

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE AGRONOMIA



**INFLUENCIA DE LA PENDIENTE DEL TERRENO EN LA FIJACIÓN DE
CARBONO EN PLANTACIONES DE *Pinus patula* Schiede et Cham.,
CENTRO POBLADO COMBAYO – LA ENCAÑADA – CAJAMARCA**

T E S I S

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE.

INGENIERO AGRÓNOMO

PRESENTADO POR EL BACHILLER:

PERCY OMAR MANTILLA GUTIERREZ

ASESOR:

Ing. M.Sc. ATTILIO CADENILLAS MARTÍNEZ

CAJAMARCA – PERÚ

2022



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
"NORTE DE LA UNIVERSIDAD PERUANA"
Fundada por Ley N° 14015, del 13 de febrero de 1962
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
Secretaría Académica



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

En la ciudad de Cajamarca, a los veintisiete días del mes de junio del año dos mil veintidós, se reunieron en el ambiente **2G - 207** de la Facultad de Ciencias Agrarias, los miembros del Jurado, designados según **Resolución de Consejo de Facultad N° 134-2022-FCA-UNC, de fecha 26 de abril del 2022**, con la finalidad de evaluar la sustentación de la **TESIS** titulada: **"INFLUENCIA DE LA PENDIENTE DEL TERRENO EN LA FIJACIÓN DE CARBONO EN PLANTACIONES DE *Pinus patula* Schiede et Cham; CENTRO POBLADO COMBAYO - LA ENCAÑADA - CAJAMARCA"**, realizada por el Bachiller **PERCY OMAR MANTILLA GUTIÉRREZ** para optar el Título Profesional de **INGENIERO AGRÓNOMO**.

A las nueve horas y veinte minutos, de acuerdo a lo establecido en el **Reglamento Interno para la Obtención de Título Profesional de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Cajamarca**, el Presidente del Jurado dio por iniciado el Acto de Sustentación, luego de concluida la exposición, los miembros del Jurado procedieron a la formulación de preguntas y posterior deliberación. Acto seguido, el Presidente del Jurado anunció la aprobación por unanimidad, con el calificativo de catorce (14); por tanto, el Bachiller queda expedito para proceder con los trámites que conlleven a la obtención del Título Profesional de **INGENIERO AGRÓNOMO**.

A las diez horas y cuarenta y cinco minutos del mismo día, el Presidente del Jurado dio por concluido el Acto de Sustentación.

Dr. Marcial Hidelso Mendo Velásquez
PRESIDENTE

Dr. Edin Edgardo Alva Plasencia
SECRETARIO

Ing. M. Sc. Luis Dávila Estela
VOCAL

Ing. M. Sc. Attilio Israel Cadenillas Martínez
ASESOR

DEDICATORIA

A DIOS,

Por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor.

A MI ESPOSA e HIJO

Dedico este trabajo a mi amada esposa, por su apoyo y ánimo que me brinda día a día para alcanzar nuevas metas, tanto profesionales como personales. A mi adorado hijo Liam Andréé, posiblemente en este momento no entiendas mis palabras, pero para cuando seas capaz, quiero que te des cuenta de lo que significas para mí. Eres la razón de que me levante cada día esforzarme por el presente y el mañana, eres mi principal motivación, te amo mi pequeño hijo.

A MIS PADRES Y HERMANOS

Pablo y Edita, por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, pero más que nada, por su amor.

A mis hermanos Aldo y Edgar, por ser parte de mi vida, por su apoyo moral que fue el motivo de lograr este objetivo.

AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer todo el apoyo recibido por parte de mi esposa e hijo: Milagros y Liam Andrée, a mis padres: Pablo y Edita, así como de mis hermanos: Aldo y Edgar.

A todos mis amigos y compañeros de la Facultad, futuros colegas, Henry y Alex, que me ayudaron de una manera desinteresada, gracias infinitas por toda su ayuda y buena voluntad.

Agradezco a todos aquellos que contribuyeron con la formación académica durante mis cinco años dentro de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Cajamarca, a mi asesor Ing. M.Sc. Attilio Israel Cadenillas Martínez, por la orientación y ayuda que me brindó para la realización de esta tesis, por su apoyo y amistad que me permitieron aprender mucho más que lo estudiado en el proyecto.

Por último, agradezco al Profesor Manolo Manrique y esposa por facilitar el acceso a las zonas de estudio y su disposición en todo momento en cuanto se lo solicitó.

ÍNDICE GENERAL

| | Pág. |
|--|------|
| DEDICATORIA | iii |
| AGRADECIMIENTO | iv |
| ÍNDICE DE TABLAS | viii |
| ÍNDICE DE FIGURAS | xii |
| RESUMEN | xiv |
| ABSTRACT | xv |
| CAPÍTULO I | 1 |
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| CAPÍTULO II | 4 |
| REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA | 4 |
| 2.1. Antecedentes de la investigación | 4 |
| 2.2. Bases teóricas | 7 |
| 2.2.1. Calentamiento global y cambio climático | 7 |
| 2.2.2. Causas y consecuencias del cambio climático | 8 |
| 2.2.3. Efecto invernadero | 8 |
| 2.2.3.1. Gases de efecto invernadero | 8 |
| 2.2.4. Plantación forestal | 9 |
| 2.2.5. Pendiente del terreno | 9 |
| 2.2.6. Carbono | 10 |
| 2.2.6.1. Ciclo del carbono | 10 |
| 2.2.6.2. El carbono en los ecosistemas agroforestales | 12 |
| 2.2.6.3. El carbono orgánico del suelo | 12 |
| 2.2.7. Fijación de carbono | 13 |
| 2.2.7.1. Fuentes de fijación de carbono | 14 |

| | | |
|---------------------------------|--|-----------|
| 2.2.7.2. | Fijación de carbono en el suelo | 15 |
| 2.2.7.3. | Fijación de carbono en la biomasa arbórea..... | 16 |
| 2.2.7.4. | Fijación de carbono en ecosistemas forestales | 16 |
| 2.2.8. | Impactos del bosque de forestales sobre el sotobosque | 17 |
| 2.2.9. | Factores topográficos que influyen en la producción de bosques de <i>Pinus patula</i> Schiede et Cham. | 17 |
| 2.2.10. | Plantación de estudio <i>Pinus patula</i> Schiede et Cham. | 17 |
| 2.3. | Definición de términos básicos | 19 |
| CAPÍTULO III | | 21 |
| MARCO METODOLÓGICO | | 21 |
| 3.1. | Localización de la investigación..... | 21 |
| 2.4. | Características del área de estudio | 22 |
| 2.4.1. | Suelo | 22 |
| 2.4.2. | Clima y temperatura | 22 |
| 2.4.3. | Vegetación..... | 23 |
| 2.4.4. | Pendiente..... | 23 |
| 2.5. | Materiales..... | 23 |
| 2.5.1. | Material biológico..... | 23 |
| 2.5.2. | Equipos de campo | 24 |
| 2.5.3. | Material y equipo de laboratorio | 24 |
| 2.6. | Metodología..... | 25 |
| 2.6.1. | Tipo y diseño de investigación..... | 25 |
| 2.6.2. | Factores, variables (independientes), niveles y tratamientos en estudio..... | 25 |
| 2.6.2. | Delimitación y trazado de parcelas | 26 |
| 2.6.3. | Métodos para estimar la biomasa y la fijación del carbono | 26 |

| | |
|--|-----------|
| 2.6.4. Trabajo de laboratorio..... | 31 |
| 2.6.5. Trabajo en gabinete | 31 |
| CAPÍTULO IV | 38 |
| RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... | 38 |
| 4. Carbono fijado por la plantación de <i>Pinus patula</i> Schiede et Cham .. | 38 |
| 4.1. Fijación de carbono por el suelo | 38 |
| 4.2. Fijación de carbono por la biomasa del sotobosque..... | 41 |
| 4.3. Fijación de carbono por la biomasa de la hojarasca en la plantación de <i>Pinus patula</i> Schiede et Cham en t ha ⁻¹ | 44 |
| 4.4. Fijación de Carbono por la biomasa aérea en la plantación de <i>Pinus</i> <i>patula</i> Schiede et Cham (t ha ⁻¹) | 46 |
| CAPÍTULO V | 49 |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 49 |
| CAPÍTULO VI..... | 50 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS | 50 |
| CAPITULO VII..... | 60 |
| ANEXOS..... | 60 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Principales gases de efecto invernadero | 9 |
| Tabla 2. Tratamientos en estudio (pendientes)..... | 25 |
| Tabla 3. Fijación de carbono total del suelo de acuerdo con las pendientes ... | 37 |
| Tabla 4. Análisis de varianza (ANOVA) para la fijación de carbono por el suelo.. | 39 |
| Tabla 5. Fijación de carbono por la biomasa del sotobosque en plantación de <i>Pinus patula</i> Schiede et Cham | 40 |
| Tabla 6. Análisis de varianza (ANOVA) para la fijación de carbono por la biomasa del sotobosque..... | 42 |
| Tabla 7. Fijación de carbono por la biomasa de la hojarasca de la plantación de <i>Pinus patula</i> Schiede et Cham. | 43 |
| Tabla 8. Analisis de varianza (ANOVA) para la fijacion de carbono por la biomasa de la hojarasca..... | 44 |
| Tabla 9. Fijación de carbono por la biomasa aérea de la plantación de <i>Pinus patula</i> Schiede et Cham | 45 |
| Tabla 10. Prueba de Tukey al 5 % de probabilidad para la fijación de Carbono obtenidos en cada pendiente. | 47 |
| Tabla 11. Analisis de varianza (ANOVA) para la fijación de carbono por la biomasa aérea de la plantación de <i>Pinus patula</i> Schiede et Cham..... | 63 |
| Tabla 12. Definición de términos..... | 61 |
| Tabla 13. Especies vegetales que forman parte del sotobosque de la zona de estudio, en la platacion de <i>Pinus patula</i> Schiede et Cham..... | 64 |

| | |
|---|----|
| Tabla 14. Coordenadas UTM de muestreo de suelos en la plantación de <i>Pinus patula</i> Schiede et Cham, Combayo..... | 64 |
| Tabla 15. Coordenadas UTM de muestreo de la vegetación en la plantación de <i>Pinus patula</i> Schiede et Cham, Combayo..... | 65 |
| Tabla 16. Resultados de los cálculos de la fijación de carbono por la biomasa aérea, en pendientes de 0 % a 10 %, dentro de la plantación de <i>Pinus patula</i> Schiede et Cham, Centro Poblado de Combayo..... | 67 |
| Tabla 17. Resultados de los cálculos para la fijación de carbono por la biomasa aérea, en pendientes de 10 % a 20 %, dentro de la plantación de <i>Pinus patula</i> Schiede et Cham, Centro Poblado de Combayo..... | 68 |
| Tabla 18. Resultados de los cálculos para la fijación de carbono por la biomasa aérea, en pendientes mayores a 20 %, dentro de la plantación de <i>Pinus patula</i> Schiede et Cham, Centro Poblado de Combayo..... | 70 |
| Tabla 19. Resultados de los cálculos de la fijación de carbono por la biomasa de la Rama, en pendientes de 0 % a 10 %, dentro de la plantación de <i>Pinus patula</i> Schiede et Cham, Centro Poblado de Combayo..... | 71 |
| Tabla 20. Resultados de los cálculos de la fijación de carbono por la biomasa de la Rama, en pendientes de 10 % a 20 %, dentro de la plantación de <i>Pinus patula</i> Schiede et Cham, Centro Poblado de Combayo..... | 71 |
| Tabla 21. Resultados de los cálculos de la fijación de carbono por la biomasa de la Rama, en pendiente mayor a 20 %, dentro de la plantación de <i>Pinus patula</i> Schiede et Cham, Centro Poblado de Combayo..... | 72 |
| Tabla 22. Resultados de los cálculos de la fijación de carbono por la biomasa de la Ramilla, en pendientes de 0 % a 10 % dentro de la plantación de <i>Pinus patula</i> Schiede et Cham, Centro Poblado de Combayo..... | 73 |
| Tabla 23. Resultados de los cálculos de la fijación de carbono por la biomasa de la Ramilla, en pendientes de 10 % a 20 % dentro de la plantación de <i>Pinus patula</i> Schiede et Cham, Centro Poblado de Combayo..... | 73 |

| | |
|---|----|
| Tabla 24. Resultados de los cálculos de la fijación de carbono por la biomasa de la Ramilla, en pendiente mayor a 20 % dentro de la plantación de <i>Pinus patula</i> Schiede et Cham, Centro Poblado de Combayo..... | 74 |
| Tabla 25. Resultados de los cálculos de la fijación de carbono por la biomasa de la Acícula, en pendientes de 0 % a 10 % dentro de la plantación de <i>Pinus patula</i> Schiede et Cham, Centro Poblado de Combayo..... | 74 |
| Tabla 26. Resultados de los cálculos de la fijación de carbono por la biomasa de la Acícula, en pendientes de 10 % a 20 % dentro de la plantación de <i>Pinus patula</i> Schiede et Cham, Centro Poblado de Combayo..... | 75 |
| Tabla 27. Resultados de los cálculos de la fijación de carbono por la biomasa de la Acícula, en pendiente mayor a 20 % dentro de la plantación de <i>Pinus patula</i> Schiede et Cham, Centro Poblado de Combayo..... | 75 |
| Tabla 28. Resultados de los cálculos para la captura decarbono por la biomasa de la hojarasca, en pendientes de 0 % a 10 %, dentro de la plantación de <i>Pinus patula</i> Schiede et Cham, Centro Poblado de Combayo. | 70 |
| Tabla 29. Resultados de los cálculos para la fijación decarbono por la biomasa de la hojarasca, en pendientes de 10 % a 20 %, dentro de la plantación de <i>Pinus patula</i> Schiede et Cham, Centro Poblado de Combayo. | 75 |
| Tabla 30. Resultados de los cálculos para la fijación de carbono por la biomasa de la hojarasca, en pendientes mayores a 20 %, dentro de la plantación de <i>Pinus patula</i> Schiede et Cham, Centro Poblado de Combayo. | 76 |
| Tabla 31. Resultados de los cálculos para la fijación de carbono por la biomasa del sotobosque, en pendientes de 0 % a 10 %, dentro de la plantación de <i>Pinus patula</i> Schiede et Cham, Centro Poblado de Combayo. | 76 |
| Tabla 32. Resultados de los cálculos para la fijación de carbono por la biomasa del sotobosque, en pendientes de 10 % a 20 %, dentro de la plantación de <i>Pinus patula</i> Schiede et Cham, Centro Poblado de Combayo. | 77 |

| | |
|--|----|
| Tabla 33. Resultados de los cálculos para la fijación de carbono por la biomasa del sotobosque, en pendientes mayores a 20 %, dentro de la plantación de <i>Pinus patula</i> Schiede et Cham, Centro Poblado de Combayo. | 77 |
| Tabla 34. Resultados de los cálculos para la fijación de carbono por el suelo, en pendientes de 0 % a 10 %, dentro de la plantación de <i>Pinus patula</i> Schiede et Cham, Centro Poblado de Combayo..... | 78 |
| Tabla 35. Resultados de los cálculos para la fijación de carbono por el suelo, en pendientes de 10 % a 20 %, dentro de la plantación de <i>Pinus patula</i> Schiede et Cham, Centro Poblado de Combayo..... | 78 |
| Tabla 37. Resultados de los cálculos para la fijación de carbono por el suelo, en pendientes mayores a 20 %, dentro de la plantación de <i>Pinus patula</i> Schiede et Cham, Centro Poblado de Combayo..... | 79 |
| Tabla 37. Formato para la toma de datos de las muestras ingresadas al laboratorio..... | 71 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Mapa de ubicación del área de estudio en el caserío Molino del Arco, Centro Poblado de Combayo, Distrito de La Encañada, Cajamarca..... | 21 |
| Figura 2. Croquis de parcelas de evaluación de los diferentes componentes de investigación (fuente: Arevalo, 2003) | 39 |
| Figura 3. Fijación de carbono total del suelo obtenido en cada pendiente de la plantación de <i>Pinus patula</i> Schiede et Cham. | 39 |
| Figura 4. Fijación de carbono obtenido por el sotobosque en cada pendiente de la plantación de <i>Pinus patula</i> Schiede et Cham | 42 |
| Figura 5. Fijación de carbono por la biomasa de la hojarasca obtenido en cada pendiente de la plantación de <i>Pinus patula</i> Schiede et Cham..... | 46 |
| Figura 6. Fijación de carbono por la biomasa aérea obtenido en cada pendiente de la plantación de <i>Pinus patula</i> Schiede et Cham..... | 46 |
| Figura 7. A: Delimitación de 1 m ² , B: Medición a la altura de pecho (DAP).... | 81 |
| Figura 8. A: Recolección de la hojarasca en 1 m ² , B: Medición a la altura de pecho (DAP)..... | 81 |
| Figura 9. A y B: Separación de la rama, ramilla y acícula..... | 81 |
| Figura 10. A: Excavación de la calicata, B: Recolección de la muestra de suelos. | 82 |
| Figura 11. A: Pesado de la muestra de suelos e identificación, B: Identificación de la calicata. | 82 |
| Figura 12. A: Calicata para el muestreo de suelos, B: Limpieza del terreno para muestrear. | 82 |
| Figura 13. Medición de la calicata. | 83 |

| | |
|--|----|
| Figura 14. Pesado y secado de las muestras haciendo uso de una balanza electrónica y una estufa..... | 83 |
| Figura 15. A: Figura 1. A: Planta de Tuyo (<i>Puya sp.</i>), B: Planta de cortadera (<i>Cortaderia sp.</i>)..... | 83 |
| Figura 16. A: Planta de romero silvestre (<i>Clinopodium sericeum</i>), B: Paja o pajonal (<i>vulpia sp.</i>) | 84 |
| Figura 17. A: Zarza mora (<i>Rubus ulmifolius</i>), B: Cucharilla (<i>Baccharis sirvata</i>). | 84 |
| Figura 18. A: Achicoria (<i>hypochaeris meyeniana</i>), B: Lloctara (<i>Baccharis chilco</i>). | 85 |
| Figura 19. A: Llune (<i>Pappobolus sp.</i>), B: Andacushma (<i>Achyrocline alata</i>). ... | 85 |

RESUMEN

El presente trabajo de investigación tuvo como objetivo determinar la influencia de la pendiente del terreno en la fijación de carbono en plantaciones de *Pinus patula* Schiede et Cham., en el Centro Poblado de Combayo, La Encañada, Cajamarca. En un área experimental de 0.01 ha, donde se evaluó la fijación de carbono por el suelo, biomasa sotobosque, biomasa de la hojarasca y biomasa aérea en tres pendientes (de 0 a 10 %, de 10 a 20 % y mayor al 20 %). La estimación de la fijación se realizó siguiendo los procedimientos del Manual de Determinación de las Reservas Totales de Carbono. Se concluyó que la pendiente influye significativamente en la fijación de carbono en el suelo, en la pendiente de 0 a 10 % se obtuvo 263.856 t ha⁻¹ de carbono, de 10 % a 20 % se obtuvo 214.844 t ha⁻¹ y en la pendiente mayor al 20 % la fijación de carbono fue 160.708 t ha⁻¹. La fijación de carbono por la biomasa del sotobosque en cada pendiente fue de 1.454 t ha⁻¹ en la pendiente de 0 a 10 %, 1.174 t ha⁻¹ en la pendiente de 10 % a 20 % y 1.127 t ha⁻¹ en la pendiente mayor a 20 %, la fijación de carbono por la biomasa de la hojarasca en cada pendiente fue de 1.938 t ha⁻¹ en la pendiente de 0 a 10 %, 1.732 t ha⁻¹ en la pendiente de 10 % a 20 % y 1.140 t ha⁻¹ en la pendiente mayor a 20 % y para la biomasa aérea la fijación del carbono fue 45.874 t ha⁻¹ en la pendiente de 0 a 10 %, 31.760 t ha⁻¹ en la pendiente de 10 % a 20 % y 23.357 t ha⁻¹ en la pendiente mayor a 20 %.

Palabra clave: Pendiente, Fijación de carbono, *Pinus patula*, sotobosque, biomasa aérea, hojarasca y suelo, reserva de carbono.

ABSTRACT

The present research work aimed to determine the slope's influence of the land on carbon fixation in plantations of "Pinus patula Schiede et Cham", in the town center of Combayo, La Encañada, Cajamarca. In an experimental area 0.01 ha, where the fixation of carbon in the soil, tree biomass, leaf litter biomass and understory were evaluated on three slopes (from 0 to 10 %, from 10 % to 20 % and greater than 20 %). The estimation of the fixation was carried out following the procedures of a manual for the determination of total carbon stocks. It was determined that the slope does not significantly influence the fixation of carbon in the soil, in the slope from 0 to 10 % 263.856 t ha⁻¹ of carbon was obtained, from 10 to 20 % 214.844 t ha⁻¹ was obtained and, in the slope, greater than 20 % the carbon fixation was 160.708 t ha⁻¹. The carbon fixation by the understory biomass on each slope was 1.454 t ha⁻¹ on the slope from 0 to 10 %, 1.174 t ha⁻¹ on the slope from 10 to 20 % and 1.127 t ha⁻¹ on the slope greater than 20 %. The carbon fixation for leaf litter biomass on each slope was 1.938 t ha⁻¹ on the slope from 0 to 10 %, 1.732 t ha⁻¹ on the slope from 10 % to 20 % and 1.140 t ha⁻¹ on the slope greater than 20 % and for the tree biomass the carbon fixation was 28.595 t ha⁻¹ on the slope from 0 to 10 %, 21.733 on the slope from 10 % to 20 % and 15.143 on the slope greater than 20 %.

Keywords: Slope, Fixation Carbon, *Pinus patula*, understory, tree biomass, leaf litter and soil, booking from carbon.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

El carbono es un componente esencial que forma parte de los seres vivos, se presenta con mayor frecuencia como dióxido de carbono en la atmósfera y en los mares, en los combustibles fósiles se presenta como carbón de petróleo y otros hidrocarburos. El CO₂ en la atmósfera es absorbido por las plantas y convertido en carbohidratos y tejidos a través del proceso de fotosíntesis, como parte del ciclo del carbono (Lapeyre *et al.* 2004).

Los bosques mundiales contienen más del 80 % del carbono presente sobre la superficie terrestre y aproximadamente el 40 % de todo el carbono existente en el subsuelo terrestre (suelo, desperdicio, raíces). Aproximadamente el 37 % de este carbono se encuentra en las selvas, un 14 % en los bosques templados de mediana latitud y un 49 % en los bosques templados de alta latitud (Cárdenas 2016).

La fijación de carbono en los ecosistemas forestales se da gracias al intercambio de carbono con la atmósfera a través de la fotosíntesis y la respiración. Luego de estos procesos (fijación de carbono a través de la vegetación) se almacena en la biomasa de las especies y en el suelo (Romero 2015).

La concentración y almacenamiento de carbono dependen de muchos factores como la cobertura vegetal, el relieve, el suelo, el agua, y los microorganismos, entre otros factores. La pendiente, la exposición de la ladera y la cubierta forestal son importantes porque explican los procesos físicos y químicos que ocurren en el suelo, entre ellos la dinámica de los elementos (Madrigal *et al.* 2018).

Anaya *et al.* (2016) indican que la ubicación topográfica, pendiente y composición florística influyen en la variación de carbono. Según Gayoso y Guerra (2005), los bosques de Pinos, juegan un papel muy importante en el ciclo global de carbono que desafortunadamente, a nivel mundial, muchos de estos ecosistemas han sido alterados o destruidos a través del tiempo sin conocer su importancia ambiental, muchos de ellos sirven para conservar los suelos, ya que se en su gran mayoría se encuentran en pendientes pronunciadas, además tienen la capacidad de capturar carbono de la atmosfera y almacenarlo en su biomasa.

Los sistemas agro forestales representan una importante opción para la fijación de carbono y de esta forma mitigar los efectos de cambio climático (Dávila 2011; Bravo *et al.* 2013), sin embargo, no han sido considerados como tal, debido a la poca información sobre su potencial de fijación y almacenamiento especialmente en los Andes peruanos.

En la comunidad de Combayo, perteneciente al Distrito de la Encañada, Provincia y Departamento de Cajamarca, existen plantaciones de *Pinus patula* Schiede et Cham; que en los últimos años han ocupado un lugar importante en el afán de reducir las concentraciones de CO₂ en la atmosfera y pese a esta importancia muchos no conocemos el potencial de esta especie forestal en la fijación de carbono. Este desconocimiento sobre la fijación de carbono por las plantaciones de *Pinus patula* Schiede et Cham en nuestra región nos conlleva a un inadecuado manejo y aprovechamiento de los bienes y servicio ambientales. También se ha podido observar que la población rural se expande más hacia nuestro valle disminuyendo nuestras áreas verdes que vienen hacer los pulmones de nuestro planeta, en su defecto el parque automotor emite monóxido de carbono, las industrias hasta el propio ser humano durante sus actividades diarias emite gases de efecto invernadero generando el cambio climático, en base a esto, la presente investigación se realizó con la finalidad de obtener datos cuantificables de fijación de carbono en la plantación de *Pinus patula* Schiede et Cham y de esta manera conocer la relación existente entre el carbono fijado por el ecosistema y la pendiente, de esta forma también lo que se busca es generar antecedentes que refuercen la implementación de políticas que ayuden a establecer plantaciones de sistemas forestales y así de esta manera contribuir a mitigar los excesos de CO₂ presentes en la atmosfera y frenar el calentamiento global.

Frente a este contexto se planteó la pregunta que nos ayudará a responder a través de la investigación: ¿Cómo influye la pendiente del terreno en la fijación de carbono en plantaciones de *Pinus patula* Schiede et Cham en el Centro Poblado de Combayo, La Encañada, Cajamarca?

La hipótesis que se formuló es que la pendiente del terreno influye significativamente en la fijación de carbono en plantaciones de *Pinus patula* Schiede et Cham en el Centro Poblado de Combayo, La Encañada, Cajamarca.

El presente trabajo de investigación tuvo como objetivo, determinar la influencia de la pendiente del terreno en la fijación de carbono en plantaciones de *Pinus patula* Schiede et Cham, en el Centro Poblado de Combayo, La Encañada, Cajamarca.

CAPÍTULO II

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. Antecedentes de la investigación

Cargua *et al.* (2014) en su trabajo de investigación determinaron el contenido de carbono orgánico en biomasa aérea, sotobosque, detritus no vivo, raicillas y suelo, en una plantación de *Pinus radiata* y en páramo, ubicado en la zona sur occidental del Parque Nacional Sangay, en Ecuador. Se aplicó un diseño de muestreo de doble estratificación, el cual consiste en dos fases. Para la primera fase se definió una rejilla de puntos de (1x1) km con proyección geográfica UTM WGS'84 Zona 17S; path-row 10 - 62 (glovis.usgs.gov), luego se seleccionó una muestra más pequeña en dos estratos correspondientes a seis parcelas de 60 x 60 m. El contenido de carbono promedio para biomasa aérea en la plantación fue de 14.69 Mg C ha⁻¹, sotobosque 0,68 Mg C ha⁻¹, detritus no vivo 2.97 Mg C ha⁻¹, raicillas 0.15 Mg C ha⁻¹ y suelo 268,83 Mg C ha⁻¹. En páramo el valor promedio para sotobosque fue de 6.55 Mg C ha⁻¹, detritus no vivo 56.09 Mg C ha⁻¹, raicillas 0,17 Mg C ha⁻¹ y suelo 215.0 Mg C ha⁻¹, el carbono promedio total en la plantación es de 287.31 Mg C ha⁻¹ y en páramo 277.81 Mg C ha⁻¹, observando un incremento del 30 %, en la plantación de *Pinus radiata*, pero con una menor tasa de regeneración de especies herbáceas y arbustivas con relación al páramo.

Anaya *et al.* (2016) identificó los principales suelos de un bosque de niebla (BN) en Michoacán, y evaluaron sus contenidos de carbono orgánico (COS) y capacidad de retención de agua. El diseño del muestreo fue estratificado, considerando diferentes posiciones de ladera. Ocho perfiles de suelo de 1 m de profundidad lo caracterizaron con métodos estándar. El contenido de COS osciló de 92 a 152 Mg ha⁻¹, el 55 % se distribuyó en los primeros 30 cm, y no hubo diferencias de contenido entre grupos de suelo. Los autores concluyeron que la concentración de CO decreció con la profundidad del suelo, y que aproximadamente 55 % se concentra en los primeros 30 cm.

Álvarez (2016) El objetivo de estudio fue evaluar la capacidad de captura de carbono en plantaciones de 4, 6, 8, 10, 12 y 15 años de edad de *Pinus patula* establecidas en Tonalaco, Veracruz, ubicadas en la zona agrícola del ejido. Se evaluaron 6 plantaciones de diferentes edades, en cada edad se realizó un muestreo aleatorio estratificado, en cada plantación seleccionada por edad se establecieron de forma sistemática 5 parcelas circulares (113.1 m²), un total de 30 parcelas de medición. Las variables medidas fueron altura, diámetro normal (a 1.3 m de altura), densidad de árboles, altitud, pendiente y coordenadas geográficas. La estimación del carbono capturado se realizó utilizando ecuaciones alométricas que requieren para su cálculo la variable diámetro normal (DN). Los resultados indican que existen diferencias en el carbono capturado en cada clase de edad de *P. patula*, a la edad de 15 años capturan en promedio aproximadamente 54.03 t ha⁻¹; por lo que, demuestran ser una excelente opción para fijar el carbono atmosférico.

Madrigal *et al.* (2018) evaluaron la Influencia de la cobertura, pendiente y profundidad, sobre el carbono y nitrógeno del suelo. El trabajo se realizó en la Estación Forestal Experimental de Zoquiapan, de la cual se tomó muestras de suelos con el objetivo de obtener y analizar el contenido de COS y Nt del suelo a las profundidades de 0 a 10, 10 a 20 y 20 a 30 cm, con tres grados de pendiente donde se desarrollan bosques de oyamel, pino y pinoale. Los resultados indicaron que, los mayores almacenes de COS y Nt se ubicaron en los primeros 10 cm. El suelo con la cobertura de oyamel, pendiente mayor y profundidad menor presentó el mayor contenido de COS y Nt (132.20 y 14.19 Mg ha⁻¹ respectivamente).

El suelo con cobertura de Pino, pendiente y profundidad mayor tuvo los contenidos más bajos de COS y Nt (30.86 y 3.37 Mg ha⁻¹, respectivamente). Se concluye que los contenidos de COS y Nt mostraron diferencias por tipo de cobertura, por pendiente y por profundidad. Aunque fue con relación a la profundidad que los contenidos de COS y Nt tuvieron un comportamiento más regular, que disminuye a medida que la profundidad se incrementó, independientemente de la cobertura y pendiente.

Francisco y Sebastián (2020) en su trabajo de investigación en el afán de determinar la cantidad de carbono almacenado en la biomasa arbórea, empleo

el método no destructivo basado en ecuaciones alométricas, donde se estimó que en la biomasa aérea existe una cantidad almacenada de 60.01 t ha^{-1} y en la biomasa de la hojarasca se estimó que hay 3.20 t ha^{-1} , encontrando mayor almacenamiento de carbono en el suelo con un total de 328.73 t ha^{-1} a una profundidad de 30 cm.

(Oliva *et al.*, 2017), en su investigación haciendo uso del muestreo directo concluye que los árboles presentaron un promedio de 30.90 t ha^{-1} de carbono secuestrado en el tejido vegetal, la hojarasca aportó un total de 2.64 t ha^{-1} de carbono y el suelo aportó un total de 81.24 t ha^{-1} de carbono.

Chacha (2011) en su trabajo de investigación “Estimación del servicio ambiental de captura de CO_2 y de recurso hídrico en montes y plantaciones forestales en Cajamarca”, la cantidad de carbono fijado por el sistema forestal de *Pinus radita* en la biomasa aérea es de 322.65 t ha^{-1} , de carbono, en cuanto a la biomasa del estrato arbustivo no se encontró probablemente se deba a la falta de luz y humedad y por la presencia de resinas, el volumen de la biomasa de hojarasca es de 5.8 t ha^{-1} del cual 2.62 t ha^{-1} es de carbono.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Calentamiento global y cambio climático

El calentamiento global básicamente, es un fenómeno que está asociado al aumento de la concentración de ciertos gases, conocidos como gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera y que se ha convertido en el problema ambiental más trascendental del presente siglo en función de sus impactos negativos sobre los ecosistemas, biodiversidad, infraestructura, recursos hídricos, procesos productivos y la salud pública (Barros, 2007).

Las consecuencias del calentamiento global de acuerdo con Olmos (2013) son el efecto invernadero, aumento de gases invernadero, el aumento del nivel de mar, desaparición de países, cambios climáticos que conllevan fenómenos como ciclones, huracanes, sequías, lluvias y enormes inundaciones, fuertes vientos, climas extremos, pérdidas económicas por desastres naturales, extinción de especies de plantas que crecen de forma natural, aumento del ciclo hidrológico, derretimiento de glaciares.

Mendiola (2008), define como un fenómeno que proviene del efecto invernadero debido al aumento de la temperatura media del planeta de esta manera afectando a los ecosistemas. En cuanto al cambio climático la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, afirma que es considerado como un cambio de clima generado de manera directa o indirectamente por la actividad humana, que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la inestabilidad natural del clima observada durante periodos de tiempo comparables.

Zamora y Marisela (2015), en las décadas recientes, las modificaciones en el clima han causado impactos en los sistemas naturales y humanos en todos los continentes y océanos. El cambio climático es un factor de riesgo para el éxito de las acciones encaminadas a la reducción de la pobreza, para la seguridad alimentaria, la salud pública, educación, en general para el desarrollo humano; elementos que de no atenderse en forma oportuna aumentan la vulnerabilidad de la población.

2.2.2. Causas y consecuencias del cambio climático

El IPCC (2004), afirma que el incremento de la temperatura global se debe también en una gran parte al incremento antropogénico de los GEI, fenómenos naturales como erupciones volcánicas y la variación del ciclo solar, también precisa que las principales causas en el futuro será el crecimiento demográfico de los pueblos, el desarrollo económico y social en el afán de erradicar la pobreza y la rapidez del avance tecnológico.

Este fenómeno tendría graves consecuencias desfavorables en aquellos ecosistemas naturales, conllevando a la pérdida y degradación de la riqueza biótica de nuestro planeta, la erosión de los suelos, contaminación de acuíferos, el hielo de los glaciares se está derritiendo, se producen más inundaciones provocadas por el Fenómeno El Niño siendo esta una consecuencia muy lamentable ya que trae muchas pérdidas humanas, también hay más sequías en la Sierra perjudicando a los cultivos de esta manera generando conflictos sociales, así como los huaicos que deja a ciudades aisladas (Ordoñez *et al.* 2016)

2.2.3. Efecto invernadero

Según (Pérez *et al.*, 2005). Afirma que efecto invernadero es un fenómeno natural en donde la atmósfera terrestre retiene la energía calorífica que proviene del sol de esta manera permite que la temperatura media de la tierra sea de 14.4 °C.

2.2.3.1. Gases de efecto invernadero

El efecto invernadero es producido por la presencia en la atmósfera de pequeñas cantidades de vapor de agua (0 - 2 %) y los GEI (CO₂, NO₂ y CH₄), estos absorben parte de las radiaciones térmicas de la superficie terrestre e impiden que escapen hacia el espacio exterior (Bazzaz, 1996).

Tabla 1. Principales gases de efecto invernadero

| GEI | Composición atómica | Vida media en años | Origen |
|------------------------|---------------------|--------------------|--|
| Dióxido de carbono | CO ₂ | 50 - 200 | Quema de combustibles fósiles y de biomasa, incendios forestales. |
| Metano | CH ₄ | 12 + (-) 3 | Cultivo de arroz, producción pecuaria, residuos sólidos. |
| Óxido nitroso | N ₂ O | 120 | Del uso de fertilizantes y residuos médicos de hospitales. |
| Hidrofluoro carbonos | HFC-23 HFC-125 | 1.5 a 264 | Extinguidores, aire acondicionado, aerosoles, etc. |
| Hexafluoruro de azufre | SF ₆ | 3200 | Producción del aluminio, magnesio, producción y uso de halocarbonos. |

Fuente: (Mendiola, 2008)

2.2.4. Plantación forestal

Se define como aquellas masas arbóreas las cuales han sido establecidas por el ser humano con la finalidad de poder aprovechar sus recursos como ambientales y comerciales (Pacheco *et al.*, 2007)

Por su parte la FAO (2002), define a las plantaciones forestales como aquellas formaciones de árboles sembradas con la finalidad de forestación o reforestación, estas pueden ser especies introducidas o indígenas que cumplen con los requisitos de una superficie mínima de 0.5 ha, una cubierta de copa de al menos el 10 % de la cubierta de la tierra, y una altura total de los árboles adultos por encima de los 5 m.

2.2.5. Pendiente del terreno

López (1997) define a la pendiente como un declive del terreno y la inclinación, respecto a la horizontal, de una vertiente, la pendiente del terreno en un punto dado como el ángulo que forma el plano horizontal con el plano tangente a la superficie del terreno en ese punto. Es, en definitiva, la inclinación o desnivel del suelo.

En lugar de expresarla como un ángulo, es más interesante representar la pendiente del terreno como un valor de tanto por ciento. Esto se obtiene multiplicando por 100 la tangente del ángulo que define el desnivel del suelo.

2.2.6. Carbono

El carbono (C) es el cuarto elemento más abundante en el Universo, después del hidrógeno, el helio y el oxígeno (O). Es el pilar de la vida que conocemos. Existen básicamente dos formas de carbono: orgánica (presente en los organismos vivos y muertos, y en los descompuestos) y otra inorgánica (presente en las rocas) (Javier *et al.* 2015).

En la naturaleza, el carbono se halla por doquier: en el agua bajo la forma de compuestos carbónicos disueltos (carbonatos), y en el aire como dióxido de carbono. Todos los organismos vivos son compuestos de carbono, que se obtienen como resultado de los procesos metabólicos durante su crecimiento y desarrollo, y que son liberados cuando éstos mueren. Aproximadamente, el 50 % del peso seco de cualquier organismo lo constituye este elemento, por lo que es uno de los más importantes de la vida (Quiñe 2009).

Existe en su mayor parte como dióxido de carbono en la atmósfera, los océanos y los combustibles fósiles (carbón, petróleo y otros hidrocarburos). Además, carbono en la atmósfera es absorbido por las plantas y convertidas en carbohidratos y tejidos a través del proceso de la fotosíntesis (Lapeyre 2004).

2.2.6.1. Ciclo del carbono

Ordoñez (1999), menciona que, este ciclo gira especialmente alrededor del dióxido de carbono, ya que constituye la especie química predominante en la atmósfera; este ciclo funciona básicamente a través de la fotosíntesis, la respiración, las emisiones de gases por quema de combustibles fósiles y fenómenos naturales como las erupciones volcánicas, así mismo afirma que, el ciclo del carbono es el responsable de la cantidad de CO₂ contenido en la atmósfera, ya que es el mecanismo que equilibra las cantidades de carbono presentes en los diferentes reservorios o almacenes de carbono en el planeta.

Saugier y Pontailier (2016), considera que el ciclo del carbono se describe tomando en cuenta los intercambios entre la atmósfera y la biosfera, así como las modificaciones causadas por las actividades humanas: deposiciones nitrogenadas, aumento del CO₂ atmosférico y el calentamiento climático inducido.

El ciclo del carbono se inicia con la fijación del dióxido de carbono atmosférico mediante la fotosíntesis que realizan las plantas y algunos microorganismos. En la fotosíntesis, el dióxido de carbono y el agua reaccionan para formar carbohidratos y a la vez, liberar oxígeno, que va a la atmósfera. (Orellana *et al.* 2012).

Entre las funciones más importantes que realizan las plantas esta la captura de carbono, ya que poseen clorofila, un pigmento fotosintético que tiene la capacidad de absorber la energía proveniente del sol y cederla para la síntesis de hidratos de carbono (almidón) a partir de dos compuestos disponibles en el medio: agua (H₂O) y dióxido de carbono (CO₂). Este proceso foto químico produce oxígeno (O₂) que es liberado a la atmósfera y tiene fundamental importancia para la vida de todo ser vivo, la respiración proporciona energía y productos intermedios a otras vías metabólicas esenciales para la supervivencia, crecimiento y reproducción de las plantas (Rambal *et al.*, 2014)

En correlación con lo anterior hay que mencionar que en el suelo se da la respiración, que consiste en la producción de CO₂ resultante de dos procesos: la ruptura u oxidación de la MOS realizada por los microorganismos del suelo, y la respiración de las células de las raíces de las plantas. La tasa de producción de CO₂ es importante porque es indicativa de la tasa de descomposición de la MOS en consecuencia, de la cantidad de carbono que se pierde del sistema suelo (Orellana *et al.* 2012).

2.2.6.2. El carbono en los ecosistemas agroforestales

El sistema suelo-vegetación forestal (agroforestería) desempeña un papel importante en el aumento o en la reducción de las concentraciones de CO₂ dependiendo de la velocidad de formación y descomposición de la materia orgánica (Segura *et al.* 2005).

Además de la reforestación (la cual depende en buena parte de decisiones políticas), la agrosilvicultura representa una buena técnica y una buena opción ecológica de manejo de la tierra. Sin embargo, se debe tener presente que la agrosilvicultura es un sistema complejo que comprende al menos 18 prácticas distintas y un número virtualmente infinito de variaciones (Cairns y Meganck 1994).

Sánchez *et al.* (1999), manifiestan que, la tasa de absorción de carbono en los suelos agroforestales, puede ser muy alta ya que la captura de carbono se efectúa tanto por los árboles como por los cultivos (ecosistemas agroforestales): de 2 a 9 t C ha⁻¹, dependiendo de la duración de 15 a 40 años. Schroeder (1994), menciona que, en las áreas tropicales, se puede obtener un almacenamiento de 21 a 50 t C ha⁻¹ en zonas subhúmedas y húmedas respectivamente. Las raíces por si solas podrían incrementar esos valores en 10 %.

2.2.6.3. El carbono orgánico del suelo

De acuerdo con Blasco y Burbano (2015), la materia orgánica del suelo es la fracción de la biosfera incorporada a la pedosfera (parte de la corteza que se compone de suelo y donde los procesos de formación de suelo aún están activos).

Todos estos compuestos sufren transformación catabólica (parte del proceso metabólico que consiste en la degradación de nutrientes orgánicos transformándolos en productos finales simples, con el fin de extraer de ellos energía química y convertirla en una forma útil para la célula) y finalmente dan los elementos precursores y junto con el carbono también están el hidrógeno, el oxígeno y el nitrógeno, a los cuales se suman otros elementos minerales

acomplejados en los compuestos catalizados. Cuando el proceso es natural o el suelo es objeto de manejo sostenible, como en todo metabolismo, la acción catabólica se compensa con la anabólica (Blasco y Burbano 2015)

La presencia del carbono en el suelo se puede considerar respecto al carbono orgánico del suelo (COS) o de la materia orgánica del suelo (MOS), advirtiendo que el carbono tiene funciones nutricionales particulares y que el catabolismo de los microorganismos se realiza en los compuestos orgánicos, toda vez que la MOS es el consolidado de la materia orgánica muerta y la biomasa. La cantidad total de la MOS está en función del balance entre la productividad de la biomasa y la velocidad catabólica o descomposición de la misma. Cuando el catabolismo es menor que la entrada de biomasa, la materia orgánica se acumula, como sucede en las turbas o en muchos suelos de regiones frías y húmedas. Si la tasa de descomposición supera a la adición de biomasa, la MOS disminuye, como ocurre en muchas áreas bajo cultivo, aunque también en esta disminución obran otros fenómenos denominados de exportación física, como la erosión y la percolación (Blasco y Burbano 2015).

2.2.7. Fijación de carbono

Según Alberto & Elvir (2008), la fijación del carbono es conocido y comúnmente llamado como captura o secuestro de carbono. Por su parte Gayoso y Guerra (2005) refieren que, para que se lleve a cabo la fijación de carbono, primero el dióxido de carbono presente en la atmósfera es absorbido por las plantas, a través del proceso de fotosíntesis. Luego, por este medio, las plantas convierten la energía de la luz solar en energía química aprovechable para los organismos vivos. Así, finalmente, los bosques almacenan grandes cantidades de carbono (C) en la vegetación y el suelo, e intercambian C con la atmósfera a través de la fotosíntesis y la respiración.

Pero no todo el CO₂ es transformado en biomasa, una parte es regresada a la atmósfera por medio de la respiración que se lleva a cabo por los procesos fisiológicos y lo que se emite en los procesos naturales como la descomposición de materia orgánica (Montoya 2014).

Los sumideros de carbono son ecosistemas forestales como suelo, vegetación viva, materia orgánica en descomposición, productos maderables y no maderables, combustibles fósiles no usados, etc (Yáñez 2004).

Cuando el tiempo de residencia del carbono en tejido vegetal es mayor a 60 años, se dice que existe un proceso biológico de captura de carbono (Pacheco *et al.* 2007).

2.2.7.1. Fuentes de fijación de carbono

Según Hernández (2010), los humedales ocupan sólo entre 4 – 6 % de la superficie terrestre, ellos desempeñan un papel importante en el ciclo de carbono (C) del planeta. La captación de carbono en humedales se realiza, en su mayoría, a través de las plantas que fijan el dióxido de carbono (CO₂) de la atmósfera y lo convierten a carbono orgánico. La saturación de agua en los suelos de humedales favorece la acumulación de carbono debido a que disminuye velocidad de descomposición de la materia orgánica. Los suelos inundados poseen condiciones anaerobias que favorecen la producción de metano (CH₄), el cual es considerado un gas de efecto invernadero, con un potencial de calentamiento global 21 veces mayor al del CO₂. Las emisiones de CH₄ de los humedales situados en diferentes zonas geográficas están dentro del rango de 0.001 - 1.810 Mg C ha⁻¹ año⁻¹. La vegetación y los suelos contienen aproximadamente tres veces y medio más carbono que la atmósfera, sin embargo, la cantidad de carbono almacenado globalmente en los suelos es mucho mayor que en la vegetación.

Los principales almacenes de C en los ecosistemas forestales se encuentran fraccionado en cuatro componentes: biomasa sobre el suelo (vegetación), hojarasca, sistema radicular y C orgánico del suelo, la vegetación es la encargada de incorporar el C atmosférico al ciclo biológico por medio de la fotosíntesis (Snowdon *et al.* 2001).

2.2.7.2. Fijación de carbono en el suelo

El suelo es el almacén de carbono más importante en los ecosistemas terrestres, en general, y forestales, en particular. La mayor concentración de este elemento se encuentra en las capas más superficiales del suelo (Segura *et al.* 2005). De acuerdo con Guzmán (2004) en su trabajo de investigación en Valorización Económica de beneficios ambientales en el Manejo sostenible de humedales el suelo es el componente de mayor almacenamiento de carbono con una cantidad de 532 - 631 t ha⁻¹.

Ávila *et al.* (2001) confirma que el carbono orgánico del suelo representa la mayor fijación en comparación del carbono inorgánico que representa cerca de 1,700 t ha⁻¹ bajo formas estables, como los carbonatos. La vegetación 650 t ha⁻¹ y la atmósfera 750 t ha⁻¹ almacenan considerablemente menos cantidades que los suelos.

Se conoce como materia orgánica del suelo (MOS) a un conjunto de residuos orgánicos de origen animal o vegetal, que están en diferentes etapas de descomposición, y que se acumulan tanto en la superficie como dentro del perfil del suelo. Además, incluye una fracción viva, o biota, que participa en la descomposición y transformación de los residuos orgánicos (Álvarez 2009). El COS es el principal elemento que forma parte de la MOS, por esto es común que ambos términos se confundan o se hable indistintamente de uno u otro.

Los suelos contienen más C que la suma existente en la vegetación y en la atmósfera, el carbono en los suelos puede encontrarse en forma orgánica e inorgánica la cantidad total de C orgánico almacenada en los suelos ha sido estimada por diversos métodos y su valor es cercano a 1.500 Picogramos (Pg) a una profundidad de 1 m (FAO 2001).

El muestreo de suelos es la actividad donde se toman muestras representativas que permiten caracterizar el suelo en estudio, en tanto que la muestra puede ser definida como una parte representativa que presenta las mismas características o propiedades del material que se está estudiando y las muestras que serán enviadas al laboratorio, constituyen las muestras elegidas para ser analizadas de acuerdo a los objetivos establecidos (MINAM 2014).

2.2.7.3. Fijación de carbono en la biomasa aérea

El almacenamiento de carbono en árboles, es un servicio ambiental que valoriza la incorporación de especies arbóreas en sistemas agroforestales, y se suma así a posibles beneficios para el productor que adopta estos sistemas alternativos, beneficios hídricos en relación con el incremento productivo de pastizal y bosque, y beneficios al nivel de fijación de carbono por medio de “bonos verdes” o “de carbono”, etc. (IPCC 2007). En las estimaciones de la cantidad de carbono almacenado para biomasa aérea se asume generalmente el valor de la fracción de carbono en materia seca en un 50 % sin diferenciar especies (Brown y Lugo, 1992; IPCC 2003).

Los bosques y selvas capturan, almacenan y liberan CO₂ como resultado de los procesos fotosintéticos, de respiración y de degradación de MO. Este servicio ambiental que proveen bosques o selvas como secuestradores o fijadores de carbono (también llamados sumideros) permite equilibrar la concentración de este elemento (Torres y Guevara 2005).

2.2.7.4. Fijación de carbono en ecosistemas forestales

Los ecosistemas forestales son capaces de una absorción neta de dióxido de carbono, y por lo tanto de contribuir a la reducción de dióxido de carbono atmosférico (Ruiz 2002). Es una estrategia para incrementar las tasas de secuestro o captura de carbono rápida y eficiente (Méndez 2011). La función de los árboles en la captura de CO₂ se evalúa debido a su potencial para modular el cambio climático y reducir el efecto invernadero (Ordóñez et al. 2001).

Los árboles están asociados con los cultivos, con el ganado o con ambos, todas las prácticas involucran la captura de carbono por lo que los cultivos deben ser plantados según las prácticas mencionadas anteriormente (labranza cero, cobertura con residuos, cobertura con cultivos). Es por ello que, la tasa de absorción de carbono puede ser muy alta ya que la captura de carbono se efectúa tanto por los árboles como por los cultivos: de 2 a 9 t C año⁻¹, dependiendo de la duración (15 a 40 años) (Sánchez *et al.* 1999).

Los ecosistemas forestales y el suelo son almacenes de alta consideración de C, las plantaciones de árboles forestales, el sotobosque que se desarrolla bajo la copa y la hojarasca contienen un estimado de 340 t ha⁻¹ de C por su parte el suelo fija 620 t ha⁻¹ (Brown *et al.*, 1996)

2.2.8. Impactos del bosque de forestales sobre el sotobosque

Los bosques de especies exóticas de rápido crecimiento tienen mucha influencia sobre la vegetación nativa. El ejemplo más directo es *Eucalyptus*, que es una especie alelopática que deja caer una hojarasca con unos fenoles que inhiben el crecimiento de otras especies. Bajo plantaciones de coníferas muchas veces tampoco puede crecer mucho sotobosque. Razones para esto son la falta de luz, más que todo en plantaciones densas sin manejo las copas de los *Pinus* no dejan pasar ni un rayo solar al piso (Ohep y Herrera 1985), y la gran producción de hojarasca que queda casi sin descomposición en el piso y ahoga la vegetación del sotobosque (Cortés *et al.* 1990).

2.2.9. Factores topográficos que influyen en la producción de bosques de *Pinus patula* Schiede et Cham.

La topografía se relaciona con el microclima, y a través de sus elementos: exposición y posición modifican el contenido de humedad del suelo y el régimen de nutrición, así tiene una marcada influencia sobre la calidad de suelo (Basset 1963); también hace mención que, la exposición y pendiente tienen un notable efecto sobre la distribución de la vegetación en las regiones montañosas. Por su parte Castaños (1962), hace mención que las plantaciones forestales con pendientes hasta 22% tienen un efecto positivo sobre el crecimiento en altura y diámetro de la plantación y que a partir de esa empieza a tener efecto curvilíneo negativo.

2.2.10. Plantación de estudio *Pinus patula* Schiede et Cham.

Conocido como *Pino pátula*, pino china u ocote en español, y *Patula pine*, spreading-leaved pine o Mexican weeping pine en inglés, es uno de los cuatro pinos de conos cerrados nativos de América Central.

Estos árboles pueden alcanzar de 20 a 40 m de altura, son notables por su corteza papirácea, escamosa y de color rojizo en la parte superior del tallo y en las ramas y por sus conos serótinios persistentes y de gran tamaño (Gillespie 1992).

Prospera en altitudes que van desde 1500 a 3100 msnm., con precipitaciones anuales de 600 a 2500 mm, es un árbol con tamaño de mediano a grande que en ejemplares longevos pueden alcanzar alturas de 40 m y diámetros e 120 cm (Ospina *et al.* 2011).

Se ha introducido en muchos países y se han plantado en altitudes superiores a los 3000 msnm como: Colombia, Bolivia, Ecuador, Perú, Kenia, Tanzania, Angola, Zimbabue, Nueva Guinea, Hawái, Brasil, Sudáfrica, India y provincias argentinas de Córdoba y San Luis, también se han plantado cerca del nivel del mar como Nueva Gales del Sur, Australia. Se ha introducido en Nueva Zelanda donde la respuesta del crecimiento ha sido buena y se han establecido plantaciones comerciales donde ya está totalmente naturalizado (Ospina *et al.* 2011).

Esta especie se desarrolla mejor en suelos con buen drenaje, es susceptible a vientos, no soporta a sequías intensas y es resistente al frío. Sánchez-Gonzales citado por Rodríguez *et al.* (2012), expresa que es una pinácea endémica de México, y de las más explotadas, tiene un gran potencial de producción con un manejo silvícola simple y posee una amplia variedad fenotípica y genética (Rodríguez *et al.* 2012). También, puede crecer en plantaciones puras o asociado con otras especies (Ospina *et al.* 2011).

Aguilera (2019) su propagación es través de semillas y es necesario de un tratamiento pre germinativo y su germinación demora 16 días, para el desarrollo de la especie es necesario la presencia de micorrizas, sus acículas o las hojas alcanzan de 20 a 30 cm y se agrupan en fascículos de 3 o 4 agujas y que en algunos casos pueden tener hasta 5.

Presenta flores unisexuales sobre el mismo árbol, la flor femenina es de color púrpura y se encuentran en las partes laterales, pedunculadas, solitarias o en pequeños racimos de hasta ocho escamas y la inflorescencia masculina está

ubicado en la parte terminal de las ramas generalmente son de color verde cuando estas están jóvenes y se tornan de color amarillo al madurar, también presenta frutos, conos en forma ovoide a cónico, punzantes, asimétricos, curvados en el extremo, firmes en el árbol, de 4,0 a 12,0 cm de largo por 2,5 a 5,0 cm de diámetro, dispuestos en pedúnculos cortos de 1,5 cm y, frecuentemente agrupados de tres a siete; las semillas son pequeñas de forma casi triangular de un color negruzco de 3,0 a 5,0 mm de longitud (Wormald, 1975).

2.3. Definición de términos básicos

Biomasa: Hernández y Santos (2017) establece que la biomasa forestal está definida como el peso de un ecosistema forestal y está dividida en biomasa aérea, biomasa de la hojarasca, biomasa del sotobosque y biomasa subterránea refiriendo al sistema radicular de la planta. La biomasa forestal aérea es la suma de la materia orgánica seca del fuste con corteza, ramas y hojas, componentes de la cobertura vegetal quien ayuda a determinar la fijación de carbono.

Biomasa aérea (Ba): Material vegetal acumulado sobre el nivel del suelo (entrenudos aéreos del tallo, raíces, y estructuras reproductivas en kg árbol⁻¹ (Medina, 2006).

Biomasa forestal: Se define como la materia orgánica que existe en un determinado ecosistema forestal, tanto por encima como por debajo del suelo. Plantaciones forestales: zonas forestales establecidos mediante plantación y/o siembra durante el proceso de forestación o reforestación (Zamora *et al.*, 2000).

Carbono orgánico del suelo (COS): El carbono orgánico del suelo es un componente importante en el ciclo completo del carbono, que ocupa un 69.8 % del carbono de la biosfera (FAO, 2001).

Captura de carbono: Es el proceso de extracción del carbono o del CO₂ de la atmósfera y almacenarlo en un depósito. La fotosíntesis es el principal mecanismo de secuestro de carbono (Segura, 1997).

Fijación de carbono: Según Alberto & Elvir (2008), la fijación del carbono es conocido y comúnmente llamado como captura o secuestro de carbono.

Materia seca: Es la parte que resta de un material tras extraer toda el agua posible a través de un calentamiento hecho en condiciones de laboratorio. Se expresa generalmente en porcentaje.

Pendiente del terreno: Una pendiente es un declive del terreno y la inclinación, respecto a la horizontal, de una vertiente (López 1997).

Plantación forestal: Se define como aquellas masas arbóreas las cuales han sido establecidas por el ser humano con la finalidad de poder aprovechar sus recursos como ambientales, comerciales (Pacheco *et al.*, 2007).

Reservas de carbono: La cantidad de carbono en un “depósito”, o sea una reserva o sistema capaz de almacenar o liberar el carbono (Segura, 1999).

Sotobosque: Se denomina sotobosque al conjunto de arbustos, hierbas y matorrales y pajonales que se desarrollan debajo de los árboles. Se puede señalar que el sotobosque es el sector poblado más cercano a la superficie del suelo y cubierto por la copa de árbol de acuerdo con Luna *et al* (2015) el sotobosque viene hacer la parte arbustiva y herbáceo, siendo estos los estratos que más contribuyen a la diversidad vegetal de los bosques forestales.

Sumidero de carbono: Es un depósito natural o artificial de carbono, que absorbe el carbono de la atmósfera y contribuye a reducir la cantidad de CO₂ del aire (Segura ,1999).

2.4. Características del área de estudio

2.4.1. Suelo

Los suelos del bosque natural (Monte) y de la plantación forestal de *Pinus patula*, ubicado en el Centro Poblado de Combayo, Distrito de La Encañada, derivan de rocas volcánicas. Los suelos de estos sistemas presentan elevada cantidad de materia orgánica, debido a la presencia de pastos naturales que crecen bajo las plantaciones.

De acuerdo con la FAO (2006), el tipo de suelo que proviene de las rocas volcánicas se le denomina Andosol, estos suelos que se forman a partir de cenizas volcánicas, principalmente en ambientes templados y húmedos, aunque también se pueden encontrar en climas tropicales, debido a que son suelos de origen volcánico, se asocian a relieves ondulados y montañosos.

2.4.2. Clima y temperatura

La zona de estudio corresponde a un clima templado sub - húmedo (Valles Andinos), presenta dos estaciones bien marcadas, una lluviosa entre los meses de noviembre a marzo y otra seca entre los meses de abril a noviembre, con algunas etapas transicionales; este ciclo tiene períodos excepcionales cuando se presentan años de sequía y/o abundantes precipitaciones por fenómeno de El Niño, que causan daños a la agricultura, ganadería y forestaría mediante los deslizamientos de suelos (ONERN 1998).

Presenta una radiación solar desde 14 – 27 °C, promedio máximo 21 °C, con una precipitación promedio de 600- 800 mm entre las estaciones de sequía y lluviosa. La diferencia de temperatura diurna es alrededor de 5 – 13 °C. El enfriamiento es fuerte durante las noches claras, lo que ocurre sobre todo en los meses secos, en los cuales aumenta la incidencia de heladas llegando incluso a 0 °C.

2.4.3. Vegetación

Está conformada por la presencia de pastos naturales, donde es común hallar especies como ichu o paja (*Stipa ichu*) y otras gramíneas, también existen especies arbóreas como eucalipto (*Eucalyptus globulus*), *Pinus patula* Schiede et Cham., y un soto bosque con especies vegetales propias de la zona el cual es frecuente encontrar en el área de estudio.

A este tipo de vegetación se le atribuye como Páramo, ya que se encuentra a 3010 msnm y está caracterizado por la presencia de pajonales, arbustos y bosques de altura, de manera que se lo puede calificar como formaciones alternantes de pajonales y matorrales (Brack, et al., 2002).

La plantación forestal que es de nuestro objeto de estudio fue instalada aproximadamente 8 años atrás, con un distanciamiento promedio de 2.5 m por 3 m, con hoyos de 40 cm x 40 cm, la mayor parte de la plantación ha recibido el manejo forestal con la finalidad de incrementar la producción maderable.

2.4.4. Pendiente

Es una variable física que se relaciona con el aspecto topográfico del territorio, el Caserío Molino del Arco, presenta considerables accidentes geográficos que determinan el uso y la ocupación del territorio donde el 35.18% de su territorio presenta una pendiente empinada, seguida por la pendiente moderadamente empinada que cubre el 30.33% del área; solamente el 2.04% de su territorio presenta superficie llana.

2.5. Materiales

2.5.1. Material biológico

- Árboles de *Pinus patula* Schiede et Cham.
- Sotobosque (especies propias de la zona de estudio).
- Suelo orgánico de la plantación forestal.

2.5.2. Equipos de campo

- GPS
- Nivel
- Balanza
- Prensa de madera
- Libreta de apuntes
- Cámara fotográfica

a) Materiales de campo

- wincha de 50 m
- Cinta métrica
- Palana derecha
- Picota
- Rafia
- Estacas de eucalipto
- Bolsas de papel diferentes medidas
- Bolsas de plástico diferentes medidas
- Cinta masking
- Etiquetas de identificación
- Machete
- Recipiente
- Sacos de 50 kg
- Regla de 60 cm
- Plumón indeleble
- Tarjetas de identificación
- Tijeras de podar
- Sierra arco
- Lápiz, marcador
- Pizarra acrílica

2.5.3. Material y equipo de laboratorio

- Laptop
- Papel bond
- Lapiceros
- Ordenador
- Plumones
- USB
- CDS
- Impresora
- Estufa eléctrica
- Balanza electrónica

2.6. Metodología

2.6.1. Tipo y diseño de investigación

Es una investigación cuantitativa, descriptiva no experimental pues se tomaron los datos sin manipular las variables con la finalidad de recolectar y procesar datos numéricos a través de datos obtenidos de la medición sobre la fijación de carbono por la biomasa arbórea, sotobosque, hojarasca y el componente suelo (Hernández *et al.*, 2017).

Por las características del estudio se utilizó el Diseño de Bloques Completos al Azar (DBCA), con tres tratamientos (pendientes) y tres repeticiones (bloques). Las muestras fueron tomadas al azar.

2.6.2. Factores, variables (independientes), niveles y tratamientos en estudio.

Las variables a medir en cada parcela fueron, la altura de cada árbol, el diámetro a la altura de pecho (DAP) de 20 árboles, biomasa del sotobosque, biomasa de la hojarasca y el suelo forestal a 40 cm de profundidad, con esto se obtuvo los datos para calcular la fijación de carbono.

De acuerdo con Romo *et al.* (2014), en su trabajo de investigación Crecimiento maderable y biomasa aérea en plantaciones jóvenes de *Pinus patula* Schiede, midió la altura de 25 árboles, se calculó la pendiente y la altitud de cada parcela. Utilizando el DAP y las ecuaciones alométricas se calculó la biomasa y el carbono capturado de cada uno de los árboles.

Tabla 1. Variables de estudio (pendientes)

| variables | Descripción de las variables |
|------------------|-------------------------------------|
| V1 | Pendiente de 0 a 10 % |
| V2 | Pendiente de 10 a 20 % |
| V3 | Pendiente > 20 % |

2.6.3. Delimitación y trazado de parcelas

Para la delimitación y trazado de parcelas se tuvo en cuenta la pendiente (de 0 % a 10 %, 10 % a 20 % y mayor a 20 %). Luego utilizando una wincha de 50 m y rafia, se trazó parcelas de 100 m² (4 m x 25 m) en forma diagonal para poder delimitar el área con dichas pendientes dentro de la plantación de *Pinus patula* Schiede et Cham., en cuyo interior se trazaron cuadrantes de 1 m² bajo la proyección de la copa del árbol, para valorar la biomasa de hojarasca y sotobosque.

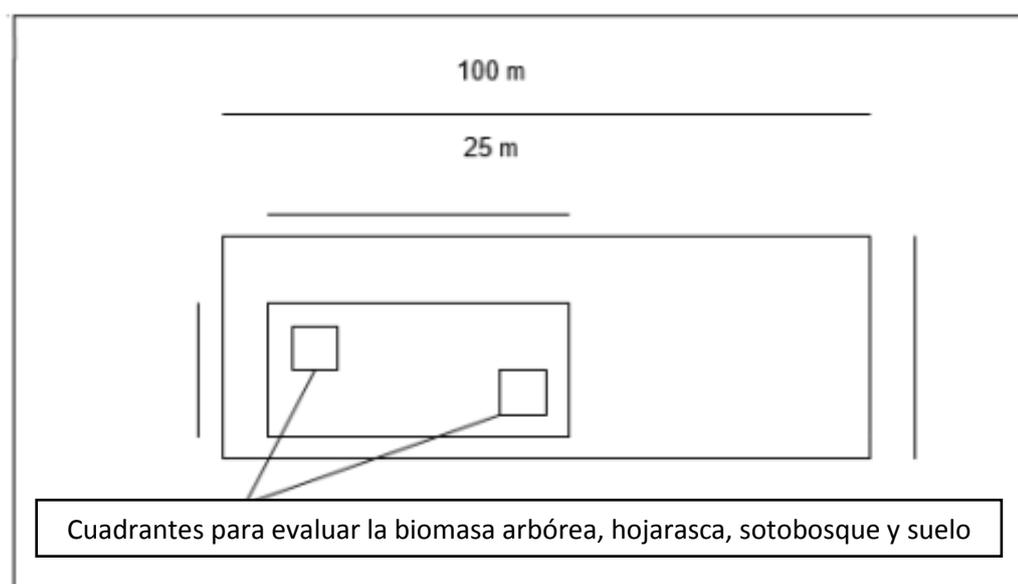


Figura 2. Croquis de parcelas de evaluación de los diferentes componentes de investigación (Fuente: Arévalo, 2003).

2.6.4. Métodos para estimar la biomasa y la fijación del carbono

➤ Estimación de la biomasa aérea de *Pinus patula* Schiede et Cham, en campo

Para el caso de la biomasa aérea se determinó solamente en aquellos árboles vivos en pie (BAVP), considerándose un número de árboles por cada parcela de 20 y el diámetro a la altura del pecho 1.30 m tomado como referencia el nivel del suelo es importante considerar esta variable ya que influye en la estimación de la biomasa de los árboles (Arévalo *et al.*, 2003).

Para la recolección de estos datos se tomaron aquellos árboles que se encontraban dentro de la parcela delimitada (4 m x 25 m) y de acuerdo a las pendientes establecidas, la medición del DAP se realizó utilizando una cinta métrica y un cuaderno de apuntes en el cual se midió y anotó la circunferencia de cada árbol, también se tomó en consideración lo siguiente:

- De los árboles seleccionados se cortaron tres ramas representativas una de la base de la copa, otra de la parte media y una de la parte terminal de la copa del árbol, de las cuales se separó las ramillas y las acículas para luego ser pesadas y colocadas en una bolsa de papel e etiquetadas, este procedimiento se realizó para la recolección de todas las muestras según las pendientes.
- También se contabilizó el número de ramas por cada árbol.
- Cuando los árboles presentaron bifurcación por debajo de 1,30 m, se registró cada uno de los diámetros y se promedió para obtener un solo dato.
- Cuando un árbol se encontró situado en una pendiente, el DAP se midió desde la parte preferente de la pendiente.
- Cuando los árboles presentaron bifurcación basales. En este caso, el DAP se midió solamente al tronco principal.
- Los árboles se seleccionaron teniendo en cuenta que sean los más representativos de cada parcela, en su ramificación, tronco y en su forma de copa (cónica).
- La medición de cada árbol lo realizó la misma persona para poder tener datos más homogéneos.

Esta metodología se basa en la determinación de la biomasa total de las especies vegetales, mediante el uso de ecuaciones alométricas si son plantaciones forestales y en la toma de muestras en forma distributiva del

sotobosque, cultivos, pastos, así como también de la hojarasca (Arévalo *et al.* 2003).

➤ **Determinación de la biomasa de la hojarasca en campo**

Las muestras que fueron recolectadas son las que se desprendieron del árbol y que están bajo la proyección de la copa de *Pinus patula* Schiede et Cham. Esto se realizó de acuerdo a la pendiente, en total se tomaron nueve muestras (3 de cada pendiente).

La recolección de las hojas (acículas), se realizó teniendo en cuenta lo siguiente:

- Dentro del cuadrante de 1 m², se recolectó toda la acícula acumulada por debajo la copa de *Pinus patula* Schiede et Cham. y además se recolectó también ramas, ramillas y las hojas caídas de los arbustos del sotobosque.
- Las acículas que están necrosadas también fueron recolectadas, nos referimos a la materia orgánica que está en un estado poco degradado y fresco.
- Toda la hojarasca recolectada se vertió en un plástico para mezclar y separa los troncos secos, ramas y ramillas que no fueron parte de nuestro experimento.

Luego se pesó la cantidad de hojarasca (peso fresco), que existía en 1 m², del cual se tomó solamente 1 kg y se llevó al laboratorio para determinar materia seca. Cada muestra fue colocada en bolsas de polietileno correctamente identificadas

El peso seco obtenido en el laboratorio se llevó a t ha⁻¹ y se multiplicó por el factor 0.45 para obtener la cantidad de carbono por hectárea (C ha⁻¹) de la hojarasca; asumiendo que el 45 % del peso constante de la biomasa vegetal es carbono Arévalo *et al.*, (2003).

Determinación de la biomasa del sotobosque en el campo.

Dentro de la parcela limitada de 1 m² se cortó toda la vegetación que forma el sotobosque, arbustos, hierbas, troncos secos y paja, teniendo en cuenta lo siguiente:

- Los arbustos que se tomaran en cuenta solo fueron aquellos que habían crecido bajo la proyección de la copa y que este dentro del 1 m² delimitado.
- No se tomó en cuenta el sistema radicular de ninguna planta herbácea, solo aquellas que están a nivel del suelo.
- En los casos donde se encontró plantas rastreras como la zarza mora, solamente se recolectó aquella parte de la planta que se encontraba dentro del área delimitada.

Luego se vertió en un plástico para mezclar y homogenizar la muestra; de todo el sotobosque recolectado se tomó una muestra de un kilogramo en una bolsa de polietileno, se registró el peso fresco en el cuaderno de apuntes luego fue etiquetada para poder llevar al laboratorio, y de esta manera poder determinar la materia seca, teniendo un total de nueve muestras, tres de cada pendiente de 0 % a 10 %, 10 % a 20 % y mayores a 20 %.

De acuerdo con Arévalo *et al.*, (2003) el sotobosque está compuesto por biomasa arbustiva (BA) y herbácea (BH) y arbustos menores de 2.5 cm de diámetro, gramíneas, leguminosas, tuberosas, etc., de cultivos, y otras hierbas.

➤ **Determinación del carbono en el suelo**

Para la determinación de este parámetro se hicieron micro calicatas de 0.40 m de profundidad en cada una de las parcelas delimitadas y de acuerdo a las pendientes del terreno (0 a 10 %, 10 % a 20 % y mayores a 20 %), de las cuales se tomaron muestras de 1 kg, teniendo en cuenta lo siguiente:

- Se realizó la limpieza total del área de muestreo sacando las hiervas, hojas y algunos desechos orgánicos.
- Según las pendientes se excavaron 5 micro calicatas de cada una, teniendo un total de 15 sub muestras.
- Se realizó la excavación de la calicata haciendo uso de una pala recta a una profundidad de 0.40 m.
- Se limpio cuidadosamente todo el perfil vertical y el fondo de la calicata extrayendo los residuos de suelo.
- La toma de las muestras se realizó desprendiendo una lámina de suelo en forma vertical de arriba hacia abajo con la pala y se puso en una bolsa de polietileno, este procedimiento se realizó para la recolección de todas las sub muestras según las pendientes.
- De cada pendiente se recolectaron 5 sub muestras, las cuales se colocaron en un plástico para la eliminación raíces, rocas.
- Se mezcló bien las 5 sub muestras para luego extraer 2 muestras de suelo de cada pendiente de 1 kg.
- Para identificación de la muestra se colocó una etiqueta con los datos siguientes, el nombre del responsable, nombre del lugar “Combayo”, ubicación geográfica (Cajamarca, Cajamarca, La Encañada, Molino del Arco), número de muestra, y algunas informaciones complementarias, por ejemplo: pendiente del terreno, plantación instalada.

Luego que se seleccionó las muestras representativas de cada pendiente fueron llevadas al Laboratorio de Servicios de Suelos del Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA) para determinar el carbono total, pH, textura y densidad aparente.

Para calcular el carbono existente en el suelo Ricse *et al.*, (2001) abrió calicatas de 0.50 m de profundidad donde definió los horizontes entre 0 – 0.25 m y 0.25 – 0.50 m; que podrían variar según la textura del suelo

tomado muestras de 500 gramos en promedio por cada 25 cm de profundidad del perfil, las mismas que fueron correctamente identificadas, codificadas y llevadas al Laboratorio de Suelos de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo (UNASAM) para la determinación del porcentaje de carbono en el suelo.

2.6.5. Trabajo de laboratorio

- Pesado de muestras

Las muestras vegetales colectadas se llevaron al laboratorio de Rizobiología de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Cajamarca (UNC), para ser pesadas, etiquetadas y colocadas en una bandeja de aluminio para ser dispuestas en la estufa.

- Secado de las muestras

Las muestras vegetales fueron llevadas al Laboratorio de Silvicultura de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Cajamarca (UNC), donde fueron sometidas a 105 °C por un periodo de 24 horas, hasta obtener un peso constante, luego se obtuvo el peso seco de la biomasa del sotobosque y de la hojarasca teniendo en cuenta el formato de toma de datos (Tabla 27).

2.6.6. Trabajo en gabinete

Con el peso fresco obtenido en campo y el peso seco obtenido en el laboratorio se calculó la materia seca de cada uno de los componentes de la plantación forestal para así poder calcular el carbono fijado, haciendo uso de las siguientes ecuaciones alométricas establecidas por Arévalo *et al.* (2003), en el Manual determinación de las reservas totales de carbono en los diferentes sistemas de uso de la tierra.

a) Cálculo de porcentaje de materia seca (MS %)

Para estimar la materia seca de cada componente (biomasa arbórea, sotobosque y hojarasca), se utilizó la relación peso seco/peso fresco por el 100% y el peso total del componente como lo recomienda Arévalo *et al.*, (2003).

El peso seco así obtenido se elevó a toneladas por hectárea ($t\ ha^{-1}$) y dicho valor se multiplicó por el factor 0.45, obteniéndose la cantidad de carbono en dicha biomasa.

$$MS \% = \frac{\text{Peso seco}}{\text{Peso Fresco}} * 100$$

Donde:

- MS% : Porcentaje materia seca
- Ps : Peso seco
- Pf : Peso fresco

b) Cálculo del peso de la humedad de las muestras

El contenido de humedad viene hacer la cantidad de agua que contiene las muestras recién recolectadas de campo (hojarasca, sotobosque). se calcula mediante la ecuación establecida por (Serrato *et al.*, 2014).

$$PH = \frac{(\text{Peso fresco} - \text{Peso seco})}{\text{Peso fresco}}$$

Donde:

- PH : Peso del contenido de humedad de la muestra
- PF : peso fresco de la muestra en gr
- PS : peso seco de la muestra salida de la estufa en gr

c) Cálculo de la biomasa seca

La biomasa seca es aquella materia orgánica (hojarasca y sotobosque), que está libre de agua (secadas en la estufa a 105 °C por 24 horas). Para determinar la biomasa seca Serrato *et al.*, (2014) utiliza la siguiente ecuación:

$$BS = \frac{Pft - (Pft * Ph)}{1000000}$$

Donde:

- BS : Biomasa seca en t
- Pft : Peso fresco total
- Ph : Peso del contenido de humedad
- 1000000 : Para transformar a toneladas

d) Cálculo de la biomasa total del ecosistema

De acuerdo con Macdicken, (1997), la biomasa total es equivalente a la sumatoria de la biomasa aérea viva total, biomasa del sotobosque, biomasa de la hojarasca y la biomasa del suelo.

$$BT (t ha^{-1}) = (BA + BS+ Bh + Bs)$$

Donde:

- BT : Biomasa total del ecosistema
- BA : Biomasa aérea
- Bs : Biomasa del sotobosque
- Bh : Biomasa de la hojarasca
- Bs : Biomasa suelo

e) Cálculo de la biomasa aérea (BA) en Kg ha⁻¹

Una vez recogido los datos en campo, éstos se procesan utilizando ecuaciones alométricas, donde se utilizó la siguiente ecuación (Díaz, 2007)

$$BAr = 0.0948 * DAP^{2.4079}$$

Dónde:

- BA : Biomasa aérea (kg⁻¹ árbol)
- DAP : Diámetro a la altura del pecho (cm).
- 0.0948 : Constante obtenida mediante estudio de alometría
- 2.4079 : Constante obtenida mediante estudio de alometría

f) Cálculo de número de plantas por hectárea

$$N^{\circ} \text{ Arboles ha}^{-1} = \frac{\text{Área}}{L * A}$$

Donde:

- L : distancia del largo entre plantas (m)
- A : distancia del ancho entre plantas (m)
- Área : Se hace referencia a una hectárea (10 000 m²).

g) Cálculo del carbono de la biomasa aérea total (Bt)

Para obtener el carbono fijado por la biomasa total (biomasa aérea, biomasa del sotobosque y hojarasca), se multiplicó el valor obtenido de la biomasa por un factor de conversión de carbono de 0,45. Este factor, es el resultado de un gran número de estudios, que han demostrado que, en promedio la materia vegetal contiene un 45 a 50 % de carbono, una vez que se ha eliminado el exceso de agua mediante la estufa a una temperatura establecida (Márquez 2000).

$$\text{Carbono de Bt en t ha}^{-1} = \text{BA} * 0,45$$

Donde:

- Bt : Biomasa total en t ha⁻¹
- 0.45 : Constante establecida, el cual indica que el 45 % de la biomasa del árbol es carbono.
- BA : biomasa aérea total.

h) Fórmula para calcular la captura del dióxido de carbono (CO₂)

$$\text{CO}_2 \text{ de la Bx en t ha}^{-1} = \text{CB} * 3.6666$$

Donde:

- Bx : Biomasa ya sea del sotobosque, aérea y hojarasca
- CB : Carbono de la biomasa
- 3.6666 : Constante que se calcula Como la molécula gramo de CO₂ pesa 44 gr frente a los 12 gr que contiene de carbono el CO₂ por cada kg de madera, medido en materia seca se fijan 44/12= 3,66667 kg de CO₂ donde (C= 12, O=16 y CO₂= 44).

i) Cálculo del diámetro a la altura del pecho (DAP)

La medición de la circunferencia del árbol se realizó haciendo uso de una cinta métrica tomada a una altura 1.30 m teniendo como referencia el suelo, en este caso se tomó la circunferencia a la altura de pecho (CAP) para luego calcular el DAP, como también Ruginz *et al.*, (2009) misiona que para calcular el DAP teniendo como dato la CAP se realiza aplicando la siguiente formula.

$$\text{DAP} = \frac{\text{CAP}}{\pi}$$

Dónde:

- CAP : Circunferencia a la altura del pecho en cm
- DAP : Diámetro a la altura de pecho (1.30 m)
- π : 3.1416

j) Cálculo de carbono en el sotobosque

$$CBs = Bs * 0.45$$

Dónde:

- B : Biomasa vegetal seca que puede ser: BA o Bh
- S : Sotobosque
- C : Carbono en la biomasa vegetal
- 0.45 : Constante (proporción de carbono, asumido por convención)

k) Cálculo de la densidad aparente del suelo

La densidad aparente se define como la masa del suelo por unidad de volumen de acuerdo con López (2017) la densidad aparente se determina haciendo uso del método descrito por MacDicken (1997); y se calcula con la siguiente ecuación, el cual nos servirá para calcular el carbono fijado por el suelo:

$$DA = \frac{PS}{VC}$$

Donde:

- DA : Densidad aparente del suelo en g cm³
- PS : Peso del suelo dentro del cilindro
- VC : Volumen del cilindro en cm³

El volumen del cilindro se calcula con la siguiente ecuación:

$$VC = \pi * r^2 * h$$

Donde:

- VC : Volumen del cilindro en cm³
- π : 3.1415
- r : Radio del cilindro en cm
- h : Altura del cilindro en cm

I) Cálculo del carbono del suelo

Para determinar la cantidad de C acumulado en el componente suelo se empleó la siguiente fórmula (Acosta *et al.*, 2002):

$$CC = Pm * DA * \% C$$

donde:

- CC : Cantidad de carbono (t ha⁻¹)
- Pm : Profundidad de la muestra (cm)
- DA : Densidad aparente del suelo (g cm⁻³)
- C : Porcentaje de carbono por cada muestra

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4. Carbono fijado por la plantación de *Pinus patula* Schiede et Cham

En el Distrito de La Encañada, Centro Poblado de Combayo, Caserío Molino del Arco se evaluó la plantación forestal de *Pinus patula* Schiede et Cham de 8 años de edad con la finalidad de cuantificar el carbono fijado, obteniendo los siguientes resultados.

4.1. Fijación de carbono por el suelo

Tabla 3. Fijación de carbono total del suelo de acuerdo con las pendientes

| Pendiente | N° de Muestra | Profundidad de muestreo en m | Carbono Orgánico en % | Densidad Aparente g/cm ³ | Carbono Orgánico en t ha ⁻¹ |
|-------------|---------------|------------------------------|-----------------------|-------------------------------------|--|
| 0 %-10 % | I | 0.4 | 2.1 | 1.42 | 119.28 |
| | II | 0.4 | 2.51 | 1.44 | 144.576 |
| Total | | | | | 263.856 |
| 10 % - 20 % | I | 0.4 | 1.45 | 1.43 | 82.94 |
| | II | 0.4 | 2.29 | 1.44 | 131.904 |
| Total | | | | | 214.844 |
| >20 % | I | 0.4 | 1.33 | 1.43 | 76.076 |
| | II | 0.4 | 1.49 | 1.42 | 84.632 |
| Total | | | | | 160.708 |

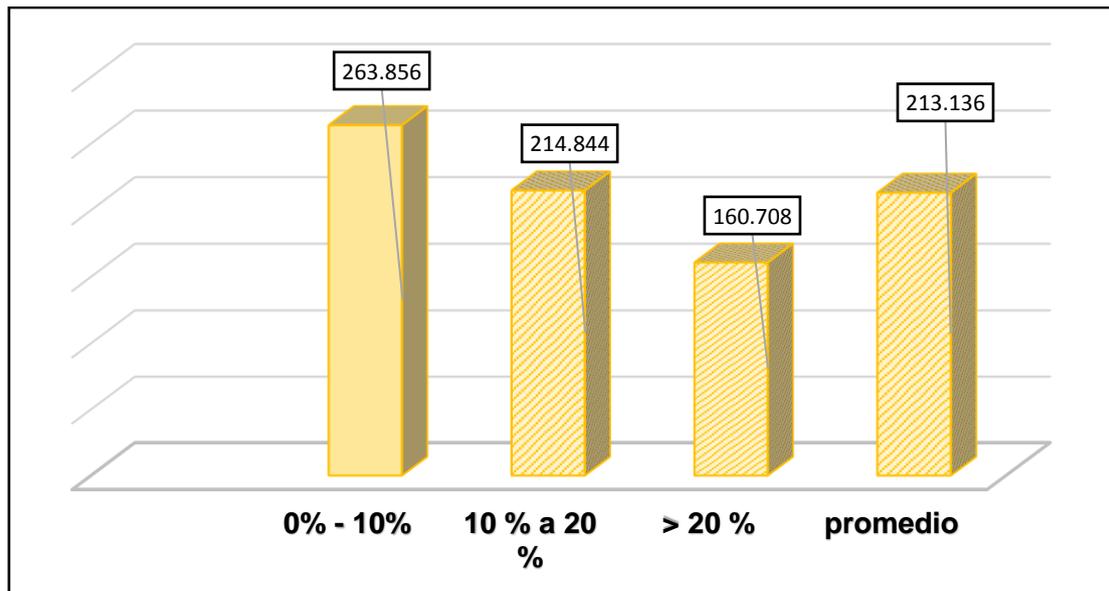


Figura 3. Fijación de carbono por el suelo obtenido en cada pendiente de la plantación de *Pinus patula* Schiede et Cham.

En la Tabla 3 y figura 3, se observa que en la profundidad de 0 - 40 cm del suelo forestal y teniendo en cuenta la pendiente, la fijación de carbono (C) fue; de 0 a 10 % fijó 263.856 t ha⁻¹ (a este valor se lo atribuye el 100 %). El carbono muestra un comportamiento decreciente conforme se incrementa la pendiente, de 10 % a 20 % fijó 214.844 t ha⁻¹, que equivale a una reducción de 18.5 % y para la pendiente mayor al 20 % la fijación fue de 160.708 t ha⁻¹ disminuyendo en un 39 % con respecto a la menor pendiente (0 a 10 %). Observando la Figura 3, la fijación de carbono varía según aumenta la pendiente esto se debe a que en pendientes menores la acumulación de restos orgánicos, acículas de *Pinus patula* que cae de los árboles, mayor número de raíces, hojas necrosadas del sotobosque y desechos de animales que se encuentran formando una especie colchón donde la humedad juega un papel muy importante para activar la flora microbiana y acelerar la descomposición de la materia orgánica, también cambian en función de la densidad aparente y el porcentaje de carbono encontrada en cada muestra de suelo.

Por otro lado, la cantidad de carbono fijado por el suelo en la pendiente mayor al 20% fue significativamente más bajo que el las dos anteriores esto se debe a que existe erosión del suelo, eliminación de la capa superficial dada por el agua

o deslizamientos, el viento que transporta las hojas de los Pinos y las partículas del suelo, esto ocasiona que el suelo contenga bajos niveles de materia orgánica.

Como se muestra en la Figura 3 estos datos son similares a los que fueron obtenidos por Ibrahim (2007), quien reporta que la fijación de carbono del suelo fue 313.589 t ha⁻¹ a una profundidad de 40 cm; mientras que el valor más bajo obtuvo a mayor profundidad con un valor de 238.366 t ha⁻¹.

De acuerdo con Francisco y Sebastián (2020) en su trabajo de investigación en el afán de determinar la cantidad de carbono almacenado en la biomasa arbórea y suelo, se determinó que se ha encontrado mayor almacenamiento de carbono en el suelo, un total de 328.73 t ha⁻¹ a una profundidad de 30 cm. En nuestro trabajo de investigación encontramos un promedio de fijación de carbono de 213.136, el cual se encuentra dentro de los rangos reportados por Dixon (1995), el cual indica que en los suelos de ecosistemas forestales la fijación de carbono está entre los 12 a 228 t ha⁻¹. Además, la fijación de carbono del suelo en los ecosistemas naturales se da por dos vías principales: por la capa superficial que está cubierta por las hojas caídas del árbol y el sotobosque quienes juegan un papel importante en la fijación de C y la otra vía es por la biomasa radicular. La velocidad de la descomposición de la materia orgánica depende de la humedad y de la población microbiana del suelo (Romero 2015).

Tabla 4. Análisis de varianza (ANOVA) para la fijación de carbono por el suelo.

| Fuente de variación | Suma de cuadrados | Grados de libertad | Cuadrados medios | F calculado | F tabular | |
|---------------------|-------------------|--------------------|------------------|-------------|-----------|-------|
| | | | | | 0.05 | 0.01 |
| Bloque | 15367.22 | 1 | 15367.22 | 5.55 ns | 18.51 | 98.50 |
| Pendiente | 35788.26 | 2 | 17894.13 | 6.46 ns | 19 | 99 |
| Error | 5541.61 | 2 | 2770.8 | | | |
| Total | 56697.09 | 5 | | | | |

CV = 13.47 %

Según el ANOVA Tabla 4, entre los resultados obtenidos no existe diferencias significativas, esto puede explicarse a que las muestras fueron tomadas de 0 - 40 cm de profundidad con respecto a la superficie del suelo, también se puede

afirmar que el suelo forestal es más compacto por lo tanto la densidad aparente es mayor afectando de esta manera la retención de humedad y limitando el crecimiento de raíces.

Al respecto Anaya *et al.* (2016) menciona que cerca del 55 % de carbono se concentra en los primeros 30 cm, sin embargo, los resultados muestran comportamiento decreciente conforme la pendiente se incrementa, según Madrigal *et al.* (2018) indica que en pendientes mayores a 20 % se fija menos carbono que en pendientes menores debido a que existen diferentes factores que pueden alterar las concentraciones de carbono como la erosión, deslizamientos de suelo por las pronunciadas pendientes y escasas de plantas naturales que se desarrollan bajo la sombra de los bosques. Los cambios en la cobertura vegetal y en el manejo del suelo alteran el sistema edáfico y ocasionan cambios en la dinámica de almacenamiento de C (Schrumpf *et al.*, 2011).

4.2. Fijación de carbono por la biomasa del sotobosque

Tabla 5. Fijación de carbono por la biomasa del sotobosque en plantación de *Pinus patula* Schiede et Cham.

| Variables /Repeticiones | V1 | V2 | V3 |
|-------------------------|------------|-------------|--------|
| | 0 % a 10 % | 10 % a 20 % | > 20 % |
| I | 1.581 | 1.095 | 1.307 |
| II | 1.348 | 1.155 | 1.130 |
| III | 1.432 | 1.271 | 0.945 |
| Promedio | 1.454 | 1.174 | 1.127 |

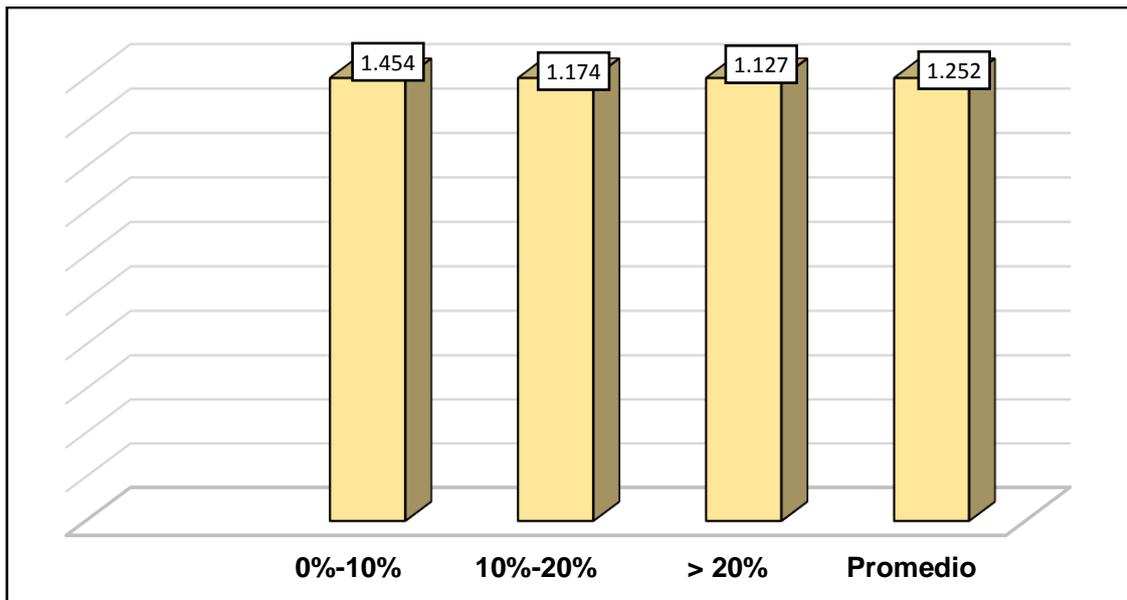


Figura 4. Fijación de carbono obtenido por el sotobosque en cada pendiente del bosque de *Pinus patula* Schiede et Cham

En la Tabla 5 y Figura 4, se muestra la cantidad de carbono orgánico fijado por la biomasa del sotobosque, teniendo en cuenta cada pendiente; de 0 a 10 % fijó 1.454 t ha⁻¹ (a este valor se lo atribuye el 100 %), el carbono muestra un comportamiento decreciente conforme se incrementa la pendiente de 10 % a 20 % la fijación de carbono fue de 1.174 t ha⁻¹, que equivale a una disminución de 19.2 % y para la pendiente mayor al 20 % la fijación fue 1.127 t ha⁻¹ disminuyendo en un 22.5 % con respecto a la pendiente menor (0 a 10 %). Esto indica que los niveles de captura de carbono por el sotobosque son menores a los demás componentes del sistema forestal, conforme con nuestros resultados la fijación de carbono varía conforme se incrementa la pendiente esto es debido que en aquellas pendientes menores al 10 % existen el crecimiento de pasturas y algunos arbustos mejor desarrollados ya que presenta mayor profundidad y humedad en el suelo y las labores culturales ayudan a que la luz solar ingrese por la copa del árbol, de esta forma permitiendo el crecimiento de las plantas herbáceas, pajas y arbustos, quienes son los responsables de que exista mayor fijación de carbono, por lo contrario en aquellas pendientes mayores al 10 % y al 20 %, la plantación de *Pinus patula* presentan una copa más densa debido a que el acceso para las labores culturales se hace más limitado y por ende la penetración de la luz es limitada de esta forma limitando el desarrollo de plantas

herbáceas y arbustos que generalmente necesitan de la luz solar para su desarrollo, por otro lado el suelo es más seco y compacto el cual también es un limitante para que las semillas puedan germinar.

Nuestros resultados son similares a los obtenidos por Gayoso y Guerra (2005), quien manifiesta que el sotobosque que crece en una plantación forestal de *Pinus radiata* D.Don, captura 1.50 t ha⁻¹, esto indica que los niveles de captura de carbono por el sotobosque son menores a los demás componentes del sistema forestal, esto debido que existen bosque que presentan una copa densa donde la penetración de la luz es limitada. Por lo contrario, en aquellos bosques donde se realizan prácticas silviculturales y presenta pendiente poco accidentada la captura de carbono es en promedio 9.166 t ha⁻¹ (Bautista 2008).

Ricardo, (2016), evaluó el sotobosque de fincas que presentaban bosques de *Pinus patula* obteniendo resultados de 0.51 t ha⁻¹ en la primera finca y 0.57 t ha⁻¹ en la segunda finca, esta diferencia se debe a la cantidad de árboles presentes en las áreas evaluadas que son poco similares numéricamente.

Tabla 6. Análisis de varianza (ANOVA) para la fijación de carbono por la biomasa del sotobosque.

| Fuente de variación | Suma de cuadrados | Grados de libertad | Cuadrados medios | F calculado | F tabular | |
|---------------------|-------------------|--------------------|------------------|-------------|-----------|------|
| | | | | | 0.05 | 0.01 |
| Bloque | 0.03 | 2 | 0.01 | 0.65 ns | 6.94 | 18 |
| Pendiente | 0.19 | 2 | 0.09 | 4.46 ns | 6.94 | 18 |
| Error | 0.08 | 4 | 0.02 | | | |
| Total | 0.3 | 8 | | | | |

CV = 11.53 %

Según el ANOVA estos resultados son estadísticamente iguales, pero numéricamente existe diferencia esto se deben al follaje, ramas, raíces de las especies vegetales que conforman el ecosistema forestal, los cuales son almacenes de carbono y se reincorporan al ciclo por descomposición (Ordoñez, 2015).

4.3. Fijación de carbono por la biomasa de la hojarasca en la plantación de *Pinus patula* Schiede et Cham en t ha⁻¹

Tabla 7. Fijación de carbono por la biomasa de la hojarasca de la plantación de *Pinus patula* Schiede et Cham.

| Variables / Repeticiones | V1 | V2 | V3 |
|--------------------------|------------|-------------|--------|
| | 0 % a 10 % | 10 % a 20 % | > 20 % |
| I | 1.688 | 1.714 | 1.637 |
| II | 2.200 | 1.755 | 1.520 |
| III | 1.927 | 1.726 | 1.443 |
| Promedio | 1.938 | 1.732 | 1.533 |

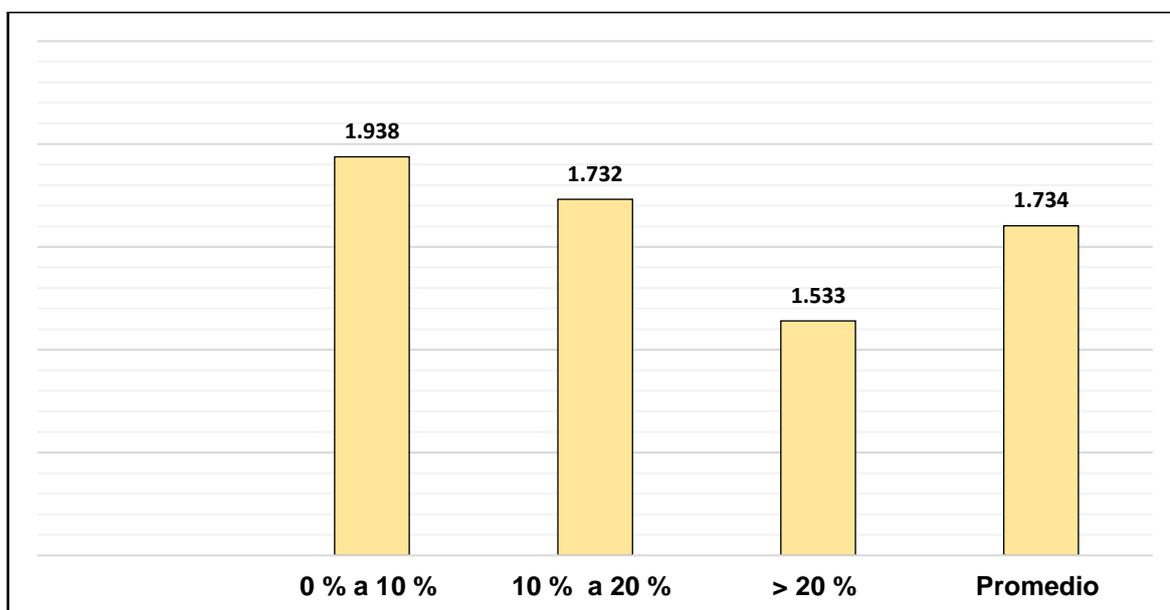


Figura 5. Fijación de carbono obtenido por la biomasa de la hojarasca en cada pendiente de la plantación de *Pinus patula* Schiede et Cham.

En la Tabla 7 y Figura 5, se muestran los resultados de la fijación de carbono (C) por la biomasa de la hojarasca en cada pendiente, de 0 a 10 % la fijación fue de 1.938 t ha⁻¹ (a este valor se lo atribuye el 100 %), el carbono muestra un comportamiento decreciente conforme se incrementa la pendiente, de 10 % a 20 % se fijó 1.732 t ha⁻¹ de carbono, que equivale a una disminución de 10.6 % y para la pendiente mayor al 20 % la fijación de C por la hojarasca fue de 1.140 t ha⁻¹ disminuyendo en un 13.18 % con respecto a la menor pendiente (0 a 10 %).

La variación que existe en la fijación de carbono por la hojarasca en cada pendiente, se debe a la acumulación de hoja en el suelo ya que a mayor cantidad de hojarasca mayor fue la fijación de carbono. Conforme con nuestros resultados la fijación de carbono varía conforme se incrementa la pendiente, aquellas pendientes menores al 10 % existen una acumulación de hojarasca mayor debido a que existen vientos fuertes durante el día, esto hace que las hojas (acículas) se desprendan de los árboles de *Pinus patula* y sean almacenadas con más facilidad en aquellas zonas con menor pendiente, la densidad de la plantación también fue otro factor que influyó en la acumulación de biomasa, por lo contrario en aquellas pendientes mayores al 10 % y al 20 %, la fijación de carbono por la hojarasca fue menor, esto se debe a que existió arrastre y deslizamientos de las hojas por el viento.

La cantidad de carbono orgánico fijado por la hojarasca de *Pinus patula* Schiede et Cham, alcanza un peso promedio total de 1.063 t ha⁻¹, estos resultados se asemejan con los obtenidos por Rojas (2009), quien obtuvo 4.29 t ha⁻¹, cabe mencionar que existen varios factores que pueden alterar la variación en la cantidad de biomasa en la hojarasca como por ejemplo la densidad y la edad de los árboles, ya que entre más densa y madura esté una plantación, lo probable es que exista una mayor cantidad de hojarasca (Figuroa *et al.*, 2005).

Oliva *et al.*, (2017) encuentra datos similares de fijación de carbono en la hojarasca presente sobre el suelo de un sistema silvopastoril, fue de 1.12 y 2.00 t ha⁻¹, por lo que se observa que, al igual que sucedía con la biomasa aérea, la capacidad de acumulación de la hojarasca en el suelo depende de la densidad.

Tabla 8. Análisis de varianza (ANOVA) para la fijación de carbono por la biomasa de la hojarasca.

| Fuente de variación | Suma de cuadrados | Grados de libertad | Cuadrados medios | F calculado | F tabular | |
|---------------------|-------------------|--------------------|------------------|-------------|-----------|------|
| | | | | | 0.05 | 0.01 |
| Bloque | 0.04 | 2 | 0.02 | 0.33 ns | 6.94 | 18 |
| Pendiente | 0.11 | 2 | 0.06 | 0.92 ns | 6.94 | 18 |
| Error | 0.24 | 4 | 0.06 | | | |
| Total | 0.39 | 8 | | | | |

CV = 13.75 %

Según el ANOVA estos resultados son estadísticamente iguales, pero numéricamente existe diferencia esto se debe al follaje de las especies vegetales que conforman el ecosistema forestal, los cuales son almacenes de carbono y se reincorporan al ciclo por descomposición y quema de la biomasa forestal.

4.4. Fijación de Carbono total por la biomasa aérea en la plantación de *Pinus patula* Schiede et Cham (t ha⁻¹)

Tabla 9. Fijación de Carbono total de la biomasa aérea de la plantación de *Pinus patula* Schiede et Cham.

| Pendientes/ componentes | Fuste | Rama | Ramilla | Acícula | Total |
|----------------------------|--------|-------|---------|---------|--------|
| 0 % al 10 % | 28.595 | 8.594 | 2.116 | 6.568 | 45.874 |
| 10 % al 20 % | 21.733 | 4.881 | 1.457 | 3.690 | 31.760 |
| Mayor a 20 % | 15.143 | 3.681 | 1.321 | 3.212 | 23.357 |

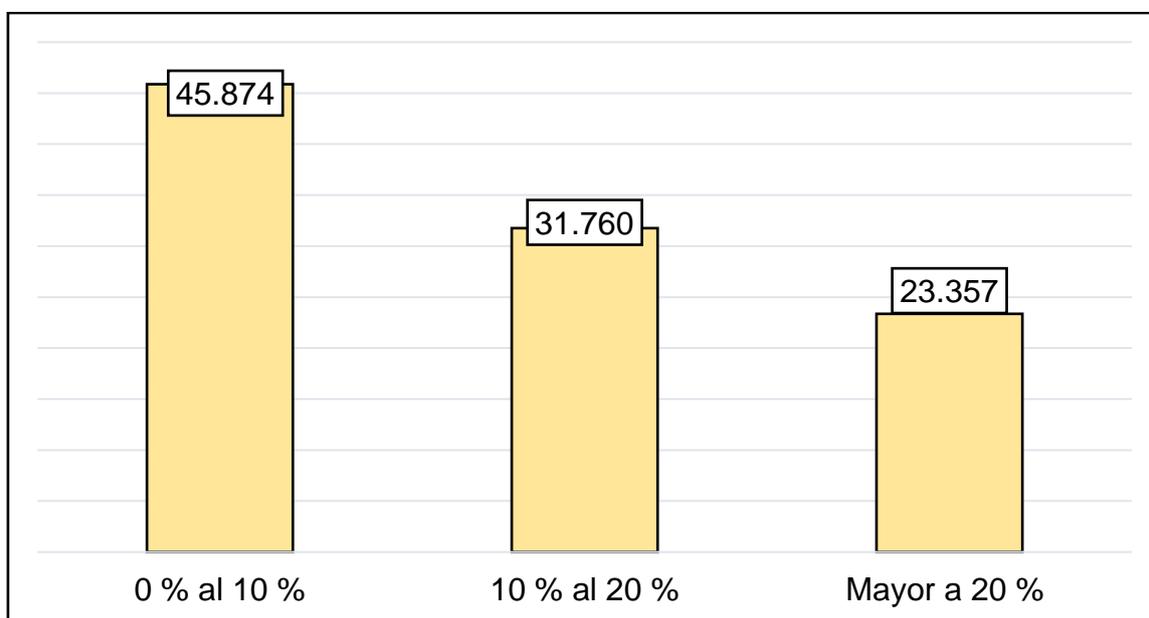


Figura 6. Fijación de carbono por la biomasa aérea obtenido en cada pendiente de la plantación de *Pinus patula* Schiede et Cham.

En la Tabla 9 y Figura 6, observamos la mayor cantidad de carbono fijado por la biomasa aérea de la plantación de *Pinus patula* se encuentra en la pendiente, de 0 a 10 % con un total de 45.874 t ha⁻¹ (a este valor se lo atribuye el 100%), este resultado es significativamente mayor a los obtenidos en la pendiente de 10% a 20 % donde se obtuvo 31.760 t ha⁻¹ de carbono, que equivale a una disminución de 79.66 % y cuando la pendiente es mayor a 20 %, la fijación de carbono por la biomasa aérea fue 23.357 t ha⁻¹ disminuyendo el carbono (C) en un 66.22 % con respecto a la pendiente menor (0 a 10 %). Según nuestros resultados la cantidad de carbono fijado por la biomasa aérea en las pendientes menores al 10 % estos son mayores, esto se lo atribuye a la relación que existe entre el diámetro y la altura de los árboles de *Pinus patula*, esto se debe a que la pendiente es poco pronunciada y presentan suelos más profundos y húmedos esto hace que su desarrollo la plantación forestal sea mejor, también esta atribuido a la edad de la especie, la densidad de simbra y sobre todo a las condiciones ecológicas. En cambio, la fijación de carbono por la biomasa aérea en las pendientes mayores al 10 % y 20 % disminuye, la variabilidad de estos resultados se debe a que en pendientes pronunciadas existen plantas con menor diámetro y altura por las limitaciones del suelo, estos son más compactos y áridos haciendo que el sistema radicular no esté bien distribuido de esta forma limitando el crecimiento y desarrollo de la planta.

Datos similares fueron obtenidos por Vidal *et al.* (2004), la cual reporta valores de 105 a 125 t ha⁻¹ de captura de carbono en bosque de *Pinus radiata*, así mismo Gómez y Oviedo (2000), en un estudio realizado en plantaciones de *Pinus* de 11 años de edad, encontraron valores de 116.75 a 193.52 t ha⁻¹, de carbono fijado por esta especie.

Según García (2014) establece que la cantidad de biomasa en *Pinus patula* depende donde se desarrolla la planta, en suelos profundos, fértiles con pH entre 4.5 y 6.8, bien drenados alcanzan mayor altura, el tronco presenta mayor diámetro y mayor vigorosidad en sus ramas y hojas factores influyentes en la cantidad de biomasa. En cambio, Peralta (2011) menciona el *Pinus patula* no se desarrolla bien en suelos erosionados e infértiles, con capas delgadas de MOS, arenosos y pedregosos lo que limita al desarrollo de la planta.

Según Yolmer (2021), obtiene datos del carbono fijado por la biomasa aérea, observándose que los árboles con mayor cantidad de carbono almacenado en su estructura aérea son los de 15 años con una cantidad de 36.5 t ha⁻¹ y los que secuestran menor cantidad los de 5 años 7.88 t ha⁻¹. Esto indica que el DAP y el carbono fijado es directamente proporcional ya que el carbono en los diferentes componentes estructurales varía de acuerdo al tamaño del árbol.

Tabla 10. Prueba de Tukey al 5 % de probabilidad para la fijación de carbono (C) obtenidos en cada pendiente.

| Pendiente | Captura de C (t ha ⁻¹) | Agrupación por Tukey |
|-----------|------------------------------------|----------------------|
| 0 a 10 % | 45.874 | A |
| 10 a 20 % | 31.760 | B |
| > 20 % | 23.357 | B |

según la prueba de Tukey al 5 %, el carbono fijado por la biomasa aérea en las pendientes menores al 10 %, difieren significativamente en la cantidad de carbono fijado por aquellas pendientes mayores al 10% y 20 %, llegando a fijar la pendiente menor 45.874 t ha⁻¹ y las pendientes mayores a 10 % y 20 %, 31.760 t ha⁻¹, 23.357 t ha⁻¹ respectivamente.

Esta diferencia se debe a que la plantación de *Pinus patula* es una especie de rápido crecimiento donde las condiciones ecológicas son favorables, las cuales favorecen una elevada biomasa aérea, por lo contrario sucede en aquellas pendientes pronunciadas donde las labores culturales son escasas, dificultando las podas, también existe erosión del suelo, deslizamientos y suelos superficiales, esto influye en el desarrollo del árbol por ende la fijación de carbono va hacer menor en comparación con aquellos árboles que se encuentran en pendientes menores.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El carbono fijado por el suelo de la plantación forestal de *Pinus patula* Schiede et Cham en la pendiente de 0 a 10 % fue 263.856 t ha⁻¹ de carbono, seguido por el suelo de las pendientes de 10 % a 20 % fijando 214.844 t ha⁻¹ de carbono y en la pendiente mayor al 20 % la fijación de carbono fue de 160.708 t ha⁻¹ resaltándose que la fijación de carbono del suelo forestal es inversamente proporcional a la pendiente.

El carbono fijado por la biomasa del sotobosque de la plantación de *Pinus patula* Schiede et Cham en la pendiente de 0 a 10 % fue 1.454 t ha⁻¹, seguido por las pendientes de 10 % al 20% y mayor al 20 % donde la fijación de carbono fue de 1.174 t ha⁻¹ y 1.127 t ha⁻¹, respectivamente.

El carbono fijado por la biomasa de la hojarasca de *Pinus patula* Schiede et Cham en la pendiente de 0 a 10 % fue 1.938 t ha⁻¹, seguido por las pendientes de 10 % al 20% y mayor al 20 % donde la fijación de carbono fue de 1.732 t ha⁻¹ y 1.140 t ha⁻¹, respectivamente.

El carbono fijado por la biomasa aérea de *Pinus patula* Schiede et Cham en la pendiente de 0 a 10 % fue 45.874 t ha⁻¹, esta cantidad fue significativamente mayor a los obtenidos en la pendiente de 10 a 20 % y mayor al 20 %, cuyos resultados fueron 31.760 y 23.357 t ha⁻¹ de carbono, respectivamente.

Si bien en nuestro estudio de investigación no se incluyó el análisis de las raíces para ver la fijación de carbono, se recomienda para futuras investigaciones incluir la cuantificación del carbono fijado por el sistema radicular.

Determinar la captura en la misma especie forestal, de la misma edad, pero en diferentes zonas de plantación.

Realizar el mismo estudio en la misma especie forestal, pero teniendo en cuenta diferentes edades de las plantaciones.

CAPÍTULO VI

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aguilera, A. C. (2019). Evaluación ambiental a las actividades Fito - profilácticas y sanitarias prescritas para el control del *Dendroctonus e Ips* sp en *Pinus oocarpa* de la reserva natural Tomabú, en el periodo 2016-2018 (tesis doctoral), Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.

Alberto, D & Elvir, J. 2008. Acumulación y fijación de carbono en biomasa aérea de *Pinus oocarpa* en bosques naturales en Honduras (en línea). Consultado el 05 de enero de 2020. Disponible en <http://Downloads/1522-2441-1-PB.pdf>

Álvarez, S. 2009. Optimización de la planificación forestal considerando la captura de carbono en bosque de *Pinus* de la sierra de Juárez México. Universidad Politécnica de Madrid. 232 p.

Anaya, CA; Mendoza, M; Rivera, M; Páez, R y Olivares, LD. 2016. Contenido de carbono orgánico y retención de agua en suelos de un bosque de niebla en Michoacán, México (en línea). *Agro ciencia* 50: 251-269.

Arévalo, L; Alegre, J; Palm, CH. 2003. Manual de las reservas totales de carbono en los diferentes sistemas de uso de la tierra en Perú. Publicación de STC - CGIAR Ministerio de agricultura. Pucallpa, Perú. 24 p.

Ávila, G; Jiménez, F; Beer, J; Gómez, M; Ibrahim, M. 2001. Almacenamiento, fijación de carbono y valoración de servicios ambientales en sistemas agroforestales en Costa Rica. *Agroforestería en las Américas* 30: 32-35.

Basset, JR. 1963. la influencia de las propiedades de la tierra en el índice de sitio de pinus. *Lousiana Ass. Of. Arg. Proc.* 3, 30-37.

Bazzaz, F. A. 1996. *Plants in Changing Environments. Linking physiological, population, and community ecology.* Cambridge University Press. 320 p.

Bautista, A. 2008. Carbono y nutrimentos en la vegetación del sotobosque en bosques manejables de *Pinus patula* Schiede & Deppe. Universidad Autónoma Chapingo, México. 95 p.

Barros, V. (2007). El cambio climático global. ¿Cuántas catástrofes antes de actuar? Buenos Aires: Libros El Zorzal. Ediciones desde abajo.

Blasco, M & Burbano, H. 2015. La vida en el suelo. Notas sobre su bioquímica y microbiología. Pasto: Impresos La Castellana. 365p.

Brack, A; Mendiola, C. 2002. Perú Ecológico. <http://www.peruecologico.com.pe/> (revisado el 22-08- 05).

Brown, S. 1989. Biomass estimation methods for tropical forests with applications to forest inventory data. *Forest Science* 35(4):381-902.

Cairns, MA; Meganck, RA. 1994. Carbon sequestration, biological diversity and sustainable development: integrated forest management. *Environmental Management* 18 (1): 13-22.

Cárdenas R, RC. 2016. Evaluación del potencial de los bosques de *Eucalyptus globulus* y *Pinus radiata* como sumideros de carbono en el entorno del Parque Nacional Huascarán (Perú) (en línea). Universidad de Salamanca. 193 p. Consultado el 05 de enero de 2020.

Cargua, F; Rodríguez, M; Recalde, C y Vinueza, LM. 2014. Cuantificación del Contenido de Carbono en una Plantación de Pino Insigne (*Pinus radiata*) y en Estrato de Páramo de Ozogoché Bajo, Parque Nacional Sangay, Ecuador (en línea). *Revista Información Tecnológica*, 25(3), 83-92.

Castaños, ML. 1962. Evaluación de la calidad de estación de *Pinus patula* en el norte de Oaxaca. Boletín Técnico N° 2 Instituto Nacional de Investigaciones Forestales. México. 32 p.

Chacha, T. 2011. Estimación del servicio ambiental de captura de CO₂ y de recurso hídrico en montes y plantaciones forestales en Cajamarca. Tesis Ing. Agrónomo. Universidad Nacional de Cajamarca, Cajamarca, Perú. 130 p.

Cortés, A; Chamorro, C y Vega, A. 1990. Cambios en el suelo por la implantación de praderas, coníferas y eucaliptos en un área aledaña al Embalse del Neusa (Páramo de Guerrero). Investigaciones Subdirección Agrológica IGAC :101-114.

Dávila R, HA. 2011. Estimación de la cantidad de carbono almacenado en los sistemas agroforestales de cacao (*Teobroma cacao* L.), en los departamentos de Suchitepquez y Retalhuleu del sur – occidental de Guatemala. Tesis Ing. Agr. Guatemala, GT, Universidad de San Carlos de Guatemala. 96 p.

Díaz, F; Acosta, A; Carrillo, R; Buendía, A; Flores, E; Etchevers, B. 2007. Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus patula* Schl. et Cham. Madera y Bosques 13: 17–28.

FAO. 2001. Soil carbon sequestration for improved land management. World soil reports 96. Rome, 58 p.

FAO. 2002. Captura de Carbono en los Suelos para un Mejor Manejo de la Tierra. Informes Sobre recursos Mundiales de Suelos. 42 p.

FAO. 2006. Global Forest Resources Assessment 2005: Progress towards sustainable forest management. FAO Forestry Paper 147. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Figuroa, N; Etchevers, B; Velásquez, M, A; Acosta, M. 2005. Concentración de carbono en diferentes tipos de vegetación de la sierra norte de Oaxaca. Terra Latinoamericana 1: 57-64

Francisco, A.S.G; Sebastián, T. 2020. Estimación del carbono almacenado en la biomasa aérea necrosada(hojarasca) y en el suelo en un bosque de pino en la comuna Paquizhapa Provincia de Loja. Ecuador.

Gayoso A, J; Guerra C, J. 2005. Contenido de Carbono en la biomasa aérea de bosques nativos en Chile. Revista Bosque, 26(2), 33-38.

Gillespie, AJR. 1992. *Pinus patula* Schiede and Deppe. Patula pine. SO-ITF-SM-54. New Orleans, LA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Forest Experiment Station. 5 p.

Gómez, L; Oviedo, S. 2000. Cambio climático y desarrollo. Un proyecto de colaboración de la oficina regional para América Latina y el Caribe del PNUD y Yale School of forestry & Environmental Studies. Publicación en formato PDF en CD –ROM. 86 p.

Guzmán, W. (2004). Valoración Económica de los beneficios Ambientales en el manejo sostenible de humedales: Estudio del caso de manejo sostenible del sistema de "Aguajal" en la comunidad de Parinani, Reserva Nacional de Pacaya samiria. Lima-Perú: INRENA.

Hernández, M. 2010. Suelos de humedales como sumideros de carbono y fuentes de metano. Terra Latinoamericana, 28(2), 139-147.

Hernández, J; Santos, H; Valdez, J. R; Tamarit, J. C; Ángeles, G; Hernández, A; Carrero, O. (2017). Biomasa aérea y factores de expansión en plantaciones forestales comerciales de *Eucalyptus urophylla* ST Blake. Agrociencia, Volumen 51(8), pp.921-938.

Ibrahim, M. 2007. Almacenamiento de carbono en el suelo y la biomasa aérea en sistemas de uso de la tierra en paisajes ganaderos de Colombia, Costa Rica y Nicaragua. Agroforestería en las Américas, 45: 27–36 p.

ICRAF – AMERICA LATINA (Centro Internacional de Investigación Agroforestal ICRAF en América Latina, PE). 2014. Medios de vida y producción: saberes locales, un aporte clave para el desarrollo sustentable de la región andina. 35 p.

IPCC. 2003. Definitions and Methodological Options to Inventory Emissions from Direct Human-Induced Degradation of Forests and De vegetation of Other VegetationTypes. The Institute for Global Environmental Strategies (IGES), Japón. 32 p.

IPCC (Panel Intergubernamental del Cambio Climático). 2007. Fourth Assessment Report: Climate Change 2007. Informe del Grupo de Trabajo I-Base de las Ciencias Físicas. RT.4 Comprensión y Atribución del Cambio Climático.

Javier, C; Ozuna, ME; Ortiz, JI; Ávila, G. 2015. Química del carbono: un enfoque en competencias. 4 edición. Sinaloa, México. 207 p.

Lapeyre, T; Alegre, J; Arévalo, L. 2004. Determinación de las reservas de carbono de la biomasa aérea, en diferentes sistemas de uso de la tierra en San Martín, Perú. Ecol. apl. (en línea). Disponible en http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1726-22162004000100006 &lng=es&nrm=iso>. ISSN 1726-2216.

Lessard, R; Gignac, LD & Rochette, P. 2006. El ciclo del carbono: Midiendo el flujo del CO₂ del suelo (en línea). Disponible en [https://greenteacher.com/article%20 files/elciclodelcarbono.pdf](https://greenteacher.com/article%20files/elciclodelcarbono.pdf)

López, A. 1997. Programa para obtener tabla de valores de pendiente del terreno usando mapas topográficos. *Investigaciones geográficas*, (8), 7-24. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46111977000100001&lng=es&tlng=es.

López, R.,2017. Valoración de carbono en la necro masa y suelo del bosque protector Aguarongo, provincia del Azuay, Ecuador. 70.

Luna, B; Lizbeth, H; Patricia, V.M; Alejandro, G; Armando, A.M. (2015). El sotobosque en la composición y diversidad de áreas forestales manejadas en Santa Catarina Tepeji, Oaxaca. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 21 (1), 109-121.

Madrigal, S; Cristóbal A, D; Hernández, E & Romo, J. 2018. Influencia de la cobertura, pendiente y profundidad, sobre el carbono y nitrógeno del suelo (en línea). *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 10 (51), 201-223. Disponible en <http://www.scielo.org.mx/pdf/remcf/v10n51/2007-1132-remcf-10-51-201.pdf>

Márquez, L. 2000. Elementos técnicos para inventarios de carbono en el uso del suelo. Fundación solar. Guatemala.10 – 33 p.

Macdicken, K. 1997. A Guide to Monitoring Carbon Storage in Forestry Projects. Arlington, VA: Winrock International Institute for Agricultural Development. [En línea]: WINROCK, (<http://www.winrock.org/fnrm/files/carbon.pdf>, documento, 20 agosto. 2009).

Méndez, J; Luis, S; Angel, M y Abel, J. 2011. Ecuaciones alométricas y estimación de incrementos en biomasa aérea y carbono en una plantación mixta de *Pinus devoniana* Lindl. y *P. pseudostrobus* Lindl., en Guanajuato, México. *Agrociencia* 45(4).

Mendiola, a. 2008. Desarrollo del mercado de carbono en el Perú.<http://repositorio.esan.edu.pe/handle/ESAN/617>.

MINAM (Ministerio del Ambiente). 2014. Guía para el Muestreo de Suelos/ Ministerio del Ambiente. Dirección General de Calidad Ambiental. Lima. 12 p.

Medina, C.2006. indicadores de impactos de los sistemas forestales y agroforestales. POSAF II p 1, 28p.

Montoya V, R. 2014. Cuantificación de Biomasa Aérea, Carbono y Oxígeno en *Pinus alepensis* Mill., en Arteaga, Coahuila, México. Tesis Ing. Agr. UAAAN, Saltillo, Coahuila, México. 89 p.

Ohep C, NF y Herrera S, LV. 1985. Impacto de las plantaciones de coníferas sobre la vegetación originaria del páramo de Mucubají. Mérida: Universidad de los Andes, Facultad de ciencias forestales. 60 p.

Ordóñez, J; De Jong, B y Masera O. 2015. Almacenamiento de carbono en un bosque de *Pinus pseudostrobus* en Nuevo San Juan, Michoacán. Madera y Bosques 7, 27-47.

Orellana, G; Sandoval, ML; Linares, G; García, NE & Tamariz, JV. 2012. Descripción de la dinámica de carbono en suelos forestales mediante un modelo de reservorios. Avances en Ciencias e Ingeniería 3(1): 123-135.

Olmos, E.; González, M. E. y Contreras, M. 2013. Percepción de la población frente al cambio climático en áreas naturales protegidas de Baja California Sur, México. Chile. Polis, Rev. Universidad Bolivariana.

Oliva, Manuel, Culqui Mirano, Lorenzo, Leiva, Santos, Collazos, Roicer, Salas, Rolando, Vásquez, Héctor V., & Maicelo Quintana, Jorge Luis. (2017). Reserva de carbono en un sistema silvopastoril compuesto de *Pinus patula* y herbáceas nativas. *Scientia Agropecuaria*, 8(2), 149-157.

Ospina, C; Hernández, R; Rincón, E; Sánchez, F; Urrego, J; Rodas, J. 2011. El Pino pátula, *Pinus patula* Schiede and Deppe in Schlecht. & Cham. Manizales, Colombia: Blanecolor S.A.S.; Guías Silviculturales. 15 p.

Pacheco, F; Aldrete, A; Gómez, A; Fierros, A; Cetina, V; Vaquera, H. 2007. Almacenamiento de carbono en la biomasa aérea de una plantación joven de *Pinus greggii* Engelm. Revista Fitotecnia Mexicana, 30(3), 251-254.

Pérez, E, et al., 2005. Potencial de plantación y fijación de carbono. Tomo II. MAGFOR – PROFOR.165p.

Pinot, R, H. (2000). Manual de Edafología. Ed.Computec. Chile.

Quiñe M, PC. 2009. Cuantificación de biomasa y reserva de carbono en sistemas agroforestales de café (*Coffea arabica* L.) en dos pisos altitudinales (en línea). Tesis Ing. Agr. UNSM, Tarapoto, Perú. 96 p.

Rambal, S. M.; Lempereur, J. M; Limousin, N. K; Paul Martin, J. M; Ourcival, J; Rodríguez, C. 2014. How drought severity constrains GPP and its partitioning among carbon pools in a *Quercus ilex* coppice? Biogeosciences Discussions 11: 8673-8711.

Ricse, A. (2001). Reservas de Carbono de los Bosques Altos del Género Eucalyptus en el Valle del Mantaro. Ponencia en el I Congreso Nacional del Eucalipto. Huancayo.

Ricardo, M. S. Z. 2016. Evaluación del contenido de carbono almacenado en diferentes usos del suelo en las micro cuencas Tecomapa, Somotillo y Río Pire, Condega, Nicaragua.p72.

Rojas, R. 2009. Determinación de las reservas de carbono en dos sistemas de uso de la tierra en el distrito de Chota, Cajamarca. Unc.49 p.

Romero, F. 2015. Determinación de la captura del carbono en dos sistemas de pastos mejorados en el distrito de San Silvestre de Cochán provincia de San Miguel – Cajamarca. Tesis M. Cs. UNC, Cajamarca, Perú. 151 p.

Romo Guzmán, D; Navarro Garza, H. M; De los Santos, P. O; Hernández, J; Romero, L. 2014. Crecimiento maderable y biomasa aérea en plantaciones jóvenes de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. et Cham. en Zacualpan, Veracruz. Revista Mexicana de Ciencias Forestales 5(23): 8-91.

Ruiz, A. 2002. Fijación y almacenamiento de carbono en sistemas silvopastoriles y competitividad económica en Matiguas Nicaragua. Tesis M. Sc. Centro

Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). Programa de enseñanza para el desarrollo y conservación, Costa Rica. 119 p.

Sánchez, PA; Buresh, RJ; Leakey RB. 1999. Trees, soils and food security. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series B 353: 949-961.

Saugier, B; Pontailier, J.Y. 2016. El ciclo global del carbono y sus consecuencias en la fotosíntesis en el Altiplano boliviano. *Ecología en Bolivia*, 41(3), 71-85.

Segura, M. 1999. Valoración del servicio de fijación y almacenamiento de carbono en bosques privados en el área de conservación cordillera volcánica central de Costa Rica. CATIE. Turrialba Costa Rica .132 p.

Segura C, MA; Sánchez, P; Ortiz, C y Gutiérrez, M. 2005. Carbono orgánico de los suelos de México. *Terra Latinoamericana* 1: 21-27.

Serrato, R; López, J; Flores, D. (2014). Carbono orgánico de la hojarasca en los bosques de la reserva de la biosfera Mariposa Monarca, caso santuario sierra Chincua, México. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 5(1), 29.

Schrumpf, M; Schulze, E. D; Kaiser, K; Schumacher, J. (2011). How accurately can soil organic carbon stocks and stock changes be quantified by soil inventories? *Biogeosciences*, 8(5), 1193–1212. doi:10.5194/bg-8-1193-2011

Snowdon, P; Raison, J; Keith, H; Montagu, K; Bi, K; Ritson, P; Grierson, P; Adams, M; Burrows, W; Eamus, D. 2001. Protocol for sampling tree and stand biomass. Draft-March 2001. Australian Greenhouse Office. 114p. (National carbon accounting system technical report No. 31).

Torres, JM y Guevara, SA. 2005. El potencial de México para la producción de servicios ambientales: captura de carbono y desempeño hidráulico. Instituto Nacional de Ecología.

Vidal A., Benítez J. Y., Carlos R. y Gra H. (2004). Estimación de la biomasa de copa para árboles de *Pinus caribaea* var. *caribaea* en la F. E. I. La Palma de la Provincia de Pinar del Río, Cuba. *Quebracho* 11:60-66.

WORMALD, T.J. 1975. *Pinus patula*. Oxford: Unit of tropical silviculture. (Tropical forestry papers No. 7)

Yáñez S, A. 2004. La captura de carbono en bosques: ¿Una herramienta para la gestión ambiental? en: *Gaceta Ecológica*, México, DF, Instituto Nacional de Ecología INE, pp. 5-18.

Yolmer Mires, R. 2021, tesis: Estimación de biomasa y contenido de carbono en *Pinus patula* de diferentes edades en la jalca del distrito de Chalamarca, Chota –Cajamarca.

Zamora Martínez, Marisela Cristina. (2015). Cambio climático. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 6(31), 04-07.

Zamora, J. Quiroz, 2000. Terminología forestal de uso común en centro América. *Manejo forestal tropical*. CATIE. Unidad de manejo de bosques naturales.

CAPITULO VII

ANEXOS

Tabla 11. Análisis de varianza (ANOVA) para la fijación de Carbono por la biomasa aérea en la plantación de *Pinus patula* Schiede et Cham (t ha⁻¹).

| Fuente de variación | Suma de cuadrados | Grados de libertad | Cuadrados medios | F calculado | F tabular | |
|---------------------|-------------------|--------------------|------------------|-------------|-----------|------|
| | | | | | 0.05 | 0.01 |
| Bloque | 8967.78 | 2 | 4483.89 | 189.61** | 6.94 | 18 |
| Pendiente | 2349.72 | 2 | 1174.86 | 49.68** | 6.94 | 18 |
| Error | 94.59 | 4 | 23.65 | | | |
| Total | 11412.1 | 8 | | | | |

CV = 7.09 %

Tabla 12. Definición de términos

| Términos | Definiciones |
|----------------------|--|
| Altura total | Es la distancia vertical entre el nivel del suelo y el extremo superior del árbol o ápice de la copa. |
| Árbol | Planta leñosa perenne con un solo tronco principal o, en el caso del monte bajo, con varios tallos, que tenga una copa más o menos definida. |
| Calentamiento global | Aumento de la temperatura media de la atmósfera terrestre y de los océanos a través del tiempo, como consecuencia del incremento de la concentración de los gases de efecto invernadero en la atmósfera. |
| Carbono almacenado | Cantidad de carbono presente en la vegetación en forma de materia orgánica o compuestos de carbono (Segura, 1999). |
| Carbono | Elemento químico de número atómico 6 y símbolo C. Forma la base de muchas moléculas de organismos vivos y, por ende, |

| | |
|---------------------|---|
| | es uno de los elementos fundamentales de la química orgánica. Junto con el oxígeno, compone la molécula de dióxido de carbono, uno de los gases atmosféricos responsables del efecto invernadero. |
| Ciclo del carbono | Son las transformaciones químicas de compuestos que contienen carbono en los intercambios entre biósfera, atmósfera, hidrósfera y litósfera; Es un ciclo de gran importancia para la supervivencia de los seres vivos en nuestro planeta, debido a que de él depende la producción de materia orgánica. |
| CMNUCC | Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. |
| D | Distanciamiento de siembra de los árboles de <i>pinus patula</i> . |
| DAP | Diámetro a la altura de pecho (1.30 cm) |
| DA | Viene hacer el peso seco del suelo por unidad de volumen de suelo inalterado, tal cual se encuentra en su emplazamiento natural, incluyendo el espacio poroso (Pinot, 2000). |
| Fijación de carbono | Extracción y almacenamiento de carbono de la atmósfera en sumideros de carbono como los océanos, los bosques o la tierra a través de un proceso físico o biológico como la fotosíntesis. |
| Fotosíntesis: | Proceso o conjunto de reacciones químicas, que tienen lugar en el interior de los cloroplastos, por las que las plantas verdes sintetizan su propia materia orgánica a partir de sustancias inorgánicas a través de la energía solar. |
| Hojarasca | Se hace referencia a la materia orgánica que se encuentra en diferentes estados de descomposición (Medina, 2006). |

| | |
|--------------------|--|
| MDL | Mecanismo de Desarrollo Limpio, es un procedimiento contemplado en el Protocolo de Kioto (PK) en el cual países desarrollados pueden financiar proyectos de mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero. |
| Mg | Mega gramo, que equivale a toneladas |
| PS | Peso seco |
| PF | Peso fresco |
| Protocolo de Kyoto | Protocolo Internacional para la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) en virtud del cual los países industrializados se comprometen a combatir el calentamiento global mediante la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, siguiendo la Cumbre de la Tierra en Río de Janeiro en 1992. |
| Vegetación | Es la suma total de las plantas que cubren un área determinada |
| 0.1184 | Constante obtenida mediante estudio de alométricas para el cálculo de la biomasa (Díaz 2017). |
| 2.53 | Constante obtenida mediante estudio de alométricas para el cálculo de la biomasa (Díaz 2017). |
| 3.6666 | Constante establecida en la formula alométrica para calcular el CO ₂ |

Tabla 13. Especies vegetales que forman parte del sotobosque de la zona de estudio, plantación de *Pinus patula* Schiede et Cham.

| N° | Nombre común | Nombre científico | Familia |
|-----------|-----------------------------|--|----------------|
| 1. | Paja | <i>Stipa ichu</i> | Poaceae |
| 2. | Cortadera o tululas | <i>Cortaderia selloana</i> | Poaceae |
| 3. | Lloctaras | <i>Baccharis cuneata DC</i> | Asteraceae |
| 4. | Tuyo | <i>Puya fastuosa Mez</i> | Bromeliaceae |
| 5. | Zarza mora | <i>Rubus ulmifolius</i> | Rosaceae |
| 6. | Muña | <i>Minthostachys mollis</i> | Lamiaceae |
| 7. | Pie de perro | <i>Desmodium molliculum</i> | Fabaceae |
| 8. | Huanga | <i>Hesperomeles heterophylla</i> <i>Hook</i> | Rosaceae |
| 9. | Achicoria | <i>Cichorium intybus</i> | Asteraceae |
| 10 | Romero silvestre o de jalca | <i>Clinopodium sericeum</i> | Lamiaceae |
| 11 | Cadillo | <i>Bidens pilosa</i> | Asteraceae |
| 12 | Hierva de toro | <i>Cuphea strigulosa H</i> | Lythraceae |
| 13 | Hierva santa | <i>Piper auritum</i> | Piperaceae |
| 14 | Verbena | <i>Verbena litoralis H</i> | Verbenaceae |
| 15 | Flor blanca | <i>Iresine weberbaueri Suess</i> | Amaranthaceae |
| 16 | Coñor | <i>Barnadesia dombeyana</i> <i>Less</i> | Asteraceae |
| 17 | Amaro | <i>Chuquiraga weberbaueri</i> <i>Tovar</i> | Asteraceae |
| 18 | Luñe | <i>Pappobolus sp</i> | Asteraceae |
| 19 | Honrada | <i>Tagetes elliptica Sm</i> | Asteraceae |
| 20 | Añashquero | <i>Tagetes sp</i> | Asteraceae |
| 21 | Cucharilla | <i>Maytenus verticillata</i> | Celastraceae |
| 22 | Laclaguay | <i>CalagualaNiphidium</i> <i>crassifolium</i> | Polypodiaceae |
| 23 | Gayagaya | <i>Bulbo de orquídea</i> | Orchidaceae |
| 24 | Escorzonera | <i>Perezia pungens</i> | Asteraceae |

| | | | |
|----|---------------------|-------------------------------------|-------------|
| 25 | Anashquero | <i>Dyssodia jelskii</i> | Asteraceae |
| 26 | Andacushma | <i>Geranium ruizii</i> | Geraniaceae |
| 27 | Culantrillo de sapo | <i>Adiantum poiretii</i> | Adiantaceae |
| 28 | Pushgay | <i>negro Pernettya prostrata</i> | Ericaceae |
| 29 | Tandal | <i>Duranta obtusifolia Kunth</i> | Verbenaceae |
| 30 | LLoque | <i>Pineda incana Ruiz & Pav</i> | Salicaceae |

Tabla 14. Coordenadas UTM de muestreo de suelos en la plantación de *Pinus patula* Schiede et Cham, Combayo.

| | N° | ESTE | NORTE | COTA |
|---------------------------------------|------|-----------|------------|---------|
| Parcelas con Pendiente 0 % - 10 % | MS1 | 786665.51 | 9217364.52 | 2060.30 |
| | MS2 | 786709.51 | 9217409.24 | 3050.96 |
| | MS3 | 786757.42 | 9217455.47 | 3046.15 |
| | MS4 | 786804.46 | 9217501.76 | 3043.09 |
| | MS5 | 786848.21 | 9217529.40 | 3048.64 |
| | MS6 | 786871.81 | 9217564.44 | 3044.80 |
| Parcelas con Pendiente 10 % - 20 % | MS7 | 786698.44 | 9217301.93 | 3049.21 |
| | MS8 | 786647.49 | 9217334.64 | 3044.53 |
| | MS9 | 786636.58 | 9217391.42 | 3041.20 |
| | MS10 | 786679.49 | 9217438.25 | 3039.95 |
| | MS11 | 786733.17 | 9217478.23 | 3041.18 |
| | MS12 | 786767.10 | 9217524.85 | 3033.46 |
| Parcelas con Pendiente >20 % | MS13 | 786809.73 | 9217546.60 | 3034.13 |
| | MS14 | 786773.42 | 9217575.67 | 3016.99 |
| | MS15 | 786593.56 | 9217388.44 | 3027.58 |
| | MS16 | 786618.96 | 9217431.82 | 3023.86 |
| | MS17 | 786552.92 | 9217403.65 | 3005.61 |
| | MS18 | 786565.16 | 9217439.01 | 2997.87 |

Tabla 15. Coordenadas UTM de muestreo de la vegetación en la plantación de *Pinus patula* Schiede et Cham, Combayo.

| | N° | ESTE | NORTE | COTA |
|---|-------------|------------------|-------------------|----------------|
| Parcelas con Pendiente 0 % - 10 % | MV1 | 786676.75 | 9217350.47 | 3050.32 |
| | MV2 | 786694.70 | 9217377.65 | 3052.38 |
| | MV3 | 786695.97 | 9217414.67 | 3048.89 |
| | MV4 | 786748.52 | 9217432.25 | 3049.36 |
| | MV5 | 786758.98 | 9217471.18 | 3044.46 |
| | MV6 | 786793.84 | 9217496.93 | 3042.60 |
| | MV7 | 786836.41 | 9217514.79 | 3047.72 |
| | MV8 | 786849.52 | 9217545.32 | 3044.55 |
| | MV9 | 786883.44 | 9217558.45 | 3049.30 |
| Parcelas con Pendiente 10 % - 20 % | MV10 | 786709.97 | 9217317.38 | 3052.72 |
| | MV11 | 786662.96 | 9217313.14 | 3043.81 |
| | MV12 | 786630.53 | 9217335.07 | 3040.10 |
| | MV13 | 786628.62 | 9217372.50 | 3041.06 |
| | MV14 | 786660.59 | 9217405.60 | 3044.66 |
| | MV15 | 786686.45 | 9217434.03 | 3042.87 |
| | MV16 | 786719.61 | 9217465.73 | 3042.26 |
| | MV17 | 786742.42 | 9217497.91 | 3036.97 |
| | MV18 | 786775.95 | 9217520.77 | 3036.04 |
| Parcelas con Pendiente >20 % | MV19 | 786833.46 | 9217563.29 | 3034.83 |
| | MV20 | 786792.99 | 9217580.27 | 3018.94 |
| | MV21 | 786756.35 | 9217545.78 | 3023.04 |
| | MV22 | 786646.71 | 9217449.47 | 3026.95 |
| | MV23 | 786592.54 | 9217451.68 | 3004.64 |
| | MV24 | 786603.13 | 9217416.55 | 3022.82 |
| | MV25 | 786594.17 | 9217370.14 | 3030.58 |
| | MV26 | 786542.59 | 9217388.92 | 3006.40 |
| | MV27 | 786544.99 | 9217437.28 | 2989.06 |

(MS) * Hace referencia a la muestra de suelos que se obtuvieron dentro del área de estudio, las cuales sirvieron para realizar los cálculos y poder determinar el Carbono (C) fijado por el suelo en plantaciones de *Pinus patula* Schiede et Cham, Combayo.

(MV) * Muestra vegetal, estas coordenadas son de donde se tomaron las muestras de hojarasca, sotobosque y arbórea dentro del área de estudio, plantación de *Pinus patula* Schiede et Cham.

Tabla 16. Resultados de los cálculos de la fijación de carbono por la biomasa aérea, en pendientes de 0 % a 10 %, dentro de la plantación de Pinus patula Schiede et Cham, Centro Poblado de Combayo.

| Cálculo del DAP ($D=L/\pi$) | Cálculo de la BA (BA = $0.1184 (DAP)^{2,53}$) Kg/Árbol | N° de Árboles/ha ($N^{\circ}.ARB./ha = A/D^2 \times$ 0.866) | BA (kg ha ⁻¹) | BA (t ha ⁻¹) | Cálculo del Carbono CBA = BA x 0,45 (t ha ⁻¹) | Captura del CO ₂ BA en. CO ₂ = CBA x 3,6666 (t ha ⁻¹) |
|----------------------------------|--|---|---------------------------|--------------------------|--|--|
| 10.82251082 | 49.00062452 | 795.224977 | | | | |
| 13.36898396 | 83.63357467 | | | | | |
| 13.6872931 | 88.76364906 | | | | | |
| 13.36898396 | 83.63357467 | | | | | |
| 13.36898396 | 83.63357467 | | | | | |
| 13.05067482 | 78.6870226 | | | | | |
| 14.64222052 | 105.2779135 | | | | | |
| 13.36898396 | 83.63357467 | | | | | |
| 11.14081996 | 52.7293123 | | | | | |
| 11.14081996 | 52.7293123 | | | | | |
| 13.36898396 | 83.63357467 | | | | | |
| 13.05067482 | 78.6870226 | | | | | |
| 13.36898396 | 83.63357467 | | | | | |
| 14.32391138 | 99.58355247 | | | | | |
| 12.09574739 | 64.92507418 | | | | | |
| 13.05067482 | 78.6870226 | | | | | |
| 13.6872931 | 88.76364906 | | | | | |
| 14.32391138 | 99.58355247 | | | | | |
| 13.05067482 | 78.6870226 | | | | | |
| 13.05067482 | 78.6870226 | | | | | |
| 261.3318054 | 1596.593201 | | | | | |
| 13.06659027 | 79.82966005 | 796 | 63544.409 | 63.5444 | 28.59498423 | 104.8463692 |

Tabla 17. Resultados de los cálculos de la fijación de carbono por la biomasa aérea, en pendientes de 10 % a 20 %, dentro de la plantación de Pinus patula Schiede et Cham, Centro Poblado de Combayo.

| Cálculo del DAP ($D=L/\pi$) | Cálculo de la BA (BA = $0.1184 (DAP)^{2,53}$) Kg/Árbol | N°de Árboles/ha (N°.Arb./ha = $A/D^2 \times$ 0.866 | BA (kg ha ⁻¹) | BA (t ha ⁻¹) | Cálculo del Carbono CBA = BA x 0,45 (t ha ⁻¹) | Captura del CO ₂ BA en. CO ₂ = CBA x 3,6666 (t ha ⁻¹) |
|----------------------------------|--|--|------------------------------|-----------------------------|---|---|
| 12.73236567 | 73.92166378 | 795.224977 | | | | |
| 12.09574739 | 64.92507418 | | | | | |
| 12.73236567 | 73.92166378 | | | | | |
| 13.05067482 | 78.6870226 | | | | | |
| 12.09574739 | 64.92507418 | | | | | |
| 9.549274255 | 35.70069983 | | | | | |
| 10.18589254 | 42.03290442 | | | | | |
| 13.36898396 | 83.63357467 | | | | | |
| 12.73236567 | 73.92166378 | | | | | |
| 12.09574739 | 64.92507418 | | | | | |
| 11.14081996 | 52.7293123 | | | | | |
| 9.549274255 | 35.70069983 | | | | | |
| 7.957728546 | 22.50858412 | | | | | |
| 9.549274255 | 35.70069983 | | | | | |
| 8.912655971 | 29.98263338 | | | | | |
| 13.36898396 | 83.63357467 | | | | | |
| 12.41405653 | 69.33514224 | | | | | |
| 12.09574739 | 64.92507418 | | | | | |
| 13.36898396 | 83.63357467 | | | | | |
| 13.05067482 | 78.6870226 | | | | | |
| 232.0473644 | 1213.430733 | | | | | |
| 11.60236822 | 60.67153666 | 796 | 48294.543 | 48.2945 | 21.73254443 | 79.68454742 |

Tabla 18. Resultados de los cálculos de la fijación de carbono por la biomasa aérea, en pendientes mayores a 20 %, dentro de la plantación de Pinus patula Schiede et Cham, Centro Poblado de Combayo.

| Cálculo del DAP ($D=L/\pi$) | Cálculo de la BA (BA = $0.1184 (DAP)^{2,53}$) Kg/Árbol | N° de árboles/ha (N°.ARB./ha = $A/D^2 \times 0.866$) | BA (kg ha ⁻¹) | BA (t ha ⁻¹) | Cálculo del Carbono CBA = BA x 0,45 (t ha ⁻¹) | Captura del CO ₂ BA en. CO ₂ = CBA x 3,6666 (t ha ⁻¹) |
|----------------------------------|--|--|---------------------------|--------------------------|--|---|
| 8.59434683 | 27.34703701 | 795.224977 | | | | |
| 7.957728546 | 22.50858412 | | | | | |
| 8.912655971 | 29.98263338 | | | | | |
| 8.59434683 | 27.34703701 | | | | | |
| 10.18589254 | 42.03290442 | | | | | |
| 10.18589254 | 42.03290442 | | | | | |
| 10.50420168 | 45.43601382 | | | | | |
| 10.18589254 | 42.03290442 | | | | | |
| 7.957728546 | 22.50858412 | | | | | |
| 10.82251082 | 49.00062452 | | | | | |
| 7.957728546 | 22.50858412 | | | | | |
| 7.957728546 | 22.50858412 | | | | | |
| 8.912655971 | 29.98263338 | | | | | |
| 9.549274255 | 35.70069983 | | | | | |
| 13.36898396 | 83.63357467 | | | | | |
| 10.82251082 | 49.00062452 | | | | | |
| 12.09574739 | 64.92507418 | | | | | |
| 12.41405653 | 69.33514224 | | | | | |
| 12.09574739 | 64.92507418 | | | | | |
| 11.14081996 | 52.7293123 | | | | | |
| 200.2164502 | 845.4785308 | | | | | |
| 10.01082251 | 42.27392654 | 796 | 33650.046 | 33.65 | 15.14252049 | 55.52156562 |

Tabla 19. Resultados de los cálculos de la fijación de carbono por la biomasa de la Rama, en pendientes de 0 % a 10 %, dentro de la plantación de Pinus patula Schiede et Cham, Centro Poblado de Combayo.

| Muestra | Peso Fresco en gr | Peso Fresco en kg | Peso Seco a 105°C en gr | Peso Seco en kg | M.S en kg | N°Rama /Árbol | B.RA /Árbol Kg | (N°.ARB./ha = A/D ² X 0.866 | kg ha ⁻¹ | Biomasa t ha ⁻¹ | C de la Rama (CB=B*0.45) t ha ⁻¹ | (CO ₂ =CB*3.6666) en t ha ⁻¹ |
|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------------|-----------------|-----------|---------------|----------------|--|---------------------|----------------------------|---|--|
| M1 | 1050 | 1.05 | 324.54 | 0.325 | 0.325 | 70 | 22.718 | 795.225 | 18065.762 | 18.066 | | |
| M2 | 850 | 0.85 | 231.48 | 0.231 | 0.231 | 70 | 16.204 | 795.225 | 12885.507 | 12.886 | | |
| M3 | 250 | 0.25 | 441.72 | 0.442 | 0.442 | 75 | 33.129 | 795.225 | 26345.008 | 26.345 | | |
| TOTAL | | 2.15 | 997.74 | 0.998 | 0.998 | | 72.050 | 795.225 | 57296.278 | 57.296 | | |
| PROMEDIO | | 0.7167 | 332.58 | 0.333 | 0.333 | | 24.017 | 795.225 | 19098.759 | 19.099 | 8.594 | 31.512 |

Tabla 20. Resultados de los cálculos de la fijación de carbono por la biomasa de la Rama, en pendientes de 10 % a 20 %, dentro de la plantación de Pinus patula Schiede et Cham, Centro Poblado de Combayo.

| Muestra | Peso Fresco en gr | Peso Fresco en kg | Peso Seco a 105°C en gr | Peso Seco en kg | M.S en kg | N°Rama /Árbol | B.RA/Árbol Kg | (N°.ARB./ha = A/D ² X 0.866 | kg ha ⁻¹ | Biomasa t ha ⁻¹ | C de la Rama (CB=B*0.45) t ha ⁻¹ | (CO ₂ =CB*3.6666) en t ha ⁻¹ |
|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------------|-----------------|-----------|---------------|---------------|--|---------------------|----------------------------|---|--|
| M1 | 400 | 0.4 | 194.82 | 0.195 | 0.195 | 67 | 13.053 | 795.225 | 10380.024 | 10.380 | | |
| M2 | 700 | 0.7 | 208.73 | 0.209 | 0.209 | 66 | 13.776 | 795.225 | 10955.162 | 10.955 | | |
| M3 | 550 | 0.55 | 207.15 | 0.207 | 0.207 | 68 | 14.086 | 795.225 | 11201.698 | 11.202 | | |
| TOTAL | | 1.65 | 610.7 | 0.611 | 0.611 | | 40.915 | 795.225 | 32536.884 | 32.537 | | |
| PROMEDIO | | 0.55 | 203.567 | 0.204 | 0.204 | | 13.638 | 795.225 | 10845.628 | 10.846 | 4.881 | 17.895 |

Tabla 21. Resultados de los cálculos de la fijación de carbono por la biomasa de la Rama, en pendiente mayor a 20 %, dentro de la plantación de Pinus patula Schiede et Cham, Centro Poblado de Combayo.

| Muestra | Peso Fresco en gr | Peso Fresco en kg | Peso Seco a 105°C en gr | Peso Seco kg | M.S en kg | N°Rama /Árbol | B.RA/Árbol Kg | N° de arboes /HA (N°.ARB./ha = A/D² X 0.866 | kg ha ⁻¹ | Biomasa t ha ⁻¹ | C de la Rama (CB=B*0.45) t ha ⁻¹ | (CO ₂ =CB*3.6666) en t ha ⁻¹ |
|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------------|--------------|-----------|---------------|---------------|---|---------------------|----------------------------|---|--|
| M1 | 600 | 0.6 | 199.6 | 0.200 | 0.200 | 56 | 11.178 | 795.225 | 8888.707 | 8.889 | | |
| M2 | 550 | 0.55 | 194.73 | 0.195 | 0.195 | 54 | 10.515 | 795.225 | 8362.125 | 8.362 | | |
| M3 | 500 | 0.5 | 183.32 | 0.183 | 0.183 | 50 | 9.166 | 795.225 | 7289.032 | 7.289 | | |
| TOTAL | | 1.65 | 577.65 | 0.578 | 0.578 | | 30.859 | 795.225 | 24539.863 | 24.540 | | |
| PROMEDIO | | 0.55 | 192.55 | 0.193 | 0.193 | | 10.286 | 795.225 | 8179.954 | 8.180 | 3.681 | 13.497 |

Tabla 22. Resultados de los cálculos de la fijación de carbono por la biomasa de la Ramilla, en pendientes de 0 % a 10 % dentro de la plantación de Pinus patula Schiede et Cham, Centro Poblado de Combayo.

| Muestra | Peso Fresco en gr | Peso Fresco en kg | Peso Seco a 105°C en gr | Peso Seco en kg | M.S en kg | N°Rama/Árbol | B.R /Árbol Kg | N° de Árboles /HA (N°.ARB./ha = A/D² X 0.866 | kg ha ⁻¹ | Biomasa t ha ⁻¹ | C de las Ramillas (CBR=B*0.45) t ha ⁻¹ | (CO ₂ =CBh*3.6666) en t ha ⁻¹ |
|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------------|-----------------|--------------|--------------|---------------|--|---------------------|----------------------------|---|---|
| M1 | 300 | 0.300 | 78.840 | 0.079 | 0.079 | 70 | 5.519 | 795.225 | 4388.688 | 4.389 | | |
| M2 | 300 | 0.300 | 77.620 | 0.078 | 0.078 | 70 | 5.433 | 795.225 | 4320.775 | 4.321 | | |
| M3 | 1100 | 1.100 | 90.540 | 0.091 | 0.091 | 75 | 6.791 | 795.225 | 5399.975 | 5.400 | | |
| TOTAL | | 1.700 | 247.000 | 0.247 | 0.247 | | 17.743 | 795.225 | 14109.438 | 14.109 | | |
| PROMEDIO | | 0.567 | 82.333 | 0.082 | 0.082 | | 5.914 | 795.225 | 4703.146 | 4.703 | 2.116 | 7.760 |

Tabla 23. Resultados de los cálculos de la fijación de carbono por la biomasa de la Ramilla, en pendientes de 10 % a 20 % dentro de la plantación de Pinus patula Schiede et Cham, Centro Poblado de Combayo.

| Muestra | Peso Fresco en gr | Peso Fresco en kg | Peso seco a 105°C en gr | Peso Seco en kg | M.S en kg | N°Rama/Árbol | B.R/Árbol Kg | N° de Árboles /HA (N°.ARB./ha = A/D² X 0.866 | kg ha ⁻¹ | Biomasa t ha ⁻¹ | C de las Ramillas (CBR=B*0.45) t ha ⁻¹ | (CO ₂ =CBh*3.6666) en t ha ⁻¹ |
|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------------|-----------------|--------------|--------------|---------------|--|---------------------|----------------------------|---|---|
| M1 | 150 | 0.15 | 51.13 | 0.051 | 0.051 | 67 | 3.426 | 795.225 | 2724.21 | 2.724 | | |
| M2 | 200 | 0.2 | 65.9 | 0.066 | 0.066 | 66 | 4.349 | 795.225 | 3458.752 | 3.459 | | |
| M3 | 200 | 0.2 | 65.34 | 0.065 | 0.065 | 68 | 4.443 | 795.225 | 3533.28 | 3.533 | | |
| TOTAL | | 0.55 | 182.37 | 0.182 | 0.182 | | 12.218 | 795.225 | 9716.242 | 9.716 | | |
| PROMEDIO | | 0.18333 | 60.79 | 0.061 | 0.061 | | 4.073 | 795.225 | 3238.747 | 3.239 | 1.457 | 5.344 |

Tabla 24. Resultados de los cálculos de la fijación de carbono por la biomasa de la Ramilla, en pendiente mayor a 20 % dentro de la plantación de Pinus patula Schiede et Cham, Centro Poblado de Combayo.

| Muestra | Peso Fresco en gr | Peso Fresco en kg | Peso Seco a 105°C en gr | Peso Seco en kg | M.S en kg | N°Rama /Árbol | B.R /Árbol Kg | N° de Árboles /HA (N°.ARB./ha = A/D² X 0.866 | kg ha ⁻¹ | Biomasa t ha ⁻¹ | C de las ramillas (CBR=B*0.45) t ha ⁻¹ | (CO ₂ =CBh*3.6666) en t ha ⁻¹ |
|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------------|-----------------|-----------|---------------|---------------|--|---------------------|----------------------------|---|---|
| M1 | 200 | 0.2 | 69.56 | 0.070 | 0.070 | 56 | 3.895 | 795.225 | 3097.688 | 3.098 | | |
| M2 | 200 | 0.2 | 81.41 | 0.081 | 0.081 | 54 | 4.396 | 795.225 | 3495.920 | 3.496 | | |
| M3 | 100 | 0.1 | 55.69 | 0.056 | 0.056 | 50 | 2.785 | 795.225 | 2214.304 | 2.214 | | |
| TOTAL | | 0.5 | 206.66 | 0.207 | 0.207 | 160 | 11.076 | 795.225 | 8807.912 | 8.808 | | |
| PROMEDIO | | 0.167 | 68.887 | 0.069 | 0.069 | 53.3333 | 3.692 | 795.225 | 2935.971 | 2.936 | 1.321 | 4.844 |

Tabla 25. Resultados de los cálculos de la fijación de carbono por la biomasa de la Acícula, en pendientes de 0 % a 10 % dentro de la plantación de Pinus patula Schiede et Cham, Centro Poblado de Combayo.

| Muestra | Peso Fresco en gr | Peso Fresco en kg | Peso Seco a 105°C en gr | Peso seco en kg | M.S en kg | N°Rama /Árbol | B.A./Árbol en Kg | N° de Árboles /HA (N°.ARB./ha = A/D² X 0.866 | kg ha ⁻¹ | Biomasa t ha ⁻¹ | C de la acícula (CBh=Bh*0.45) t ha ⁻¹ | (CO ₂ =CBh*3.6666) en t ha ⁻¹ |
|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------------|-----------------|-----------|---------------|------------------|--|---------------------|----------------------------|--|---|
| M1 | 750 | 0.75 | 253.44 | 0.253 | 0.253 | 70 | 17.741 | 795.225 | 14107.927 | 14.108 | | |
| M2 | 550 | 0.55 | 174.86 | 0.175 | 0.175 | 70 | 12.240 | 795.225 | 9733.713 | 9.734 | | |
| M3 | 1000 | 1 | 334.41 | 0.334 | 0.334 | 75 | 25.081 | 795.225 | 19944.839 | 19.945 | | |
| TOTAL | | 2.3 | 762.71 | 0.763 | 0.763 | | 55.062 | 795.225 | 43786.479 | 43.786 | | |
| PROMEDIO | | 0.766667 | 254.2367 | 0.254 | 0.254 | | 18.354 | 795.225 | 14595.493 | 14.595 | 6.568 | 24.082 |

Tabla 26. Resultados de los cálculos de la fijación de carbono por la biomasa de la Acícula, en pendientes de 10 % a 20 % dentro de la plantación de Pinus patula Schiede et Cham, Centro Poblado de Combayo.

| Muestra | Peso Fresco en gr | Peso Fresco en kg | Peso Seco a 105°C en gr | Peso Seco en kg | M.S en kg | N°Rama /Árbol | B.A/Árbol Kg | N° de Árboles /HA (N°.ARB./ha = A/D² X 0.866 | kg ha ⁻¹ | Biomasa t ha ⁻¹ | C de la Acícula (CBh=Bh*0.45) t ha ⁻¹ | (CO ₂ =CBh*3.666) en t ha ⁻¹ |
|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------------|-----------------|-----------|---------------|--------------|--|---------------------|----------------------------|--|--|
| M1 | 600 | 0.6 | 206.12 | 0.20612 | 0.20612 | 56 | 11.5427 | 795.224977 | 9179.059 | 9.1790592 | | |
| M2 | 550 | 0.55 | 208.95 | 0.20895 | 0.20895 | 54 | 11.2833 | 795.224977 | 8972.762 | 8.972762 | | |
| M3 | 500 | 0.5 | 162.12 | 0.16212 | 0.16212 | 50 | 8.106 | 795.224977 | 6446.094 | 6.4460937 | | |
| TOTAL | | 1.65 | 577.19 | 0.57719 | 0.57719 | | 30.932 | 795.224977 | 24597.91 | 24.597915 | | |
| PROMEDIO | | 0.55 | 192.3967 | 0.192397 | 0.192397 | | 10.3107 | 795.224977 | 8199.305 | 8.199305 | 3.689687234 | 13.52860721 |

Tabla 27. Resultados de los cálculos de la fijación de carbono por la biomasa de la Acícula, en pendiente mayor a 20 % dentro de la plantación de Pinus patula Schiede et Cham, Centro Poblado de Combayo.

| Muestra | Peso Fresco en gr | Peso Fresco en kg | Peso Seco a 105°C en gr | Peso Seco en kg | M.S en kg | N°Rama/Árbol | B.A/Árbol Kg | N° de Árboles /HA (N°.ARB./ha = A/D² X 0.866 | kg ha ⁻¹ | Biomasa t ha ⁻¹ | C de la Acícula (CBh=Bh*0.45) t ha ⁻¹ | (CO ₂ =CBh*3.666) en t ha ⁻¹ |
|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------------|-----------------|-----------|--------------|--------------|--|---------------------|----------------------------|--|--|
| M1 | 500 | 0.5 | 150.96 | 0.15096 | 0.15096 | 67 | 10.1143 | 795.224977 | 8043.16 | 6.4656085 | | |
| M2 | 450 | 0.45 | 123.19 | 0.12319 | 0.12319 | 66 | 8.13054 | 795.224977 | 6465.608 | 6.9037934 | | |
| M3 | 350 | 0.35 | 127.67 | 0.12767 | 0.12767 | 68 | 8.68156 | 795.224977 | 6903.793 | 21.412562 | | |
| TOTAL | | 1.3 | 401.82 | 0.40182 | 0.40182 | | 26.9264 | 795.224977 | 21412.56 | 7.1375206 | | |
| PROMEDIO | | 0.433333 | 133.94 | 0.13394 | 0.13394 | | 8.97547 | 795.224977 | 7137.521 | 7.1375206 | 3.211884259 | 11.77669482 |

Tabla 28. Resultados de los cálculos para la fijación de carbono por la biomasa de la hojarasca, en pendientes de 0 % a 10 %, dentro de la plantación de Pinus patula Schiede et Cham, Centro Poblado de Combayo.

| Muestra | Peso fresco en gr | Peso Fresco en Kg | Peso Seco a 105°C en gr | Peso seco en kg | M.S en Kg | Kg ha ⁻¹ | Biomasa t ha ⁻¹ | C de la hojarasca (CBh=Bh*0.45) | (CO ₂ =CBh*3.6666) en t ha ⁻¹ |
|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------------|-----------------|------------|---------------------|----------------------------|---------------------------------|---|
| M1 | 185.89 | 0.18589 | 102.28 | 0.10228 | 0.10228 | 1022.8 | 1.0228 | 0.46026 | 1.687589316 |
| M2 | 159.91 | 0.15991 | 133.33 | 0.13333 | 0.13333 | 1333.3 | 1.3333 | 0.599985 | 2.199905001 |
| M3 | 146.84 | 0.14684 | 116.78 | 0.11678 | 0.11678 | 1167.8 | 1.1678 | 0.52551 | 1.926834966 |
| TOTAL | | 0.49264 | 352.39 | 0.35239 | 0.35239 | | | | |
| PROMEDIO | | 0.16421333 | 117.4633333 | 0.117463333 | 0.11746333 | 1174.63333 | 1.174633 | 0.528585 | 1.938109761 |

Tabla 29. Resultados de los cálculos para la fijación de carbono por la biomasa de la hojarasca, en pendientes de 10 % a 20 %, dentro de la plantación de Pinus patula Schiede et Cham, Centro Poblado de Combayo.

| Muestra | Peso fresco en gr | Peso Fresco en Kg | Peso Seco a 105°C en gr | Peso Seco en Kg | M.S en Kg | Kg ha ⁻¹ | Biomasa t ha ⁻¹ | C de la hojarasca (CBh=Bh*0.45) | (CO ₂ =CBh*3.6666) en t ha ⁻¹ |
|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------------|-----------------|------------|---------------------|----------------------------|---------------------------------|---|
| M1 | 142.08 | 0.14208 | 103.91 | 0.10391 | 0.10391 | | | | |
| M2 | 132.46 | 0.13246 | 106.37 | 0.10637 | 0.10637 | | | | |
| M3 | 134.84 | 0.13484 | 104.59 | 0.10459 | 0.10459 | | | | |
| TOTAL | | 0.40938 | 314.87 | 0.31487 | 0.31487 | | | | |
| PROMEDIO | | 0.13646 | 104.9566667 | 0.104956667 | 0.10495667 | 1049.56667 | 1.049567 | 0.472305 | 1.731753513 |

Tabla 30. Resultados de los cálculos para la fijación de carbono por la biomasa de la hojarasca, en pendientes mayores a 20 %, dentro de la plantación de *Pinus patula* Schiede et Cham, Centro Poblado de Combayo.

| Muestra | Peso fresco en gr | Peso Fresco en kg | Peso seco a 105°C en gr | Peso seco en kg | M.S en kg | kg ha ⁻¹ | Biomasa t ha ⁻¹ | C de la Hojarasca (CBh=Bh*0.45) t ha ⁻¹ | (CO ₂ =CBh*3.6666) en t ha ⁻¹ |
|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------------|-----------------|-------------|---------------------|----------------------------|--|---|
| M1 | 175.7 | 0.1757 | 119.8 | 0.1198 | 0.1198 | | | | |
| M2 | 120.29 | 0.12029 | 98.73 | 0.09873 | 0.09873 | | | | |
| M3 | 130.27 | 0.13027 | 87.43 | 0.08743 | 0.08743 | | | | |
| TOTAL | | 0.42626 | 305.96 | 0.30596 | 0.30596 | | | | |
| PROMEDIO | | 0.14208667 | 101.9866667 | 0.101986667 | 0.101986667 | 1019.86667 | 1.019867 | 0.45894 | 1.53349404 |

Tabla 31. Resultados de los cálculos para la fijación de carbono por la biomasa del sotobosque, en pendientes de 0 % a 10 %, dentro de la plantación de *Pinus patula* Schiede et Cham, Centro Poblado de Combayo.

| Muestra | Peso fresco en gr | Peso fresco en kg | Peso seco a 105°C en gr | Peso seco en kg | Peso del agua kg | % de agua | M.S % | M.S en kg | kg ha ⁻¹ | BS en t ha ⁻¹ | CBS=BS*0.45 en t ha ⁻¹ | CO ₂ BS =CBS*3.6666 en t ha ⁻¹ |
|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------------|-----------------|------------------|-----------|---------|-----------|---------------------|--------------------------|-----------------------------------|--|
| M1 | 161.18 | 0.161 | 95.81 | 0.096 | 0.065 | 40.557 | 59.443 | 0.096 | 958.100 | 0.958 | 0.431 | 1.581 |
| M2 | 134.74 | 0.135 | 85.7 | 0.086 | 0.049 | 36.396 | 63.604 | 0.086 | 857.000 | 0.857 | 0.386 | 1.414 |
| M3 | 161.39 | 0.161 | 86.77 | 0.087 | 0.075 | 46.236 | 53.764 | 0.087 | 867.700 | 0.868 | 0.390 | 1.432 |
| Total | 457.31 | 0.457 | 268.28 | 0.268 | 0.189 | 123.189 | 176.811 | 0.268 | 2682.800 | 2.683 | 1.207 | 4.427 |
| Promedio | 152.4367 | 0.1524 | 89.427 | 0.089 | 0.063 | 41.063 | 58.937 | 0.089 | 894.267 | 0.894 | 0.402 | 1.476 |

Tabla 32. Resultados de los cálculos para la fijación de carbono por la biomasa del sotobosque, en pendientes de 10 % a 20 %, dentro de la plantación de *Pinus patula* Schiede et Cham, Centro Poblado de Combayo.

| Muestra | Peso fresco en gr | Peso fresco en kg | peso seco a 105°C en gr | Peso seco en kg | Peso del agua kg | % de agua | M.S % | M.S en kg | kg ha ⁻¹ | BS en t ha ⁻¹ | CBS=BS*0.45 en t ha ⁻¹ | CO ₂ BS= CBS*3.6666 en t ha ⁻¹ |
|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------------|-----------------|------------------|-----------|---------|-----------|---------------------|--------------------------|-----------------------------------|--|
| M1 | 127.73 | 0.1277 | 66.39 | 0.0664 | 0.061 | 48.023 | 51.977 | 0.066 | 663.900 | 0.664 | 0.299 | 1.095 |
| M2 | 122.32 | 0.1223 | 70.03 | 0.0700 | 0.052 | 42.749 | 57.251 | 0.070 | 700.300 | 0.700 | 0.315 | 1.155 |
| M3 | 163.52 | 0.1635 | 77.04 | 0.0770 | 0.086 | 52.886 | 47.114 | 0.077 | 770.400 | 0.770 | 0.347 | 1.271 |
| TOTAL | 413.57 | 0.4136 | 213.46 | 0.2135 | 0.200 | 143.658 | 156.342 | 0.213 | 2134.600 | 2.135 | 0.961 | 3.522 |
| PROMEDIO | 137.8567 | 0.1379 | 71.1533 | 0.0712 | 0.067 | 47.886 | 52.114 | 0.071 | 711.533 | 0.712 | 0.320 | 1.174 |

Tabla 33. Resultados de los cálculos para la fijación de carbono por la biomasa del sotobosque, en pendientes mayores a 20 %, dentro de la plantación de *Pinus patula* Schiede et Cham, Centro Poblado de Combayo.

| Muestra | Peso fresco en gr | Peso fresco en kg | Peso seco a 105°C en gr | Peso seco en kg | Peso del agua kg | % de agua | M.S % | M.S en kg | kg ha ⁻¹ | BS en t ha ⁻¹ | CBS=BS*0.45 en t ha ⁻¹ | CO ₂ BS=CBS*3.6666 en t ha ⁻¹ |
|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------------|-----------------|------------------|-----------|---------|-----------|---------------------|--------------------------|-----------------------------------|---|
| M1 | 163.91 | 0.16391 | 79.2 | 0.0792 | 0.08471 | 51.6808 | 48.3192 | 0.079 | 792 | 0.792 | 0.3564 | 1.30677624 |
| M2 | 113.49 | 0.11349 | 68.49 | 0.06849 | 0.045 | 39.6511 | 60.3489 | 0.068 | 684.9 | 0.6849 | 0.308205 | 1.130064453 |
| M3 | 120.6 | 0.1206 | 57.26 | 0.05726 | 0.06334 | 52.5207 | 47.4793 | 0.057 | 572.6 | 0.5726 | 0.25767 | 0.944772822 |
| Total | 398 | 0.398 | 204.95 | 0.20495 | 0.19305 | 143.853 | 156.147 | 0.205 | 2049.5 | 2.0495 | 0.922275 | 3.381613515 |
| Promedio | 132.666667 | 0.13266667 | 68.3166667 | 0.0683167 | 0.06435 | 47.9509 | 52.0491 | 0.068 | 683.167 | 0.683167 | 0.307425 | 1.127204505 |

Tabla 34. Resultados de los cálculos para la fijación de carbono por el suelo, en pendientes de 0 % a 10 %, dentro de la plantación de *Pinus patula* Schiede et Cham, Centro Poblado de Combayo.

| N° de muestra | Profundidad de Muestreo en cm | Profundidad en m | Carbono orgánico en % | Densidad aparente g cm ³ | Carbono fijado: C%*DA(g/cm ³) *100*pro en (m). t ha ⁻¹ | CO ₂ =CO*3.6666 en t ha ⁻¹ |
|---------------|-------------------------------|------------------|-----------------------|-------------------------------------|---|--|
| I | 40 | 0.4 | 2.1 | 1.42 | 119.28 | 437.352048 |
| II | 40 | 0.4 | 2.51 | 1.44 | 144.576 | 530.102361 |
| TOTAL | | | | | 263.856 | 917.454409 |

Tabla 35. Resultados de los cálculos para la fijación de carbono por el suelo, en pendientes de 10 % a 20 %, dentro de la plantación de *Pinus patula* Schiede et Cham, Centro Poblado de Combayo.

| N° de muestra | Profundidad de Muestreo en cm | Profundidad en m | Carbono orgánico en % | Densidad aparente g cm ³ | Carbono fijado: C%*DA(g/cm ³) *100*pro en (m). t ha ⁻¹ | CO ₂ =CO*3.6666 en t ha ⁻¹ |
|---------------|-------------------------------|------------------|-----------------------|-------------------------------------|---|--|
| I | 40 | 0.4 | 1.45 | 1.43 | 82.94 | 304.107804 |
| II | 40 | 0.4 | 2.29 | 1.44 | 131.904 | 483.6392064 |
| TOTAL | | | | | 214.844 | 787.7470104 |

Tabla 36. Resultados de los cálculos para la fijación de carbono por el suelo, en pendientes mayores a 20 %, dentro de la plantación de *Pinus patula* Schiede et Cham, Centro Poblado de Combayo.

| N° de muestra | Profundidad de Muestreo en cm | Profundidad en m | Carbono orgánico en % | Densidad aparente g cm ³ | Carbono fijado: C%*DA(g/cm ³) *100*prof en (m). tha ⁻¹ | CO ₂ =CO*3.6666 en tha ⁻¹ |
|---------------|-------------------------------|------------------|-----------------------|-------------------------------------|---|---|
| I | 40 | 0.4 | 1.33 | 1.43 | 76.076 | 278.9402616 |
| II | 40 | 0.4 | 1.49 | 1.42 | 84.632 | 310.3116912 |
| TOTAL | | | | | 160.708 | 589.2519528 |

Tabla 37. Formato para la toma de datos de las muestras ingresadas al laboratorio.

| Nombre de la muestra: sotobosque | | | | Especie: <i>Pinus patula</i> | | | |
|----------------------------------|-------------|------------------|---------------------|------------------------------|-----------------|----------------|---------------|
| Responsable: | | | Pendiente: 0 a 10 % | | | Fecha: | |
| Código de la muestra | Peso fresco | Fecha de ingreso | Peso seco | Fecha de salida | Hora de ingreso | Hora de salida | Observaciones |
| 1. | | | | | | | |
| 2. | | | | | | | |
| 3. | | | | | | | |



Figura 7. A: Delimitación de 1 m², B: Identificación del área de muestreo.



Figura 8. A: Recolección de la hojarasca en 1 m², B: Medición a la altura de pecho (DAP).



Figura 9. A y B: Separación de la rama, ramilla y acícula.



A



B

Figura 10. A: Excavación de la calicata, B: Recolección de la muestra de suelos.



A



B

Figura 11. A: Pesado de la muestra de suelos e identificación, B: Identificación de la calicata.



A



B

Figura 12. A: Calicata para el muestreo de suelos, B: Limpieza del terreno para muestrear.



Figura 13. Medición de la calicata.



Figura 14. Pesado y secado de las muestras haciendo uso de una balanza electrónica y una estufa.



Figura 15. A: Planta de Tuyo (*Puya sp.*), B: Planta de cortadera (*Cortaderia sp.*)



Figura 16. A: Planta de romero silvestre (*Clinopodium sericeum*)., B: Paja o pajonal (*Vulpia sp.*)



Figura 17. A: Zarza mora (*Rubus ulmifolius*), B: Cucharilla (*Baccharis sinuata*).



Figura 18. A: Achicoria (*Hypochaeris meyeniana*), B: Lloctara (*Baccharis chilco*).



Figura 19. A: Llune (*Pappobolus* sp), B: Andacushma (*Achyrocline alata*)