

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

LA MOLINA

Facultad de Ciencias Forestales



**Evaluación de la influencia de la
precipitación y temperatura en el
crecimiento de *Pinus patula* y *Pinus
muricata* en plantaciones de la Granja
Porcon (Perú) a través de técnicas
dendrocronológicas**

Tesis para optar el Título de
INGENIERO FORESTAL

Juan Carlos Domínguez Varas

Lima – Perú
2014

RESUMEN

El presente trabajo aplica el análisis dendrocronológico para obtener información registrada en el leño, y evaluar la influencia de los factores climáticos como la precipitación y temperatura en el crecimiento de los árboles de *Pinus patula* y *Pinus muricata* en plantaciones de granja Porcón. Para tal fin se tomaron 3 a 4 muestras radiales de 35 árboles de cada una, en rodales puros y próximos. Por medio de los anillos de crecimiento se determinó la edad de los árboles; y con ayuda de los programas COFECHA, ARSTAN y RESPO se definió la variable climática de mayor influencia en el crecimiento de los árboles. La plantación tiene una edad de 22 años, y tanto en la especie *P. patula* como en *P. muricata* la variable climática de mayor influencia en el crecimiento de los árboles fue la precipitación. Posteriormente, con los valores de ancho de anillos se modelaron ecuaciones matemáticas para describir el crecimiento de cada especie, a través del programa Curve Expert v. 2.0.2., seleccionando por medio de un análisis estadístico el modelo Chapman-Richards por presentar un mejor ajuste de los datos. El modelamiento del crecimiento muestra que, a los 25 años de edad, el rodal de *P. patula* presenta mayor tasa de crecimiento (1.13cm/año) que el rodal de *P. muricata* (0.88cm/año). Por último, las curvas de área basal de incremento corriente anual (ICA) e incremento medio anual (IMA) indican que ambas especies de pino se encuentran en la edad técnica de corte, por lo que se recomienda la aplicación de técnicas de raleos.

Palabras claves: Dendrocronología, Anillos de crecimiento, *Pinus patula*, *Pinus muricata*, Modelo Chapman-Richards.

K10,
D65
T

ÍNDICE

	Página
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTOS	IV
RESUMEN	V
ÍNDICE	VI
LISTA DE CUADROS	VIII
LISTA DE FIGURAS	IX
1. INTRODUCCIÓN	1
2. REVISIÓN DE LITERATURA	2
2.1 LA REGIÓN CAJAMARCA Y GRANJA PORCÓN.....	2
2.2 ESPECIES.....	2
2.2.1 <i>Pinus patula</i>	2
2.2.2 <i>Pinus muricata</i>	4
2.3 ANILLOS DE CRECIMIENTO Y FACTORES QUE INFLUYEN EN SU FORMACIÓN.....	6
2.4 LA DENDROCRONOLOGÍA.....	7
2.4.1 <i>Principios de la Dendrocronología</i>	7
2.4.2 <i>El clima y su relación con la Dendrocronología (Dendroclimatología)</i>	9
2.4.3 <i>La estacionalidad y su relación con la Dendrocronología</i>	11
2.4.4 <i>La Dendrocronología como Estimación del Crecimiento de árboles</i>	12
2.5 ANÁLISIS DE FUSTE.....	13
2.6 CRECIMIENTO DE LOS ÁRBOLES.....	14
2.7 MODELOS MATEMÁTICOS DE CRECIMIENTO.....	16
3. MATERIALES Y MÉTODOS	18
3.1 SELECCIÓN DE ÁREA DE ESTUDIO.....	18
3.1.1 <i>Selección de áreas de muestreo</i>	19
3.2 LEVANTAMIENTO DE INFORMACIÓN, SELECCIÓN Y COLECCIÓN DE MUESTRAS.....	20
3.3 RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE SERIES METEOROLÓGICAS.....	22
3.4 ANÁLISIS DENDROCRONOLOGICO.....	22
3.4.1 <i>Preparación de los tarugos obtenidos</i>	22
3.4.2 <i>Demarcación, digitalización y medición de los anillos de crecimiento</i>	23
3.4.3 <i>Sincronización (COFECHADO) y obtención de series maestras</i>	25
3.4.4 <i>Obtención de las series cronológicas</i>	25
3.5 ANÁLISIS DENDROCLIMATOLÓGICO.....	28
3.6 ANÁLISIS DENDROECOLÓGICO.....	28
3.6.1 <i>Modelamiento del crecimiento diamétrico</i>	29
3.6.2 <i>Validación de modelos de crecimiento</i>	30
3.6.3 <i>Determinación de la tasa de crecimiento, INCREMENTO CORRIENTE ANUAL (ICA) e INCREMENTO MEDIO ANUAL (IMA)</i>	30

43779

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	31
4.1 ANÁLISIS DENDROCRONOLÓGICO	31
4.1.1 <i>VARIABILIDAD DEL ANCHO DE LOS ANILLOS DE CRECIMIENTO</i>	31
4.1.2 <i>Sincronización (COFECHADO) y/o control de calidad de los anillos de crecimiento</i>	31
4.1.3 <i>Obtención de cronologíaS</i>	34
4.2 ANÁLISIS DENDROCLIMATOLÓGICO.....	35
4.2.1 <i>VARIABLES CLIMÁTICAS Y SU CORRELACIÓN CON LAS CRONOLOGÍAS DE P. patula y P. muricata</i>	35
4.2.2 <i>Respuesta climática en el crecimiento de los árboles: DENDROCLIMATOLOGÍA</i> 37	
4.3 ANÁLISIS DENDROECOLÓGICO.....	42
4.3.1 <i>Crecimiento diamétrico de los árboles</i>	42
4.3.2 <i>Modelamiento del crecimiento diamétrico</i>	44
4.3.3 <i>Validación del modelo de crecimiento</i>	53
4.3.4 <i>Comparación de tasas de crecimiento diamétrico</i>	55
4.3.5 <i>Análisis del incremento corriente anual (ICA) e incremento medio anual (IMA)</i> .58	
5. CONCLUSIONES.....	60
6. RECOMENDACIONES.....	61

Lista de cuadros

	Página
CUADRO 1 CONTROL DE CALIDAD DE SERIES REALIZADO POR EL PROGRAMA COFECHA	34
CUADRO 2 COEFICIENTES DE CORRELACIÓN PEARSON PARA LA RELACIÓN ENTRE ÍNDICES DE ANCHOS DE ANILLOS (SERIE CRONOLÓGICAS) DE <i>P. PATULA</i> Y <i>P. MURICATA</i> , Y LOS VALORES MENSUALES DE PRECIPITACIÓN TOTAL (MM) Y TEMPERATURA MEDIA (°C). NIVEL DE SIGNIFICANCIA 0.3.....	38
CUADRO 3 MODELOS DE CRECIMIENTO Y ESTADÍSTICOS PROBADOS CON DATOS TOTALES DE EDAD Y DIÁMETRO ACUMULADO PARA <i>P. PATULA</i> Y <i>P. MURICATA</i>	46
CUADRO 4 MODELOS DE CRECIMIENTO Y ESTADÍSTICOS PROBADOS CON DATOS MÁS REPRESENTATIVOS DE EDAD Y DIÁMETRO ACUMULADO PARA <i>P. PATULA</i> Y <i>P. MURICATA</i> .	52
CUADRO 5 CRITERIOS ESTADÍSTICOS Y PARÁMETROS DEL MODELO DECRECIMIENTO CHAPMAN RICHARDS VALIDADO CON EL 10 POR CIENTO DE LOS DATOS.....	53
CUADRO 6 TASA DE CRECIMIENTO DIAMÉTRICO DE <i>P. PATULA</i> Y <i>P. MURICATA</i>	57

Lista de figuras

Página

FIGURA 1 CURVAS DE CRECIMIENTO ACUMULADO SIGMOIDEA TÍPICA (ARRIBA) Y CURVAS DE CRECIMIENTO ICA – IMA (ABAJO).....	15
FIGURA 2 UBICACIÓN DE ÁREA DE ESTUDIO: GRANJA PORCÓN-CAJAMARCA.	18
FIGURA 3 DISTRIBUCIÓN DE PARCELAS DE MUESTREO EN QUEBRADA CUSHURO, GRANJA PORCÓN.	19
FIGURA 4 HISTOGRAMA DE FRECUENCIA DE NÚMERO DE ÁRBOLES A BARRENAR POR CLASE DIAMÉTRICA.	20
FIGURA 5 (A) BARRENADO DE ÁRBOL CON BARRENO PRESSLER; (B) EXTRACCIÓN DE TARUGOS DEL LEÑO, (C) COLECCIÓN DE TARUGOS, (D) SELLADO DE ORIFICIO GENERADO EN EL BARRENADO.	21
FIGURA 6 (A) MATERIALES PARA MONTADO DE MUESTRAS; (B) MONTADO DE MUESTRAS; (C) MUESTRAS ACONDICIONADAS; (D) PULIDO DE SECCIÓN TRANSVERSAL DE MUESTRAS.	23
FIGURA 7 (A, B) DEMARCACIÓN DE ANILLOS DE CRECIMIENTO; (C) DIGITALIZACIÓN DE MUESTRAS, (D) RADIOS DIGITALIZADOS.	24
FIGURA 8 VARIABILIDAD DE ANCHO DE ANILLOS EN <i>P. PATULA</i> (A) Y <i>P. MURICATA</i> (B).....	31
FIGURA 9 SERIES INDIVIDUALES DEL ANCHO DE ANILLOS CON SEÑAL COMÚN EN <i>P. PATULA</i> (A) Y <i>P. MURICATA</i> (B).....	32
FIGURA 10 SERIES MAESTRAS (ÍNDICES) DE <i>P. PATULA</i> Y <i>P. MURICATA</i> OBTENIDAS CON EL PROGRAMA COFECHA	33
FIGURA 11 SERIES CRONOLÓGICAS DESPUÉS DE LA REMOCIÓN DE TENDENCIAS CON EL PROGRAMA ARSTAN (LÍNEAS CONTINUAS) EN <i>P. PATULA</i> (A) Y <i>P. MURICATA</i> (B).	35
FIGURA 12 TEMPERATURA Y PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL REGISTRADA EN GRANJA PORCÓN	36
FIGURA 13 (A) PRECIPITACIÓN ANUAL ACUMULADA (MM) Y (B) TEMPERATURA MEDIA ANUAL (°C) VERSUS SERIES CRONOLÓGICAS DE <i>P. PATULA</i> (LÍNEA PUNETADA) Y <i>P. MURICATA</i> (LÍNEA CONTINUA)	37
FIGURA 14 CORRELACIÓN ENTRE LOS ÍNDICES DE ANILLOS DE CRECIMIENTO CON LAS VARIABLES CLIMÁTICAS MENSUALES DE PRECIPITACIÓN (A) Y TEMPERATURA (B) EN LA ESPECIE <i>P. PATULA</i>	40
FIGURA 15 CORRELACIÓN ENTRE LOS ÍNDICES DE ANILLOS DE CRECIMIENTO CON LAS VARIABLES CLIMÁTICAS MENSUALES DE PRECIPITACIÓN (A) Y TEMPERATURA (B) EN LA ESPECIE <i>P. MURICATA</i>	42
FIGURA 16 DESCRIPCIÓN DEL CRECIMIENTO ACUMULADO EN DIÁMETRO DE LOS ÁRBOLES DE <i>P. PATULA</i> (A) Y <i>P. MURICATA</i> (B).....	43
FIGURA 17 CURVAS DE CRECIMIENTO ACUMULADO OBTENIDAS CON EL MODELO CHAPMAN RICHARDS EN SERIES TOTALES	48
FIGURA 18 DISTRIBUCIÓN DE RESIDUALES PARA EL MODELO CHAPMAN RICHARDS EN SERIES TOTALES; DONDE; DONDE $P > 5$ POR CIENTO, PATRÓN DE NORMALIDAD NO IMPROBABLE	49
FIGURA 19 CURVAS DE CRECIMIENTO ACUMULADO OBTENIDAS CON EL MODELO CHAPMAN RICHARDS EN SERIES CON VALORES MÁS REPRESENTATIVOS	50

FIGURA 20 DISTRIBUCIÓN DE RESIDUALES PARA EL MODELO CHAPMAN RICHARDS EN SERIES CON VALORES MÁS REPRESENTATIVOS; DONDE; DONDE $P > 5$ POR CIENTO, PATRÓN DE NORMALIDAD NO IMPROBABLE.....	51
FIGURA 21 DISTRIBUCIÓN DE RESIDUALES PARA EL MODELO AJUSTADO CHAPMAN-RICHARDS CON EL 10 POR CIENTO DE LOS DATOS TOTALES EN <i>P. PATULA</i> (A) Y <i>P. MURICATA</i> (B); DONDE $P > 5$ POR CIENTO, PATRÓN DE NORMALIDAD NO IMPROBABLE.....	54
FIGURA 22 CRECIMIENTO DIAMÉTRICO ACUMULADO MODELADO PARA 25 AÑOS.....	56
FIGURA 23 COMPARACIÓN ENTRE LAS CURVAS ICA E IMA EN <i>P. PATULA</i> (A) Y <i>P. MURICATA</i> (B).	58

1. INTRODUCCIÓN

El crecimiento de los árboles queda registrado en la estructura anatómica de la madera y está relacionado directamente a factores climáticos y de sitio; su análisis puede brindar información suficiente sobre la edad y tasa de crecimiento anual de un bosque. La necesidad de predecir el crecimiento de las masas forestales y su respuesta a las actuaciones silvícolas ha sido y es uno de los objetivos fundamentales de la investigación forestal, ya que la clave para una correcta gestión radica en un profundo conocimiento de los procesos de crecimiento. En este escenario surge la Dendrocronología como una herramienta importante para la reconstrucción del crecimiento de los árboles, con la aplicación inmediata en los planes de manejo forestal sostenible; ya que si se evalúa el crecimiento a través de los anillos de árboles, se podría obtener datos del ritmo de crecimiento de las especies tanto en diámetro como en altura, lo que permitiría tomar decisiones adecuadas en las técnicas de manejo del bosque, contribuyendo de esta forma a la mejora de la calidad de la madera.

En las últimas décadas la Dendrocronología ha permitido estudiar la relación entre la anatomía de los árboles y la tasa de crecimiento, variaciones climáticas y fenología de distintas especies forestales en el mundo; sin embargo, en el Perú son escasos los estudios que utilizan las técnicas dendrocronológicas como metodología para determinar dichas relaciones; a pesar de contar con varias especies forestales potenciales para este tipo de estudios. Actualmente, en la granja Porcón - Cajamarca existen plantaciones forestales de pino, en las cuales se han llevado a cabo pocos monitoreos de crecimiento a través de parcelas permanentes; y a su vez, se vienen aplicando técnicas silviculturales de manera empírica y fuera del turno oportuno de corta; por ello que, estudios basados en Dendrocronología pueden resultar de utilidad para el manejo adecuado del recurso forestal en Porcón, contribuyendo a la mejora de la productividad y gestión del bosque.

Por ello, el presente trabajo busca comprobar estadísticamente la anualidad en la formación de los anillos de crecimiento en *Pinus patula* y *Pinus muricata* de las plantaciones forestales de granja Porcón; para determinar la influencia de la precipitación y temperatura en el crecimiento de los árboles. Asimismo, determinar la tasa de crecimiento anual y comparar el crecimiento diamétrico de los árboles en ambas especies de pino.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 LA REGIÓN CAJAMARCA Y GRANJA PORCÓN

El departamento de Cajamarca, situado en la zona norte del país, se extiende a lo largo de la cadena occidental de los andes, y abarca zonas de sierra y selva. Tiene una superficie de 33 318 km², que representa el 2.6 por ciento del territorio nacional, y políticamente está constituido por 13 provincias y 127 distritos (MINCETUR, 2004).

El potencial económico que se encuentra en la Región Cajamarca se sustenta en la riqueza de sus valles interandinos y en la abundancia de sus recursos mineros, producto de su ubicación privilegiada en la zona más baja de la Cordillera de los Andes. A pesar de ello, Cajamarca es sin lugar a dudas uno de los departamentos más pobres del país, ya que cifras mostradas por el INEI (2006) indican que el 64 por ciento de su población vive en la pobreza y el 29 por ciento en pobreza extrema.

En la actualidad, la Cooperativa Agraria Atahualpa - Jerusalén, más conocida como “granja Porcón” presenta una población conformada por 1 200 personas y una extensión de 12 881 hectáreas (YANACUCHA, 2004). La economía de granja Porcón se ve sustentada principalmente en las actividades forestal, ganadera, agrícola y turística, lo que la convierte en la comunidad exitosa y modelo en el Perú. Los recursos forestales que fueron plantados son valorizados en 14 millones de dólares, representando un capital importante para desarrollar actividades complementarias (MINAGRI, 2005).

2.2 ESPECIES

2.2.1 *Pinus patula*

A) DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA

El área de distribución natural de la especie es comparativamente restringida y discontinua, comprende las zonas de media y alta montaña de las regiones centro-oriental y sur de México, abarcando latitudes que varían entre 16° N a 24 N°, en altitudes que van desde 1 500 a 3 100

msnm; además, puede crecer en masas puras o asociada con otras especies (Ospina *et al.*, 2011). Patiño y Yoshio (1991) indican que la distribución natural de *Pinus patula* está influenciado por factores orográficos, que a su vez afectan a los factores climáticos y edáficos.

Gillespie (1992) señala que *Pinus patula* ha sido plantado extensamente fuera de sus área de distribución a través de los trópicos y zonas templadas desde 1940, incluyendo zonas del sur de África, el subcontinente de la India, América del Sur y Australia.

B) DESCRIPCIÓN BOTÁNICA

Nombre común: Según Sáenz *et al.* (2011), el nombre más común es “pino llorón”, aunque también tiene otros nombres como “pino ocote” (México), “pino colorado”, “pino candelabro”, “pino gelecate” (Puerto Rico).

Familia: Pinaceae

Especie: *Pinus patula* Schltl. & Cham. (TROPICOS, 2014).

Pinus patula es un árbol de porte mediano a grande, que en ejemplares longevos puede alcanzar alturas de hasta 40 m y 120 cm de diámetro, de tronco recto, cilíndrico en la base y bastante cónico en casi toda su longitud; corteza escamosa y roja, sobretudo en la parte superior del tronco (Sáenz *et al.*, 2011).

La especie presenta hojas aciculadas, en fascículos de 3 ó 4 agujas (rara vez 2 y 5), delgadas, colgantes, de color verde claro, con una longitud entre 15 y 30 cm; presenta además ramas delgadas, finas, generalmente en número de 4 por verticilo (Patiño y Yoshio, 1991). Las inflorescencias femeninas son de color púrpura, laterales, pedunculadas, solitarias o en pequeños grupos de hasta ocho escamas; las inflorescencias masculinas son amentos, ubicados en la parte terminal de la rama, de color verde cuando jóvenes y amarillos al madurar, agrupadas alrededor de un nuevo brote (Ospina *et al.*, 2011).

Los frutos son conos largamente cónicos de 7 a 9 cm, sésiles, algo encorvados, oblicuos y puntiagudos, por lo general en grupos de 3 a 6. Semilla pequeña, casi triangular, aguda, marrón oscura o con manchas grises o blanquecinas y algo engrosada en la base (Sáenz *et al.*, 2011).

C) CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA MADERA

La madera es de color blanco, con duramen rosáceo, posee a menudo un fuerte contraste entre la madera temprana (de color claro) y la madera tardía (de color oscuro), determinando así la presencia de anillos de crecimiento; asimismo, el olor y sabor son poco distintivos, textura ligeramente gruesa e irregular, grano recto (con frecuencia espiralado), con brillo bajo y presencia de canales resiníferos (Gillespie, 1992).

Presenta traqueidas largas en su madera con diámetro tangencial del lumen mediano y grosor de la pared muy delgada en la madera temprana, de diámetro tangencial de lumen fino y grosor de la pared delgada en la madera tardía; sus caras radiales presentan una hilera de puntuaciones aeroladas; los radios son de tipo homogéneo poco numerosos y muy bajos, los que no presentan canal son uniserados y los que presentan son fusiformes de dos a tres series en la parte central del canal, en los campos de cruzamiento se ven de una a tres puntuaciones del tipo pinoide; las traqueidas de radios presentan bordes dentados; los canales longitudinales no son numerosos por mm² y no presentan parénquima axial. (Sáenz *et al.*, 2011).

Asimismo, Martínez (2011) evaluó la variación en la longitud de las traqueidas de *P. patula* en relación con otras especies del género *Pinus* en Oaxaca México, demostrando que *P. patula* tiene una menor variación en la longitud de sus traqueidas, lo que indica la obtención de una pulpa más homogénea.

P. patula es una especie utilizada para diferentes fines, según Sáenz *et al.* (2011), se utiliza en acabados de interiores y exteriores, muebles, postes, durmientes, pilotes, armaduras, vigas, madera aserrada y construcción en general. Esta madera de muy buena calidad se emplea también en la elaboración de cajas de empaque, y debido a la longitud de sus fibras es muy apreciada para la fabricación de papel (Martínez, 2011).

2.2.2 *Pinus muricata*

A) DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA

Pinus muricata es una especie que tiene un rango de distribución restringido a la costa del pacífico en el estado de California en Estados Unidos y una población en la zona de San Vicente en el estado Mexicano de Baja California (Millar y Crichfield, 1998).

En su medio natural *P. muricata* crece en colinas costeras bajas, con clima templado cálido y suelos comúnmente ácidos con drenaje pobre. Las poblaciones de esta especie están comúnmente compuestas por individuos de la misma edad, ya que la regeneración ocurre después del fuego; el cual es uno de los factores más críticos en la regeneración y mantenimiento de dichas poblaciones (Álvarez y Medina, 1997).

B) DESCRIPCIÓN BOTÁNICA

Nombre común: Millar y Crichfield (1998) señalan que el nombre más común es “pino obispo”, aunque también tiene otros nombres como “pino del obispo”, “pino prickle-cono” y pino Bishop.

Familia: Pinaceae

Especie: *Pinus muricata* D. Don (TROPICOS, 2014).

Pinus muricata es un árbol de 15 a 25 metros de altura (a veces más) con diámetro en el tronco de hasta 120 cm, corteza marrón, áspera, gruesa y con escamas; ramas extendidas y fuertes, que forman una copa redondeada y densa (USDA, 2013).

Las acículas se encuentran en pares (a veces de tres), de 10-15 cm de longitud, de color verde oscuro y yemas muy resinosas (López y Sánchez, 1998). Los estróbilos aparecen en racimos de uno a cinco. Los conos están fuertemente doblados en la rama, 5-10 cm de largo; con presencia de escamas rígidas. Los conos permanecen cerrados durante muchos años hasta que el fuego o un calor intenso hace que se abran y liberen las semillas (USDA, 2013).

C) CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA MADERA

La madera de color blanco, posee un fuerte contraste entre madera temprana y tardía, lo que determina la presencia de anillos de crecimiento, presentando además canales de resina y olor característico.

Según García *et al.*, (2000) la madera de *P. muricata* presentan traqueidas de sección poligonal en un número menor a 2000 por mm²; además tiene punteaduras areoladas en las paredes tangenciales y radiales, con diámetros superiores a 5 μ y 15μ, respectivamente. Los mismos autores señalan la ausencia de parénquima longitudinal en la madera e indica la presencia de radios uni y pluri seriados, así como de células epiteliales.

P. muricata no es una especie con uso específico; sin embargo, en Chile se han desarrollado estudios para comprobar su factibilidad en la producción de pulpa para papel (Benavente y Cipriano, 2001). Según INFOR (2014) la calidad de la madera de *P. muricata* es comparable a *P. radiata*; por lo que podría utilizarse para pulpa y papel, en construcciones y revestimientos; así como, en la fabricación de tableros de fibras y partículas.

2.3 ANILLOS DE CRECIMIENTO Y FACTORES QUE INFLUYEN EN SU FORMACIÓN

Los anillos de crecimiento en los árboles son inducidos por la alternancia entre condiciones favorables y desfavorables para el crecimiento. El cambium vascular responsable del crecimiento en diámetro de los árboles, alterna entre estados de mayor actividad y latencia, originando diferencias estructurales en las células de la madera que definen los anillos de crecimiento (Melandri *et al.*, 2007). Al respecto, Rosero (2009) señala que, durante la etapa de mayor crecimiento el cambium vascular produce elementos anatómicos de lumen amplio y paredes delgadas (leño de primavera), mientras que en la etapa de latencia produce elemento con paredes más gruesas y lumen reducido (leño verano); la actividad de todo el año forma un anillo de crecimiento.

Melo (2010) señala que entre los principales factores ambientales que influyen en el crecimiento de los árboles se encuentran la precipitación, temperatura, suelos, luz, viento y composición genética; los cuales ejercen influencia sobre la estructura anatómica, en la actividad cambial, en el proceso de diferenciación celular, expansión celular y crecimiento de las paredes celulares, así como en la formación de elementos secundarios. El resultado son anillos de crecimiento que poseen un número variable de células, de diferentes estructuras con paredes celulares de diversos espesores, y células conteniendo materiales secundarios variados.

La presencia de anillos de crecimiento demarcados es una característica bien definida en el leño de la mayoría de las especies arbóreas y arbustivas que crecen en las regiones templadas y frías donde existe una fuerte estacionalidad climática que induce un periodo de reposo invernal de crecimiento (Morales *et al.*, 2001). Hay además otra serie de factores que obstaculizan el crecimiento (clima, competencias, contaminación, etc.), y en la medida en que su influencia varía de un año a otro, el ancho del anillo generado es distinto; como consecuencia, el tronco forma una serie de anillos anchos y estrechos (Correa, 2003).

2.4 LA DENDROCRONOLOGÍA

Según Tomazello *et al.* (2000b) la palabra Dendrocronología proviene del griego “dendros” que significa árbol, “cronos” tiempo y “logos” ciencia o conocimiento. En una definición estricta, es la ciencia de la datación de maderas utilizando sus anillos anuales, y en una definición amplia, es la ciencia que fecha anillos anuales de crecimiento de los árboles, analizando su estructura e investigando la información registrada en ella para aplicaciones a cuestiones ambientales e históricas (Campos, 2009). Por su parte, Corona (1986) señala que la Dendrocronología es también una ciencia que reúne gran cantidad de datos de alto valor para la toma de decisiones en la gestión forestal, como los registros de crecimiento, caracterización y seguimiento de volúmenes de madera producida, así como la estimación de biomasa y CO₂ fijado en la madera; siendo una fuente de información importante acerca de la calidad de la misma, por permitir la observación de su heterogeneidad, formación y defectos.

Fritts (1976) indica que la Dendrocronología es una ciencia que estudia, registra, y reconstruye los fenómenos meteorológicos, incendios forestales, actividades volcánicas, entre otras, a través de los anillos de crecimiento de los árboles; mientras que, Rosero (2009) menciona que dicha ciencia tiene su aplicación en múltiples eventos ambientales estudiados por disciplinas como Dendroclimatología, Dendroecología, Dendroclimatografía, Dendrogeomorfología, Dendrosismología, Dendroglaciología, Dendroarqueología, entre otras.

2.4.1 PRINCIPIOS DE LA DENDROCRONOLOGÍA

La Dendrocronología está gobernada por un número de principios científicos. Tomazello *et al.* (2000b) hacen una descripción completa de dichos principios:

- Principio de Uniformidad: Este principio fue establecido por James Hutton 1875, quien lo indica de la manera siguiente “el presente es la clave para entender el pasado”. Sin embargo dendrocronologistas lo han ampliado al indicar que “el pasado es la clave del futuro”. Este principio establece que los procesos físicos y biológicos que relacionan los procesos ambientales actuales con los patrones de crecimiento de los árboles son los mismos que operaron en el pasado (Fritts, 1976).
- Principio de los factores limitantes: Su formulación puede ser la siguiente: del conjunto de factores que interviene en el proceso de crecimiento de los árboles, siempre suele haber uno que limita el proceso (Gutiérrez, 2008). Tal como se le concibe en Dendrocronología, este principio establece que la velocidad con la que ocurren los procesos de crecimiento en las plantas está regulada por la variable o factor ambiental que es limitante o escaso para los árboles.
- Principio de amplitud ecológica: Establece que una especie es más sensible a los factores ambientales en los límites latitudinales y de elevación de su rango de hábitat. Grissino-Mayer (1996) señala que bajo este principio las especies pueden crecer, reproducirse y propagarse a través de un rango de hábitat que puede ser amplio, estrecho o restringido.
- Principio de crecimiento agregado: Cook y Kairiuskstis (1989) estableció que cada serie individual de crecimiento de un árbol puede descomponerse en un agregado de factores ambientales, tanto naturales como antrópicos, que afectan los patrones de crecimiento. Este principio puede ser expresado de forma matemática, con la siguiente ecuación:

$$R_t = A_t + C_t + D1t + D2t + E_t$$

Esta ecuación expresa que cualquier anillo de crecimiento (R) formado en un determinado año (t) es una función de la tendencia de crecimiento relacionada con la edad (A), condiciones climáticas (C), factores internos del bosque que puedan afectar el crecimiento (D1t), factores externos del bosque que pueden afectar el crecimiento (D2t) y la acción de cualquier otro aleatorio (E_t) que no sea tomado en consideración por los anteriores.

- Principio del fechado cruzado (crossdating): El reconocimiento de patrones comunes en el ancho de anillos u otras características (tales como la densidad) entre varias series de anillos de árboles, permite identificar el año exacto en el cual cada anillo de crecimiento fue formado. Es

el principio básico de la Dendrocronología y consiste en asignar a cada anillo el año exacto de su formación mediante un proceso de “superposición” de la variación del ancho y otras características estructurales de los anillos de crecimiento (Campos, 2009). Sin la precisión dada por el co-fechado, la datación de los anillos de árboles no sería más que un simple conteo de anillos de crecimiento.

- Principio de selección de sitio: Se establece que para estudios dendrocronológicos debe identificarse y seleccionar aquellos lugares que produzcan series de anillos sensibles a cambios ambientales que están siendo examinados, a fin de maximizar dichas señales ambientales (Melo, 2010).

- Principio de replicación: Este principio indica que se debe tomar más de una muestra del radio del tallo por árbol y más de un árbol por sitio. Al tomar más de una serie de anillos por árbol se reduce la tasa de variación dentro de un mismo árbol (Grissino-Mayer, 1996); por lo tanto la señal ambiental estudiada puede ser maximizada, en tanto que la cantidad de “ruido” minimizado.

2.4.2 EL CLIMA Y SU RELACIÓN CON LA DENDROCRONOLOGÍA (DENDROCLIMATOLOGÍA)

Desde hace varios siglos se sabe que el ancho de anillos de crecimiento de los árboles es una fuente importante de información climática y cronológica. Los estudios dendroclimatológicos se remontan al siglo XV, en el que Leonardo Da Vinci estudio la relación entre el clima y los anillos de crecimiento. Con el pasar de los años distintos científicos europeos fueron confirmando esta teoría y contribuyendo a mejorar las técnicas para la obtención de data. Según Del Valle y Zapata (2004) hoy en día el análisis de los anillos de crecimiento se ha desarrollado ampliamente para numerosos propósitos climatológicos y otras ciencias de la Tierra, ya sea en estudios de bosques templados o tropicales.

La formación y acumulación de madera en los árboles da información que puede ser utilizada como registros de cambios ambientales. La Dendroclimatología constituye una disciplina específica que permite extraer y aprovechar información de carácter climático contenido en la variabilidad de los datos dendrocronológicos (Génova, 2004). El ancho de los anillos de los

árboles es el rasgo anatómico tradicionalmente utilizado en la Dendrocronología para el estudio de bosques, ya que data procesos geodinámicos, o puede reconstruir variaciones climáticas pasadas (Fritts, 1976).

Los factores de estrés que se producen estacionalmente y permiten la formación de anillos de crecimiento, se deben a las bajas temperaturas de invierno en las zonas templadas y elevaciones altas, así como a las estaciones secas y lluviosas en las zonas tropicales (Worbes, 1995). Estos factores de estrés climáticos inducen una latencia cambial en los árboles, y en consecuencia la formación de anillos en la madera.

Fritts (1976) desarrolló los principales métodos aplicados a la Dendroclimatología, entre ellos el de la selección de los árboles, que se encuentren en sitios donde se limita el ancho de los anillos, directa o indirectamente por el estrés causado por las variables climáticas. Los requerimientos para realizar análisis dendrocronológicos de las variaciones del clima, son los siguientes:

- 1.- Muestreo: Especies forestales que presenten anillos de crecimiento periódicos, así como también la selección de sitios donde los árboles presentes una mayor sensibilidad a los factores climáticos;
- 2.- Medición y análisis de crecimiento: Las etapas de medición y análisis de las secuencias de crecimiento deben hacerse con mucha precisión, ya que permitirán un análisis de los patrones de crecimiento y la secuencia temporal;
- 3.- Sincronización y datación (crossdating): El crossdating es un proceso clave en los estudios dendrocronológicos y consiste básicamente en la identificación y corrección de las irregularidades en la cronología, como heridas, anillos múltiples, anillos discontinuos y/o ausente;
- 4.- Estandarización o normalización: La estandarización analiza la variabilidad común de las secuencias datadas del crecimiento, que generalmente provienen de árboles de diferentes edades.

La importancia de los estudios dendroclimatológicos radica en la posibilidad de comprender y predecir los efectos de los factores climáticos en el crecimiento de los árboles, a través de la construcción y/o reconstrucción de series climáticas y las respectivas respuestas de la planta, y en consecuencia, la influencia del clima en la calidad de madera formada (Ugulino, 2011). Es por ello que las investigaciones han sido dirigidas al estudio de las correlaciones entre algunos factores climáticos, como la precipitación y temperatura, y el incremento anual de los árboles.

Es ampliamente aceptado que el clima influye fuertemente sobre los patrones de la vegetación a grandes escalas espaciales y temporales; por ello, en la actualidad, el conocimiento de las relaciones entre el clima y el crecimiento de los árboles puede ayudar en el desarrollo de métodos silviculturales más sofisticados, como también estimar los impactos del calentamiento global sobre los bosques (Nutto y Farinha, 2002).

2.4.3 LA ESTACIONALIDAD Y SU RELACIÓN CON LA DENDROCRONOLOGÍA

El inicio y cese del crecimiento periódico se manifiesta en los árboles mediante características estructurales, que se reflejan en incrementos del tejido de la madera del tronco (López *et al.*, 2006). Investigaciones sobre el crecimiento en árboles de bosques tropicales y subtropicales indican que la variación intra e inter anual en diferentes especies está relacionada principalmente a factores limitantes como la precipitación y temperatura (Fritts, 1976; Tomazello *et al.*, 2000a; Rosero, 2009).

En áreas con clima estacional los árboles son capaces de formar un anillo de crecimiento cada año. Usualmente, estas especies presentan un mayor crecimiento al comienzo de la estación favorable (húmeda), formando madera temprana la cual es relativamente menos densa y por lo tanto más clara; posteriormente, el árbol reduce su actividad fisiológica durante la estación menos favorable (seca), la cual es densa y frecuentemente más oscura (Meliandri *et al.*, 2007). La estacionalidad en regiones tropicales es marcada por la presencia de estación seca, periodos de inundación o por estación moderadamente seca en lugares con suelos bien drenados, ocasionando en los árboles una fase de latencia llevando a la formación de anillos de crecimiento (Worbes, 1995).

2.4.4 LA DENDROCRONOLOGÍA COMO ESTIMACIÓN DEL CRECIMIENTO DE ÁRBOLES

El estudio del crecimiento en los árboles parte siempre de un postulado biológico, el de la persistencia de la especie por un tiempo prolongado, lo necesario como para que le sea asignable un número concreto de años, reflejado en la presencia de anillos de crecimiento (Giménez y Ríos, 1999). En este contexto, surge la Dendrocronología como una disciplina que estudia anillos (capas) de crecimiento de la madera, en función del tiempo y factores ambientales como el clima (Schweingruber, 1988). Dichos anillos se caracterizan por una marcada variabilidad, la cual es atribuida a las variaciones de los factores climáticos a las que el árbol responde con fluctuaciones en la magnitud del grosor de los anillos de crecimiento (Gutiérrez, 1990).

Worbes (1995) menciona que los estudios dendrocronológicos son muy útiles, ya que indican la variación existente inter e intra anual en la formación de la madera de muchas especies. El conocimiento del crecimiento pasado de un árbol puede ser obtenido por medio de técnicas dendrocronológicas, que permiten verificar como un árbol crece en altura y diámetro, y como es el cambio en forma a medida que aumenta el volumen (Chagas y García, 2002; Doetzer *et al.*, 2003). Es por ello también, que la Dendrocronología aplicada a la ecología de los árboles (Dendroecología), es una herramienta importante para la reconstrucción del crecimiento de los árboles, determinación de tasas de crecimiento, producción de madera y ciclos de rotación, con la aplicación inmediata en los planes de manejo forestal sostenible y sostenibilidad de bosques naturales (Tomazello *et al.*, 2000b).

Spathelf *et al.* (2000) señalan que, si una especie forestal presenta anillos anuales de crecimiento fácilmente observables, las técnicas dendrocronológicas como el análisis de tronco permite recomponer el crecimiento pasado de manera relativamente rápida. Tradicionalmente la determinación del crecimiento diamétrico anual de los árboles se realiza mediante mediciones directas y sucesivas a lo largo del tiempo en parcelas permanentes, lo cual representa una labor que demanda largos periodos de medición, gran esfuerzo y elevados costos; por estos inconvenientes surge el análisis de anillos de crecimiento como método conveniente que permite estudiar las tasas de crecimiento y las relaciones entre edad y tamaño.

Al respecto, Brienen y Zuidema (2003) utilizaron los anillos de crecimiento para determinar tasas de crecimiento de árboles de *Cedrela odorata*, *Peltogyne heterophylla* y *Cedrelinga catenaeformis* y compararon los resultados de las tasas de crecimiento con resultados obtenidos mediante el uso de parcelas permanentes de muestreo, encontrando que no existe diferencias significativas entre los resultados provenientes de estas dos fuentes de datos, demostrando así la importancia de la Dendrocronología como fuente de información para el manejo forestal.

2.5 ANÁLISIS DE FUSTE

Finger (1992) señala que el análisis de tronco es apropiado para especies que poseen anillos de crecimiento fácilmente observables, como resultado de la actividad cambial de los árboles durante periodos de máxima actividad vegetativa y de periodos de reducción de actividades fisiológicas. El análisis de tronco es una técnica que posibilita el registro del crecimiento pasado de los árboles a través de sus anillos de crecimiento (Correa, 2006). Imaña y Encinas (2008) indican que el análisis de tronco, además de permitir determinar la edad de los árboles, también ofrece la posibilidad de conocer el correspondiente crecimiento anual en diámetro y altura, y en consecuencia el área basal o seccional y el volumen de madera producido.

Doetzer *et al.*, 2003 consideran que el análisis de tronco es una fuente importante de datos para las siguientes líneas de investigación:

- Reacción del crecimiento en relación a factores ambientales (bióticos y abióticos) y al manejo de poblaciones (liberación, poda, raleo);
- Determinación de las alteraciones de forma de los árboles en función de los factores mencionados;
- Sincronización de las medidas de los anillos de crecimiento y determinación del número de anillos ausentes como indicadores del grado del daño sufrido por los árboles y;
- Elaboración de modelos de producción.

En este sentido, Bellote *et al.* (2006) demostraron en un estudio en *Pinus taeda*, que el análisis de tronco es una herramienta adecuada para ser utilizada en el desarrollo de modelos matemáticos para estimar la acumulación de carbono en el tronco de los árboles.

El análisis de tronco puede ser completo o parcial; según Finger (1992) en el primer caso, el árbol es tumbado y seccionado en un determinado número de discos a lo largo de todo el tronco; en tanto, cuando la muestra es extraída a la altura del DAP (diámetro altura pecho) en árboles que se encuentra en pie, mediante el uso del barreno de Pressler, se trata de análisis parcial de tronco (Chagas y García, 2002). En el análisis parcial de tronco, el árbol no precisa ser cortado, se trata consecuentemente de un método no destructivo y puede servir para analizar un mayor número de individuos mejorando la precisión de las estimaciones (Imaña y Encinas, 2008).

2.6 CRECIMIENTO DE LOS ÁRBOLES

El crecimiento de un árbol es su aumento de tamaño en el tiempo y se puede expresar en términos de diámetro, altura, área basal o volumen. El crecimiento es producto de los procesos de anabolismo, o síntesis, y catabolismo; es decir, producido por la actividad fisiológica de la planta. El primer proceso captura la energía necesaria para producir tejidos y para cumplir con las funciones del organismo; el segundo mantiene los tejidos y en este proceso consume y libera parte de la energía mediante la respiración (Louman *et al.*, 2001).

Todo crecimiento implica un estado inicial mensurable y cambios en ese estado con el tiempo. Según Scolforo (1998), existen diferentes maneras para expresar el crecimiento; entre ellas:

- Incremento corriente anual (ICA): Es el crecimiento ocurrido o la diferencia en la producción del elemento dendrométrico considerado dentro de un periodo de un año.
- Incremento medio anual (IMA): Es la razón entre la producción del elemento dendrométrico considerado a partir del año cero y la edad de la población forestal o del árbol.
- Incremento periódico (IP): Es el crecimiento del elemento dendrométrico considerado durante un determinado periodo en el tiempo.

Al graficar los datos de tamaño acumulado en alguna variable específica como altura, diámetro, área basal o volumen en relación del tiempo, se obtiene una curva de crecimiento. Cancino (2006) indica que si se dispone de datos de crecimiento hasta edades avanzadas del árbol, puede observarse que la curva de crecimiento acumulado es de forma sigmoidea (Figura 1).

Las curvas ICA, IMA e IP pueden derivarse a partir de mediciones y también a partir de la curva de crecimiento total acumulado. El incremento corriente anual (ICA) crece, culmina y decrece rápidamente. El incremento medio anual (IMA) crece más lentamente, teniendo un máximo más tarde, hasta llegar e igualar al ICA, partir de aquel punto comienza a declinarse gradualmente. Huamán (2011) señala que se debe hacer notar que la curva del ICA tiene un máximo antes de la curva del IMA y que las dos curvas se cruzan en el punto máximo del IMA, llamando normalmente a aquel punto como la edad técnica de corta.

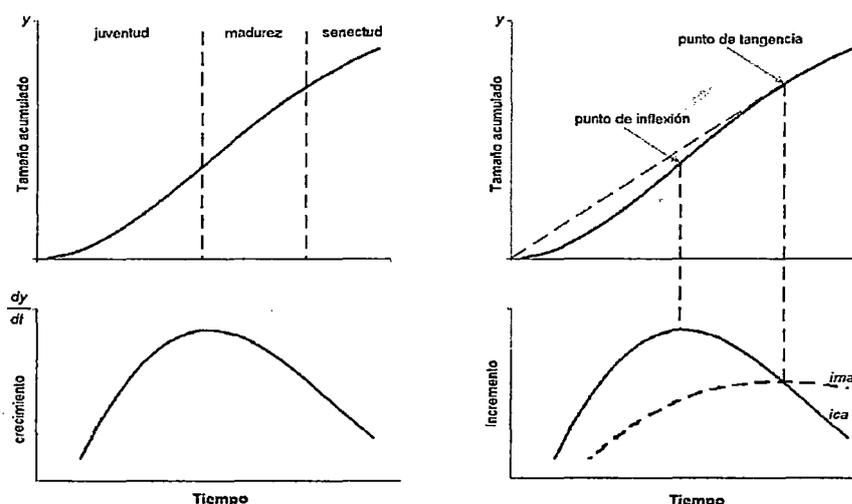


Figura 1 Curvas de crecimiento acumulado sigmoidea típica (arriba) y curvas de crecimiento ICA – IMA (abajo).

Según Imaña y Encinas (2008) la curva sigmoideal o curva en “S” se caracteriza por que una primera fase corresponde a la edad juvenil, la segunda a la edad madura o rectilínea y la tercera edad senil (vieja). Cada fase mantiene un ritmo de crecimiento característico de la vida total del

árbol y juntas forman la curva de crecimiento. La edad juvenil se caracteriza por un crecimiento rápido muchas veces del tipo exponencial. En la edad madura, el árbol normalmente presenta periodos iguales con crecimiento semejantes (rectilíneos). La edad senil se caracteriza por un crecimiento cada vez más insignificante, desde un punto de vista relativo, mostrando una asíntota de la curva.

Existen diversos estudios de crecimiento realizados en varias especies de pino; Sáenz *et al.* (2011) señala que en plantaciones de *P. patula* del estado de Veracruz (México), a la edad de 15 años, el incremento medio anual en diámetro es 1.06 cm/año. Por su parte, Muñoz *et al.* (2012) estimó que *P. montezumae* tienen un incremento medio anual diamétrico de 1.23 cm/año, para un área semillera en Michoacán (México). Por otro lado, un estudio comparativo entre las tasas de crecimiento mensual de tres especies de árboles de navidad, realizado por Espinosa (2006), demostró que *Abies religiosa* tiene una tasa de crecimiento mayor (0.85 mm/mes), comparado con *P. ayacahuite* (0.52 mm/mes) y *Pseudotsuga macrolepis* (0.47 mm/mes).

2.7 MODELOS MATEMÁTICOS DE CRECIMIENTO

Melo y Vargas (2002), señalan que un modelo es una abstracción o entidad física que representa de alguna manera la forma o la función de entidades o procesos reales del ecosistema forestal. El modelamiento es un tema envolvente y busca pronosticar el crecimiento, para las variables dendrométricas en función a una serie de variables posibles de ser cuantificadas en la población forestal por medio de análisis de regresión (Da Cunha, 2009).

Los modelos de crecimiento asisten a los investigadores y silvicultores de muchas maneras. Algunos importantes usos incluyen la habilidad para predecir el crecimiento futuro y para explorar opciones silviculturales, aunque también pueden ser utilizados para describir e interpretar fenómenos biológicos (Vanclay, 2000).

La información básica empleada para el desarrollo de los modelos consiste en los siguientes pares de datos: Incremento del diámetro normal en relación a la edad (t), y el diámetro normal en función de la edad (Cruz, 2013).

Generalmente se usa el término “Modelo de crecimiento” para hacer referencia a un sistema de ecuaciones con una predicción de crecimiento y producción de un rodal bajo amplia variedad de condiciones (Huamán, 2011). Del mismo modo, Da Cunha (2009) señala que los modelos de crecimiento son, sobretodo, sistemas de ecuaciones matemáticas que permiten la predicción del crecimiento y la producción de una población, mediante condiciones que deben presentar dos características importantes: Precisión, ya que las predicciones deben ser las más precisas posibles, y flexibilidad.

Para Scolforo (1998), existen dos tipos de modelos de crecimiento: Los biológicos y los empíricos. Sin embargo, los modelos biológicos, aunque propicien un buen análisis del crecimiento, por ser completos, tornan difícil su ajuste y manejo. Por este motivo, los modelos empíricos son más empleados, por ser menos complejos y propiciar estimaciones confiables del crecimiento y de producción. Según Moscovich (2004) los modelos empíricos, o funciones artificiales, presentan forma matemática más simple, facilitando el ajuste y manejo, y brindan, igualmente, buenas estimaciones de crecimiento.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 SELECCIÓN DE ÁREA DE ESTUDIO

La zona de estudio se encuentra ubicada en las plantaciones de pinos pertenecientes a la Cooperativa Agraria-Jerusalén granja Porcón, en el distrito, provincia y departamento de Cajamarca. (Figura 2). En la actualidad, las plantaciones forestales en granja Porcón tienen una extensión aproximada de 10 000 ha, con más de cinco especies de pino, dos de Eucalipto, *Polylepis*, entre otras (ADEFOR, 2005). Dichas plantaciones se ubican en la cabecera de la cuenca del Rio Jequetepeque, y fueron establecidas con fines ecológicos, económicos y sociales dentro del marco del “Proyecto Piloto de Reforestación en la Zona de Porcón”, teniendo como principales especies plantadas a *Pinus patula* y *Pinus radiata* (Melo, 2010).

Granja Porcón limita por el Norte con las localidades de Chaupilóma, Pucará, Muruisha y La Shioglia; al Sur con Porcón Alto, Chancas y Callancas; al Este con la minera Yanacocha y la localidad de Chilimpampa; y al Oeste con Pozo Seco, Agua Colorada y El Progreso.

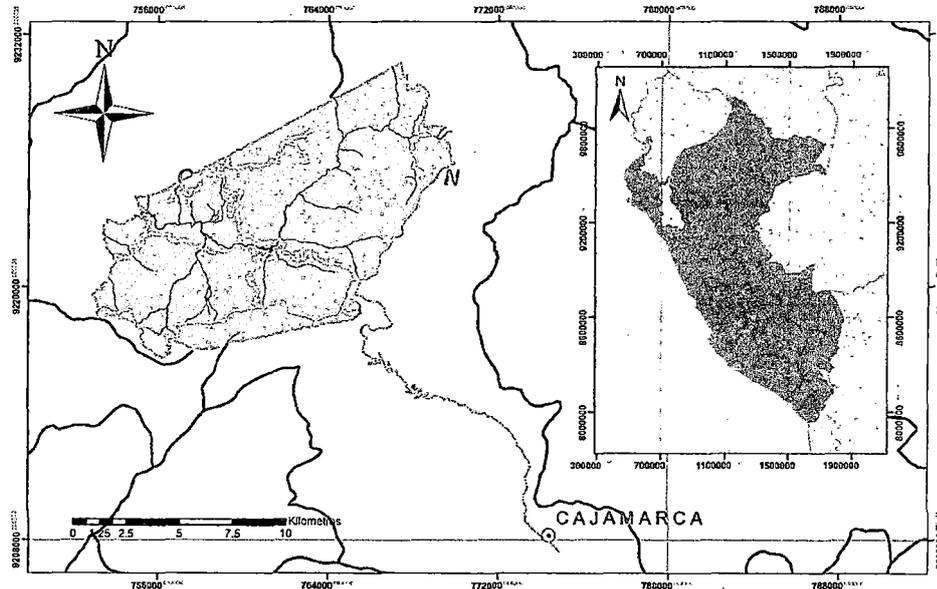


Figura 2 Ubicación de área de estudio: granja Porcón-Cajamarca.

3.1.1 SELECCIÓN DE ÁREAS DE MUESTREO

La zona de muestreo conocida como Quebrada Cushuro pertenece al Sector Cushuro, el cual se encuentra situado al norte de la granja Porcón. Esta plantación fue sembrada en el año 1990 con especies de *P. patula* y *P. muricata*, y con patrón de plantación “tres bolillos” distanciados a tres metros (ADEFOR, 2005). En la Quebrada Cushuro se muestreó una ladera de colina en la que se observó la presencia de ambas especies de pino sembradas por separado. A su vez, estas áreas se caracterizan por no haber recibido ningún tratamiento silvicultural (podas y raleos) que haya influenciado en el crecimiento de los árboles.

Las áreas de muestreo quedaron definidas de la siguiente manera: Plantación de *P. patula* con 10 ha, y plantación de *P. muricata* con 9 ha. Teniendo en cuenta esta consideración y siguiendo la propuesta de Murillo *et al.* (2012), el muestreo en ambas zonas se realizó al azar con una intensidad de 5 por ciento, a través de parcelas rectangulares. Por ello, en el área de *P. patula* se levantaron 10 parcelas de 500 m²; mientras que en el área de *P. muricata* se levantaron 9 parcelas de 500 m². (Figura 3)

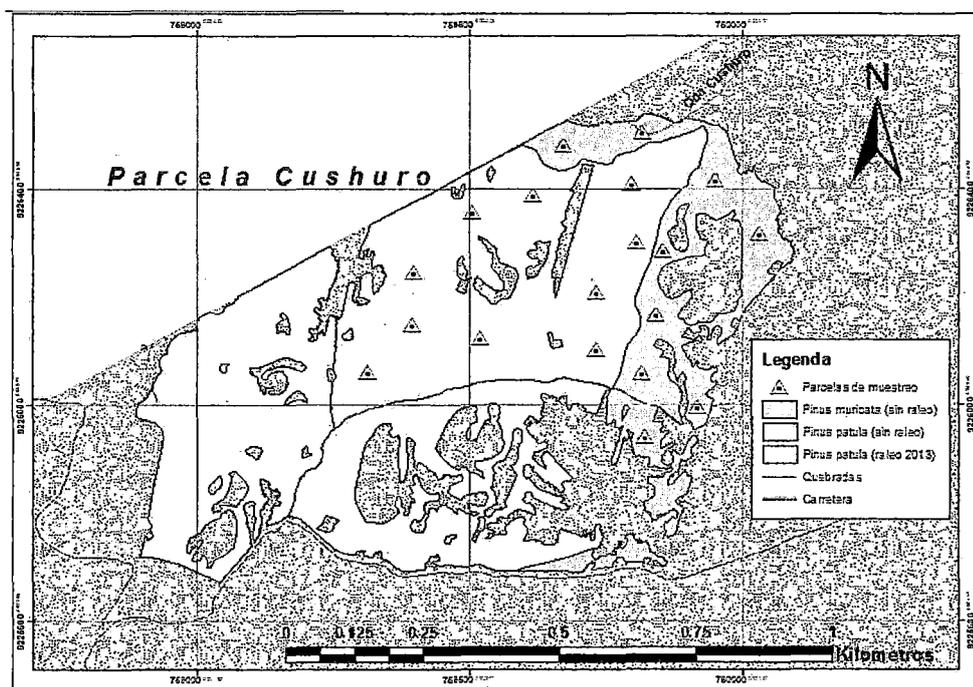


Figura 3 Distribución de parcelas de muestreo en Quebrada Cushuro, granja Porcón.

3.2 LEVANTAMIENTO DE INFORMACIÓN, SELECCIÓN Y COLECCIÓN DE MUESTRAS

Se realizó el inventario forestal de las áreas de muestreo y se registró la siguiente información: Numero de parcela, código del árbol, diámetro a la altura pecho (DAP), altura total, altura comercial y observaciones del estado sanitario de cada árbol. Luego, con los datos del inventario se procedió a definir las clases diamétricas en intervalos de 10 cm, obteniéndose un total de 05 clases en cada área de muestreo (Figura 4). Cabe señalar que la información obtenida en dicho inventario sirvió como base para la selección de los árboles a barrenar.

Posteriormente, en cada área de muestreo se seleccionó y muestreó, en forma aleatoria y proporcional a las clases diamétricas, un total de 35 árboles (Cancino, 2006). Dicha selección se realizó evitando el efecto borde de la plantación, ya que éste influye en el crecimiento de los árboles debido a factores como inclinación de terreno, exposición solar, vientos, competencia, etc. (Zúñiga, 2012).

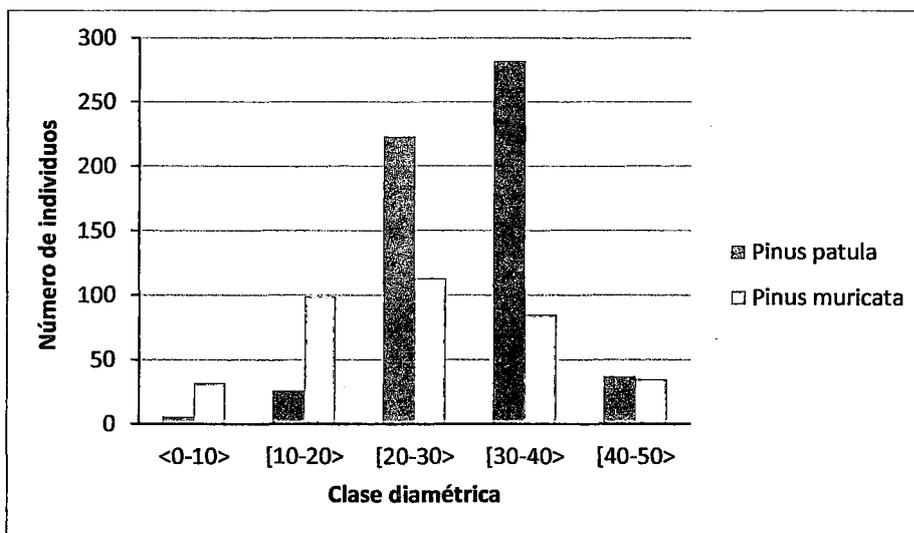


Figura 4 Histograma de frecuencia de número de árboles a barrenar por clase diamétrica.

Las muestras de madera (tarugos) se colectaron por medio de un método no destructivo con ayuda del barrenado Pressler (5,1 x 400 mm; diámetro x largo), tal como lo sugieren Rosero (2009) y Zúñiga (2012). Se extrajeron 3 a 4 muestras radiales del leño (distanciados 90°) a la

altura del DAP de los árboles seleccionados. Una vez extraídas las muestras, se codificaron y colocaron en sorbetes de plástico para luego analizarlas en el Laboratorio de Anatomía e Identificación de Maderas de la Universidad Nacional Agraria La Molina. Los agujeros generados por el barrenado en los árboles fueron sellados con plastilina para evitar el ingreso de agentes patógenos dentro de los orificios. (Figura 5).



Figura 5 (A) Barrenado de árbol con barrenado Pressler; (B) extracción de tarugos del leño, (C) colección de tarugos, (D) sellado de orificio generado en el barrenado.

3.3 RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE SERIES METEOROLÓGICAS

Los datos meteorológicos de precipitación y temperatura mensual fueron proporcionados por el servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú – SENAMHI, de la estación meteorológica “granja Porcón” (cercana a la zona de estudio); la cual cuenta con datos climáticos (precipitación y temperatura) correspondientes al periodo 1990-2013. Dicha estación se encuentra localizada en el distrito de Cajamarca, provincia de Cajamarca, departamento de Cajamarca; a una latitud de $07^{\circ} 02' 02''$, longitud $78^{\circ} 37' 36''$ y altitud de 3 261 msnm (VER ANEXO 1).

3.4 ANÁLISIS DENDROCRONOLÓGICO

El análisis dendrocronológico se llevó a cabo en el Laboratorio de Anatomía e Identificación de Maderas de la Universidad Nacional Agraria La Molina.

3.4.1 PREPARACIÓN DE LOS TARUGOS OBTENIDOS

Los tarugos obtenidos de los 35 árboles de pino en cada área de muestreo, fueron encolados en soportes de madera considerando la posición de las fibras en sentido longitudinal; de manera tal que queden expuestas en la parte superior la sección transversal de la muestra. Dicha sección fue pulida con ayuda de una lijadora orbital, utilizando lijas de diferentes granos en forma ascendente: P120, P240, P360, P400 y P600 (Escala FEPA). El pulido de los tarugos permitió observar claramente la presencia de los anillos de crecimiento en la superficie de las muestras (Figura 6).

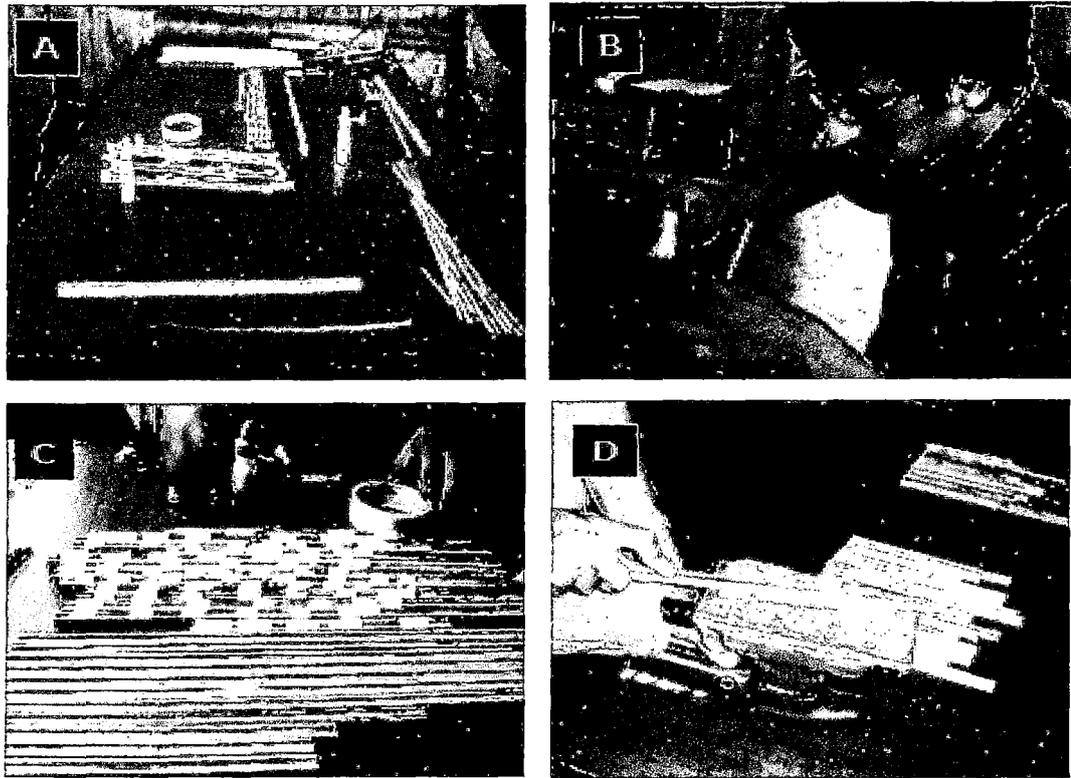


Figura 6 (A) Materiales para montaje de muestras; (B) montaje de muestras; (C) muestras acondicionadas; (D) pulido de sección transversal de muestras.

El pulido de los tarugos tuvo como objetivo facilitar la visualización y diferenciación del límite de los anillos de crecimiento. Luego del pulido se procedió a la aplicación de aire comprimido sobre la superficie pulida, con el fin de eliminar partículas e impurezas que podrían impedir un correcto análisis de los anillos de crecimiento.

3.4.2 DEMARCACIÓN, DIGITALIZACIÓN Y MEDICIÓN DE LOS ANILLOS DE CRECIMIENTO

Montadas las muestras sobre los soportes de madera, con auxilio de un estereoscopio (40X) marca OLYMPUS, se demarcaron los límites de los anillos de crecimiento en la sección transversal de los tarugos. Dicha demarcación se realizó con lápiz considerando como referencia principal la variación del grosor de las paredes celulares, la cual se refleja en la coloración de la superficie lijada. Una vez demarcados los anillos, se colocó una regla (escala)

al lado de las muestras y se procedió a digitalizarlas haciendo uso de un Scanner HP SCANJET con 600 ppp de resolución a color (Figura 7).

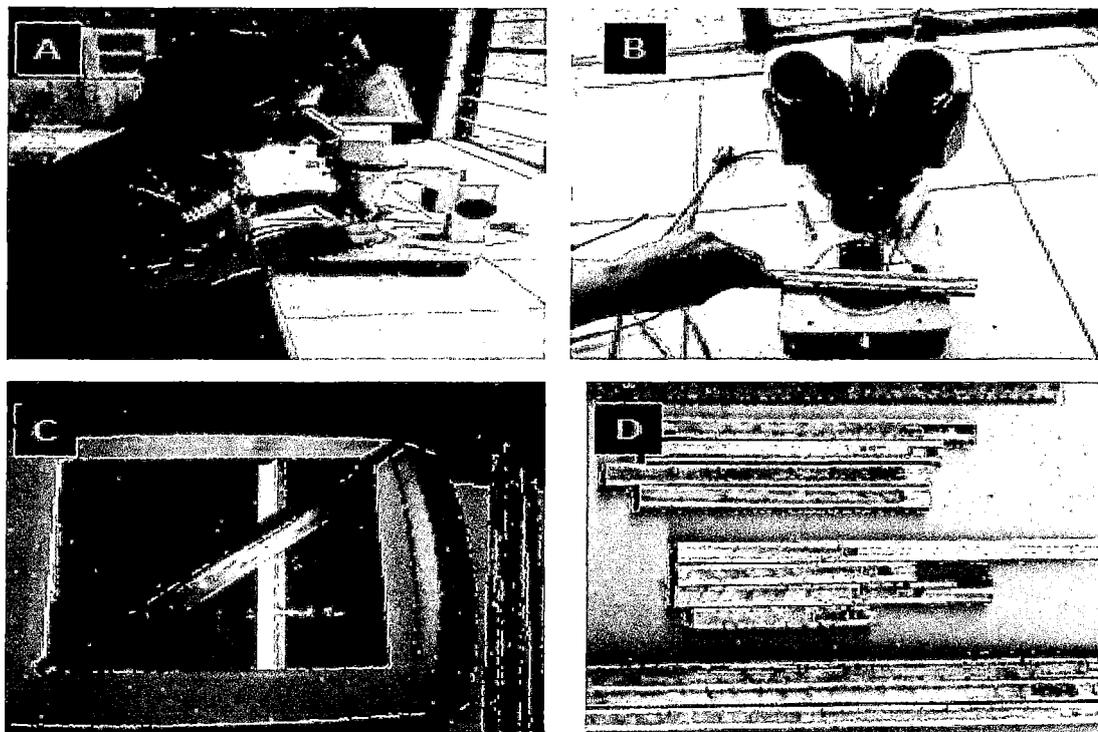


Figura 7 (A, B) Demarcación de anillos de crecimiento; (C) digitalización de muestras, (D) radios digitalizados.

Con las imágenes digitalizadas se procedió a medir el ancho de los anillos, previamente demarcados. Para la medición se utilizó el programa de análisis de imágenes IMAGE PRO PLUS v.4.5, siguiendo la metodología propuesta por Rosero (2009). Previamente, se calibró el programa de forma manual a través de una escala digital (600 dpi), uniendo dos puntos cuya distancia era conocida en la imagen (regla). Luego, se midieron los anchos de los anillos demarcados, generándose una data, que fue exportada al programa MICROSOFT OFFICE EXCEL para su posterior análisis.

3.4.3 SINCRONIZACIÓN (COFECHADO) Y OBTENCIÓN DE SERIES MAESTRAS

Con la información generada, es decir, con la totalidad de anchos de anillos de los 3 o 4 radios de cada árbol muestreado, se procedió a realizar el crossdating o datación cruzada de los anillos de crecimiento. El control de calidad de las mediciones y la verificación de la sincronización (cofechado) se realizó mediante el programa COFECHA, que analiza estadísticamente la correlación entre las porciones de las series individuales y la serie promedio, verificadas de forma independiente, permitiendo identificar la existencia de falsos anillos o anillos faltantes; comprobando y corrigiendo de esta manera los errores del cofechado (Holmes *et al.*, 1986).

Tanto para *P. patula* y *P. muricata* el programa COFECHA correlacionó las series individuales con sus respectivas series promedio, teniendo en cuenta segmentos de 20 años comparados cada 5 años. Este procedimiento permitió detectar los errores de medición, que se manifestaron a través de correlaciones bajas que no alcanzaron el nivel crítico de significancia ($p < 0.05$). Aquellas series cuya sincronización mostraban correlaciones muy bajas fueron retiradas del análisis. Al respecto, Schweingruber (1998) sugiere que las series que presentan anomalías, reflejadas en el crecimiento de los anchos de anillos, deben ser excluidas del análisis porque pueden originar problemas en la sincronización de las series. Lara *et al.* (2000) señalan que, en una colección de series usualmente se pueden cofechar solo el 43 y 90 por ciento, dependiendo de las características del sitio. Las muestras que no cofechar correctamente suelen provenir de árboles cuyo crecimiento ha estado fuertemente influenciado por condiciones locales como competencia, liberaciones, incendios, etc. (Zúñiga, 2012).

Asimismo, en el análisis de los anillos de crecimiento de las dos especies de pino, las tendencias de crecimiento fueron removidas de cada serie mediante la aplicación de una función de remoción “Spline cúbica”, para lo cual cada valor de las series fue dividido por su valor correspondiente en la curva de dicha función, con un valor límite de respuesta-frecuencia de 50 por ciento y una longitud de serie predeterminada de 22 años. De esta forma se maximizó la señal común de las series y se determinó una serie maestra para cada especie.

3.4.4 OBTENCIÓN DE LAS SERIES CRONOLÓGICAS

En la elaboración de las series cronológicas es importante describir los conceptos de “señal” y “ruido”. Se denomina señal a la información relevante contenida en los anillos de crecimiento

para un estudio particular de una variable. El término ruido es una parte de la información presente en la serie maestra y que es irrelevante para el estudio de la variable considerada. En este sentido, la serie de anillos de crecimiento es un conjunto (agregado) de varias señales y ruidos, según la aplicación del estudio dendrocronológico. El análisis de un disturbio particular por aplicación de anillos de crecimiento, consiste en realizar una buena decodificación de las señales contenidas en los anillos de crecimiento, resaltando las de interés para el estudio y minimizando las restantes.

En el presente estudio, el disturbio particular o señal en el ancho de los anillos de crecimiento está en función del clima (precipitación y temperatura), considerándose como ruido todas aquellos factores que hayan afectado el ancho de los anillos (o al crecimiento del fuste del árbol).

En esta etapa del análisis dendrocronológico fueron aplicados los conceptos de Cook y Kairiuskstis (1989), mencionados anteriormente; los cuales consideran a las series de anillos como un agregado lineal compuesto por señales presentes, expresadas de la siguiente manera:

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

Donde:

R_t : Serie de anchos de anillos observada;

A_t : Tendencias de los anchos de anillos relacionada con el tamaño y la edad de los árboles;

C_t : Señal climáticamente relacionada con el ambiente;

δ : Indicador binario relacionado con la presencia ($\delta = 1$) o ausencia ($\delta = 0$);

$D1_t$: Disturbios causados por perturbaciones endógenas y de acción localizada;

$D2_t$: Disturbios causados por perturbaciones exógenas que actúan a nivel poblacional;

E_t : Variabilidad (año a año) no relacionado con los demás factores y;

t : año relacionado a cada factor.

Para facilitar la aplicación del modelo se buscó maximizar el efecto de “variable climática” en la formación de los anillos de crecimiento. Por ello, se buscó que las especies de las áreas de muestreo seleccionadas se caractericen por presentar un comportamiento sensible a las variaciones climáticas estacionales (precipitación y temperatura), evitando la colección de aquellos árboles inclinados y aquellos ubicados a los bordes de la plantación.

Posteriormente, cada serie cronológica fue estandarizada retirándose las tendencias de crecimiento de los anchos de anillos, asumiendo que estas son funciones de las dimensiones y edad de los árboles; así como, de las perturbaciones endógenas y exógenas conforme al siguiente modelo:

$$Q_t = f(A_t, \delta D1_t, \delta D2_t)$$

Donde:

Q_t : Tendencia de crecimiento estimada como una función de la edad;

f : Función matemática;

A_t : Tendencia del ancho de anillo relacionada al tamaño y edad de los árboles;

δ : Indicador binario relacionado con la presencia ($\delta = 1$) o ausencia ($\delta = 0$);

$D1_t$: Disturbios causados por perturbaciones endógenas y de acción localizada;

$D2_t$: Disturbios causados por perturbaciones exógenas que actúan a nivel poblacional y;

t : Año relacionado a cada factor.

La tendencia de crecimiento fue removida utilizando el programa ARSTAN (Holmes *et al.*, 1986), el cual ajusta una función de regresión a los anchos de anillos de crecimiento. La remoción de las tendencias fue realizada conforme a la metodología indicada por Fritts (1976), en donde los datos fueron transformados en índices del ancho del anillo de crecimiento o denominado simplemente (I_t):

$$I_t = R_t/Q_t$$

Donde:

I_t : Índice en el ancho de anillo de crecimiento;

R_t : Serie en el ancho de anillo de crecimiento observado y;

Q_t : Tendencia de crecimiento estimado en función solamente de la edad.

La estandarización hecha por ARSTAN tiene como objetivos remover las tendencias no climáticas relacionadas con la edad de los árboles, y permitir que los valores estandarizados de los árboles individuales, con diferentes tasas anuales de crecimiento del tronco, sean calculados juntos en una función promedio. El proceso de estandarización posee la ventaja de corregir la heterogeneidad de la variancia de los anchos de anillos, una vez que la desviación estándar de los índices deja de ser función de la media, como ocurría antes de la estandarización.

ARSTAN realiza la estandarización de las series individuales de cada árbol, existiendo la opción de ajustarlas a diferentes curvas teóricas (recta, exponencial negativa, horizontal o Spline de diferente rigidez), las cuales tratan de reproducir las tendencias biológicas de crecimiento (Zúñiga, 2012). En el análisis dendrocronológico con ARSTAN se eligió la opción 3 del programa (para las dos especies de pino), que ajusta la curva a una regresión lineal (línea horizontal), que asegura eliminar el efecto de cambio de tasa de crecimiento del árbol debido a la edad (si lo hubiera) y preservar la varianza de baja frecuencia.

3.5 ANÁLISIS DENDROCLIMATOLÓGICO

Las series cronológicas obtenidas con ARSTAN fueron comparadas con las series climáticas, determinando qué variable influye más (precipitación y temperatura) en el ancho de anillos de crecimiento y consecuentemente en el crecimiento de los árboles; para ello, se utilizó el programa RESPO (Holmes, 1994), que analiza detalladamente las respuestas de los árboles a la variable climática mensual por medio de correlaciones Pearson (95 por ciento de confiabilidad).

RESPO transforma los parámetros climáticos en componentes principales para realizar una regresión en donde la cronología de los árboles son variables dependientes y los parámetros climáticos son variables independientes (Huamán, 2011). El resultado es una función de respuesta para cada cronología que expresa la relación independiente entre el crecimiento de los árboles y el clima.

Asimismo, para el análisis dendroclimatológico, se determinó como inicio de la época de lluvia el mes de setiembre (época húmeda) y como fin de la época de lluvia el mes de mayo (época seca), priorizando el primer escenario por describir mejor la relación del crecimiento con el clima.

3.6 ANÁLISIS DENDROECOLÓGICO

Obtenidas las correlaciones entre las series de anillos y las series meteorológicas, definiendo así la anualidad en la formación de los anillos de crecimiento, se procedió a determinar los diámetros de cada árbol (a partir de los radios), y se elaboraron las curvas de crecimiento anual

acumulado. Luego, a través de los pares de datos de las curvas (año-ancho de anillo acumulado), se determinaron las tendencias de crecimiento respectivas y el modelo de crecimiento más representativo para cada especie de pino. Una vez determinado el modelo de crecimiento de cada especie se procedió a calcular las respectivas tasas de crecimiento, incremento corriente anual (ICA) e incremento medio anual (IMA).

3.6.1 MODELAMIENTO DEL CRECIMIENTO DIAMÉTRICO

El análisis del modelo más apropiado para describir el crecimiento de *P. patula* y *P. muricata* se determinó mediante el uso del programa propuesto por Vanclay (2000) denominado CURVE EXPERT v.2.0.2; el cual permite determinar la fortaleza de la relación entre un par de valores: x, y; asimismo, mediante un análisis rápido ajusta una curva de pares de datos donde compara automáticamente la capacidad de ajuste de 35 modelos de crecimiento preestablecidos (Giraldo & Del Valle, 2012).

Los incrementos radiales fueron acumulados en relación a la edad del individuo para obtener curvas de incrementos radiales acumulados. Estos incrementos se obtuvieron sumando al incremento radial en cada edad, el incremento radial correspondiente del año anterior. Posteriormente, se probaron los modelos no lineares preestablecidos para plantaciones: Richards, Logistic, Gompertz, Weibull y Chapman-Richards, los cuales son descritos por Vanclay (2000) y Giraldo y Del Valle (2012). Según Juárez de Galíndez *et al.* (2005), la familia de ecuaciones de crecimiento asintótico es ampliamente utilizada para modelar el crecimiento de especies forestales.

En la comparación y selección entre modelos de regresión se utilizaron los parámetros estadísticos del error estándar (ES), coeficiente de determinación (r^2), coeficiente de Akaike (ACI) y suma de cuadrados residuales (SCR). Según Da Cunha (2009), de forma general, el empleo de éstos parámetros en conjunto sirven como criterio en el análisis estadístico para la selección del mejor modelo. Asimismo, el análisis fue realizado con apoyo de gráficos de residuos para validar la eficiencia de la ecuación ajustada y diagnosticar la presencia de observaciones influyentes u “outliers” Las observaciones influyentes son aquellas que, por varios criterios, parecen tener gran influencia sobre los estimados de los parámetros de regresión (Da Cunha, 2009).

3.6.2 VALIDACIÓN DE MODELOS DE CRECIMIENTO

La validación del modelo se realizó teniendo como base la metodología planteada por Giraldo y Del Valle (2012), para ello se tomó una muestra aleatoria del 10 por ciento de la base datos original (aproximadamente), obteniendo un total de 70 y 60 pares de datos diámetro-edad de *P. patula* y *P. muricata*, respectivamente; con los que se estimaron los parámetros del modelo y se aplicó una prueba Chi cuadrado (χ^2) con el fin de determinar si existían diferencias estadísticas entre los diámetros de esta muestra y los estimados con el modelo.

3.6.3 DETERMINACIÓN DE LA TASA DE CRECIMIENTO, INCREMENTO CORRIENTE ANUAL (ICA) E INCREMENTO MEDIO ANUAL (IMA)

Determinados y validados los modelos de crecimiento de cada especie de pino, se modelaron las curvas de crecimiento definitivas de diámetro acumulado por año. A su vez, a partir de las ecuaciones y parámetros calculados en cada especie de pino se obtuvieron los valores de media, máxima, mínima y desviación estándar del crecimiento; que permitieron comparar las respectivas tasas de crecimiento.

Asimismo, siguiendo la metodología propuesta por Bogino y Villalba (2008), se procedió a determinar el incremento corriente anual (ICA) y el incremento medio anual (IMA) con las siguientes formulas:

$$ICA = \pi (r_i^2 - r_{i-1}^2)$$

$$IMA = \pi r^2 / i$$

Donde r representa la longitud del radio (suma de anillos) en el año i.

Finalmente, se construyeron y compararon las curvas de ICA e IMA para ambas especies de pino, determinando de esta manera el turno óptimo de corta en cada plantación.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 ANÁLISIS DENDROCRONOLÓGICO

4.1.1 VARIABILIDAD DEL ANCHO DE LOS ANILLOS DE CRECIMIENTO

A través de la marcación y medición del ancho de anillos, se construyeron las respectivas series radiales para las especies *P. patula* y *P. muricata*. El análisis de estas series reveló una variabilidad caracterizada por la secuencia de anillos de crecimiento anchos y estrechos dispuestos de manera indistinta; pudiéndose indicar que dicha variabilidad del ancho de anillos es un indicador de la sensibilidad de las especies de pino a responder a los estímulos del medio; y por tanto presentar potencial para la aplicación de técnicas dendrocronológicas. (Figura 8).

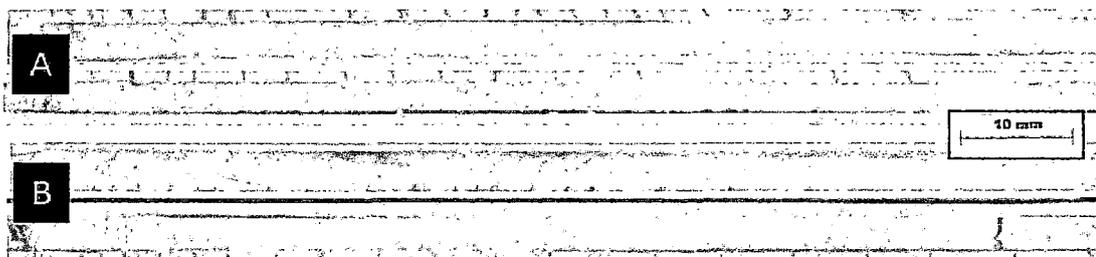


Figura 8 Variabilidad de ancho de anillos en *P. patula* (A) y *P. muricata* (B).

4.1.2 SINCRONIZACIÓN (COFECHADO) Y/O CONTROL DE CALIDAD DE LOS ANILLOS DE CRECIMIENTO

Teniendo en cuenta la variabilidad del ancho de anillos, se midieron los respectivos anchos y se construyeron las series individuales para ambas especies de pino (Figura 9). Se puede observar la presencia de una señal común entre las series radiales, además de una tendencia del ancho de anillos, a disminuir conforme aumenta la edad de los árboles. Al respecto, García (2005) señala que esta respuesta; es decir, la disminución del ancho de anillos, está asociada al incremento de la competencia por luz y nutrientes del suelo, conforme los árboles aumentan de tamaño.

Es evidente, además, que a nivel intraespecífico existe una tendencia similar en el comportamiento de las series individuales del ancho de anillos. Asimismo, comparadas ambas

especies, se puede notar la presencia de un mismo ritmo de crecimiento para los periodos 1997-1998 (año 1997), 2000-2001 (año 2000) y 2004-2005 (año 2004).

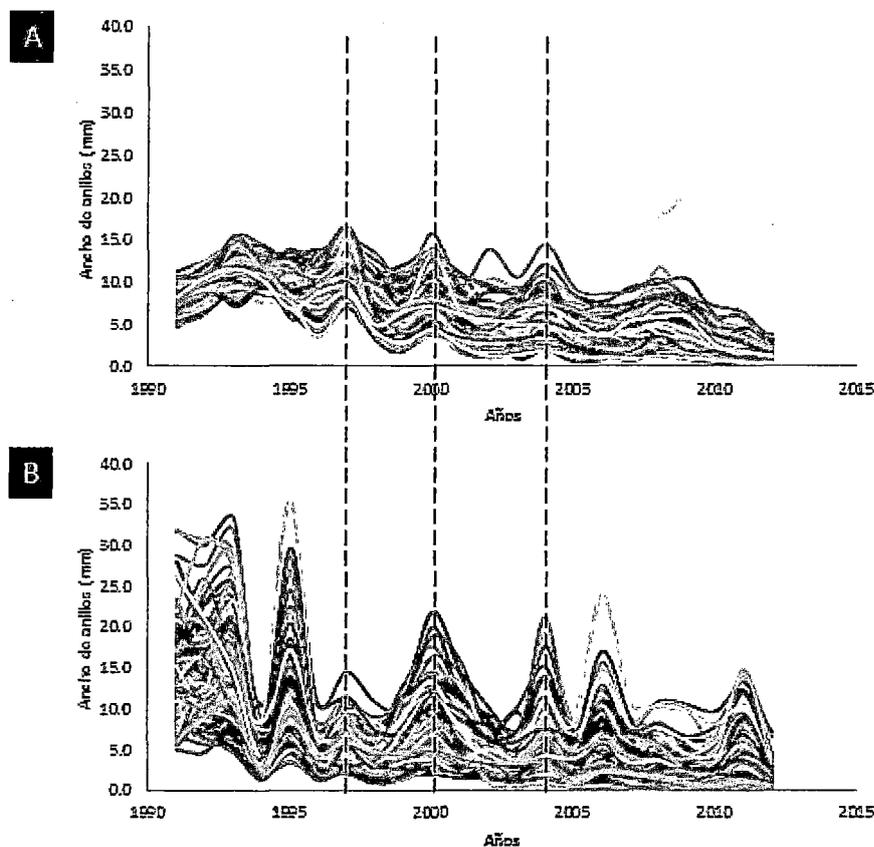


Figura 9 Series individuales del ancho de anillos con señal común en *P. patula* (A) y *P. muricata* (B).

Las series de los anillos de crecimiento que mostraron correlaciones bajas y al mismo tiempo no llegaron a un nivel de correlación crítico de significancia (Pearson 99 por ciento) fueron excluidas del análisis; por lo que la señal común de las series restantes fue maximizada formando una serie maestra (índices) que representa el comportamiento similar en cada especie (Figura 10). Para ello, se sincronizaron las series individuales con la serie promedio (de las series individuales), lográndose detectar errores en la medición e identificación de anillos falsos y ausentes. Al respecto, Rosero (2009) señala que la minimización del efecto de la variabilidad entre las capas de crecimiento es importante para el análisis dendrocronológico; pues una

adecuada muestra de leño posibilita (i) la identificación de una señal común y, por lo tanto, una mejor sincronización de los anillos de crecimiento y (ii) reducción de la variabilidad interna, para la correcta aplicación de técnicas de marcación, identificación y medición de anchos de anillos de crecimiento verdaderos.

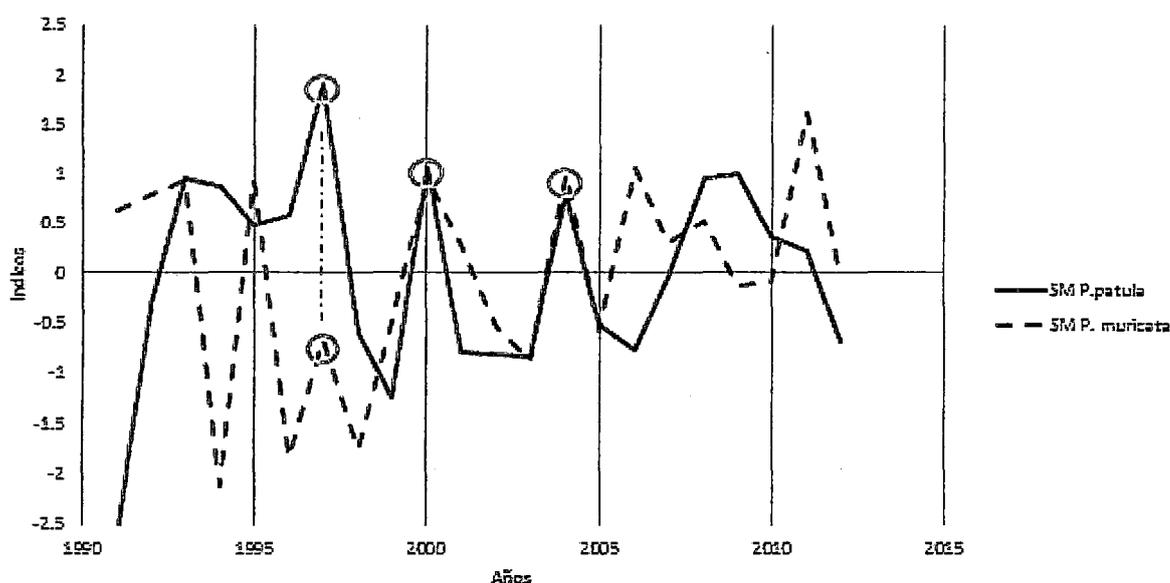


Figura 10 Series maestras (índices) de *P. patula* y *P. muricata* obtenidas con el programa COFECHA

Por último, de los 35 árboles muestreados de *P. patula* y *P. muricata* (106 y 122 series respectivamente), fueron cofechados sólo 34 árboles (96 series individuales) en la primera especie y 34 árboles (111 series individuales) en la segunda, presentándose inter-correlaciones (Pearson al 99 por ciento) significativas de 0.662 y 0.753, respectivamente; lo cual indica que existen características comunes (coincidencias) que evidencian una señal común en el crecimiento de los árboles de cada especie. El cuadro 1 muestra los resultados del control de calidad de las series y las intercorrelaciones que presentan una señal común de las series de los anillos de crecimiento.

Cuadro 1 Control de calidad de series realizado por el programa COFECHA

<i>Especie</i>	<i>Nº de árboles (series)</i>		<i>Nº Total de anillos observados</i>	<i>Intercorrelación Media</i>	<i>Intercorrelación crítica COFECHA (Pearson 99 por ciento)</i>
	<i>Antes</i>	<i>Después</i>			
<i>P. patula</i>	35 (106)	34 (96)	2112	0,662	0,515
<i>P. muricata</i>	35 (122)	34 (111)	2442	0,753	0,515

Fuente: Elaboración propia.

4.1.3 OBTENCIÓN DE CRONOLOGÍAS

A partir de las series maestras generadas en cada especie de pino, y con ayuda del programa ARSTAN, se procedió a obtener las cronologías para cada una de ellas (Figura 11).

Con los datos de ancho de anillos, el programa ARSTAN genera una curva de regresión ajustada a éstos, estimando así una tendencia de crecimiento para el conjunto de árboles bajo la forma de índices (Holmes *et al.*, 1986). En este programa, las series maestras de los árboles de pino pasaron por un proceso de remoción de las tendencias de crecimiento no climáticas y estandarización (normalización) de las mencionadas series.

Después de la normalización de los valores de los árboles para cada especie de pino, se obtuvieron las respectivas funciones medias calculadas. De esta forma, el programa generó tres versiones de la cronología: una serie “Arstan”, una “Residual” y una “Standard” teniendo en cuenta el deseo de maximizar la señal común y minimizar la cantidad de ruido. En el presente estudio fue escogida la serie que obtuvo el mejor resultado, en el caso fue la serie Arstan.

En la Figura 11 también se puede observar que la sensibilidad media; es decir, el promedio de la diferencia relativa entre el ancho de un anillo respecto del inmediato adyacente (Fritts, 1976), es relativamente alta. Esto implica que en los individuos de ambas especies, la variabilidad del crecimiento medida en la dirección radial de los árboles estaría vinculadas a las variaciones del clima; ya que, como señalan Roig *et al.* (2001), las condiciones climáticas de un determinado año tienen efecto directo sobre las características del anillo de crecimiento formado durante ese año.

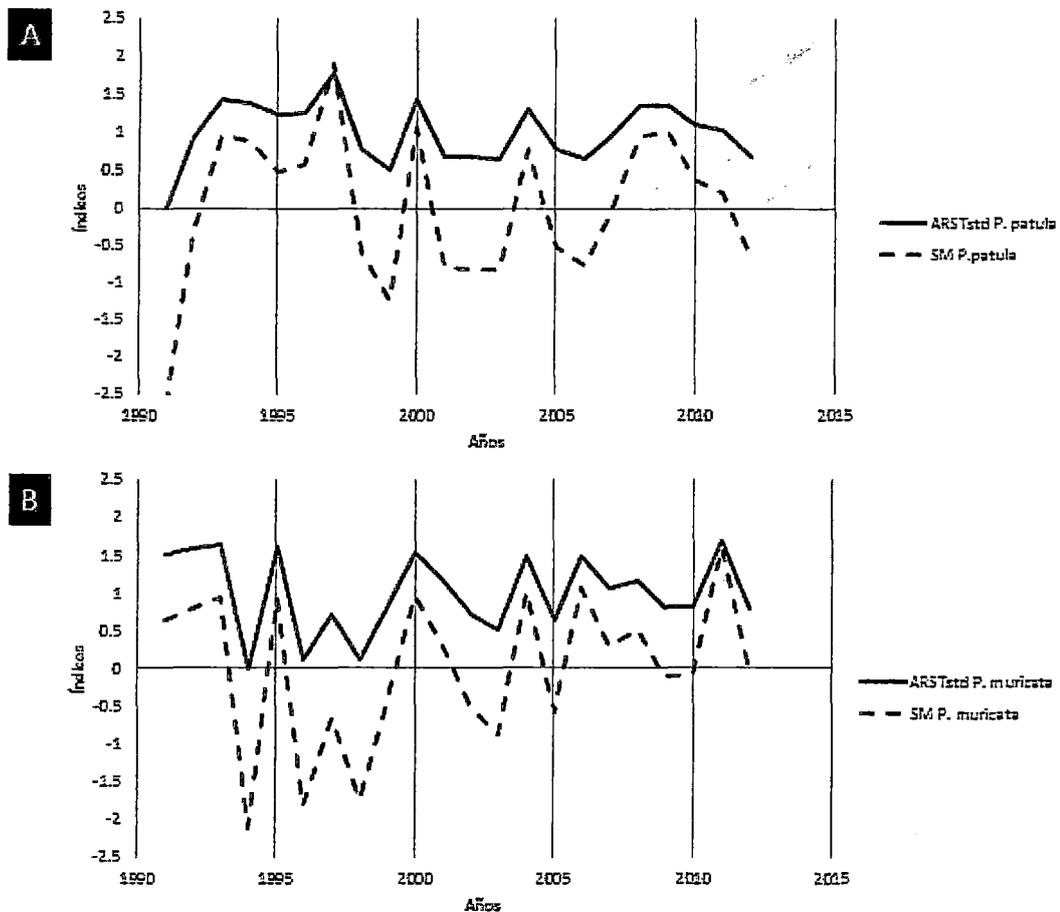


Figura 11 Series cronológicas después de la remoción de tendencias con el programa ARSTAN (líneas continuas) en *P. patula* (A) y *P. muricata* (B).

4.2 ANÁLISIS DENDROCLIMATOLÓGICO

4.2.1 VARIABLES CLIMÁTICAS Y SU CORRELACIÓN CON LAS CRONOLOGÍAS DE *P. patula* Y *P. muricata*

Se realizó un análisis de los registros meteorológicos de precipitación y temperatura media mensual en la estación granja Porcón – Cajamarca (3261 msnm), en el periodo de 1990-2013, para conocer la correlación de los datos climatológicos con las series cronológicas de cada especie.

En los datos climatológicos representados en la Figura 12, se puede observar que existe una marcada variabilidad de la precipitación media mensual en comparación a la temperatura media mensual. Asimismo, la temporada húmeda se inicia en el mes de mayo y finaliza el mes de octubre ($pp > 100\text{mm}$); mientras que la temporada seca se da en los meses de junio, julio y agosto ($pp < 60\text{mm}$).

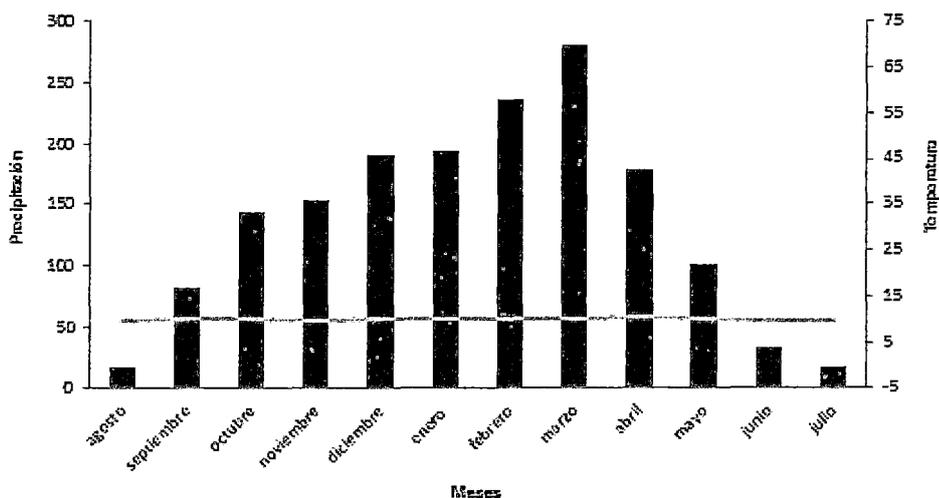


Figura 12 Temperatura y precipitación media mensual registrada en granja Porcón

En el análisis de la correlación entre las series cronológicas de los árboles de *P. patula* y *P. muricata* y los datos de precipitación anual acumulada en Granja Porcón (1990-2012), se obtuvieron coeficientes de correlación Pearson significativos y positivos de $r = 0,56$ y $r = 0,38$, respectivamente; mientras que, la temperatura media anual (1990-2012) mostró coeficientes de correlación Pearson no significativos y negativos de $r = -0,17$ y $r = -0,11$ en *P. patula* y *P. muricata*, respectivamente. Ambos análisis llevaron a cabo con un nivel de confianza de 95 por ciento.

Los coeficientes de correlación Pearson significativos y positivos obtenidos entre las cronologías de *P. patula* y *P. muricata* y los datos de precipitación media anual, indican que ésta, a diferencia de la temperatura, es el factor más influyente en la formación de anchos de anillos y por lo tanto del crecimiento diametral; ya que, como se muestra en la Figura 13, la formación de anillos de crecimiento anchos y estrechos es una respuesta del cambium a los

periodos de mayor y menor precipitación, respectivamente. En este sentido, especies como *P. patula* y *P. muricata* se caracterizan por ser especies de crecimiento cíclico anual cuyo factor limitante es la precipitación (Rosero, 2009, Melo, 2010).

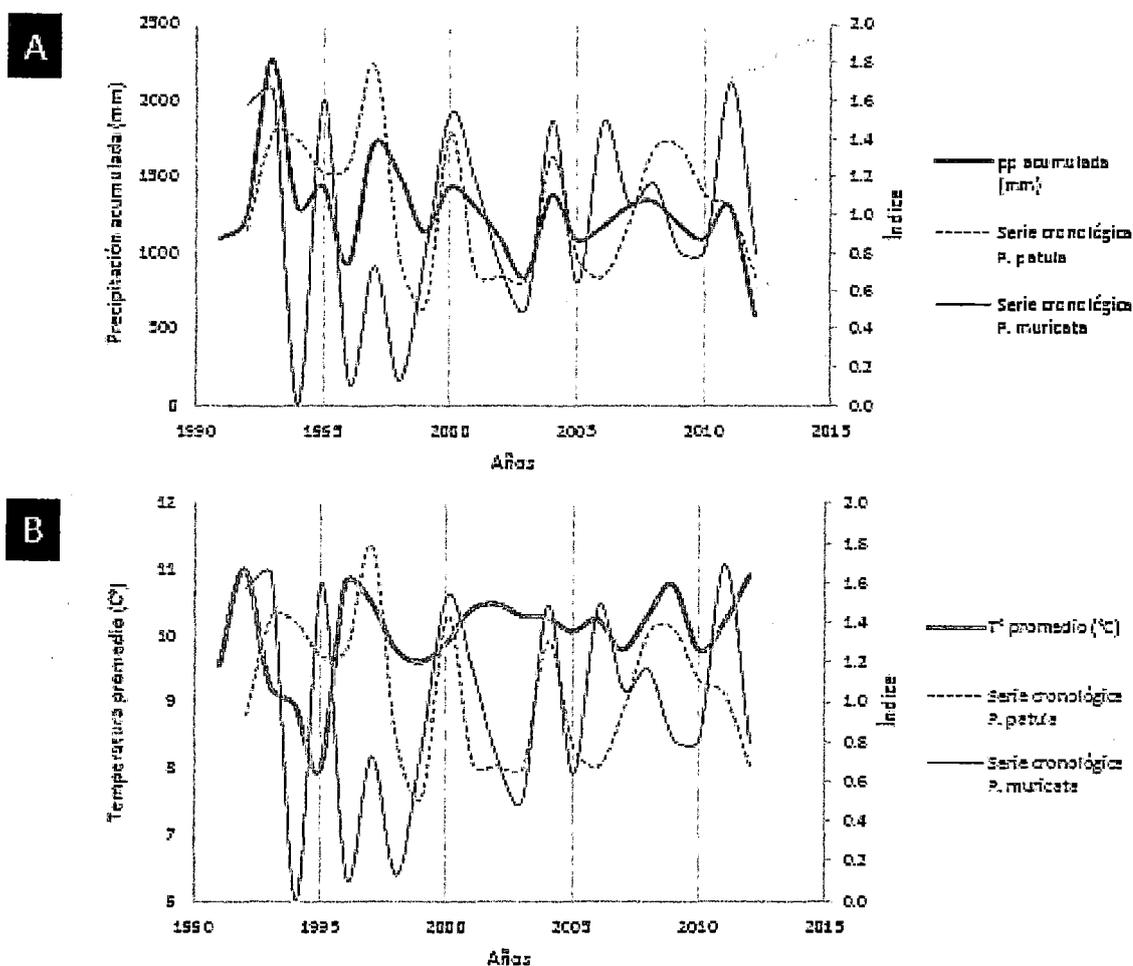


Figura 13 (A) Precipitación anual acumulada (mm) y (B) temperatura media anual (°C) versus series cronológicas de *P. patula* (línea punetada) y *P. muricata* (línea continua)

4.2.2 RESPUESTA CLIMÁTICA EN EL CRECIMIENTO DE LOS ÁRBOLES: DENDROCLIMATOLOGÍA

La influencia del clima en el crecimiento diametral de los árboles, en las poblaciones de ambas especies, fue comprobada mediante la correlación entre sus respectivas series cronológicas y las variables climáticas (precipitación y temperatura) en la granja Porcón.

El análisis dendroclimatológico en el periodo 1990-2013, a través del programa RESPO (Holmes, 1994), muestra que la precipitación presenta correlaciones Pearson significativas, positivas y negativas, tanto en *P. patula* ($r=0.464$, $r=-0.304$) como en *P. muricata* ($r=0.463$, $r=0.474$, $r=-0.4$, $r=-0.498$, $r=-0.592$); por otro lado, la temperatura en el mismo periodo presenta una correlación significativa y negativa solo en la especie *P. muricata* ($r=-0.342$). Se debe mencionar que ambos análisis se hicieron con un nivel de confianza de 95 por ciento.

Cuadro 2 Coeficientes de correlación Pearson para la relación entre índices de anchos de anillos (serie cronológicas) de *P. patula* y *P. muricata*, y los valores mensuales de precipitación total (mm) y temperatura media (°C). Nivel de significancia 0.3.

		<i>Pinus patula</i>		<i>Pinus muricata</i>	
		<i>Precipitación</i>	<i>Temperatura</i>	<i>Precipitación</i>	<i>Temperatura</i>
<i>Mes</i>		<i>Correlación Pearson</i>	<i>Correlación Pearson</i>	<i>Correlación Pearson</i>	<i>Correlación Pearson</i>
<i>Año anterior</i>	<i>A (-1)</i>	0,109	-0,148	0,085	0,204
	<i>S (-1)</i>	0,090	0,111	0,199	0,172
	<i>O (-1)</i>	0,069	0,150	-0,182	0,202
	<i>N (-1)</i>	-0,101	0,091	-0,400	-0,073
	<i>D (-1)</i>	-0,230	0,115	-0,498	-0,342
<i>Año corriente</i>	<i>E</i>	0,464	-0,178	0,463	0,275
	<i>F</i>	0,285	0,058	-0,085	-0,175
	<i>M</i>	0,264	-0,204	0,474	0,042
	<i>A</i>	0,111	-0,119	0,186	0,020
	<i>M</i>	0,188	-0,109	0,126	0,284
	<i>J</i>	-0,304	-0,034	0,064	-0,066
	<i>J</i>	-0,100	-0,175	-0,592	-0,154
	<i>A</i>	0,125	-0,268	-0,025	-0,019

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados del cuadro 2 muestran que la precipitación media anual (señal común) influye significativamente en el ancho de anillos de crecimiento de los árboles de *P. patula* y *P. muricata*; mientras que la temperatura solo muestra influencia en los anillos de crecimiento de

P. muricata. La sincronía existente entre las cronologías de los árboles, en ambas especies, con la precipitación media anual, indica que ésta es la principal variable climática que actúa en el crecimiento diametral de los árboles. Al respecto, Melo (2010) en un estudio dendrocronológico realizado en *Pinus radiata*, señala que la precipitación, en comparación con la temperatura, influye más en el crecimiento de los árboles de dicha especie. Estos niveles de significancia se dan porque el agua tiene gran influencia en el crecimiento de árboles, no solamente como resultado del déficit de precipitación durante ciertas estaciones del año, sino también debido a la variación de la precipitación de año a año (Brienen y Zuidema, 2005).

Para entender mejor los resultados obtenidos en ambas especies de pino, se debe mencionar que en el Hemisferio Sur, el año dendrocronológico no coincide con el año calendario, debido a que la estación de crecimiento es compartida por dos años. Schulman (1956) señala que si el año calendario es "t", el año dendrocronológico corresponde al año en que el crecimiento se inició "t-1". En este sentido, el inicio del crecimiento de los árboles de *P. patula* y *P. muricata* en granja Porcón coincide con el inicio de la temporada de lluvias; es decir, en los meses de setiembre-octubre del año t-1, y finaliza en los meses de Mayo-Abril del año t, con el cese de las lluvias. De este modo las bajas precipitaciones inducirían a una dormancia en la actividad cambial de las especies, caracterizándolas como especies de crecimiento cíclico anual cuyo factor limitante es la precipitación.

Huamán (2011) menciona que la época de inicio de las temporadas de lluvia está relacionada con el aumento gradual de agua en el suelo, producto de las precipitaciones, y que después de 2 a 3 meses de lluvia ayuda a los árboles a superar los niveles críticos y lograr mantener un balance positivo de agua, permitiendo de esa manera el uso de todos los nutrientes (producto de la fotosíntesis) almacenados en los meses de latencia, dando lugar así al inicio del crecimiento.

Para los árboles de *P. patula* la precipitación y el crecimiento del fuste presentan una correlación positiva y significativa en el mes de enero (temporada húmeda); y una correlación negativa y significativa en el mes de Junio (temporada seca). La correlación positiva y significativa en el mes de enero indica que los niveles de precipitación presentan una mayor influencia en el crecimiento al inicio de la época intensa de lluvias; asimismo, las correlaciones en los meses siguientes (hasta mayo) son positivas, pero no significativas. A comienzos de la

época seca (Junio) la correlación entre la precipitación y el crecimiento se vuelve negativa, lo cual se debe a que en esta etapa el crecimiento es limitado por el cese de la precipitación. Por otro lado, la temperatura y el crecimiento del fuste no presentan correlaciones significativas, tanto positivas como negativas, en ninguno de los meses analizados (Figura 14).

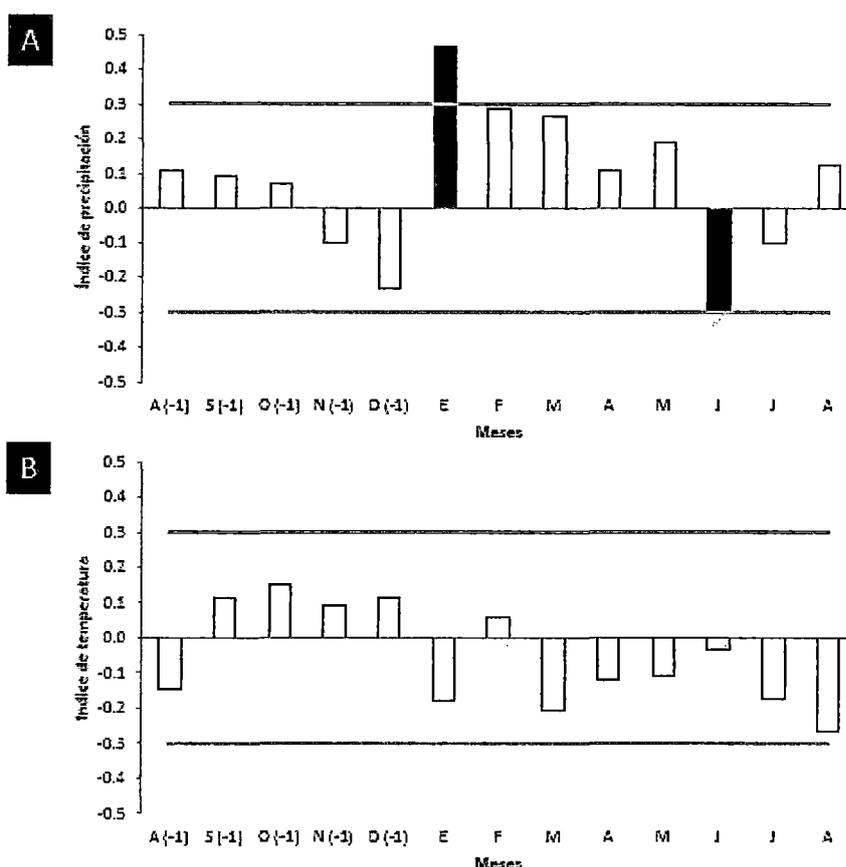


Figura 14 Correlación entre los índices de anillos de crecimiento con las variables climáticas mensuales de precipitación (A) y temperatura (B) en la especie *P. patula*.

En árboles de *P. muricata* la precipitación y el crecimiento de los árboles tienen correlaciones positivas y significativas en los meses de enero y marzo; lo cual indica que los primeros meses de intensa lluvia son clave en el crecimiento de los árboles. Asimismo, en Julio (época seca) y durante los meses de noviembre y diciembre (época húmeda) la correlación entre la temperatura y el crecimiento son negativas y significativas. En julio la correlación negativa

puede deberse a una disminución del crecimiento ante el cese de la precipitación; mientras que la correlaciones negativas en los meses de noviembre y diciembre indican que la precipitación dificulta el crecimiento, por lo que a mayor precipitación, en dichos meses, los incrementos en los anchos de anillos serán bajos. Fortuna (2007) menciona que al presentarse un aumento no gradual en la cantidad de lluvia en los meses de superación de los valores críticos, que se traduce en una saturación del suelo, este exceso de agua actúa como un factor limitante que dificulta el crecimiento de los árboles; por este motivo la correlación resulta negativa en estos meses (Figura 15). Por otro lado, la temperatura y el crecimiento de los árboles presentan una correlación negativa y significativa en el mes de diciembre (del año previo). Debe señalarse que el área de estudio se caracteriza por una temperatura casi constante durante todo el año; sin embargo, a partir del mes de diciembre ocurre un ligero aumento. Según Zúñiga (2012), el aumento de temperatura puede incrementar la tasa de evapotranspiración y poner a los árboles bajo estrés hídrico; por lo que, la correlación negativa entre la temperatura y el crecimiento puede ser un efecto directo asociado a la alta demanda de agua de los árboles y gran cantidad de lluvia en el mismo periodo.

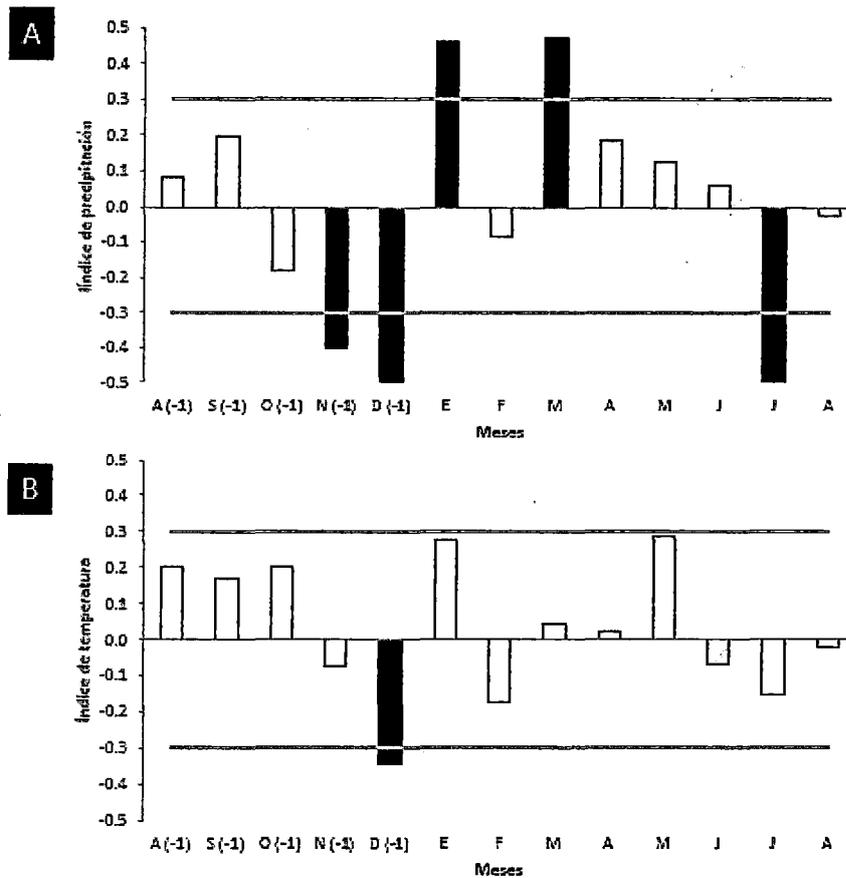


Figura 15 Correlación entre los índices de anillos de crecimiento con las variables climáticas mensuales de precipitación (A) y temperatura (B) en la especie *P. muricata*.

4.3 ANÁLISIS DENDROECOLÓGICO

4.3.1 CRECIMIENTO DIAMÉTRICO DE LOS ÁRBOLES

Demostrada la influencia de las variables climatológicas en las series cronológicas, y utilizando solo aquellas muestras que presentaron un nivel de correlación alto según COFECHA, se procedió a construir las curvas de crecimiento acumulado del diámetro, tanto de la especie de *P. patula* como de *P. muricata*. (Figura 16). De modo general, las curvas de los individuos de ambas especies presentan la configuración esperada: sigmoïdal, con un punto de inflexión, un punto de máxima tangencia y tendencia asintótica (Miessa y Tuyoshi, 2010).

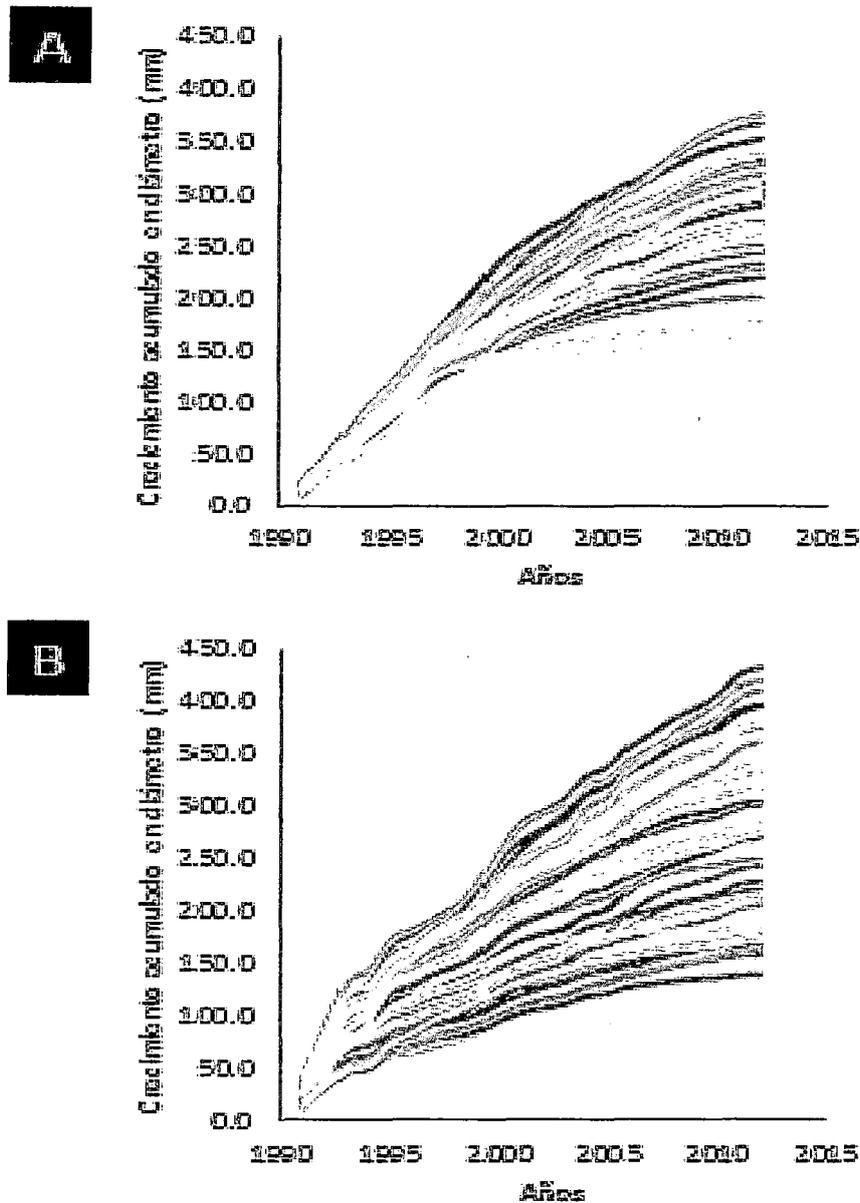


Figura 16 Descripción del crecimiento acumulado en diámetro de los árboles de *P. patula* (A) y *P. muricata* (B)

Según la Figura 16, se puede observar que en ambas especies el crecimiento tiende a ser horizontal en la parte más alta de las curvas (asintótico), debido a que el crecimiento del ancho de los anillos disminuye conforme aumenta la edad de la población. Esta disminución se debe principalmente al incremento de la competencia entre individuos, la cual está ligada a la

reducción de la disponibilidad de luz debido al aumento del tamaño de copas de los árboles (Brienen y Zuidema, 2006). Da Cunha (2009) señala que el efecto negativo de la competencia en el crecimiento se refleja en la disminución del incremento de los árboles. Huamán (2011), mencionan que al analizar el crecimiento se debe tener presente que el crecimiento total es resultado del efecto de las características genéticas de la especie, el vigor (capacidad intrínseca para aprovechar los recursos disponibles), la etapa de desarrollo de los árboles (edad), el sitio (disponibilidad de agua, minerales, luz y temperatura) y el manejo silvicultural referido a la competencia.

Además, la tendencia de horizontalidad en las curvas puede alterarse a través de tratamientos silviculturales como raleos, liberaciones, refinamientos, etc.; ya que un aumento en la disponibilidad de luz puede traducirse en un incremento del crecimiento en diámetro de los individuos. Los tratamientos silviculturales como raleos, propician una respuesta en términos de incremento en el crecimiento de los árboles individuales y del rodal (Louman *et al.*, 2001). Sin embargo, en las curvas de crecimiento acumulado obtenidas en ambas especies de pino, es evidente notar la ausencia de cambios (inflexiones), por lo que se demuestra que los rodales evaluados no han recibido raleos que hayan contribuido al incremento del crecimiento de los árboles.

4.3.2 MODELAMIENTO DEL CRECIMIENTO DIAMÉTRICO

Generadas las curvas de crecimiento acumulado para cada especie, se procedió a modelar el crecimiento diamétrico de los árboles a través de cinco ecuaciones (modelos) no lineares: Logístico, Richards, Gompertz Relation, Chapman-Richards y Weibull model (Vanclay, 2000; Giraldo y Del Valle, 2012). La familia de ecuaciones de crecimiento asintótico no lineares es ampliamente utilizada en el campo forestal para modelar el crecimiento de especies forestales. La capacidad de ajuste de los modelos se evaluó mediante el uso de parámetros estadísticos y gráficos de residuos. Dichos parámetros estadísticos fueron el Índice de Akaike (AIC), Error Estándar (ES), Suma de Cuadrados Residuales (SCR) y Coeficiente de Determinación (r^2). Aunque existen opiniones fundamentadas que plantean dudas en relación al empleo del r^2 en la selección de modelos, este estadístico brinda una idea clara de la variabilidad de los datos que explican; no obstante, no debe utilizarse como único criterio para elegir el modelo que mejor

predice entre un conjunto de modelos candidatos (Crecente-Campo, 2008). Cancino (2006) señala que al utilizar el AIC, ES y SCR debe preferirse aquel modelo que entregue el valor más bajo; lo contrario sucede cuando se usa el r^2 . En este sentido, según los resultados obtenidos (Cuadro 3) el modelo que mejor se ajusta estadísticamente al crecimiento tanto de *P. patula* como *P. muricata* es “Chapman-Richards”.

Cuadro 3 Modelos de crecimiento y estadísticos probados con datos totales de edad y diámetro acumulado para *P. patula* y *P. muricata*.

<i>Especie</i>	<i>Nombre</i>	<i>Ecuación</i>	<i>ES</i>	<i>r</i> ²	<i>SCR</i>	<i>AIC</i>	<i>GL</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
<i>P. patula</i>	Chapman Richards	$Da=a \times [(1-b \times e^{(-c \times edad)})]^{1/(1-d)}$	31,790	0,874	752837	7302,555	744	339,430	1,023	0,095	0,167
	Logistic	$Da=a/[1+b \times e^{(-c \times edad)}]$	33,050	0,864	813719	7360,724	745	283,222	8,006	0,271	
	Richards	$Da=a/[1+e^{(b-c \times edad)}]^{(1/d)}$	32,200	0,871	772310	7321,656	744	298,477	-6,525	0,178	0,001
	Weibull Model	$Da=a-b \times e^{(-c \times edad^d)}$	31,810	0,874	752993	7304,71	744	333,436	340,416	0,062	1,126
	Gompertz Relation	$D=a \times e^{[-e^{(b-c \times edad)}]}$	32,200	0,871	772290	7321,637	745	298,500	1,025	0,178	
<i>P. muricata</i>	Chapman Richards	$Da=a \times [(1-b \times e^{(-c \times edad)})]^{1/(1-d)}$	65,200	0,545	3166621	8377,11	744	316,112	0,445	0,112	0,731
	Logistic	$Da=a/[1+b \times e^{(-c \times edad)}]$	65,480	0,541	3194355	8383,633	745	285,456	4,798	0,202	
	Richards	$Da=a/[1+e^{(b-c \times edad)}]^{(1/d)}$	65,260	0,544	3172526	8378,504	744	306,030	-5,964	0,131	0,001
	Weibull Model	$Da=a-b \times e^{(-c \times edad^d)}$	65,030	0,547	3146164	8374,262	744	-2025,000	-1985,000	-0,035	0,471
	Gompertz Relation	$D=a \times e^{[-e^{(b-c \times edad)}]}$	65,260	0,544	3172499	8378,497	745	306,067	0,719	0,131	

Fuente: Elaboración propia.

ES: Error estándar

r²: Coeficiente de determinación

SCR: Suma de Cuadrados Residuales

AIC: Índice de Akaike

GL: Grados de libertad

Parámetros de las ecuaciones:

- Da (Diámetro acumulado): Variable dependiente
- Edad: Variable independiente

e: Constante de Euler ≈ 2,71828

a, b, c y d: Coeficientes de la ecuación.

A pesar que el modelo Chapman-Richards describe mejor el crecimiento en ambas especies de pino, se observa una alta variabilidad de las series totales de anillos (Figura 17). Giraldo y Del Valle (2012) señalan que en las funciones no lineales es característica la ausencia de varianza homogénea a lo largo de la distribución de los mismos. En este sentido, los gráficos de residuos son una herramienta que nos permite validar la eficiencia de la ecuación ajustada y diagnosticar la presencia de observaciones influentes denominadas “valores atípicos” u “outliers” (Da Cunha, 2009). Según la Figura 18, en las series cronológicas totales existe un patrón de normalidad improbable de residuales reflejado en valores de $p=0.99$ por ciento para *P. patula* y $p=2.60$ por ciento para *P. muricata*; los cuales son originados por valores atípicos. Por ello, para suavizar la distribución de las series se retiraron del análisis dichos datos en ambas especies de pino (Figura 19), obteniéndose los valores más representativos y lográndose obtener un patrón de normalidad no improbable de residuales tanto en *P. patula* ($p=31.44$ por ciento) como en *P. muricata* (78.20 por ciento). (Figura 20).

Finalmente, con los valores más representativos de las series, es decir, aquellos cuyos valores atípicos fueron retirados del análisis, se volvieron a modelar las series de crecimiento obteniéndose que nuevamente el modelo Chapman-Richards, es aquel que describe mejor el crecimiento en ambas especies de pino (Cuadro 4). Se obtuvieron valores estadísticos más bajos de índice de Akaike (AIC), Error Estándar (ES) y Suma de Cuadrados Residuales (SCR); mientras que el coeficiente de determinación (r^2) se incrementó a 0.941 en *P. patula* y 0.651 en *P. muricata*, mejorando la capacidad del modelo para explicar la relación entre los datos de edad y diámetro, en cada especie.

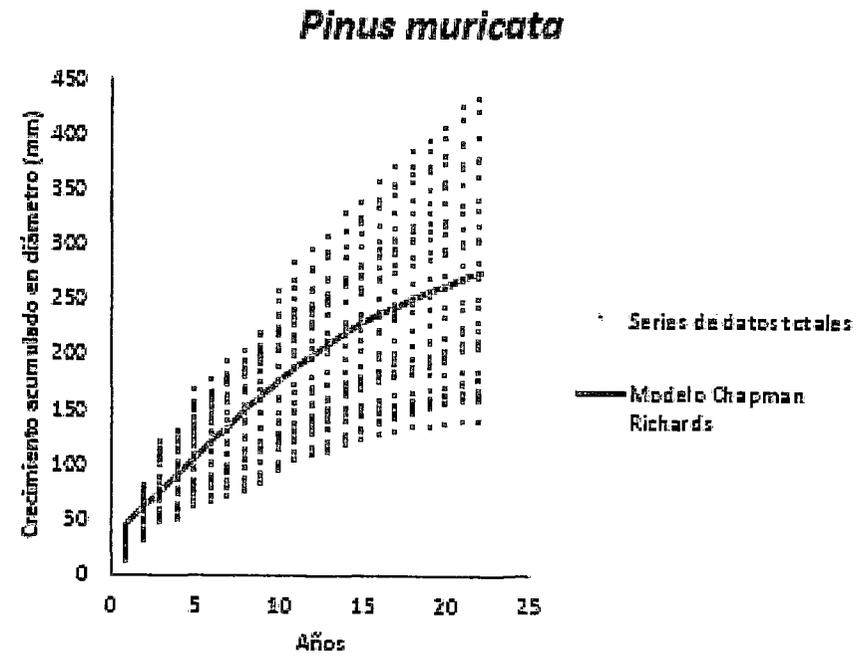
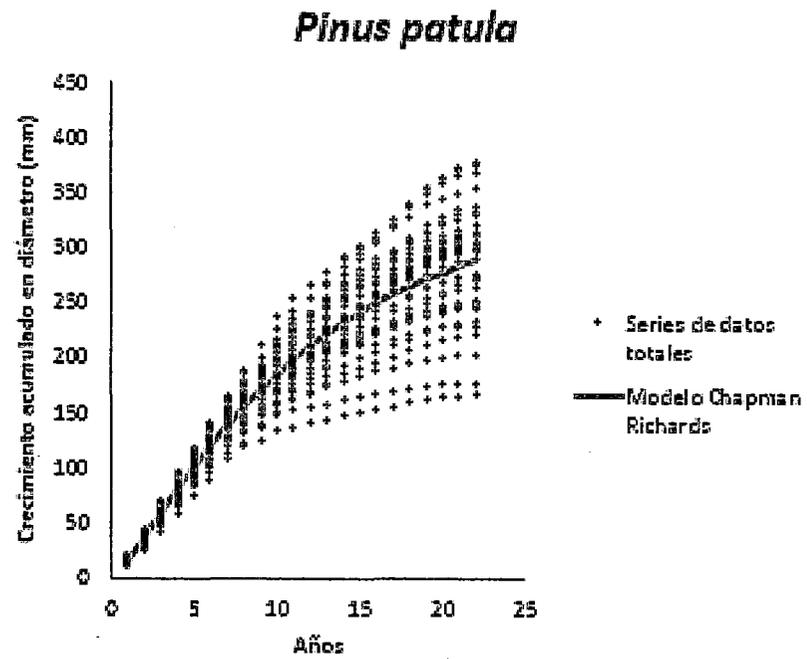
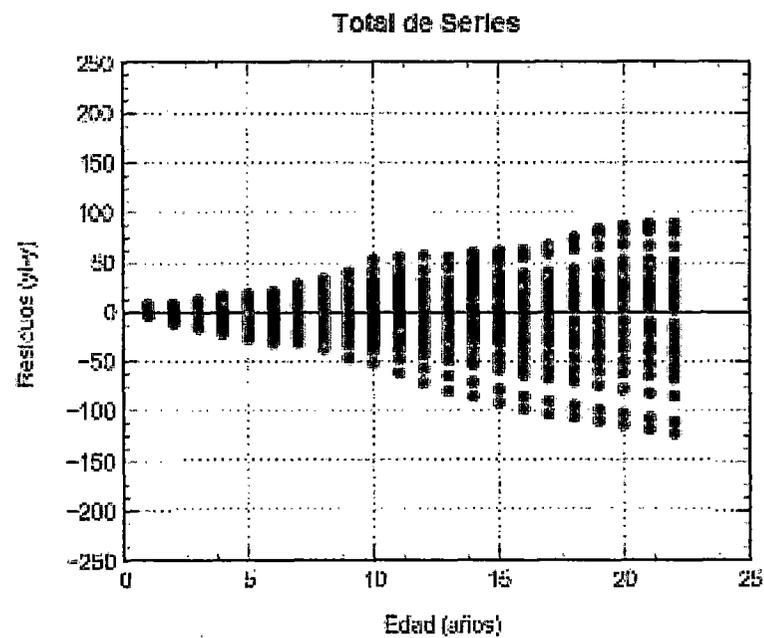
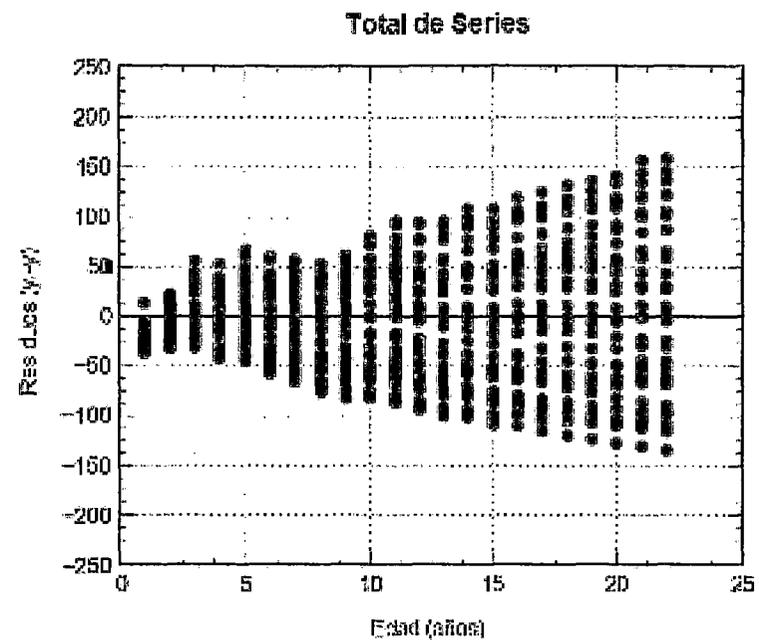


Figura 17 Curvas de crecimiento acumulado obtenidas con el modelo Chapman Richards en series totales



0.99 % (Patrón de normalidad improbable)



2.60 % (Patrón de normalidad improbable)

Figura 18 Distribución de residuales para el modelo Chapman Richards en series totales; donde, donde $p > 5$ por ciento, patrón de normalidad no improbable

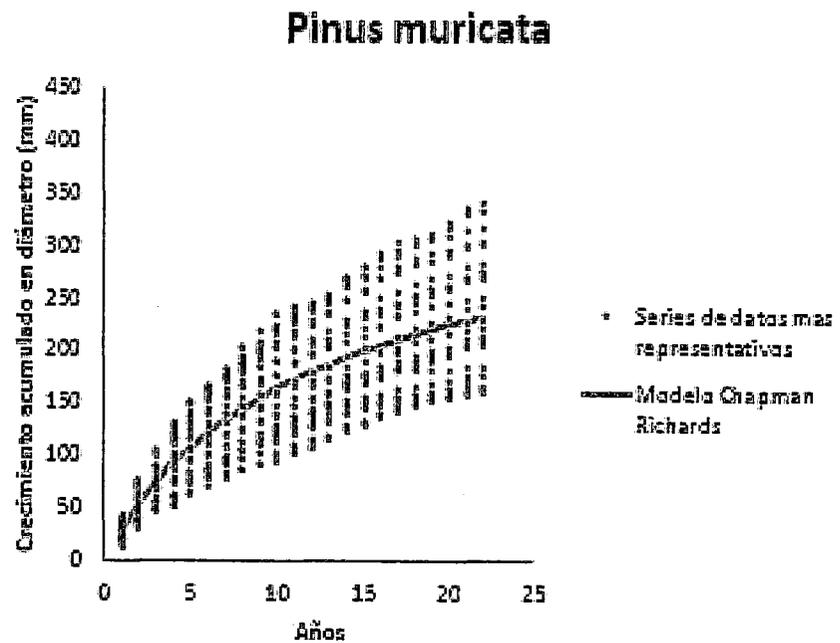
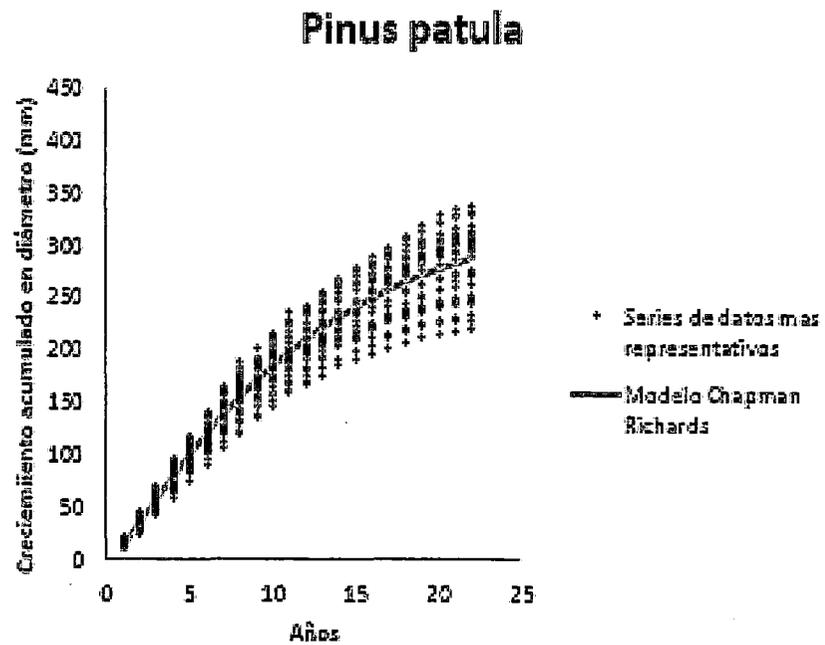
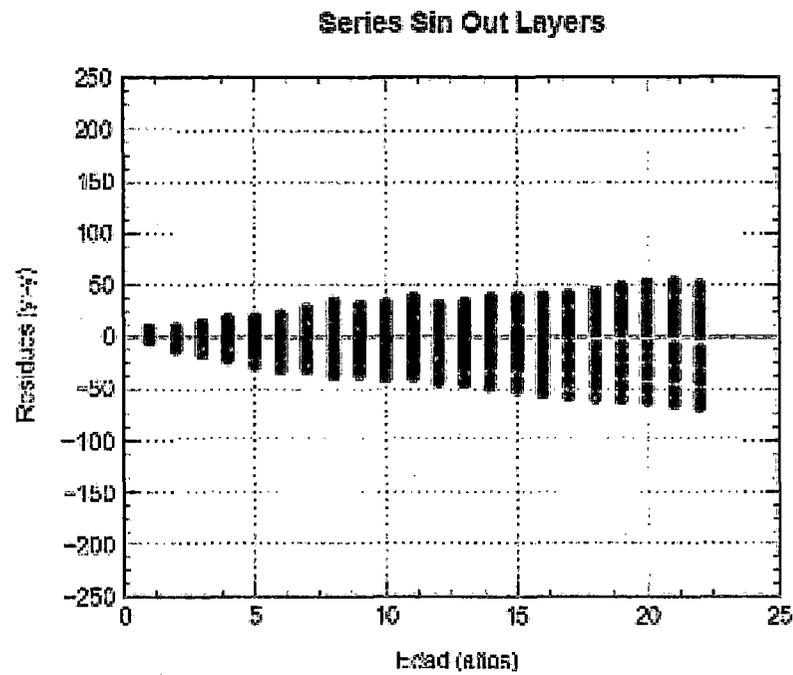
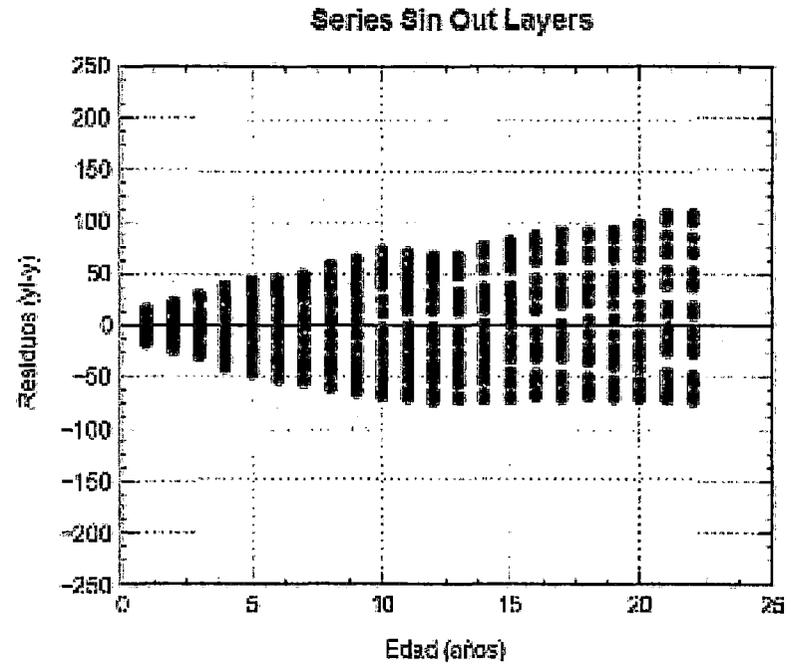


Figura 19 Curvas de crecimiento acumulado obtenidas con el modelo Chapman Richards en series con valores más representativos



31.44 % (Patrón de normalidad no improbable)



78.20 % (Patrón de normalidad no improbable)

Figura 20 Distribución de residuales para el modelo Chapman Richards en series con valores más representativos; donde; donde $p > 5$ por ciento, patrón de normalidad no improbable

Cuadro 4 Modelos de crecimiento y estadísticos probados con datos más representativos de edad y diámetro acumulado para *P. patula* y *P. muricata*.

<i>Especie</i>	<i>Nombre</i>	<i>Ecuación</i>	<i>ES</i>	<i>r</i> ²	<i>SCR</i>	<i>AIC</i>	<i>GL</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
<i>P. patula</i>	Chapman Richards	$Da=a \times [(1-b \times e^{(-c \times edad)})]^{1/(1-d)}$	21,170	0,94113	296598	5951,918	661	338,300	1,024	0,096	0,167
	Logistic	$Da=a/[1+b \times e^{(-c \times edad)}]$	23,080	0,93002	352572	6066,881	662	281,200	8,202	0,278	
	Richards	$Da=a/[1+e^{(b-c \times edad)^{1/d}}$	21,780	0,93763	314176	5990,206	661	296,502	-7,820	0,181	0,000
	Weibull Model	$Da=a-b \times e^{(-c \times edad^d)}$	21,190	0,94110	296730	5954,215	661	330,500	336,900	0,061	1,137
	Gompertz Relation	$D=a \times e^{[-e^{(b-c \times edad)}]}$	21,780	0,93764	314171	5990,195	662	296,500	1,033	0,181	
<i>P. muricata</i>	Chapman Richards	$Da=a \times [(1-b \times e^{(-c \times edad)})]^{1/(1-d)}$	42,530	0,65067	1050696	6042,436	580	284,636	1,024	0,065	-0,389
	Logistic	$Da=a/[1+b \times e^{(-c \times edad)}]$	43,300	0,64688	1089247	6063,48	581	225,692	4,465	0,254	
	Richards	$Da=a/[1+e^{(b-c \times edad)^{1/d}}$	42,910	0,65326	1069540	6052,818	580	234,337	-8,097	0,177	0,000
	Weibull Model	$Da=a-b \times e^{(-c \times edad^d)}$	42,550	0,65951	1050278	6044,204	580	329,401	352,407	0,153	0,691
	Gompertz Relation	$D=a \times e^{[-e^{(b-c \times edad)}]}$	42,910	0,65327	1069537	6052,816	581	234,339	0,712	0,177	

Fuente: Elaboración propia.

*r*²: Coeficiente de determinación

SCR: Suma de Cuadrados Residuales

AIC: Índice de Akaike

GL: Grados de libertad

Parámetros de las ecuaciones:

- Da (Diámetro acumulado): Variable dependiente
- Edad: Variable independiente

e: Constante de Euler ≈ 2,71828

a, b, c y d: Coeficientes de la ecuación.

4.3.3 VALIDACIÓN DEL MODELO DE CRECIMIENTO

La validación del modelo Chapman-Richards nos permite asegurar la calidad de ajuste de los datos que describen el crecimiento de los árboles de pino. En el Cuadro 5 se pueden observar los criterios estadísticos calculados con el 10 por ciento del conjunto de datos de edad y diámetro acumulado. Se puede observar que en ambas especies de pino los valores de los coeficientes de determinación (r^2) han incrementado, mientras que los valores de ES, SCR y AIC han disminuido. Asimismo, la distribución de residuales de *P. patula* y *P. muricata* (Figura 21) muestran un patrón de normalidad no improbable con valores de 53.74 y 76.93 por ciento, respectivamente. Cabe señalar que, a pesar que estos valores son menores a los encontrados en la distribución de residuales para los modelos ajustados (Figura 20), el patrón de normalidad no improbable sigue siendo aceptable ($p > 5$ por ciento), lo que se traduce en que el modelo Chapman-Richards es estable aun cuando fue obtenido solo con el 10 por ciento de los datos (Giraldo y Del Valle, 2012).

Cuadro 5 Criterios estadísticos y parámetros del modelo decrecimiento Chapman Richards validado con el 10 por ciento de los datos.

<i>Ecuación</i> Chapman Richards	<i>Especie</i>	<i>ES</i>	r^2	<i>SCR</i>	<i>AICC</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
$Da = a \times [(1 - b \times e^{(-c \times edad)})]^{1/(1-d)}$	<i>P. patula</i>	20,670	0,945	28623	627,750	305,850	0,833	0,143	0,539
	<i>P. muricata</i>	39,340	0,746	88209	615,860	270,566	1,032	0,074	-0,333

Fuente: Elaboración propia

r^2 : Coeficiente de determinación

SCR: Suma de Cuadrados Residuales

AIC: Índice de Akaike

GL: Grados de libertad

Parámetros de las ecuaciones:

- Da (Diámetro acumulado): Variable dependiente
- Edad: Variable independiente

e: Constante de Euler $\approx 2,71828$

a, b, c y d: Coeficientes de la ecuación.

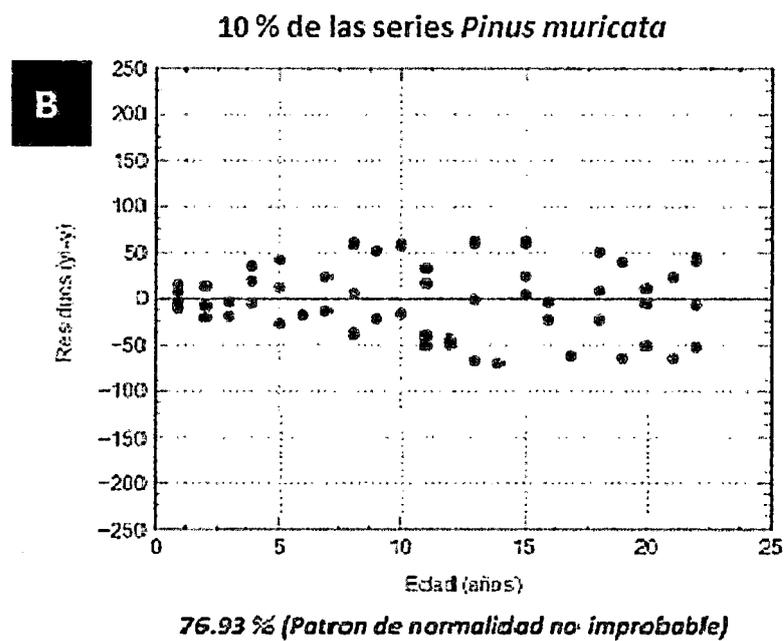
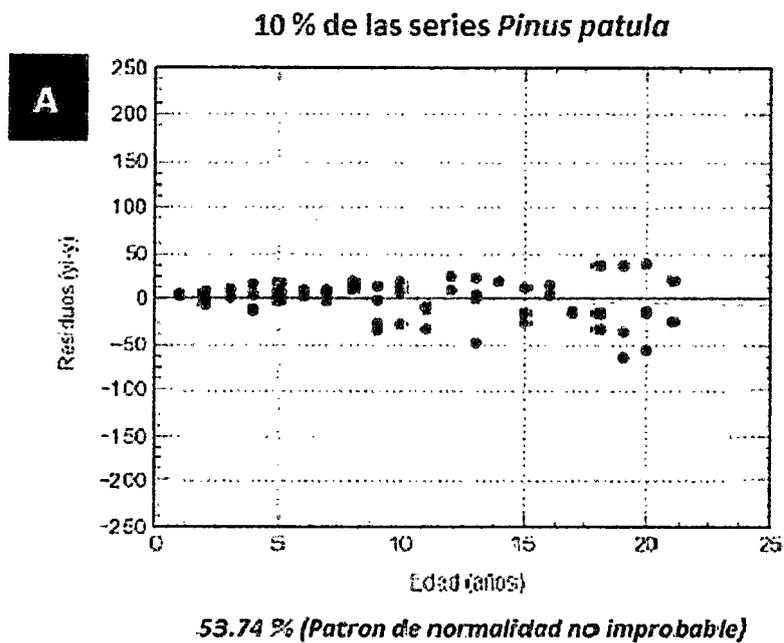


Figura 21 Distribución de residuales para el modelo ajustado Chapman-Richards con el 10 por ciento de los datos totales en *P. patula* (A) y *P. muricata* (B); donde $p > 5$ por ciento, patrón de normalidad no improbable

En la validación del modelo de crecimiento de cada especie se encontró que los valores estimados de los diámetros no difieren significativamente de los observados, con nivel de confianza del 95 por ciento ($\alpha=0.05$) y 21 grados de libertad, siendo el valor tabulado ($\chi^2_{(0.05,21)}$) superior al calculado, tanto en *P. patula* ($11.59 > 1.86$) como en *P. muricata* ($11.59 > 1.79$). En este sentido, según lo mencionado por Scolforo (1998), los modelos validados en cada especie permiten describir con precisión el crecimiento de los árboles en el área de estudio.

4.3.4 COMPARACIÓN DE TASAS DE CRECIMIENTO DIAMÉTRICO

Los rodales de pino evaluados se caracterizan por no haber recibido ningún tipo de tratamiento silvicultural que haya influenciado en el ritmo de crecimiento diamétrico de los árboles. En la Figura 22 se pueden observar las curvas de crecimiento acumulado obtenidas con el modelo Chapman-Richards para las dos especies de pino. Dichas curvas, tanto en *P. patula* como en *P. muricata*, se caracterizan por encontrarse en la etapa senil de crecimiento; es decir, aquella donde los incrementos radiales son cada vez más insignificantes, mostrando una asíntota al final de la curva. Asimismo, en la comparación de dichas curvas de crecimiento es evidente notar que la especie *P. muricata* tiene un mayor ritmo de crecimiento en la etapa juvenil, mientras que en el etapa madura y senil *P. patula* se caracteriza por ser mayor. Dicho cambio empieza a ser notorio a la edad de seis años aproximadamente. Cabe señalar que el crecimiento de un árbol, en un periodo de tiempo determinado, es el resultado de la influencia de distintos factores: edad del árbol, características genéticas de las especies, clima y disturbios (Juárez de Galíndez *et al.*, 2005).

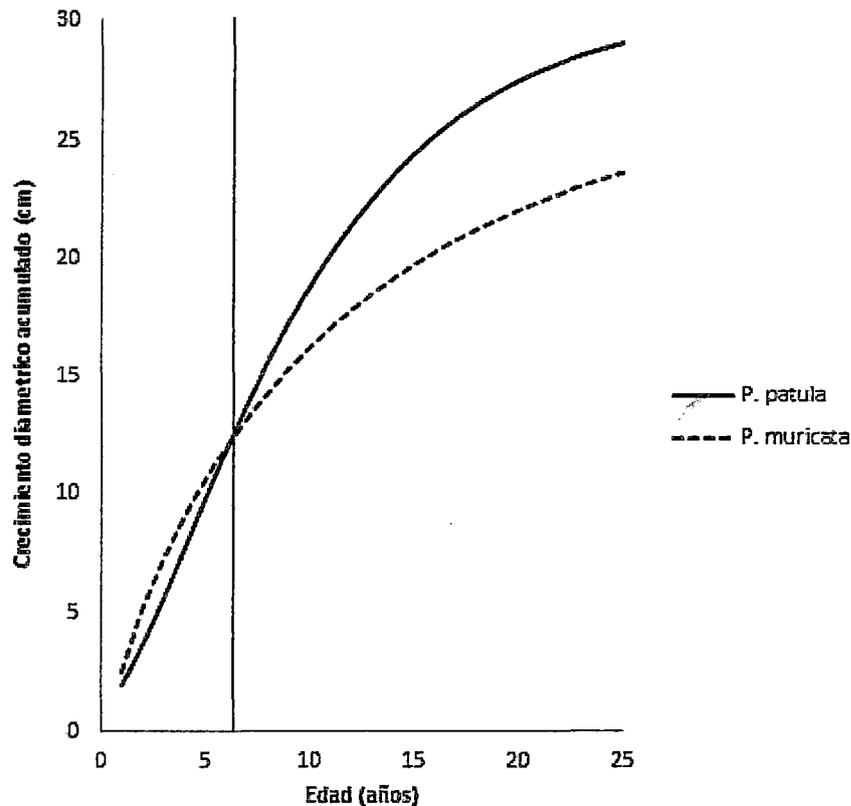


Figura 22 Crecimiento diamétrico acumulado modelado para 25 años

Asimismo, existe una clara diferencia entre el crecimiento de *P. patula* y *P. muricata*; el cual se caracteriza por tener un crecimiento menor (Figura 22). Esta diferencia en el crecimiento de *P. muricata* probablemente está ligada a las condiciones de sitio. Por ello, es preciso indicar que el sitio donde se encuentra plantado de *P. muricata* (Quebrada Cushuro), se caracteriza por estar ubicado sobre terrenos de pendiente mayor (50 por ciento), con suelos poco profundos, y orientada a ladera oeste del área. Se considera que estas condiciones son poco favorables para el crecimiento de esta especie, ya que, según Kozloff y Beidleman (1994), en condiciones ambientales ideales como suelos profundos, moderadamente ácidos y pendientes suaves, los árboles de *P. muricata* crecen altos, erguidos y con pocas ramas laterales. Asimismo, Park (2006), señala que esta especie necesita luz plena para crecer, por lo que una orientación norte de ladera es la adecuada para un adecuado crecimiento; en este sentido, se considera que la

ubicación (orientación) de la plantación no favorece el crecimiento de los árboles de esta especie.

La especie *P. patula*, por su parte, se encuentra creciendo sobre terrenos con una pendiente menor (30-40 por ciento), en comparación a la plantación de *P. muricata*, y en consecuencia sobre terrenos más profundos, lo cual favorece su crecimiento. Al respecto, Ospina *et al.* (2011) señalan que esta especie crece correctamente sobre terrenos con profundidad moderada y pendientes poco pronunciadas.

Cabe resaltar que, es posible que el mayor crecimiento en la etapa temprana de *P. muricata* pueda estar asociado a la capacidad de esta especie para aprovechar eficientemente la humedad de la neblina (Park, 2006; Fisher *et al.*, 2008) la cual es característica en la zona. Es así que el mayor crecimiento temprano, luego se ve interrumpido cuando los árboles comienzan a crecer, profundizando sus raíces (limitadas por la profundidad del suelo) y generando competencia a nivel de dosel (incrementada por los efectos de la exposición de la pendiente).

Por otro lado, en el cuadro 6 se observa la comparación de tasas de crecimiento de las dos especies de pino en estudio. Los árboles de la especie *P. patula* presentan una tasa de crecimiento medio de 1.13 cm/año, mientras que los árboles de *P. muricata* de 0.88 cm/año; en consecuencia, al comparar el diámetro proyectado con el modelo Chapman-Richards para la edad de 25 años resulta mayor el de la primera especie (29.04 cm) y menor el de la segunda (23.65 cm). Por lo tanto, debido a que las muestras de ambas especies de pino fueron extraídas de la misma zona, es claro que *P. patula* presenta un mejor crecimiento para este sitio, en comparación a *P. muricata*.

Cuadro 6 Tasa de crecimiento diamétrico de *P. patula* y *P. muricata*

<i>Especie</i>	<i>Edad (años)</i>	<i>Diámetro estimado (cm)</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>	<i>Media</i>	<i>S</i>
<i>P. patula</i>	25	29,04	0,23	2,11	1,13	0,67
<i>P. muricata</i>	25	23,65	0,26	2,66	0,88	0,63

Fuente: Elaboración propia.

43779

4.3.5 ANÁLISIS DEL INCREMENTO CORRIENTE ANUAL (ICA) E INCREMENTO MEDIO ANUAL (IMA)

La Figura 23 muestra las curvas ICA e IMA para ambas especies de pino. Se puede observar que en *P. patula* la intersección de las curvas se dio en el año 16 aproximadamente, cuando los árboles tienen un DAP estimado de 25.21 cm; mientras que en *P. muricata* la intersección de las curvas se dio en el año 13, cuando los árboles tienen un DAP estimado de 18.52 cm. En este sentido, ambas especies se encuentran en la etapa de madurez biológica; ya que, de acuerdo a Louman *et al.* (2001), un árbol o rodal coetáneo alcanzan esta etapa a partir del momento en que el ICA comienza ser menor que el IMA. Asimismo, Chagas y García (2002) mencionan que la edad en que se verifica la intersección entre las curvas de incremento, se define como la ideal para el raleo o corte a rasa; por tanto, ambas especies de pino ya alcanzaron la edad del turno óptimo de corta, siendo la edad de la plantación 22 años.

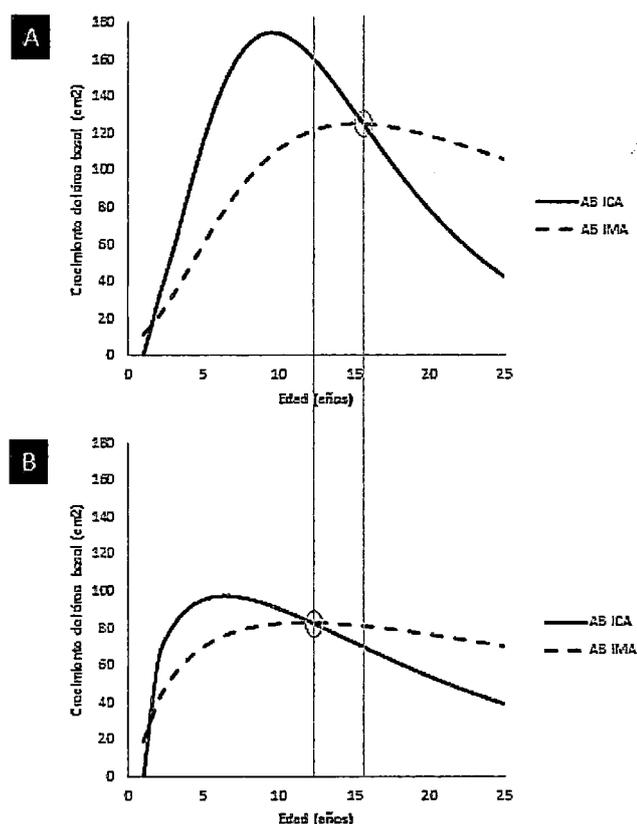


Figura 23 Comparación entre las curvas ICA e IMA en *P. patula* (A) y *P. muricata* (B).

Ospina *et al.* (2011), en estudios realizados en plantaciones de *P. patula*, señalan que cuando el ICA alcanza su valor máximo, la plantación ha llegado a la máxima capacidad de carga y el sitio empieza a estar sobreocupado; por lo que es necesaria realizar la primera entresaca o raleo, a intensidades de 25 o 33 por ciento, dependiendo de la condición de los individuos a extraer. Del mismo modo, Imaña y Encinas (2008), mencionan que cuándo el IMA alcanza el máximo valor, se define en los sistemas de manejo forestal como el mejor momento, desde el punto de vista silvicultural, para poder intervenir en los rodales a través de fuertes raleos o cortas de explotación.

La modelación del crecimiento del leño permite la estimación de momentos donde los árboles alcanzan la madurez biológica y provee información de utilidad para la planificación de una apropiada corta y renovación del bosque, con miras a obtener una mayor productividad (Juárez de Galíndez *et al.*, 2005).

5. CONCLUSIONES

- Las especies *Pinus patula* y *Pinus muricata* forman anillos de crecimiento bien definidos y de crecimiento anual.
- El análisis dendroclimatológico demostró que la precipitación es la variable climatológica de mayor influencia en el crecimiento de los árboles de *Pinus patula* y *Pinus muricata*.
- La mayor tasa de crecimiento diamétrico estimada a los 25 años corresponde a la especie *Pinus patula*, en comparación a la especie *Pinus muricata*.
- Los rodales de *Pinus patula* y *Pinus muricata*, con 22 años de edad, se encuentran en edad apropiada para la aplicación de técnicas de raleo.

6. RECOMENDACIONES

- Instalar y evaluar periódicamente parcelas de crecimiento en las plantaciones de granja Porcón, con la finalidad obtener datos de comparación.
- Dado que los rodales evaluados de *P. patula* y *P. muricata* no han recibido ningún tipo de raleo, se recomienda realizar estudio de crecimiento post-raleo, y compararlos con los resultados de crecimiento obtenidos en este trabajo.
- Continuar con técnicas dendrocronológicas como método de muestreo no destructivos para obtener información del crecimiento de las especies forestales del país.
- Complementar estudios sobre calidad de sitio en ambas especies de pino en granja Porcón.
- Extraer radios de la sección transversal de los árboles a diferentes alturas del fuste para realizar un análisis del fuste completo, y así poder estimar volúmenes en las plantaciones de granja Porcón.

BIBLIOGRAFÍA

- ADEFOR (Asociación Civil para la Investigación y el Desarrollo Forestal, PE).** 2005. Plan general de manejo forestal de las plantaciones de la cooperativa agraria Atahualpa-Jerusalén de trabajadores LTDA-Granja Porcón, establecido con el proyecto piloto forestal (PPF) administrado por ADEFOR. Cajamarca, PE, s.e. 87 p.
- ÁLVAREZ B., E.; MEDINA F., F.** 1997. Distribución, estructura poblacional y variación genética de algunas especies de pinos en peligro de extinción en México. Universidad Nacional Autónoma de México-Instituto de Ecología. Informe final SNIB-CONABIO Proyecto N° B156. México D. F., MX, s. e. 82 p.
- BENAVENTE, P.; CIPRIANO, R.** 2001. Comparación de calidad de celulosa entre *Pinus radiata* D Don. y *P. muricata* D. Don. de un rodal ubicado en el fundo Casablanca de la comuna de Angol, IX Región. Tesis Mag. Sc. Concepción, CI, Universidad de Concepción. 50 p.
- BELLOTE, A. F.; DEDECK, R. A.; LAVORANTI, O. J.; TOMAZELLO, M.; ANDRADE, G. C.** 2006. Acúmulo de carbono de *Pinus taeda* estimado pela Densitometría de raios X e análise de tronco. Paraná, BR, Colombo. p. 137-154. (Boletín de investigación forestal no.53).
- BOGINO, S. M.; VILLALBA, R.** 2008. Radial growth and biological rotation age of *Prosopis caldenia* Burkart in Central Argentina. Revista de ambientes áridos ELSEVIER 72:16-23.
- BRIENEN, R.; ZUIDEMA, P.** 2003. Anillos de crecimiento de árboles maderables en Bolivia: su potencial para el manejo de bosques y una guía metodológica. Ríberalta, BO, PROMAB/IGEMA. 33 p. (Informe técnico no.7).
- BRIENEN, R.; ZUIDEMA, P.** 2005. Relating tree growth to rainfall in Bolivian rainforests: a test for six species using tree ring analysis. Journal OECOLOGIA 146:1-12.
- BRIENEN, R.; ZUIDEMA, P.** 2006. Lifetime growth patterns and ages of Bolivian rain forest trees obtained by tree ring analysis. Journal of Ecology 94:481-493.

- CAMPOS Z., 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. Tesis Mag. Sc. Lima, PE, Universidad Nacional Agraria La Molina. 129 p.
- CANCINO, J.** 2006. Dendrometría Básica. Concepción: Universidad de Concepción. Facultad de Ciencias Forestales, Departamento de Bosques y Medio Ambiente. Concepción, CL. 171 p.
- CHAGAS C., J.; GARCIA L., H.** 2002. Mensuração florestal. Preguntas e respostas. Universidad Federal de Vicosa. Vicosa, BR. Editora UFV. 407 p.
- COOK, E.; KAIRIUKSTIS, L.** 1989. Methods of Dendrochronology: application on the enviromental sciences. Dordrecht: Kluwer Academic. 394 p.
- CORONA, E.** 1986. Dendrochronologia: principi e applicazioni. Verona, IT, s. e. 103 p.
- CORREA, J. E.** 2003. Dendrocronología: buscando las edades del árbol tropical. Revista M & M. no. 41:65-69.
- CORREA S., W.** 2006. Análise de características dendrométricas e fatores edáficos no crescimento e produção de um povoamento de *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. **Ktze**. Tesis Mag. Sc. Couritiba, BR, Universidad Nacional do Paraná. 136 p.
- CRECENTE-CAMPO, F.** 2008. Modelo de crecimiento de árbol individual para *Pinus radiata* **D.** Don en Galicia. Tesis Ph. D. Lugo, ES, Universidad de Santiago de Compostela. 140 p.
- CRUZ A., I.** 2013. Crecimiento en diámetro de *Liquidambar styraciflua* **L.** en el bosque de transición de Yetzelag, Villa Alta, Oxaca. Tesis Ing. For. Oaxaca, MX, Universidad de la Sierra Juárez. 61 p.
- DA CUNHA, T. A.** 2009. Modelagem do incremento de árvores individuais de *Cedrela odorata* **L.** na floresta amazônica. Tesis Mag. Sc. Santa María, BR, Universidad Federal de Santa María. 87 p.

- DEL VALLE A., I.; ZAPATA, M.** 2004. Los anillos de crecimiento de los árboles pueden develar información acerca del cambio climático en el trópico (I parte). Revista Cambium 2(3):1-2.
- DOETZER, M. A.; FIGUEREDO, A.; DISPERATI, A.; BAGGIO, D.** 2003. Análise de tronco digital: Uma nova metodologia para a medição de anéis de crescimento. Revista Floresta 33(3):235-255.
- ESPINOSA U., M. A.** 2006. Evaluación de crecimiento de tres especies de árboles de navidad y análisis de sus costos de producción. Tesis Ing. For. Hidalgo, MX, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. 130 p.
- FINGER, C. A.** 1992. Fundamentos da biometria florestal. Santa Maria: UFSM/CEPEF/FATEC. Santa Maria, BR, s. e. 269 p.
- FISHER, D. T.; STILL, C. J.; PARK, A. W.** 2008. Significance of summer fog and overcast for drought stress and ecological functioning of coastal California endemic plant species. Journal of Biogeography feb. 2008:1-17.
- FORTUNA M., F.** 2007. Dendroclimatología de quatro espécies florestais nativas com potencial silvicultural e econômico. Tesis Mag. Sc. Santa María, BR, Universidade federal de Santa María. 62 p.
- FRITTS, H.** 1976. Tree rings and climate. New York: Academic Press. London, UK. 567 p.
- GARCÍA V., A.** 2005. Contribución de las propiedades físicas de la madera de *Pinus greggii* proveniente de dos plantaciones en Hidalgo. Tesis Ing. For. Hidalgo, MX, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. 77 p.
- GARCÍA E., L.; GUINDEO C., P.; DE PALACIOS P., P.** 2000. Clave de identificación de maderas de coníferas a nivel de especie, región europea y norteamericana. Invest. Agr. Sist. Recur. For. 9(1):117-136.
- GÉNOVA, M.** 2004. Los anillos de crecimiento como indicadores climáticos. Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Forestal. Madrid, ES. Sin publicar.

- GILLESPI A., J. R.** 1992. *Pinus patula* Schiede and Deppe, Patula pine. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Forest Experiment Station. New Orleans, U. S. 5 p.
- GIMÉNEZ, A. M.; RÍOS, N. A.** 1999. Crecimiento de *Schinopsis* Quebracho-Colorado (Schlechet) Barkl. Et Meyer, Anacardiaceae. Rev. Maderas y Bosques 5(2):35-51.
- GIRALDO, V. D.; DEL VALLE, J.** 2012. Modelación del crecimiento de *Albizia niopoides* (Mimosaceae) por métodos dendrocronológicos. Rev. Bio. Trop. 60(3):1117-1036.
- GRISSINO-MAYER, H.** 1996. Dendrochronology Homepage (en línea). Arizona, U. S. Consultado 15 mar. 2014. Disponible en <http://www.sonic.net/bristlecone/dendro.html>
- GUTIÉRREZ, E.** 1990. Dendroecología de *Pinus sylvestris* L. en Cataluña. Revista ORSIS 5:23-41.
- GUTIÉRREZ, E.** 2008. La Dendrocronología: Métodos y aplicaciones. Dept. de Ecología Facultad de Biología, Universidad de Barcelona. Barcelona, ES. 16 p.
- HOLMES, R. L.** 1994. Dendrochronology: program manual. Tucson: Laboratory of Tree-Ring Research. Arizona, U. S. 40 p.
- HOLMES, R. L.; ADAMS, R. K.; FRITTS, H. C.** 1986. Quality control of crossdating and measuring: a user's manual for program COFECHA. Tree ring chronologies of Western North America: California, eastern Oregon and northern Great Basin. Arizona U. S. 15-35 p.
- HUAMAN C., C.** 2011. Dendrocronología de árboles de Azúcar Huayo (*Hymenaea courbaril* L.) en la región de Madre de Dios (provincia de Tahuamanu) - Perú. Tesis Mag. Sc. Lima, PE, Universidad Nacional Agraria La Molina. 127 p.
- IMAÑA, J.; ENCINAS, O.** 2008. Epidometría forestal. Universidade de Brasilia, Departamento de Engenharia florestal. Brasilia, BR, s. e. 72 p.
- INEI (INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA E INFORMÁTICA, PE).** 2006. Compendio Estadístico - 2006 (en línea). Lima, PE. Consultado 13 feb. 2014. Disponible en <http://www.inei.gob.pe>

- INFOR (Instituto Forestal, CL).** 2014. Sin título (en línea). Santiago, Cl. Consultado 13 ago. 2014. Disponible en <http://www.biblioteca1.infor.cl:81/DataFiles/8987-2.pdf>
- JUÁREZ DE GALINDEZ, M.; GIMÉNEZ, A.; RÍOS, N.; BALZARINI, M.** 2005. Modeling growth the of *Prosopis alba* Griseb. with two biological models. Revista de Ciencias Forestales Quebracho no.12:34-42.
- KOZLOFF, E. N.; BEIDLEMAN, L. H.** 1994. Plants of the San Francisco Bay region: Mendocino to Monterrey. California, U. S. 64 p.
- LARA, A.; VILLALBA, R.; ARAVENA, J.; WOLODARSKY, F.; NEIRA, E.** 2000. Desarrollo de una red de cronologías de *Fitzroya cupressoides* (Alerce) para Chile y Argentina. In ROIG, F. (Comp.). Dendrocronología en América Latina. Mendoza, AR. p. 217-244.
- LÓPEZ A., J. L.; SÁNCHEZ L., J. M.** 1998. Árboles en España: Manual de identificación. Madrid, ES. Ediciones Mundi-Prensa. 633 p.
- LÓPEZ A., J. L.; VALDEZ H., J.I.; TERRAZAS, T.; VALDEZ L., J.R.** 2006. Anillos de crecimiento y su periodicidad en tres especies tropicales del estado de Colima, México. Revista Agrociencias 40(4):533-544.
- LOUMAN, B.; OUIRÓS, D.; NILSSON, M.** 2001. Silvicultura de bosques latifoliados húmedos con énfasis en América Central. Turrialba, C. R. CATIE. 264 p.
- MARTÍNEZ J., D.** 2011. Incremento volumétrico y biomasa aérea en reforestaciones de *Pinus patula* Schltdl. & Cham en Xiacuí, Ixtlán, Oaxaca. Tesis Ing. For. Oaxaca, MX, Universidad Nacional de la Sierra Juárez. 53 p.
- MELANDRI, J. L.; DEZZEO, N.; ESPINOZA, N.** 2007. Periodicidad de los anillos de crecimiento en *P. caribaea* var. *hondurensis* proveniente de una plantación del estado de Mérida, Venezuela. Revista Forestal Venezolana 51(1):57-66.
- MELO, J.** 2010. Dendrocronología de la especie *Pinus radiata* D. Don de plantaciones de la granja Porcón Cajamarca. Tesis Mag. Sc. Lima, PE, Universidad Nacional Agraria La Molina. 83 p.

- MELO C., O.; VARGAS R., R.** 2002. Evaluación ecológica y silvicultural de ecosistemas boscosos. Universidad de Tolima. Ibagué, CO, s. e. 235 p.
- MIESSA C., V.; TUYOSHI H., R.** 2010. Avaliação da reação de crescimento aos desbastes em *Pinus taeda* L. Revista Agroambiente 4(1):42-48.
- MILLAR C., L.; CRICFIELD L., W.** 1988. Crossability and relationship of *Pinus muricata* (Pinaceae). Revista Madroño 34:351-370.
- MINAGRI (Ministerio de Agricultura y Riego, PE).** 2005. Plan estratégico regional de Cajamarca - Política agraria (en línea). Lima, PE. Consultado 20 feb. 2014. Disponible en <http://www.minag.gob.pe>
- MINCETUR (Ministerio del Comercio Exterior y Turismo, PE).** 2004. Diagnóstico para el diseño del plan estratégico regional de exportación (en línea). Lima, PE. Consultado 13 feb. 2014. Disponible en <http://www.mincetur.gob.pe>
- MORALES, M.; VILLALBA, R.; GRAU, H.; VILLAGRA, P. BONINSEGNA, J.; RIPALTA A.; PAOLINI, L.** 2001. Potential of *Prosopis ferox* Griseb (Leguminosae, subfamily: Mimosoideae) for dendrochronological studies in high-montane subtropical deserts. Rev. Chil. Hist. Nat. 74(4):1-11.
- MOSCOVICH, F.** 2004. Modelos de crecimiento y producción forestal. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Buenos Aires, AR. 56 p.
- MUÑOZ F., H. J.; GARCÍA M., J.; OROZCO G., G.; CORIA A., V. M.; MUÑOZ V., Y. Y.** 2012. Evaluación dasométrica de un área semillera de *Pinus montezumae* Lamb. a 13 años de su establecimiento en el municipio de Zacapu, Michoacán. Rev. Forestal Veracruzana 14(2):1-8.
- MURILLO, G.; BADILLA, V.; MORALES, S.** 2012. Método de inventario para plantaciones pequeñas. Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Turrialba, C. R. 16 p.

- NUTTO, L.; FARINHA W., L.** 2002. Relações entre fatores climáticos e incremento em diâmetro de *Zanthoxylum rhoifolia* Lam. e *Zanthoxylum hyemale* St. Hil. na região de Santa María, RS. Paraná, BR, Colombo. p. 41-55. (Boletín de investigación forestal no.45).
- OSPINA P., C.; HÉRNANDEZ R., R.; ANDREA R., E.; SÁNCHEZ O., F.; URREGO M., J.; RODAS P., C.** 2011. Guía silvicultural de *Pinus Patula* Schltdl. & Cham. Manizales, CO. Editorial Blanccolor S.A.S. 104 p.
- PARK W., A.** 2006. Teasing foggy memories out of pines on the California Chanel Islands tree-rings width and stable Isotope approaches. University of California. California, U. S. 102 p.
- PATIÑO V., F.; YOSHIO K., P.** 1991. Seed leaflet *Pinus patula* Schltdl. & Cham. Departamento de Silvicultura – ESALQ/UCP. Piracicaba, BR. 26 p.
- ROIG, F.; FERNÁNDEZ, E.; GARECA, E.; ALTAMIRANO, S.; MONGE, S.** 2001. Estudios dendrocronológicos en los ambientes húmedos de la puna boliviana. Rev. Bol. Ecol. 9:3-13.
- ROSERO A., J.** 2009. Dendrocronología de árboles de mogno, *Swietenia macrophylla* King. (Meliaceae), ocorrentes na floresta tropical Amazônica do Departamento de Madre de Dios, Perú. Tesis Mag. Sc. Piracicaba, BR, Universidad de San Pablo. 131 p.
- ROSERO A. J.** 2011. Análisis dendrocronológico de tres especies forestales del Bosque Seco Ecuatorial Estacional. Tesis Ing. For. Lima, PE, Universidad Nacional Agraria La Molina. 120 p.
- SÁENZ R., J.; MUÑOZ F., H.; RUEDA S., A.** 2011. Especies promisorias de clima templado para plantaciones forestales comerciales en Michoacán. Michoacán, MX, SAGARPA-INIFAP-CIRPAC. 213 p. (Libro técnico no.10).
- SCHWEINGRUBER, F.** 1988. Tree rings: Basics and applications of Dendrochronology. Dordrecht: D. Reidel. New York, U. S. 276 p.

- SCHULMAN, E.** 1956. Dendroclimatic changes in semiarid America. University of Arizona Press, Tucson. Arizona, U. S. 45 p.
- SCOLFORO, J. R.** 1998. Modelagem do crescimento e da produção de florestas plantadas e nativas. Lavras: UFLA-FAEPE-DCF. Lavras, BR, s. e. 453 p.
- SPATHELF, P.; DIMAS, F.; VACCARO, S.; MARTINS, L.** 2000. Análise Dendroecológica de *Ocotea pulchella* Nees et Mart. ex Nees (Canela Lageana) na serra geral de Santa María, Brasil. Revista Ciência Florestal 10(1):95-108.
- TOMAZELLO, M.; BOTOSSO, P. C.; LISI, C.** 2000a. Potencialidade da família Meliaceae para estudos Dendrocronología em regiões tropicais e subtropicais. In ROIG, F. (Comp.). Dendrocronología en América Latina. Mendoza, AR. p. 381-434.
- TOMAZELLO, M.; BOTOSSO, P. C.; LISI, C.** 2000b. Análise e aplicação dos anéis de crescimento das árvores. In MAIA, N.; MARTOS, H.; BARRELLA, W. (Org.). Indicadores ambientais conceitos e aplicações. São Paulo, BR. p. 117-143.
- TROPICOS (Missouri Botanical Garden, U. S.).** 2014. Herbario virtual homepage (en línea). Missouri, U. S. Consultado 07 jun. 2014. Disponible en <http://www.tropicos.org>
- UGULINO O., B. R.** 2011. Dendrocronología e análise de variação radial da densidade do lenho de árvores de *Tectona grandis* L. f. do municipio de Cáceres, MT. Tesis Mag. Sc. Rio de Janeiro, BR, Universidad rural de Rio de Janeiro. 80 p.
- USDA (Departmental of Agriculture, U. S.).** 2013. Natural resources conservation service homepage (en línea). U. S. Consultado 03 mar. 2104. Disponible en <http://www.plants.usda.gov/core/profile?symbol=PIMU>
- VANCLAY, J.** 2000. Growth modeling and yield prediction for sustainable forest. The Malaysiam Forester Journal 66:58-69.
- WORBES, M.** 1995. How to measure growth dynamics in tropical trees. IAWA Journal 16(4):337-351.
- YANACOCCHA (Minera Yanacocha, PE).** 2004. Yanacocha: responsabilidad social y ambiental (en línea). Cajamarca, PE. Consultado 16 feb. 2014. Disponible en <http://www.unglobalcompact.org>

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. Tesis Ing. For. Lima, PE, Universidad Nacional Agraria La Molina. 97 p.

ANEXO 1

DATOS METEOROLÓGICOS EN GRANJA PORCON CAJAMARCA

Nombre Estación	Granja Porcón	Latitud	07°02'2"
Departamento	CAJAMARCA	Longitud	78°37'36"
Provincia	CAJAMARCA	Altitud	3261 msnm
Distrito	CAJAMARCA		

PRECIPTACION MEDIA MENSUAL

CÓDIGO	ESTACIÓN	VARIABLE	AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
359	Granja Porcón	Precipitación total mensual (mm)	1990	29,7	85,4	88,6	127,2	33,1	35,6	0,9	0,6	139,7	262,0	250,2	103,6
359	Granja Porcón	Precipitación total mensual (mm)	1991	94,7	355,5	509,6	248,6	287,0	6,3	0,0	0,0	78,7	157,6	221,5	250,1
359	Granja Porcón	Precipitación total mensual (mm)	1992	170,1	74,1	137,1	119,1	107,7	62,4	0,0	24,0	135,5	119,2	75,7	174,1
359	Granja Porcón	Precipitación total mensual (mm)	1993	147,6	190,6	374,3	437,8	102,7	19,8	0,0	18,4	82,6	137,5	206,2	452,6
359	Granja Porcón	Precipitación total mensual (mm)	1994	475,4	373,5	531,9	268,5	329,1	18,6	0,0	22,2	104,8	252,8	210,7	142,5
359	Granja Porcón	Precipitación total mensual (mm)	1995	139,7	228,8	217,7	127,8	112,7	12,6	51,8	48,9	54,9	96,5	125,9	243,9
359	Granja Porcón	Precipitación total mensual (mm)	1996	198,8	407,5	312,7	141,3	59,7	49,7	0,0	20,3	48,5	232,9	80,6	58,6
359	Granja Porcón	Precipitación total mensual (mm)	1997	186,9	190,3	123,2	260,0	81,0	18,5	39,0	9,9	80,5	169,2	301,6	305,1
359	Granja Porcón	Precipitación total mensual (mm)	1998	168,5	380,5	298,7	243,2	85,4	0,0	0,0	14,8	67,6	234,7	158,8	99,0
359	Granja Porcón	Precipitación total mensual (mm)	1999	210,3	494,2	253,5	126,0	166,7	53,9	20,3	6,4	228,3	65,3	138,6	166,4
359	Granja Porcón	Precipitación total mensual (mm)	2000	74,8	237,0	221,1	168,6	160,7	40,7	1,6	16,3	123,2	19,3	62,8	236,5
359	Granja Porcón	Precipitación total mensual (mm)	2001	341,1	227,7	419,2	92,6	88,7	17,6	15,2	0,4	145,2	169,5	156,1	171,8
359	Granja Porcón	Precipitación total mensual (mm)	2002	76,2	188,8	390,1	159,0	38,1	27,8	15,2	2,6	53,3	202,1	226,5	243,0
359	Granja Porcón	Precipitación total mensual (mm)	2003	103,8	134,9	124,3	81,2	76,0	54,4	28,9	15,6	47,2	101,8	112,6	100,0

CÓDIGO	ESTACIÓN	VARIABLE	AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
359	Granja Porcón	Precipitación total mensual (mm)	2004	70,3	230,4	168,2	82,4	75,4	11,7	41,0	19,1	84,8	147,0	168,0	240,9
359	Granja Porcón	Precipitación total mensual (mm)	2005	157,8	231,2	343,3	93,1	91,6	53,7	0,0	7,1	54,4	152,8	28,6	164,8
359	Granja Porcón	Precipitación total mensual (mm)	2006	145,5	188,1	345,7	184,7	62,8	62,0	5,1	15,7	116,6	39,8	158,5	183,6
359	Granja Porcón	Precipitación total mensual (mm)	2007	246,6	64,5	352,3	226,3	57,7	1,1	42,6	20,1	32,8	171,8	211,1	146,4
359	Granja Porcón	Precipitación total mensual (mm)	2008	190,6	291,2	252,4	150,3	76,0	73,3	16,0	11,0	110,9	182,6	127,3	66,4
359	Granja Porcón	Precipitación total mensual (mm)	2009	344,8	197,5	307,3	149,6	127,4	31,3	18,1	8,0	27,0	184,0	187,9	234,8
359	Granja Porcón	Precipitación total mensual (mm)	2010	108,0	169,7	275,7	163,5	83,1	39,4	44,3	33,6	29,6	82,7	96,5	182,6
359	Granja Porcón	Precipitación total mensual (mm)	2011	257,0	148,9	284,6	269,4	21,2	8,5	13,7	4,8	55,4	84,5	93,0	265,4
359	Granja Porcón	Precipitación total mensual (mm)	2012	325,9	320,0	155,7	210,7	109,6	32,4	0,0	45,8	33,7	137,7	202,5	67,6
359	Granja Porcón	Precipitación total mensual (mm)	2013	141,0											

TEMPERATURA MEDIA MENSUAL

CÓDIGO	ESTACIÓN	VARIABLE	AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
359	Granja Porcón	Temperatura media mensual (°C)	1990	7,5	7,6	8,0	8,5	8,0	9,4	8,7	10,3	10,2	9,8	8,9	9,2
359	Granja Porcón	Temperatura media mensual (°C)	1991	9,1	10,4	9,5	8,0	10,2	9,3	7,4	8,3	9,7	8,7	7,8	9,7
359	Granja Porcón	Temperatura media mensual (°C)	1992	10,2	6,8	9,0	10,5	11,1	10,5	10,7	9,9	12,0	12,8	10,3	8,9
359	Granja Porcón	Temperatura media mensual (°C)	1993	11,4	12,5	11,1	11,2	12,2	10,2	9,8	9,5	9,3	9,2	10,4	12,1
359	Granja Porcón	Temperatura media mensual (°C)	1994	9,3	9,1	8,7	8,8	8,9	8,6	8,1	8,4	8,7	8,5	8,1	8,7
359	Granja Porcón	Temperatura media mensual (°C)	1995	9,2	10,6	8,6	8,9	7,7	10,2	9,7	8,5	7,8	5,0	5,3	7,0
359	Granja Porcón	Temperatura media mensual (°C)	1996	10,5	8,4	8,3	8,9	9,1	8,0	8,7	8,7	11,5	12,6	12,1	13,7
359	Granja Porcón	Temperatura media mensual (°C)	1997	9,4	9,9	10,1	9,9	10,4	8,9	10,5	10,7	10,5	10,6	10,7	11,0
359	Granja Porcón	Temperatura media mensual (°C)	1998	10,8	10,9	10,4	10,9	11,0	10,5	9,5	9,4	10,1	10,7	10,2	9,4
359	Granja Porcón	Temperatura media mensual (°C)	1999	9,7	9,7	9,7	10,8	9,8	9,2	9,2	9,0	9,2	10,0	9,9	9,5
359	Granja Porcón	Temperatura media mensual (°C)	2000	9,2	9,2	9,8	10,1	9,7	9,5	9,3	9,8	9,6	10,0	9,0	10,0

CÓDIGO	ESTACIÓN	VARIABLE	AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
359	Granja Porcón	Temperatura media mensual (°C)	2001	9,7	10,3	10,1	10,4	10,0	9,6	9,4	10,4	9,7	10,6	10,2	10,6
359	Granja Porcón	Temperatura media mensual (°C)	2002	10,4	10,7	10,8	10,3	10,7	9,9	9,9	10,7	10,2	10,5	10,4	11,2
359	Granja Porcón	Temperatura media mensual (°C)	2003	11,1	10,9	10,3	10,9	10,3	9,6	9,9	10,4	10,2	10,4	10,5	10,2
359	Granja Porcón	Temperatura media mensual (°C)	2004	9,8	10,2	11,2	10,6	10,2	10,1	9,5	10,5	9,7	10,2	10,2	10,6
359	Granja Porcón	Temperatura media mensual (°C)	2005	10,1	11,1	10,7	11,1	9,8	9,8	9,7	10,2	10,4	9,7	9,5	9,6
359	Granja Porcón	Temperatura media mensual (°C)	2006	10,3	10,8	10,3	10,3	9,7	9,8	10,1	10,2	10,1	9,9	10,4	10,8
359	Granja Porcón	Temperatura media mensual (°C)	2007	11,2	10,4	10,7	10,3	10,1	9,8	9,8	9,3	10,1	9,9	10,5	9,5
359	Granja Porcón	Temperatura media mensual (°C)	2008	10,3	9,8	9,7	9,9	9,9	9,2	8,8	9,7	10,4	10,4	10,6	9,9
359	Granja Porcón	Temperatura media mensual (°C)	2009	10,3	10,1	10,5	10,9	10,3	9,5	10,0	10,5	10,5	10,9	10,4	11,0
359	Granja Porcón	Temperatura media mensual (°C)	2010	11,4	12,1	11,8	11,5	10,9	9,8	9,4	9,5	9,7	9,7	9,1	9,4
359	Granja Porcón	Temperatura media mensual (°C)	2011	9,9	9,6	9,5	10,3	10,2	10,2	9,8	9,9	10,3	7,9	10,6	10,4
359	Granja Porcón	Temperatura media mensual (°C)	2012	10,3	9,7	11,1	10,5	10,7	10,3	10,1	10,2	11,1	10,6	10,7	10,5
359	Granja Porcón	Temperatura media mensual (°C)	2013	11,7											

ANEXO 2

**INTER-CORRELACIÓN DE LAS SERIES CRONOLÓGICAS EN LA ESPECIE
PINUS PATULA**

Muestra	Período		Intercorrelación	
			1990-2009	1995-2014
Pa34r3	1991	2012	0,48A	0,40A
Pa34r1	1991	2012	0,76	0,57
Pa34r2	1991	2012	0,79	0,7
Pa01r1	1991	2012	0,40A	0,16A
Pa01r2	1991	2012	0,45A	0,32A
Pa01r3	1991	2012	0,56	0,41A
Pa02r1	1991	2012	0,7	0,49A
Pa02r3	1991	2012	0,78	0,76
Pa03r1	1991	2012	0,75	0,82
Pa03r2	1991	2012	0,69	0,76
Pa03r3	1991	2012	0,64	0,55
Pa04r1	1991	2012	0,68	0,42A
Pa04r2	1991	2012	0,63	0,54
Pa06r1	1991	2012	0,36A	0,42A
Pa06r2	1991	2012	0,67	0,72
Pa07r1	1991	2012	0,84	0,53
Pa07r2	1991	2012	0,62	0,47A
Pa07r3	1991	2012	0,64	0,50A
Pa08r1	1991	2012	0,66	0,68
Pa08r2	1991	2012	0,50A	0,56
Pa08r3	1991	2012	0,67	0,73
Pa09r1	1991	2012	0,47A	0,40A
Pa10r1	1991	2012	0,69	0,34A
Pa10r2	1991	2012	0,73	0,45A
Pa10r3	1991	2012	0,44A	0,27A
Pa11r3	1991	2012	0,52	0,52
Pa11r4	1991	2012	0,72	0,57
Pa12r1	1991	2012	0,56	0,42A
Pa12r2	1991	2012	0,75	0,71
Pa12r3	1991	2012	0,65	0,48A
Pa13r1	1991	2012	0,71	0,49A
Pa13r2	1991	2012	0,88	0,55
Pa13r3	1991	2012	0,91	0,61
Pa13r4	1991	2012	0,91	0,62
Pa14r1	1991	2012	0,86	0,87

Muestra	Período		Intercorrelación	
			1990-2009	1995-2014
Pa14r2	1991	2012	0,54	0,36A
Pa14r3	1991	2012	0,82	0,52
Pa15r1	1991	2012	0,81	0,64
Pa15r3	1991	2012	0,87	0,77
Pa16r1	1991	2012	0,78	0,68
Pa16r2	1991	2012	0,85	0,81
Pa16r3	1991	2012	0,74	0,6
Pa17r1	1991	2012	0,78	0,79
Pa17r2	1991	2012	0,96	0,74
Pa17r3	1991	2012	0,89	0,85
Pa17r4	1991	2012	0,93	0,69
Pa18r1	1991	2012	0,76	0,51A
Pa18r2	1991	2012	0,81	0,64
Pa18r3	1991	2012	0,78	0,53
Pa18r4	1991	2012	0,76	0,47A
Pa19r1	1991	2012	0,57	0,48A
Pa19r2	1991	2012	0,75	0,52
Pa19r3	1991	2012	0,86	0,69
Pa20r1	1991	2012	0,62	0,53
Pa20r2	1991	2012	0,61	0,27A
Pa20r3	1991	2012	0,68	0,49A
Pa21r1	1991	2012	0,79	0,6
Pa21r2	1991	2012	0,76	0,55
Pa22r1	1991	2012	0,89	0,67
Pa22r2	1991	2012	0,77	0,57
Pa22r3	1991	2012	0,59	0,54
Pa22r4	1991	2012	0,54	0,43A
Pa23r1	1991	2012	0,82	0,72
Pa23r2	1991	2012	0,88	0,8
Pa21r3	1991	2012	0,77	0,64
Pa24r1	1991	2012	0,85	0,73
Pa24r2	1991	2012	0,72	0,44A
Pa24r3	1991	2012	0,88	0,76
Pa25r1	1991	2012	0,76	0,59
Pa25r2	1991	2012	0,82	0,71
Pa26r1	1991	2012	0,56	0,44A
Pa26r2	1991	2012	0,72	0,59
Pa27r1	1991	2012	0,85	0,73
Pa27r2	1991	2012	0,7	0,51A
Pa27r3	1991	2012	0,78	0,66

Muestra	Período		Intercorrelación	
			1990-2009	1995-2014
Pa28r1	1991	2012	0,49A	0,29A
Pa28r2	1991	2012	0,64	0,71
Pa28r3	1991	2012	0,74	0,44A
Pa29r1	1991	2012	0,58	0,43A
Pa29r2	1991	2012	0,59	0,55
Pa29r3	1991	2012	0,71	0,65
Pa30r1	1991	2012	0,48A	0,36A
Pa30r2	1991	2012	0,6	0,57
Pa30r3	1991	2012	0,64	0,69
Pa31r1	1991	2012	0,40A	0,48A
Pa31r2	1991	2012	0,47A	0,59
Pa31r3	1991	2012	0,77	0,23A
Pa31r4	1991	2012	0,61	0,71
Pa32r1	1991	2012	0,83	0,72
Pa32r2	1991	2012	0,92	0,54
Pa32r3	1991	2012	0,89	0,55
Pa33r1	1991	2012	0,74	0,68
Pa33r2	1991	2012	0,71	0,7
Pa35r1	1991	2012	0,69	0,62
Pa35r2	1991	2012	0,56	0,6
Pa35r3	1991	2012	0,59	0,59
Correlación promedio			0,7	0,57

Correlación Pearson 99 por ciento, nivel crítico de correlación 0.515; A: Correlación máxima obtenida; B: Presencia de correlaciones más elevadas que en otras posiciones

ANEXO 3

**INTER-CORRELACIÓN DE LAS SERIES CRONOLÓGICAS EN LA ESPECIE
PINUS MURICATA**

Muestra	Período		Intercorrelación	
			1990-2009	1995-2014
mur32r2	1991	2012	0,66	0,69
mur32r1	1991	2012	0,81	0,78
mur32r3	1991	2012	0,74	0,73
mur01r1	1991	2012	0,83	0,84
mur01r2	1991	2012	0,84	0,83
mur01r3	1991	2012	0,50A	0,48A
mur02r1	1991	2012	0,77	0,73
mur02r3	1991	2012	0,77	0,6
mur02r4	1991	2012	0,75	0,71
mur03r1	1991	2012	0,58	0,61
mur03r2	1991	2012	0,91	0,83
mur03r3	1991	2012	0,76	0,72
mur04r1	1991	2012	0,89	0,9
mur04r2	1991	2012	0,91	0,72
mur04r3	1991	2012	0,84	0,75
mur05r1	1991	2012	0,81	0,8
mur05r2	1991	2012	0,72	0,74
mur05r3	1991	2012	0,84	0,86
mur06r1	1991	2012	0,67	0,68
mur06r2	1991	2012	0,65	0,63
mur06r3	1991	2012	0,77	0,76
mur06r4	1991	2012	0,73	0,71
mur07r1	1991	2012	0,89	0,88
mur07r2	1991	2012	0,64	0,67
mur07r3	1991	2012	0,84	0,82
mur08r1	1991	2012	0,77	0,76
mur08r2	1991	2012	0,79	0,79
mur08r3	1991	2012	0,82	0,81
mur08r4	1991	2012	0,87	0,88
mur09r1	1991	2012	0,71	0,79
mur09r2	1991	2012	0,7	0,7
mur09r3	1991	2012	0,74	0,75
mur09r4	1991	2012	0,8	0,79
mur10r1	1991	2012	0,79	0,79
mur10r2	1991	2012	0,72	0,74
mur10r3	1991	2012	0,79	0,8

Universidad Nacional Agraria
 Biblioteca Agrícola Nacional

Muestra	Período	Intercorrelación	
		1990-2009	1995-2014
mur11r1	1991 2012	0,77	0,72
mur11r2	1991 2012	0,89	0,84
mur11r4	1991 2012	0,88	0,68
mur12r1	1991 2012	0,83	0,85
mur12r2	1991 2012	0,67	0,64
mur12r3	1991 2012	0,8	0,81
mur13r1	1991 2012	0,89	0,9
mur13r2	1991 2012	0,86	0,84
mur14r1	1991 2012	0,85	0,86
mur14r2	1991 2012	0,79	0,79
mur14r3	1991 2012	0,85	0,81
mur14r4	1991 2012	0,79	0,79
mur15r1	1991 2012	0,89	0,89
mur15r2	1991 2012	0,81	0,81
mur16r1	1991 2012	0,84	0,83
mur16r2	1991 2012	0,78	0,7
mur16r3	1991 2012	0,91	0,9
mur16r4	1991 2012	0,81	0,78
mur17r1	1991 2012	0,8	0,8
mur17r2	1991 2012	0,66	0,68
mur17r3	1991 2012	0,69	0,69
mur17r4	1991 2012	0,81	0,83
mur18r1	1991 2012	0,81	0,8
mur18r2	1991 2012	0,86	0,86
mur18r3	1991 2012	0,83	0,83
mur20r1	1991 2012	0,82	0,83
mur20r2	1991 2012	0,91	0,86
mur20r3	1991 2012	0,84	0,84
mur20r4	1991 2012	0,74	0,78
mur21r1	1991 2012	0,91	0,91
mur21r2	1991 2012	0,87	0,86
mur21r3	1991 2012	0,84	0,84
mur21r4	1991 2012	0,89	0,88
mur22r1	1991 2012	0,81	0,8
mur22r2	1991 2012	0,89	0,89
mur22r3	1991 2012	0,78	0,8
mur23r2	1991 2012	0,48A	0,53
mur23r3	1991 2012	0,82	0,81
mur23r4	1991 2012	0,71	0,73
mur24r1	1991 2012	0,78	0,73
mur24r2	1991 2012	0,84	0,74

Muestra	Período		Intercorrelación	
			1990-2009	1995-2014
mur24r3	1991	2012	0,62	0,6
mur25r1	1991	2012	0,71	0,72
mur25r2	1991	2012	0,68	0,76
mur25r3	1991	2012	0,84	0,84
mur25r4	1991	2012	0,59	0,6
mur26r1	1991	2012	0,69	0,72
mur26r2	1991	2012	0,83	0,84
mur26r3	1991	2012	0,82	0,83
mur27r1	1991	2012	0,30A	0,41A
mur27r2	1991	2012	0,34A	0,48A
mur27r4	1991	2012	0,46A	0,59
mur28r1	1991	2012	0,91	0,9
mur28r2	1991	2012	0,83	0,84
mur28r3	1991	2012	0,87	0,87
mur29r1	1991	2012	0,72	0,7
mur29r2	1991	2012	0,85	0,67
mur29r3	1991	2012	0,72	0,73
mur30r1	1991	2012	0,62	0,64
mur30r2	1991	2012	0,67	0,7
mur30r3	1991	2012	0,82	0,82
mur30r4	1991	2012	0,76	0,78
mur31r1	1991	2012	0,81	0,62
mur31r2	1991	2012	0,85	0,86
mur31r3	1991	2012	0,89	0,9
mur34r1	1991	2012	0,25B	0,32A
mur34r2	1991	2012	0,68	0,68
mur34r3	1991	2012	0,30A	0,29A
mur34r4	1991	2012	0,78	0,77
mur35r1	1991	2012	0,81	0,8
mur35r2	1991	2012	0,89	0,82
mur35r3	1991	2012	0,84	0,86
mur35r4	1991	2012	0,87	0,88
mur36r1	1991	2012	0,43A	0,50A
mur36r2	1991	2012	0,54	0,6
mur36r3	1991	2012	0,53	0,65
mur36r4	1991	2012	0,61	0,73
Correlación promedio			0,76	0,75

Correlación Pearson 99 por ciento, nivel crítico de correlación 0.515; A: Correlación máxima obtenida; B: Presencia de correlaciones más elevadas que en otras posiciones