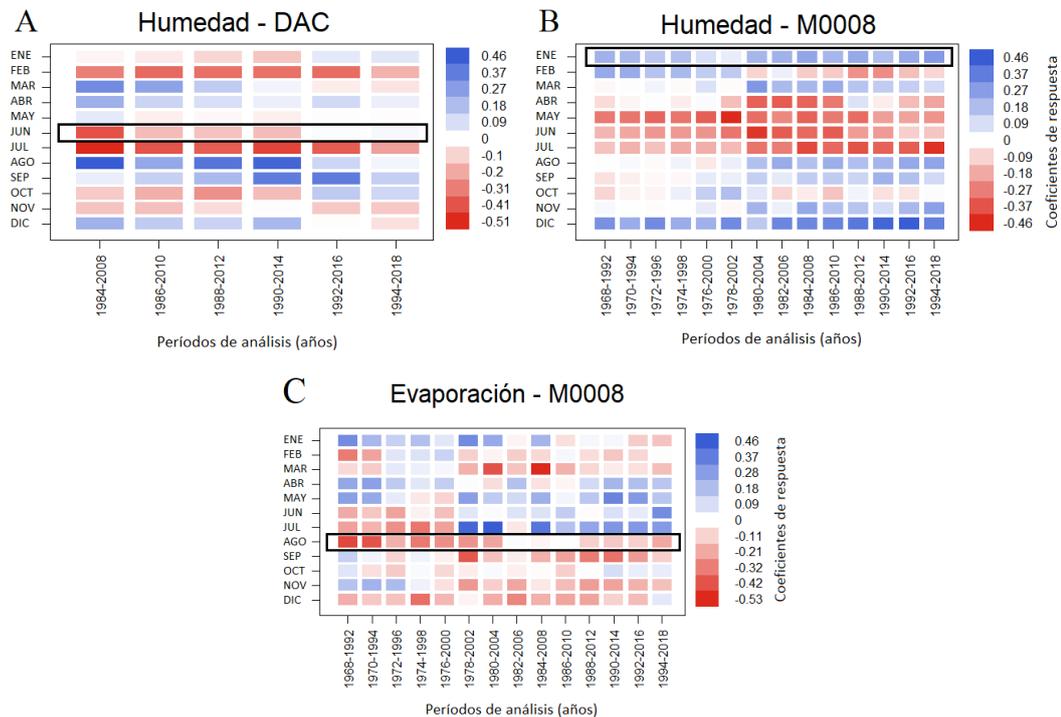


Figura 41. Funciones de respuesta móvil a partir de la cronología de ancho de anillo de *Protium* sp., y datos climáticos: A) Humedad de DAC (período 1981 – 2018), B) – C) Humedad y Evaporación de M0008 – Puyo (período 1965 - 2018). El cálculo se realizó repetidamente para períodos de tiempo de 25 años con un coeficiente de significancia $p < 0.01$.

Para *Protium* sp., de forma análoga que en el caso de *C. odorata*, al fijarse en los coeficientes de respuesta significativos estos se obtienen para la humedad relativa positiva en enero y negativa en junio y con la evaporación una respuesta negativa en agosto (Figura 41). Los coeficientes de respuesta significativos obtenidos para la

humedad relativa (positiva en enero, negativa en junio) y con la evaporación (negativa en agosto) están íntimamente relacionados al balance hídrico asociado a las precipitaciones con comportamiento bimodal y al reciclaje de vapor de agua anteriormente mencionados.

Zuidema, Brienen, & Schöngart (2012) publicaron una lista de especies de árboles con probada formación de anillos anuales en las selvas tropicales con precipitación anual > 1800 mm, donde se incluye a *Cedrela odorata* pero no a *Protium* sp., en la misma se detalla información sobre el factor de estrés que activa la latencia cambial que se requiere para formar un límite de anillo, que para el caso de *Cedrela odorata* es la precipitación. Este factor encaja perfectamente en todas las reconstrucciones dendroclimáticas en las que se utiliza *Cedrela odorata*, sea mediante el uso de técnicas tradicionales de dendrocronología o por el uso de isótopos estables ($\delta^{18}\text{O}$) en celulosa se llega a concluir que la precipitación tiene un control significativo en el crecimiento del árbol (Worbes & Nin, 2002; Brienen, Helle, Pons, Guyot, & Gloor, 2012; Pereyra et al., 2014) corroborando la calibración efectuada con la precipitación en nuestra cronología.

5.4.2. Cronología y análisis de señales periódicas

La Figura 42 presenta los índices de ancho de anillos usando un espectro wavelet, donde la cronología de *Cedrela odorata* muestra una periodicidad significativa de 2-8 años al inicio de su crecimiento, mientras que *Protium* sp., presenta periodos significativos de 2-4 años a mediados de la década de 1970.

La significancia en estos períodos sorprendentemente coincide con la banda de frecuencia del fenómeno ENSO de 2-4 años y con un ENSO fuerte en 1972. Sin embargo, no se puede atribuir una influencia directa del ENSO en ninguna de las 2

cronologías debido a que el número de muestras en la cronología no es lo suficientemente representativa. Adicionalmente un estudio con *Cedrela montana* (Meliaceae) en bosque húmedo ubicado topográficamente en las estribaciones de la cordillera Real en la provincia de Loja, análogo a Mera, encontró similares períodos 2-4 en los gráficos wavelets, pero se concluyó que el ecosistema estaba demasiado lejos de la Costa del Pacífico y por lo tanto un ENSO 3.4 no tenía la fuerza suficiente para ser un factor de estrés en el bosque (Pucha-Cofrep, 2016).

Las causas de esta periodicidad pueden estar asociados a la disponibilidad de luz generada por alta competencia entre árboles por alcanzar el dosel o ciclos fisiológicos propios al inicio de su crecimiento (Brienen et al., 2016).

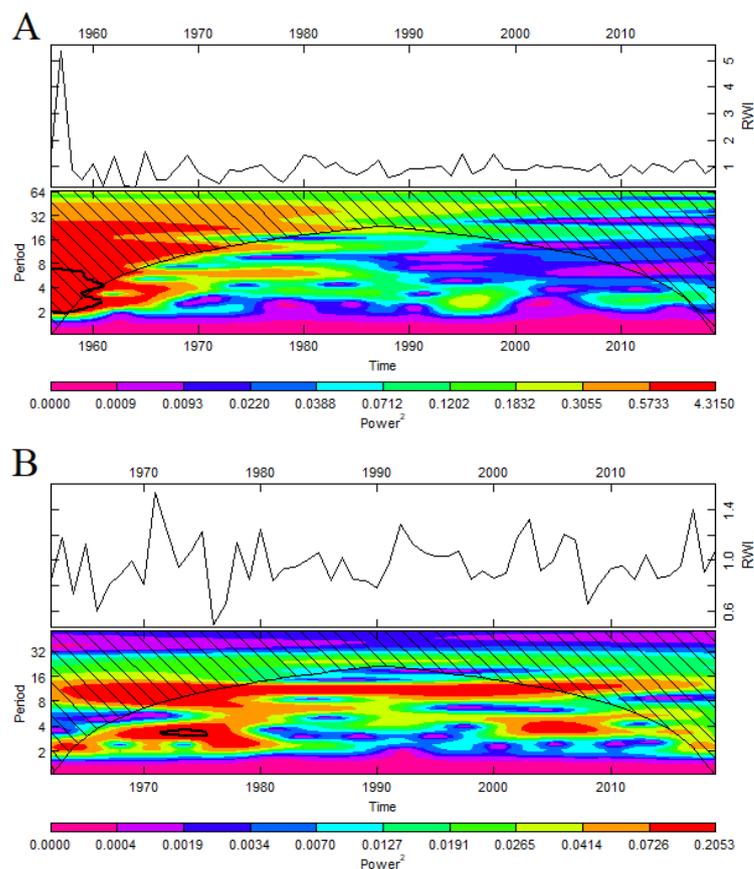


Figura 42. Series de índices de ancho de anillos (RWI) y espectro wavelet con cono de influencia (área sombreada). Los contornos negros muestran frecuencias significativas en el nivel de confianza 0.01, las líneas discontinuas negras muestran señales con tendencias de periodicidad decreciente: A) *Cedrela odorata* y B) *Protium sp.*

5.5.Reconstrucción climática

Con las cronologías desarrolladas anteriormente al ajustar la señal climática de cada especie tropical, en la Figura 43 y Figura 44 se muestra las posibles reconstrucciones con el fin de reflejar que los árboles guardan una señal climática en sus anillos y permiten comprender el clima del pasado.

Al analizar los resultados de la reconstrucción de la precipitación observada con el índice de ancho de anillos de crecimiento, se aprecia que los resultados muestran relación entre los aumentos de crecimiento rápido con la mayoría de picos de precipitación. Cabe indicar que el no registro de los picos indicados, se puede deber a incidencias particulares con las especies estudiadas en las zonas (incendios, plagas, entre otros).

Sin embargo, se aprecia un desfase en la intensidad de los eventos debido a los mecanismos de resiliencia del bosque que actúa como un amortiguador ante los eventos de lluvia muy intensos como los mostrados. Los bajos R^2 registrados, se deben justamente a estos hechos, registrándose alrededor de: 0.025, 0.06 y 0.18 para DAC, M0008 y CRU respectivamente (Figura 43). En lo que se refiere a la temperatura, se reproducen las temperaturas observadas de manera similar, la mayoría de los picos quedan representados en la cronología del árbol, pero en diferentes intensidades. Los valores de R^2 registrados son 0.22, 0.16 y 0.31 para DAC, M0008 y CRU respectivamente (Figura 44).

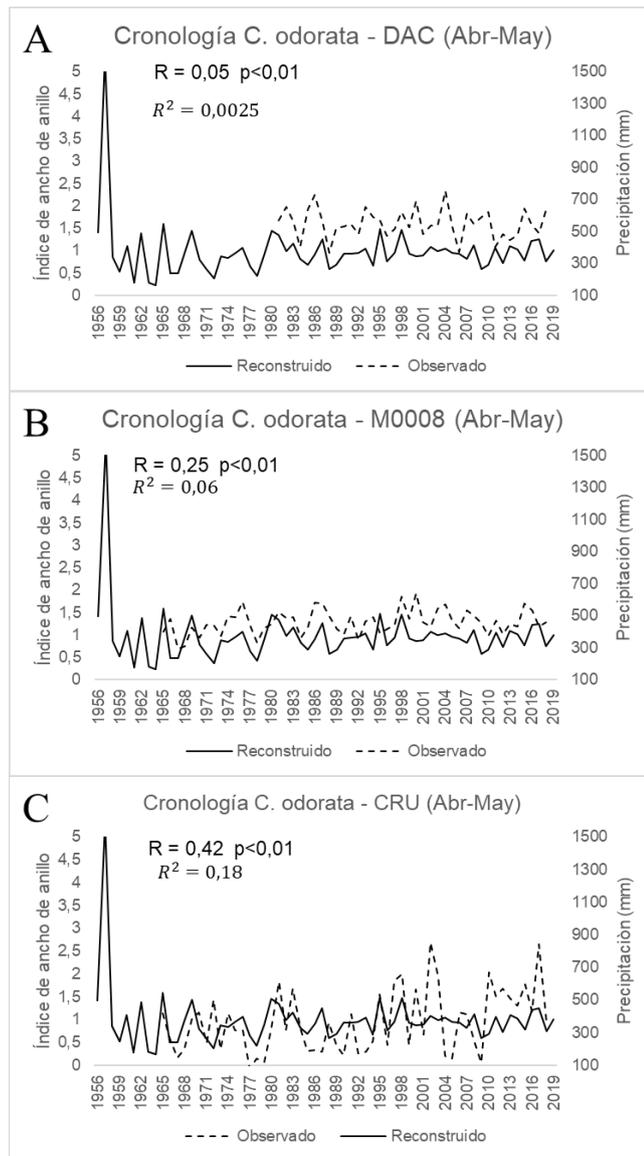
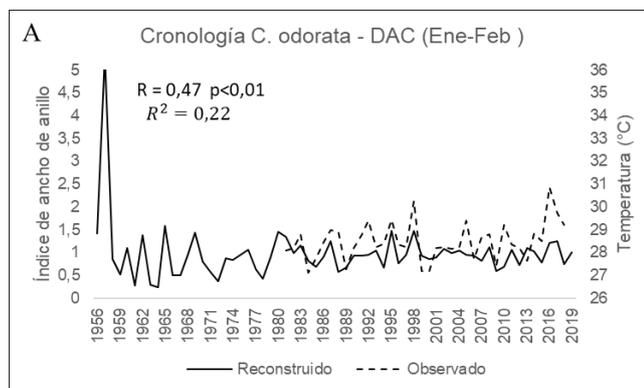


Figura 43. Reconstrucción climática de precipitaciones para los meses abril-mayo con la cronología de *Cedrela odorata* (reconstruido): A) registrado precipitación DAC (1981 – 2018), B) registrado precipitación de M0008 - Puyo (1965 – 2018) y C) registrado precipitación CRU (1965 – 2018).



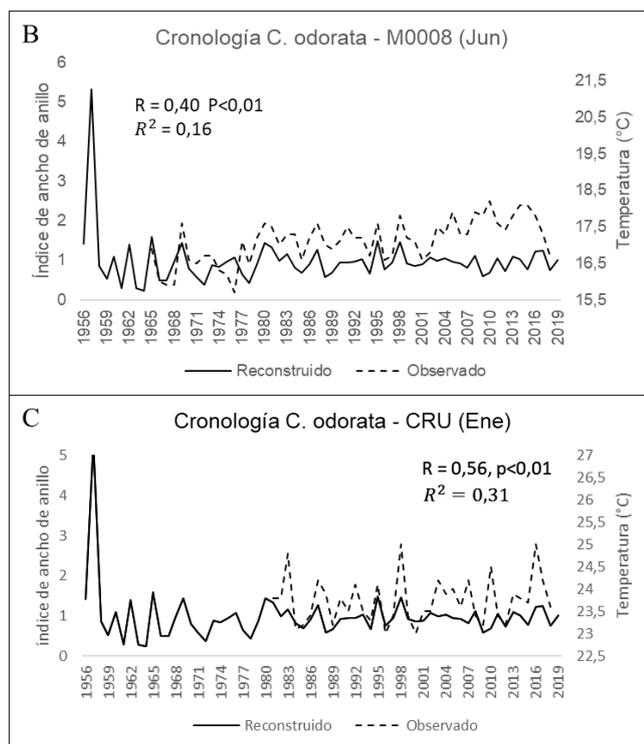


Figura 44. Reconstrucción climática de la temperatura con la cronología de *Cedrela odorata* (reconstruido): A) registrado temperatura máxima DAC – Shell (1981 – 2018 enero-febrero), B) registrado temperatura mínima M0008 - Puyo (1965 – 2018 junio) y C) registrado temperatura media CRU (1981 – 2018 enero).

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

De las 21 especies tropicales encontradas apenas 9 mostraban anillos debido a que la formación anatómica de los mismos en muchos casos fue muy compleja, solo 2 fueron útiles: *Cedrelinga odorata* y *Protium* sp.

En los bosques amazónicos, el diámetro del fuste no es un indicador de longevidad. Árboles de fuste delgado pueden alcanzar edades similares a otros más longevos debido a su rápido desarrollo inicial y prioridad por alcanzar el dosel.

La *Cedrelinga odorata* fue la mejor especie para efectuar una reconstrucción dendroclimática. En la cronología desarrollada, el factor de estrés que activa su latencia cambial es la precipitación, similar a los resultados reportados en la literatura. También existió correlación con las temperaturas sobre todo medias, eso se ve reflejado en la reconstrucción climática obteniendo un R^2 alto, no obstante, las magnitudes no se reproducen adecuadamente.

En el caso de *Protium* sp., los movimientos de vapor de agua en el área de estudio desempeñan un papel fundamental para regular la hidrología y el desarrollo de factores de estrés como humedad relativa o evaporación, con los cuales mostraron correlación esta especie. La reconstrucción no fue tan efectiva como en el caso de *Cedrelinga odorata*.

Los resultados encontrados muestran coeficientes de correlación y respuesta significativos, sin embargo, las magnitudes no se reproducen adecuadamente debido al limitado número de muestras forestales con potencialidad dendroclimatológica obtenidas. Es necesario continuar con el proceso de exploración para que el número de muestras de las especies seleccionadas sea el ideal.

6.2.Recomendaciones

Ubicar un bosque de cedros e incrementar el número de árboles muestreados ej. $n = 30$ árboles para mejorar la resolución de la calibración y generar series maestras, cuando la cronología se desarrolla por debajo de 10 o 20 árboles, las variaciones de crecimiento de cada árbol pueden abrumar la señal climática, así también pueden aumentar la varianza al comienzo de la cronología.

Para realizar un *crossdating* mucho más preciso se debe contar en la medida de lo posible con un disco de madera (sección transversal) obtenido de la tala de árboles que estén en proceso de putrefacción y/o próximos a caer por estar ubicados cerca de pendientes.

Al culminar la toma de muestras, se recomienda pegar inmediatamente la muestra al soporte debido a que existen maderas que se retuercen como es el caso de la *Cedrela odorata* y por ello tienden a esconder o tapar los anillos de crecimiento.

Finalmente es importante limpiar el barreno con aceites lubricantes y anticorrosivos para evitar que la resina y sabia de los árboles llegue a corroer el acero.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Abdoun, F., Jull, A. J. T., Guiball, F., & Thinon, M. (2005). Radial growth of the Sahara's oldest trees: *Cupressus dupreziana* A. Camus. *Trees*, *19*, 661–670.
- Ahrens, D., & Henson, R. (2018). *Essentials of Meteorology*. Boston: Cengage.
- Armenta Porras, G. (2016). *ANÁLISIS DE TENDENCIAS CLIMÁTICAS Y EVENTOS CLIMÁTICOS EXTREMOS PARA ECUADOR*. 48.
- Baker, J. C. A., Hunt, S. F. P., Clerici, S. J., Newton, R. J., Bottrell, S. H., Leng, M. J., ... Brienen, R. J. W. (2015). Oxygen isotopes in tree rings show good coherence between species and sites in Bolivia. *Global and Planetary Change*, *133*, 298–308. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2015.09.008>
- Bradley, R. S., & Elias, S. A. (2015). PALEOCLIMATOLOGY: Reconstructing Climates of the Quaternary. In *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* (Vol. 31). <https://doi.org/10.2307/1552264>
- Bräuning, A. (2019). Dendroclimatology: concepts, approaches, techniques, limitations. *FUNDAMENTOS Y APLICACIONES DE DENDROCRONOLOGÍA Y ANATOMÍA DE LA MADERA*, 73. Loja, Ecuador.
- Bräuning, A., & Burchardt, I. (2006). *Detection of growth dynamics in tree species of a tropical mountain rain forest in southern Ecuador*. 127–131.
- Brienen, R., Helle, G., Pons, T., Guyot, J., & Gloor, M. (2012, October). Oxygen isotopes in tree rings are a good proxy for Amazon precipitation and El Niño-Southern Oscillation variability. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *109*(42), 16957–16962. <https://doi.org/10.1073/pnas.1205977109>
- Brienen, R., Schöngart, J., & Zuidema, P. (2016). *Tree Rings in the Tropics: Insights into the Ecology and Climate Sensitivity of Tropical Trees*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-27422-5_20
- Bunn, A. G. (2008). A dendrochronology program library in R (dplR). *Dendrochronologia*, *26*(2), 115–124. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2008.01.002>

- Bunn, A. G. (2010). Statistical and visual crossdating in R using the dplR library. *Dendrochronologia*, 28(4), 251–258. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2009.12.001>
- Buras, A. (2017). A comment on the expressed population signal. *Dendrochronologia*, 44, 130–132. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2017.03.005>
- Cáceres, L., Mejía, R., & Ontaneda, G. (1998). Evidencias del cambio climático en Ecuador. *Bulletin de l'Institut français d'études andines*, 27(3). Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=12627319>
- Cámara Artigas, R., & Díaz del Olmo, F. (2013). Muestreo en transecto de formaciones vegetales de fanerófitos y caméfitos (I): fundamentos metodológicos. *Estudios Geográficos*, 74(274), 67–88. <https://doi.org/10.3989/estgeogr.201303>
- Campos, L. E. (2009). Dendrocronología en árboles de Tornillo, *Cedrelinga cateniformis* Ducke (Fabaceae), del Centro de Investigaciones Jenaro Herrera en el noreste de la Amazonia, Región Loreto – Perú. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Campozano, L., Célleri, R., Trachte, K., Bendix, J., & Samaniego, E. (2016). Rainfall and Cloud Dynamics in the Andes: A Southern Ecuador Case Study. *Advances in Meteorology*, 2016, 1–15. <https://doi.org/10.1155/2016/3192765>
- Campozano, L., Trachte, K., Célleri, R., Samaniego, E., Bendix, J., Albuja, C., & Mejia, J. F. (2018). Climatology and Teleconnections of Mesoscale Convective Systems in an Andean Basin in Southern Ecuador: The Case of the Paute Basin. *Advances in Meteorology*, 2018, 1–13. <https://doi.org/10.1155/2018/4259191>
- Cerón, C. (2015). *Bases para el estudio de la flora ecuatoriana* (Primera Ed). Quito: Editorial Universitaria, Universidad Central del Ecuador.
- Cerón Martínez, C. E. (2005). *MANUAL DE BOTÁNICA, Sistemática, Etnobotánica y Métodos de Estudio en el Ecuador*. Quito: Herbario “Allfredo Paredes” QAP, Escuela de Biología de la Universidad Central del Ecuador.
- Chambers, J. Q., Higuchi, N., & Schimel, J. P. (1998). Ancient trees in Amazonia.

Nature, 391(6663), 135–136. <https://doi.org/10.1038/34325>

- Constantin, S., Toulkeridis, T., Moldovan, O. T., Villacís, M., & Addison, A. (2018). Caves and karst of Ecuador – state-of-the-art and research perspectives. *Physical Geography*, 40(1), 28–51. <https://doi.org/10.1080/02723646.2018.1461496>
- Cook, E. R. (1990). *Methods of Dendrochronology* (E. R. Cook & L. A. Kairiukstis, Eds.). <https://doi.org/10.1007/978-94-015-7879-0>
- Cronin, T. M. (2009). *Paleoclimates, Understanding Climate Change Past and Present* (Georgetown). New York, United States: COLUMBIA UNIVERSITY PRESS.
- Cybis Elektronik. (2010). CDendro and CooRecorder.
- Dreybrodt, W., Gabrovšek, F., & Romanov, D. (2005). *Processes of Speleogenesis: A Modeling Approach*. Postojna: Carsologica.
- Elias, S. A., & Mock, C. J. (2013). *Encyclopedia of Quaternary Science*. Amsterdam, Netherlands.
- Espinoza, J., Ronchail, J., Guyot, J.-L., Cochonneau, G., Filizola Jr, N., Lavado, W., ... Vauchel, P. (2009). Spatio-temporal rainfall variability in the Amazon basin countries (Brazil, Peru, Bolivia, Colombia, and Ecuador). *International Journal of Climatology*, 29, 1574–1594. <https://doi.org/10.1002/joc.1791>
- Friedman, J. H. (1984). A Variable Span Smoother. *Journal of American Statistical Association*, 1984(October), LCS-TR-5.
- Fritts, H. C. (1976). Tree Rings and Climate. In *The Journal of Applied Ecology* (Vol. 15). <https://doi.org/10.2307/2402947>
- Garcia, M., Villalba, F., Araguas, L. A., & Rozanski, K. (1998). *The role of atmospheric circulation patterns in controlling the regional distribution of stable isotope contents in precipitation: Preliminary results from two transects in the Ecuadorian Andes*. 127–140. Retrieved from papers3://publication/uuid/DB7019D2-6B6B-47C3-B272-6FA99DC3AE06

- Giraldo, J. (2012). *Anillos , clima y actividad solar*. (January 2012), 66. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1485.6085>
- Goldstein, G., & Santiago, L. S. (2016). *Tropical Tree Physiology* (G. Goldstein & L. S. Santiago, Eds.). <https://doi.org/10.1007/978-3-319-27422-5>
- Gomes, V. H. F., Vieira, I. C. G., Salomão, R. P., & ter Steege, H. (2019). Amazonian tree species threatened by deforestation and climate change. *Nature Climate Change*, 9(7), 547–553. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0500-2>
- Grissino-Mayer, H. (2003). A manual and tutorial for the proper use of an increment borer. *Tree-Ring Research*, 59(2), 63–79.
- Gutierrez-Garcia, G., & Ricker, M. (2014). *Manual para tomar virutas de madera con el barreno de Pressler en el Inventario Nacional Forestal y de Suelos*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2730.9925>
- Hammer, O., Harper, D., & Ryan, P. (2001). PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. *Palaeontologia Electronica*, 4, 1–9.
- Harris, I., Jones, P. D., Osborn, T. J., & Lister, D. H. (2014). Updated high-resolution grids of monthly climatic observations - the CRU TS3.10 Dataset. *International Journal of Climatology*, 34(3), 623–642. <https://doi.org/10.1002/joc.3711>
- Hughes, M. K., Swetnam, T. W., & Diaz, H. F. (2011). *Dendroclimatology: Progress and Prospects* (M. K. Hughes, T. W. Swetnam, & H. F. Diaz, Eds.). <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5725-0>
- INEC. (2010). *Censo 2010 de Población y Vivienda*. Quito, Ecuador.
- Inga, J. G., & del Valle, J. I. (2017). Log-relative growth: A new dendrochronological approach to study diameter growth in *Cedrela odorata* and *Juglans neotropica*, Central Forest, Peru. *Dendrochronologia*, 44, 117–129. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2017.03.009>
- IPCC. (2014). *Cambio climático 2014: Informe de síntesis*. Ginebra, Suiza.

- Laraque, A., Ronchail, J., Cochonneau, G., Pombosa, R., & Guyot, J. L. (2007). Heterogeneous Distribution of Rainfall and Discharge Regimes in the Ecuadorian Amazon Basin. *Journal of Hydrometeorology*, 8(6), 1364–1381. <https://doi.org/10.1175/2007JHM784.1>
- Liu, K., & Colinvaux, P. A. (1985). Forest changes in the Amazon Basin during the last glacial maximum. *Nature*, 318(6046), 556–557. <https://doi.org/10.1038/318556a0>
- Martínez-Ramos, M., & Alvarez-Buylla, E. R. (1998). How old are tropical rain forest trees? *Trends in Plant Science, Perspectives*, 3(98), 400–404.
- Masson-Delmotte, V., Schulz, M., Abe-Ouchi, A., Beer, J., Ganopolski, J., Rouco, J. G., ... Timmermann, A. (2013). Information from Paleoclimate Archives. In Intergovernmental Panel on Climate Change (Ed.), *Climate Change 2013 - The Physical Science Basis* (pp. 383–464). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.013>
- McCarroll, D., & Loader, N. J. (2004). Stable isotopes in tree rings. *Quaternary Science Reviews*, 23(7–8), 771–801. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2003.06.017>
- Meinzer, F. C., Lachenbruch, B., & Dawson, T. E. (Eds.). (2011). *Size- and Age-Related Changes in Tree Structure and Function*. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-1242-3>
- Ministerio del Ambiente del Ecuador. (2015a). Corredores de conectividad. Retrieved from Sistema Nacional de Áreas Protegidas del Ecuador website: <http://areasprotegidas.ambiente.gob.ec/es/content/corredores-de-conectividad>
- Ministerio del Ambiente del Ecuador. (2015b). *Metodología para la generación de modelos alométricos para la estimación de la biomasa de árboles y bosques*. Quito.
- Ministerio del Ambiente del Ecuador. (2017). *Tercera Comunicación Nacional del Ecuador sobre Cambio Climático*. Quito, Ecuador, Ecuador.
- Nacimba, M. (2015). *Crecimiento y dendrocronología de Cedrela odorata en un*

bosque de la Amazonía ecuatoriana. Pontificia Universidad Católica del Ecuador.

National Oceanic and Atmospheric Administration. (2019a). Equatorial Pacific Sea Surface Temperatures.

National Oceanic and Atmospheric Administration. (2019b). Paleoclimatology Datasets.

Pacheco León, K. A. (2015). *Estructura de los rodales de *Polylepis reticulada* del Parque Nacional el Cajas. Estado actual para proyección futura en el Marco del Cambio Climático*. Universidad de Cuenca.

Palacios, W. (2016). *Árboles del Ecuador: especies representativas*. Ibarra: Universidad Técnica del Norte.

Pereyra, M. J., Inga, G. J., Santos, M., & Rodríguez, R. (2014). Potencialidad de *Cedrela odorata* (Meliaceae) para estudios dendrocronológicos en la selva central del Perú. *Revista de Biología Tropical*, 62(2), 783–793. <https://doi.org/102118955>.

Pérez, Á., Hernandez, C., Romero-Saltos, H., & Valencia, R. (2014). *Árboles emblemáticos de Yasuní, Ecuador*.

Phipps, R. L. (1985). COLLECTING, PREPARING, CROSSDATING, AND MEASURING TREE AND INCREMENTE CORES. *Water-Resources Investigations Report 85-4148*.

Pucha-Cofrep, D. (2016). *Environmental signals in radial growth , stable isotope variations and nutrient concentration of trees from different forest ecosystems in southern Ecuador Environmental signals in radial growth , stable isotope variations and nutrient concentration of tr* (University of Erlangen-Nuremberg). <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2818.2646>

Pucha-Cofrep, D. (2019). Metodología para la medición de anillos. *FUNDAMENTOS Y APLICACIONES DE DENDROCRONOLOGÍA Y ANATOMÍA DE LA MADERA*, 27–30. Loja, Ecuador.

Pucha-Cofrep, D., Peters, T., & Bräuning, A. (2015). Wet season precipitation

during the past century reconstructed from tree-rings of a tropical dry forest in Southern Ecuador. *Global and Planetary Change*, 133, 65–78. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2015.08.003>

R Core Team. (2013). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria.

Roing, F. A. (2000). *Dendrocronología en América Latina* (Primera). Mendoza: EDIUNC.

Serrano, S., Zuleta Mediavilla, D., Moscoso, V., Jácome, P., Palacios, E., & Villacis, M. (2012). Análisis estadístico de datos meteorológicos mensuales y diarios para la determinación de variabilidad climática y cambio climático en el Distrito Metropolitano de Quito. *La Granja*, 16, 23–47. <https://doi.org/10.17163/lgr.n16.2012.03>

Speer, J. H. (2010). *Fundamentals of Tree-Ring Research*. Retrieved from <https://books.google.hu/books?id=XtxEbCzbKUUC&pg=PA289&lpg=PA289&dq=http://web.utk.edu/~grissino/index.htm&source=bl&ots=MLHUt4QLih&sig=ULk5y7FiAg2Ve5KzvKWtVNPv8YQ&hl=en&sa=X&ved=2ahUKEwii7PDr67DeAhWMxosKHbbjBcYQ6AEwBXoECAkQAQ#v=onepage&q&f=false>

Stahle, D. W. (1999). *Useful strategies for the development of tropical tree-ring chronologies*. 20(3), 249–253.

Suntaxi, E. F. (2010). *Realizar una aproximación dendroclimatológica, en un bosque seco utilizando la especie Guasmo (Guazuma ulmifolia) y su relación con la Precipitación y Temperatura en el Período 1974-2007*. Escuela Superior Politécnica del Litoral.

Sylvestre, F. (2009). *Moisture Pattern During the Last Glacial Maximum in South America*. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2672-9_1

Takahashi, K. (2016). El Fenómeno El Niño en el Perú. *Simposio “Impacto Del Cambio Climático Sobre La Salud,”* 15. Retrieved from <https://rpmesp.ins.gob.pe/public/journals/1/imagenes/Simposio/2016/Takahashi.pdf>

- Trenberth, K., & Staff, N. C. for A. R. (2019). “The Climate Data Guide: Niño SST Indices (Niño 1+2, 3, 3.4, 4; ONI and TNI).” Retrieved from <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/nino-sst-indices-nino-12-3-34-4-oni-and-tni>.
- Victoria, R. L., Martinelli, L. A., Mortatti, J., & Richey, J. (1991). Mechanisms of Water Recycling in the Amazon Basin: Isotopic Insights. *Ambio*, 20(8), 384–387.
- Vimeux, F., Sylvestre, F., & Khodri, M. (2009). *Past Climate Variability in South America and Surrounding Regions* (F. Vimeux, F. Sylvestre, & M. Khodri, Eds.). <https://doi.org/10.1007/978-90-481-2672-9>
- Wigley, T. M. L., Briffa, K. R., & Jones, P. D. (1984). On the Average Value of Correlated Time Series, with Applications in Dendroclimatology and Hydrometeorology. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23(2), 201–213. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1984\)023<0201:OTAVOC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1984)023<0201:OTAVOC>2.0.CO;2)
- Worbes, M., & Nin, E. (2002). *One hundred years of tree-ring research in the tropics - a brief history and an outlook to future challenges*. 2, 217–231.
- Wunder, J., Manusch, C., Queloz, V., Brang, P., Ringwald, V., & Bugmann, H. (2013). Does increment coring enhance tree decay? New insights from tomography assessments. *Canadian Journal of Forest Research*, 43(8), 711–718. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2012-0450>
- Zang, C., & Biondi, F. (2013). Dendroclimatic calibration in R: The bootRes package for response and correlation function analysis. *Dendrochronologia*, 31(1), 68–74. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2012.08.001>
- Zhang, Z., Moore, J. C., & Grinsted, A. (2014). Haar wavelet analysis of climatic time series. *International Journal of Wavelets, Multiresolution and Information Processing*, 12(August), 11. <https://doi.org/10.1142/S0219691314500209>
- Zuidema, P. A., Brienen, R. J. W., & Schöngart, J. (2012). Tropical forest warming: looking backwards for more insights. *Trends in Ecology & Evolution*, 27(4), 193–194. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2011.12.007>

Zúñiga, C. (2012). Aplicación de la dendrocronología para evaluar la influencia de la precipitación y la temperatura en el crecimiento de *Tectona grandis* L.f. procedente del Fundo Génova- Junín. Universidad Nacional Agraria La Molina.

8. ANEXOS

```
#
#Anexo 3: Dendroclimatología tropical en la Región Amazónica: Mera, Pastaza
# Carlosama L. & Herrera M.
#####
# Iniciar con un espacio de trabajo limpio
rm (list = ls())
# Instalar paquetes dplR y bootRes
install.packages("dplR")
install.packages("bootRes")
# Cargar paquetes
library(dplR)
library(bootRes)
# Establecer el sitio de trabajo (Puede variar dependiendo de la ubicación de los documentos)
setwd("C:/Tesis/Anexo 3")
#####
# Ejemplo con series de datos de Cedrela odorata
# Leer el archivo de ancho de anillos
db <- read.rwl("CED_Continentes.csv")
# Graficar en segmentos de datos
spag.plot(db, zfac = 0.0025, res = 1200)
# Detrend con Friedman
db.rwi <- detrend(rwl = db, method = "Friedman")
# Construir la cronología y graficar (Figura 28)
db.crn <- chron(db.rwi, prefix = "CED", biweight = T)
crn.plot(db.crn, add.spline = T, nyrs = 24, spline.line.col = "red",
         spline.lwd = 2, xlab="Año", ylab="Índice de ancho de anillo",
         crn.line.col = "black")
# Graficar wavelet, la frecuencia a lo largo de la cronología (Figura 42)
years <- time(db.crn)
ceducstd <- db.crn[,1]
outwave <- morlet(y1= ceducstd, x1=years, dj = 0.1, siglvl = 0.99)
wavelet.plot(outwave)
# Desarrollo de estadísticas de las series (Tabla 7)
db.stats <- rwl.stats(db)
db.ids <- read.ids(db.rwi, stc = c(2,4,2))
db.rwi.stats <- rwi.stats(db, ids = db.ids)
#####
# Datos meteorológicos
tshell <- read.csv2("Shell_temp_mean.csv", header = T)
pshell <- read.csv2("Shell_prec_mean.csv", header = T)
tshellmax<-read.csv2("Shell_temp_max.csv",header = T)
tshellmin<-read.csv2("Shell_temp_min.csv",header = T)
hshell<-read.csv2("Shell_humi_mean.csv",header = T)
tpuyo <- read.csv2("Puyo_temp_mean.csv", header = T)
ppuyo <- read.csv2("Puyo_prec_mean.csv", header = T)
tpuyomax<-read.csv2("Puyo_temp_max.csv",header = T)
tpuyomin<-read.csv2("Puyo_temp_min.csv",header = T)
hpuyo<-read.csv2("Puyo_humi_mean.csv",header = T)
epuyo<-read.csv2("Puyo_evap_mean.csv", header = T)
tcru<-read.csv2("CRU_temp_mean.csv",header = T)
pcru<-read.csv2("CRU_prec_mean.csv",header = T)
enso1_2<-read.csv2("ENSO1+2.csv",header = T)
enso3_4<-read.csv2("ENSO3.4.csv",header = T)
# Calibración de coeficientes de correlación y respuesta
# method son los coeficientes / corr = correlación y response = respuesta
# ci determina el nivel de confianza / 0.1 = 90%, 0.05 = 95% y 0.1 = 90%
# Temperatura media y precipitación (Figura 34)
calshell<-dendroclim(db.crn,list(tshell),method="corr",
```

```

vnames = c("Temperatura Shell"),
start = 1,end=12,boot=TRUE,ci=0.1,sb=F)
dcplot(calshell)
calcru<-dendroclim(db.crn,list(pcru),method="response",
vnames = c("Precipitación CRU"),
start = 1,end=12,boot=TRUE,ci=0.01,sb=F)
dcplot(calcru)
# Temperatura máxima, mínima y humedad (Figura 35)
calpuyo<-dendroclim(db.crn,list(tpuyomax,tpuyomin,hpuyo),method="corr",
vnames = c("Temperatura máxima",
"Temperatura mínima", "Humedad"),
start = 1,end=12,boot=TRUE,ci=0.1,sb=F)
dcplot(calpuyo)
# Evaporación y ENSO 3.4 (Figura 36)
calpuyo2<-dendroclim(db.crn,list(epuyo,enso3_4),method="corr",
vnames = c("Evaporación", "ENSO 3.4"),
start = 1,end=12,boot=TRUE,ci=0.1,sb=F)
dcplot(calpuyo2)
# Funciones de respuesta móvil (Figura 37B)
ced.calpuyo <- mdcc(db.crn, list(tpuyomin),
vnames = c("Temp"), start = 1, end = 12,
method="response", ci=0.01,win.size = 25,
win.offset = 2)
mdcplot(ced.calpuyo)
#####

```

Anexo 1. Códigos utilizados para el análisis dendroclimático, acceda al siguiente link: https://drive.google.com/drive/folders/1B0EcY7_usVtCgCju-IkP_3ezcdRGlg-1?usp=sharing, descargue los documentos en el disco local C:// y utilice RStudio.



DIRECCION PROVINCIAL DEL AMBIENTE DE PASTAZA
AUTORIZACIÓN DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA DE FLORA

AC-FLO-DPAP/MAE-2019-003

El Ministerio del Ambiente, en uso de sus atribuciones que le confiere La Normativa Ambiental Vigente de Conservación de Áreas Naturales y Vida Silvestre, autoriza a:

MSc.Ph.D. Sheila Serrano Vincenti. C.C. 1710267574. Coordinación.

Tesistas Investigadores

Liseth Carlosama

Madison Herrera

Docentes Investigadores

PhD. (c) Sheila Serrano

Dr. Marco Cerna

Equipo de Investigadores

Dr. László Palcsu

Dr. Marjan Temovski

Dr. Élemer Laszló

PhD. (c) Danny Vargas.

Para que lleven a cabo el Proyecto **"RECONSTRUCCION PALEOCLIMATICO EN LA REGION AMAZONICA: MERA PASTAZA"**

.De acuerdo a las siguientes especificaciones:

1.- Solicitud del ingresada por la MSc.Ph.D. Sheila Serrano Vincenti. C.C.1710267574. Coordinadora del Proyecto.

2.- Valoración técnica del proyecto: Lic. Víctor Curicama, Responsable de Biodiversidad de la DPAP.

3.- Institución Científica Extranjera: Isotope Climatology and Environmental Research Center (ICER)

4.- Institución científica Nacional responsable: Centro de Investigaciones en Modelamiento Ambiental CIMA- UPS

5.- Contraparte del Ministerio del Ambiente: Dirección Provincial Pastaza.

- Director. Ing. Jimmy Guerrero
- Responsable de Biodiversidad: Lic. Víctor Curicama

6.- Complementos autorizados de la Investigación: NINGUNA.

7.- Cantidad de especímenes a colectarse: Flora

Se colectará 1 esta estalagmita por cueva, siendo la población muestra n=3.

Muestras con el barreno serán de 20 árboles.

10 Muestras vegetales (Hojas, flores y frutos.) Total 30 muestras.



8.- Vigencia: La vigencia de este permiso de investigación es de un año calendario desde su fecha de expedición que es desde el 28 de febrero del 2019 hasta el 28 de febrero del 2020.

9.- Obligaciones del Investigador:

- a) Entregar tres (3) copias de formato impreso y digital (formato PDF) de los resultados finales del investigador en idioma castellano.
- b) Entregar copias de las fotografías (impreso y digital) y/o video que formen parte de la investigación en el trabajo final.
- c) Entregar al Ministerio del Ambiente el registro de las especies objeto de su investigación, en formato digital incluyendo la localización exacta de los especímenes observados o muestras colectadas en coordenadas UTM WGS 84 17 SUR.

10.- Obligaciones de la Institución Científica Nacional Responsable:

- a) Cumplir con los plazos de entrega de informes finales o parciales.
- b) Informar a las dependencias correspondientes del Ministerio del Ambiente sobre irregularidades cometidas por el investigador.

11.- Del cumplimiento de las obligaciones dispuestas en los numerales 6, 7, 8, 9, 10, de respetar y hacer cumplir los aspectos legales, administrativos y técnicos a los que el investigador este obligado a ejecutar, se responsabiliza al: MSc.Ph.D. Sheila Serrano Vincenti C.C. 1710267574

12.- Plazo para la entrega del informe final de investigación: 13 febrero del 2020.

13.- Estas muestras no podrán ser utilizadas en cualquier actividad de Bioprospección ni Acceso al Recurso Genético sin la correspondiente Autorización del Ministerio del Ambiente del Ecuador.


Ing. Jimmy Ivan Guerrero Naranjo

DIRECTOR PROVINCIAL DEL AMBIENTE DE PASTAZA





OBLIGACIONES Y CONDICIONES PARA LA VIGENCIA DEL PERMISO DE INVESTIGACIÓN

1. Se autoriza la investigación en la provincia de Pastaza, jurisdicción de la dirección provincial del ministerio del ambiente de Pastaza.
2. Se realizarán muestras de las especies de flora .
3. Se autoriza la utilización de los siguientes materiales y/o equipos para la realización de esta investigación:

MATERIALES

- Sorbetes
 - Prensas
 - Papel periódico
 - Correos
 - Píolas
 - Plásticos de burbujas
 - Cajas
4. Todos los individuos o elementos constitutivos de esta investigación deberán ser preservados y depositados en una unidad de manejo autorizada por el ministerio del ambiente los duplicados de los ejemplares o subproductos colectados en esta investigación deberán ser ingresados, entregados a la colección de una unidad de manejo autorizado por el ministerio del ambiente quien certificará el ingreso de los mismos.
 5. De existir muerte accidental de el/los individuos capturados en esta investigación, deberá ser taxidermado y depositado en una unidad de manejo autorizado por el ministerio del ambiente, quien certifica el ingreso a su colección.
 6. **En el caso de encontrarse nuevas especies, deberá notificarse a la dirección nacional de biodiversidad y dirección provincial Pastaza** para la respectiva autorización de su publicación. Los tipos deberán depositarse en una unidad de manejo autorizada por el ministerio del ambiente.
 7. Los resultados de esta investigación deberán ser entregados al ministerio del ambiente, dirección provincial de Pastaza conforme lo establece la legislación ambiental vigente.
 8. Para el ingreso a áreas de propiedad privada los investigadores deberán contar con la autorización del respectivo propietario.
 9. Para la movilización de todos los ejemplares colectados el investigador deberá contar con la respectiva orden de movilización emitida por las direcciones provinciales del ministerio del ambiente.
 10. Para el ingreso a áreas del sistema nacional de áreas protegidas, los investigadores deberán coordinar el ingreso y contar con la respectiva autorización del responsable de área.
 11. Esta autorización de investigación científica podrá ser renovada anualmente previo al cumplimiento de las obligaciones contraídas por el investigador, entrega y aprobación de informes parciales o finales en las fechas indicadas.
 12. Se solicitará prórroga quince días antes de la fecha de vencimiento que indica este documento en el cual deberá manifestarse la razón de la prórroga.
 13. El registro de la localización exacta de los especímenes colectados u observados así como fotografías, incluyendo información sobre las coordenadas geográficas, deberá ser entregado en formato digital pdf, para su ingreso a la página web del ministerio del ambiente.
 14. Todo uso indebido de esta autorización, así como el incumplimiento de las obligaciones y condiciones legales, administrativas o técnicas establecidas en esta autorización, serán sancionadas de acuerdo a la codificación a la ley forestal y de conservación de áreas naturales y vida silvestre y al texto unificado de la legislación ambiental secundaria.
 15. Tasa por autorización: con orden de cobro para la autorización del permiso de investigación N° 000001723



GUÍA DE MOVILIZACIÓN DE ESPECÍMENES DE FLORA Y FAUNA SILVESTRE
Nro. DPAP-UPN-VC-2019-019

Fecha de emisión: 14/marzo/2019

Fecha de movilización: 14/marzo/2019 - 14h00

Válido hasta: 15/marzo/2019 - 14h00

La Dirección Provincial de Pastaza, Autoriza a: Ph.D. Sheila Vincenti, Director, Centro de Investigación en Modelamiento Ambiental CIMA-UPS, la movilización de muestras de flora silvestre, desde: Canto Mera -Provincia de Pastaza, hacia: Universidad Politécnica Salesiana – Herbario Nacional. Quito-Pichinch. de acuerdo a la siguiente lista:

1.- Cuadro de Información N°1.

N°	Muestras vegetales	Cantidad
1	Meliaceae	12
2	Fabaceae	18
	Muestras con el barreno	
3	Meliaceae	18
4	Fabaceae	27
	Total	75

Observaciones:

Los especímenes o elementos constitutivos se movilizarán en:

Marca: Hawal Tipo: Camioneta doble cabina Color: Rojo Placa: PCW 9682
 Conductor: Madison Herrera . C.I. No. 171884890-4

Los especímenes van en calidad de:

- Traslado de centro de manejo ()
- Comercio: ()
- Investigación: (X) Nombre de la Investigación:

Desde: La universidad Estatal Amazónica, Provincia de Pastaza N° de permiso de investigación. MAE-DNB-CM-2018-0087

Hasta: DHL (Correo ubicado en las) Av. Eloy Alfaro 113A, Quito 170144- Quito- Pichincha

Firmas de responsabilidad:


 Lcdo. Victor Curicama
 Responsable de Biodiversidad DPAP.
 C.I. 171909902-8


 Srta. Lisseth Carlosama
 Coordinadora del Proyecto
 C.I. 1724823701

Anexo 3. Permiso de movilización

9. GLOSARIO

Anóxico. - sin oxígeno.

Cambium. - tejido vegetal de los árboles localizado entre la corteza y la madera.

Datación. - determinar la edad de un objeto.

Dormancia. - periodo que se suspende el crecimiento de un organismo o planta.

Dosel. - copa del árbol.

Espeleotema. - formación rocosa compuesta de minerales presentes en las cuevas.

Estribación. - grupo de elevaciones bajas ubicadas a los lados de la cordillera.

Evapotranspiración. - resultado evaporación del agua de la superficie y de la transpiración de los seres vivos.

Follaje. - conjunto de ramas y hojas en los árboles.

Fuste. - tronco del árbol.

Lag. – retardo excesivo.

Morfo especie. – especie no identificada taxonómicamente.

Muestra botánica. - colección de hojas, flores, frutos o corteza de los árboles.

Núcleos de madera. - muestras de madera obtenidas del árbol con el barreno Pressler.

Transecto. - delimitación de una línea o trayectoria que abarque árboles o especies representativas para la investigación.

Trocha. - camino o sendero.