UNIVERSIDAD NACIONAL DE UCAYALI

ESCUELA DE POSGRADO

EFECTO DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DE CARGA EN LOS RESIDUOS DE MADERA ASERRADA DE CAPIRONA (*Calycophyllum spruceanum Benth*); CON LA POROSIDAD DEL CARBON VEGETAL PRODUCIDO EN EL PROTOTIPO DEL PROYECTO FINCYT – JB MADERAS EXPORT S.A – UNU, DEPARTAMENTO DE UCAYALI 2017

Tesis para optar el grado académico de maestro en

CIENCIAS EN MEDIO AMBIENTE, GESTIÓN SOSTENIBLE Y RESPONSABILIDAD SOCIAL

BRUNO PEIXOTO MUÑOZ

Pucallpa, Perú

2023

UNIVERSIDAD NACIONAL DE UCAYALI

ANEXO Nº 4

ACTA DE DEFENSA DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACION PARA OBTENCION DEL GRADO DE MAESTRO O MAESTRO EN CIENCIAS

En la Sala de grados de la Universidad Nacional de Ucayali siendo las 12 am horas, del día 9 de Agosto, ante el **Jurado** de Tesis o trabajo de investigación constituido por :

Dr. Cesar Mori Montero ..... Presidente

Dr. Fernando Velasquez de la Cruz ..... Secretario

Mg. Mario Adelaido Pillco Lozano ..... Vocal

El aspirante al **GRADO DE MAESTRO O MAESTRO EN CIENCIAS** en: Medio Ambiente, Gestion Sostenible y Responsabilidad Social

Mención: Medio Ambiente

Don(ña) Bruno Leyato Muñoz ,

Procedió al acto de Defensa:

a. Con la exposición de la tesis o trabajo de investigación, titulada: "Efecto del Contenido de Humedad de carga en los Residuos de madera aserrada de Capirona (Calycophyllum spruceanum Benth.) con la ponosidad del Carbon Vegetal producido en el prototipo del Proyecto FINCYT - JB Maderas Export S.A - UNU Departamento de Ucayali 2017 "

b. Respondiendo las preguntas formuladas por los miembros del Jurado y público asistente.

Concluido el acto de defensa, cada miembro del Jurado procedió a la evaluación del aspirante a Maestro, teniendo presente los criterios siguientes:

a) Presentación personal

UNIVERSIDAD NACIONAL DE UCAYALI

b) Exposición: el problema a resolver, hipótesis, objetivos, resultados, conclusiones, los aportes, contribución a la ciencia y/o solución a un problema social y Recomendaciones

c) Grado de convicción y sustento bibliográfico utilizados para las respuestas a las interrogantes del Jurado y público asistente

d) Dicción y dominio de escenario

Así mismo, el Jurado plantea a la tesis o trabajo de investigación **las observaciones** siguientes:

Levantar las observaciones realizadas por el jurado

Obteniendo en consecuencia el Maestrista la **Nota** de 15 (quince)

Equivalente a Bueno, por lo que se recomienda .....

(aprobado ó desaprobado)

Los miembros del Jurado, firman el presente **ACTA** en señal de conformidad, en Pucallpa, siendo las 12 horas del 9 de agosto del 2023

PRESIDENTE

SECRETARIO

VOCAL

UNIVERSIDAD NACIONAL DE UCAYALI
DIRECCION GENERAL DE PROPIEDAD INTELECTUAL

CONSTANCIA

ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN
SISTEMA ANTIPLAGIO URKUND

Nº V/0167-2023.

La Dirección de Producción Intelectual, hace constar por la presente, que el Informe final de tesis, titulado: "**EFECTO DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DE CARGA EN LOS RESIDUOS DE MADERA ASERRADA DE CAPIRONA (Calycophyllum spruceanum Benth); CON LA POROSIDAD DEL CARBON VEGETAL PRODUCIDO EN EL PROTOTIPO DEL PROYECTO FINCYT – JB MADERAS EXPORT S.A – UNU, DEPARTAMENTO DE UCAYALI 2017**"

Autor(es)	:	**PEIXOTO MUÑOZ, BRUNO**
Escuela	:	**POSGRADO**
Maestría	:	**MEDIO AMBIENTE, GESTIÓN SOSTENIBLE Y RESPONSABILIDAD SOCIAL**
Asesor(a)	:	**DR. PÉREZ LEAL, FERNANDO**

Después de realizado el análisis correspondiente en el Sistema Antiplagio URKUND, dicho documento presenta un **porcentaje de similitud 9%.**

En tal sentido, de acuerdo a los criterios de porcentaje establecidos en el artículo 9 de la DIRECTIVA DE USO DEL SISTEMA ANTIPLAGIO URKUND, el cual indica que no se debe superar el 10%. Se declara, que el trabajo de investigación: SI Contiene un porcentaje aceptable de similitud, por lo que SI se aprueba su originalidad.

En señal de conformidad y verificación se firma y se sella la presente constancia

Fecha: 24/03/2023

UNIVERSIDAD NACIONAL DE UCAYALI – Dirección General de Producción Intelectual

Mg. JOSÉ MANUEL CÁRDENAS BERNAOLA
Director de Producción Intelectual

UNIVERSIDAD NACIONAL DE UCAYALI

DIRECCIÓN DE PRODUCCIÓN INTELECTUAL

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Repositorio de la Universidad Nacional de Ucayali

Yo, Bruno Peixoto Muñoz

Autor de la tesis titulada : Efecto del contenido de humedad de carga en los residuos de madera aserrado de capirona (Calycophyllum spruceanum Benth) con la porosidad del carbón vegetal producido en el prototipo del proyecto FINCYT-JB MADERAS EXPORT S.A-UNU, departamento de Ucayali 2017

Sustentada el año 2023

Asesor(a): Dr. Fernando Pérez Leal

Escuela de Posgrado

Maestría: Medio Ambiente, Gestión Sostenible y Responsabilidad Social

Mención: .....

Autorizo la publicación:

PARCIAL [ ] TOTAL [X]

De mi trabajo de investigación en el Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de Ucayali (www.repositorio.unu.edu.pe), bajo los siguientes términos:

Primero: Otorgo a la Universidad Nacional de Ucayali licencia no exclusiva para reproducir, distribuir, comunicar, transformar (únicamente mediante su traducción a otros idiomas) y poner a disposición del público en general mi tesis (incluido el resumen) a través del Repositorio Institucional de la UNU, en formato digital sin modificar su contenido, en el Perú y en el extranjero; por el tiempo y las veces que considere necesario y libre de remuneraciones.

Segundo: Declaro que la tesis es una creación de mi autoría y exclusiva titularidad, por tanto me encuentro facultado a conceder la presente autorización, garantizando que la tesis no infringe derechos de autor de terceras personas, caso contrario, me hago único(a) responsable de investigaciones y observaciones futuras, de acuerdo a lo establecido en el estatuto de la Universidad Nacional de Ucayali, la Superintendencia Nacional de Educación Superior Universitaria y el Ministerio de Educación.

En señal de conformidad firmo la presente autorización.

Fecha: 09 / 08 / 2023

Email: brupemu@gmail.com Firma: _____

Teléfono: 991946349 DNI: 45986939

DEDICATORIA

A Dios, por guiarme por la senda del bien y el camino del éxito. Adonai sea enaltecido.

A mis padres, Juan Peixoto Da Fonseca y Karen Miluska Muñoz Alcorta, a mi hermano Juan Miguel por su ejemplo y su incondicional apoyo para mis estudios profesionales para ser hombre de bien; y a mi hijo Fabiano Peixoto que es motivo de mi esfuerzo.

AGRADECIMIENTO

Expreso mi sincero agradecimiento a la Universidad Nacional de Ucayali y a la Escuela de Posgrado, al asesor Dr. Fernando Pérez Leal y en memoria al asesor de la presente tesis Ing. Mg. Melchor Herbert Dolmos Castro por el desinteresado apoyo y orientación científica y tecnológica.

Al PHD. David Muñoz Negrón de la Universidad de Stanford y Jefe del Departamento de Ingeniería Industrial y Operaciones. ITAM - Instituto Tecnológico Autónomo de México. Así mismo a todos mis profesores del curso de Posgrado que compartieron sus conocimientos.

A la empresa JK Maderas Export S.A y al proyecto: FINCYT-JK Maderas Export. S.A.- UNU, denominado: “Desarrollo y validación de un prototipo para la fabricación de carbón vegetal con carbono fijo superior al 90%, sin perjuicio del medio ambiente en la Región de Ucayali”. En especial al empresario John Killer Hurtado Gallo y a la Coordinadora del proyecto Ing. Cecilia Alfaro Benítez y al Ing. José Carlos Saavedra Paredes.

A los colaboradores y equipo de trabajo: Ing. Jorge Amilcar Vargas Barbaran, Ing. Fiorella Isabel Pérez Reátegui, por su participación activa y perseverancia en el trabajo colectivo, relacionado al estudio de la carbonización en el prototipo FINCYT-JK.

A los laboratoristas de la Universidad Nacional de Ucayali: Ing Químico Roberto Tuesta Bardales del Laboratorio de Química, y al Laboratorista Juan Huaycama Murayary del Laboratorio de Suelos. Al laboratorista Gerardo Arimuya Ihuaraqui del Laboratorio de Transformacion Química Forestal.

Al Ing. Eric Graña Sandoval, por su destacado apoyo profesional en el análisis estadístico.

RESUMEN

Esta investigación sobre la especie Capirona (*Calycophyllum spruceanum* Benth), tuvo como objetivo determinar el efecto del contenido de humedad y la porosidad promedio obtenida en el carbón vegetal, a partir de residuos de madera aserrada de capirona, con distinto contenido de humedad de carga en el prototipo del proyecto FINCYT – JK Maderas Export S.A – UNU – Pucallpa 2017. Se utilizó el Diseño Completo al Azar (DCA) con cuatro tratamientos y cuatro repeticiones por tratamiento, los tratamientos fueron: T1. Vagón 1 con 1 m^3 de residuo de capirona + 10 litros de agua, T2. Vagón 2 con 1 m^3 de residuo de capirona + 20 litros de agua, T3. Vagón 3 con 1 m^3 de residuo de capirona + 30 litros de agua, T4. Vagón 4 con 1 m^3 de residuo de capirona + 40 litros de agua. Se determinó el contenido de humedad, volumen de residuos, densidad, y porosidad de la capirona. Los promedios fueron sometidos a la prueba de promedios de Tukey $\alpha = 0,05$. Se llegaron a las siguientes conclusiones: Hubo diferencias significativas entre los tratamientos en cuanto al contenido de humedad y porosidad en el carbón de capirona. A mayor contenido de humedad de la carga en la carbonización, mayor porcentaje de humedad en el carbón, mayor volumen del carbón, mayor densidad real del carbón, mayor densidad aparente del carbón. A menor contenido de humedad de carga de horno, mayor porcentaje de porosidad del carbón y mayor volumen de porosidad del carbón. A mayor porcentaje de humedad del carbón, mayor volumen del carbón, mayor densidad aparente, mayor densidad real, menor porcentaje de porosidad y menor volumen de porosidad.

Palabra Clave: Carbón vegetal de capirona**,** porosidad, densidad, humedad del carbón vegetal.

ABSTRACT

In the present investigation on the species capirona (*Calycophyllum spruceanum* Benth), The objective was to determine the effect of the moisture content and the average porosity obtained in the charcoal, from residues of sawn wood of capirona, with different moisture content from load in the prototype of the FINCYT project – JB Maderas Export S.A – UNU – Pucallpa 2017. The Complete Random Design (DCA) Was used with four treatments and four repetitions per treatment, the treatments were: T1.- Wagon 1 with 1 m3 of capirona residue + 10 liters of water, T2.- Car 2 with 1 m3 of capirona residue + 20 liters of water, T3.- Car 3 with 1 m3 of capirona residue + 30 Liters of water, T4.- Car 4 with 1 m3 of capirona residue + 40 liters of water. Capirona Moisture content,carbon volume, density, and porosity were determined. The means Were subjected to TuKey´s mean test α = 0.05. The following conclusions were reached: There were significant differences between. The treatments in terms of moisture content and porosity in the capirona carbon. The Higher the moisture content of the carbonization charge, the higher the percentage of Moisture in the coal,the greater the volume of the coal,the greater the real density of The coal, the greater the apparent density of the coal. The lower the furnace charge Moisture content, the higher the percentage of coal porosity and the higher the volume Of coal porosity. The higher the percentage of moisture in the coal, the greater the Volume of the coal, the greater the apparent density, the greater the true density, the Lower the percentage of porosity and the lower the volume of porosity.

Keyword: Capirona charcoal, porosity, density and moisture of charcoal.

INTRODUCCIÓN

La producción de carbón Vegetal en la región Ucayali genera ocupación de mano de obra e ingresos económicos importantes para las familias dedicadas a esta actividad, pero que contamina el medio ambiente con las emisiones de material volátil y desperdicios, luego del proceso de carbonización, siendo los residuos de la madera de *Calycophyllum spruceanum* Benth (capirona) uno de los recursos más importantes por su calidad de carbón, es un recurso forestal aun abundante en la región de Ucayali a pesar del elevado índice de atractividad registrado. Esta especie es valorada en la industria forestal por su alta calidad de dureza y resistencia en el mercado de la construcción, nacional e internacional; sin embargo, hasta la actualidad se sigue produciendo carbón a partir de sus residuos de aserrío, en forma artesanal. Entre tanto en el Departamento de Ucayali y Loreto, la empresa JB Maderas Export S.A qué se dedica al aserrío de la especie capirona para la exportación de madera comercial, ya cuenta con el proyecto: FINCYT-JK Maderas Export. S.A.C-UNU, denominado: “Desarrollo y validación de un prototipo para la fabricación de carbón vegetal con carbono fijo superior al 90%, sin perjuicio del medio ambiente en la Región de Ucayali”, donde se produce carbón con fines experimentales y comerciales, habiendo ya realizado trabajos previos de determinación de temperatura óptima de carbonización de los residuos de la especie capirona (Pérez, 2020). En el presente trabajo de investigación tuvo como objetivo determinar el nivel de relación entre la porosidad y el porcentaje de humedad del carbón vegetal obtenido de los residuos de la madera aserrada de capirona (*calycophyllum spruceanum benth*), producido en el prototipo del proyecto: FINCYT-JB Maderas Export S.A. - UNU, departamento de Ucayali, 2017.

ÍNDICE

	Pág.
DEDICATORIA……	vi
AGRADECIMIENTO……..	vii
RESUMEN……	viii
ABSTRACT……..	ix
INTRODUCCIÓN……	x
ÍNDICE……..	xi
ÍNDICE DE TABLAS……..	xiii
ÍNDICE DE FIGURAS……....	xvi
CAPÍTULO I. EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN……..	1
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA……	1
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA……..	5
1.3. OBJETIVO GENERAL Y OBJETIVOS ESPECÍFICOS……	7
1.4. HIPÓTESIS Y/O SISTEMA DE HIPÓTESIS……..	8
1.5. VARIABLES…….....	9
1.6. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA……	12
1.7. VIABILIDAD……	12
1.8. LIMITACIONES……	13
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO……..	14
2.1. ANTECEDENTES……..	14
2.2. BASES TEÓRICAS……	34
2.3. DEFINICIONES CONCEPTUALES……	41
2.4. BASES EPISTEMIOLÓGICAS……..	57
CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO……	58

3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN……... 58

3.2. DISEÑO Y ESQUEMA DE INVESTIGACIÓN…… 59

3.3. POBLACIÓN Y MUESTRA…… 61

3.4. INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS……. 61

3.5. TÉCNICA DE RECOJO, PROCESAMIENTO Y PRESENTACIÓN DE DATOS…… 68

CAPÍTULO IV. RESULTADOS……. 69

CAPÍTULO V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS…… 90

CONCLUSIONES…… 93

SUGERENCIAS…….. 95

REFEFRENCIAS BIBLIOGRÁFICAS…….. 96

ANEXOS…… 103

ÍNDICE DE TABLAS

Pág.

Tabla 1. Operacionalización de las variables…….…….. 11

Tabla 2. La temperatura de carbonización sobre rendimientos y composición del carbón vegetal…….……. 12

Tabla 3. Características físicas del carbón de diez especies maderables de bosques secundarios y primarios remanentes de la región Ucayali…….……. 25

Tabla 4. Poder calorífico superior del carbón vegetal de diferentes especies de plantas forestales de Ucayali……. 26

Tabla 5. Características físicas del carbón vegetal…….. 32

Tabla 6. Efecto de la temperatura de carbonización sobre rendimientos y composición del carbón vegetal 37

Tabla 7. Conformación de las repeticiones y tratamientos……. 60

Tabla 8. Fuentes de variación, tratamientos y error……. 60

Tabla 9. Contenido de humedad del carbón de capirona (*Calycophyllum spruceanum* Benth), en el prototipo del proyecto FINCYT – JB MADERAS EXPORT.S.A. y la significancia según Tukey con una significancia del 5%..... 70

Tabla 10. Volumen del carbón de capirona (*Calycophyllum spruceanum* Benth), en el prototipo del proyecto FINCYT – JB MADERAS EXPORT S.A. y la significancia según Tukey con una significancia del 5%..... 71

Tabla 11. Muestra densidad real, prueba de promedio de Tukey con una

significancia del 5%, de la densidad en el carbón de capirona (*Calycophyllum spruceanum* Benth), en el prototipo del proyecto FINCYT – JB MADERAS EXPORT S.A…… 73

Tabla 12. Muestra densidad aparente, prueba del promedio de Tukey con una significancia del 5%, de la densidad en el carbón vegetal en capirona (*Calycophyllum spruceanum* Benth), en el prototipo del proyecto FINCYT – JB Maderas EXPORT S.A….. 75

Tabla 13. Muestra prueba del promedio de Tukey con una significancia del 5%, del porcentaje de porosidad del carbón de capirona (*Calycophyllum spruceanum* Benth), en el prototipo del proyecto FINCYT – JB Maderas EXPORT S.A……. 77

Tabla 14. Muestra prueba de promedio de Tukey con una significancia del 5%, del volumen total de los poros del carbón de capirona (*Calycophyllum spruceanum* Benth), en el prototipo del proyecto FINCYT – JB Maderas EXPORT S.A……. 79

Tabla 15. Muestra promedio de la humedad y el volumen del carbón vegetal en capirona (*Calycophyllum spruceanum* Benth), en Ucayali…….……..…… 81

Tabla 16. Muestra promedio de la humedad y la densidad real del carbón vegetal en capirona (*Calycophyllum spruceanum* Benth), en Ucayali…….……..…… 82

Tabla 17. Muestra promedio de la densidad aparente y el poder calorífico del carbón vegetal en capirona (*Calycophyllum spruceanum* Benth), en Ucayali…… 84

Tabla 18. Muestra promedio de la porosidad en porcentaje y el poder

calorífico del carbón vegetal en capirona (*Calycophyllum spruceanum* benth), en Ucayali…… 86

Tabla 19. Muestra prueba de promedio de Tukey con una significancia del 5%, del volumen total de los poros del carbón de capirona (*Calycophyllum spruceanum* Benth), en el prototipo del proyecto FINCYT – JB MADERAS EXPORT S.A..... 88

ÍNDICE DE FIGURAS

Pág.

Figura 1. Variación del poder calorífico superior promedio del carbón vegetal ……. 27

Figura 2. Comparación del contenido de humedad del carbón de capirona (*Calycophyllum spruceanum* Benth), en el prototipo del proyecto FINCYT – JB MADERAS EXPORT S.A…….. 70

Figura 3. Volumen del carbón de capirona (*Calycophyllum spruceanum* Benth), en el prototipo del proyecto FINCYT – JB MADERAS EXPORT S.A……... 72

Figura 4. Densidad real del carbón de capirona (*Calycophyllum spruceanum* Benth), en el prototipo del proyecto FINCYT – JB MADERAS EXPORT S.A…….. 74

Figura 5. Densidad aparente del carbón de capirona (*Calycophyllum spruceanum* Benth), en el prototipo del proyecto FINCYT – JB MADERAS EXPORT S.A…….. 76

Figura 6. Porcentaje de porosidad del carbón de capirona (*Calycophyllum spruceanum* Benth), en el prototipo del proyecto FINCYT – JB MADERAS EXPORT S.A……. 78

Figura 7. Volumen total de los poros del carbón de capirona (*Calycophyllum spruceanum* Benth), en el prototipo del proyecto FINCYT – JB MADERAS EXPORT S.A……. 80

Figura 8. Diagrama de dispersión de la humedad y el volumen del carbón en la capirona (*Calycophyllum spruceanum* Benth), en Ucayali…….. 81

Figura 9. Muestra línea de regresión y correlación entre la humedad y la densidad real del carbón vegetal y el material volátil en capirona (Calycophyllum spruceanum Benth)…….... 83

Figura 10. Muestra línea de regresión y correlación entre la humedad y la densidad aparente del carbón vegetal en capirona (Calycophyllum spruceanum Benth), en Ucayali…….. 85

Figura 11. Muestra línea de regresión y correlación entre la humedad y la porosidad del carbón vegetal en capirona (Calycophyllum spruceanum Benth), en Ucayali……... 87

Figura 12. Muestra línea de regresión y correlación entre la humedad y el volumen total de la porosidad del carbón vegetal en capirona (Calycophyllum spruceanum Benth), en Ucayali…….. 88

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La especie arbórea Capirona (*Calycophyllum spruceanum Benth*) es una importante materia prima para la industria forestal de Pucallpa en la región Ucayali (Pérez, 2020). De allí obtenemos tableros, listones, tablas y desechos para diversos fines, tales como: desechos de corte, bloques, mantas, que se utilizan para hacer carbón vegetal, pero la mayoría se convierten en desechos junto con el aserrín, que se quema o se arroja al ambiente.

La especie *Calycophyllum spruceanum Benth* (capirona), es un recurso forestal aun cuantioso en la región de Ucayali a pesar del elevado índice de extracción registrado (Pérez, 2020). Por lo que es muy valorada en la industria Forestal de la región por su alta calidad de median dureza y resistencia en el mercado de construcción.

En la región de Ucayali y Loreto, la empresa JB Maderas Export S.A viene realizando el manejo, extracción y el aserrío de esta especie para el mercado extranjero, y en la actualidad está operando el proyecto: FINCYT-JB Maderas Export. Sac. - UNU, denominado: “Desarrollo y validación de un prototipo para la fabricación de carbón vegetal con carbono fijo superior al 90%, sin perjuicio del medio ambiente en la Región de Ucayali”, se logró desarrollar una línea de producción de carbón vegetal para la industria y el consumo doméstico como combustible vegetal. Trabajos anteriores lograron determinar la

temperatura óptima de carbonización, a una temperatura promedio de 342 ºC, para la obtención de un buen carbón vegetal tal como se observa en el trabajo de investigación anteriores con capirona (Pérez, 2020).

Para el proceso de carbonización se necesitó un tiempo promedio de 17 a 30 horas continuas donde se logró obtener un carbón con características físicas superiores a las obtenidas en el mercado local.

La capirona se llevó a dos líneas de vagones, donde se procesó los residuos de madera a media carga (Saavedra et al., 2017).

Durante un tiempo de 30 horas consecutivas en una cámara de carbonización por pirolisis inversa según Saavedra et al., (2017), en la cámara del prototipo FINCYT donde se trabajó a mitad de su capacidad; con cuatro vagones se observó algunos problemas de hermeticidad de los vagones para evitar que el aire y reduzca significativamente la calidad del carbón vegetal de capirona (Pérez, 2020).

El peso promedio de la leña húmeda fue de:

Carbonización	2825 Kg
Peso seco de la leña	1 661,76 Kg
Peso de carbón comercial	364 Kg
Peso de carbón menudo	165 Kg
Peso de leña no carbonizada	166 Kg
Rendimiento en carbón comercial:	364/1 661,76 X 100 = 22%

Los resultados obtenidos dieron una recomendación para futuros experimentos para ajustar varios parámetros, como la duración del proceso, el tiempo de descanso fuera de la habitación, las temperaturas máximas permitidas, el método de colocación de la leña, la calidad del

procesamiento de la madera.

Carbón en vagones. En cambio, la cuadrilla de la carbonera de Pucallpa con un vagón semanal de aproximadamente 30 toneladas de carbón en 320 costales y trabajando con: Copaiba, tornillo, huayruro, shihuahuaco, yacushapana y quinilla. A modo de comparación, una carga de 7,5 m^3 de leña de aserradero produce 13 sacos de carbón comercial y 5 - 6 sacos de carbón.

Un poco de carbón también se ha informado que tarda un total de 10 a 15 días en almacenar seis o siete camiones cargados de leña antes de que comience a producir carbón (Pérez, 2020).

La empresa Inversiones Valentina y Nataly SAC (antes Consorcio, C.F.B. Km. 13.700), tercera productora de carbón vegetal comercial a partir de residuos, reporta envíos semanales de camiones carboneros de 32 toneladas de especies maderables comerciales: Capirona, Mashonaste, Copaiba, Estoraque, Aguano masha. Además, una carga de carbón chico en 106 sacos. La producción semanal de carbón gira en torno al menos dos camiones.

Productores y Comercializadores Ucayali (Jr. Sánchez Cerro, Bloque 12 o 13). La asociación está formada por unos 30 productores de carbón que trabajan con las especies de Shihuahuaco, Copaiba, Capirona, Yacushapana. Informan que la furgoneta de leña produce 2 sacos de carga; 25 camionetas con 50 sacos de carbón comercial y 4 – 5 de carbón vegetal. El costo del transporte de leña en camión comercial de madera es de S/ 70.00 y en Shihuahuaco cuesta S/ 120.00.

El carbón vegetal es un material combustible sólido, quebradizo, y poroso con un alto contenido de carbono, cuyo poder calorífico también

varía según el material volátil y el contenido de humedad.

El pretexto del proyecto mencionado es la producción de carbón para combustible doméstico, el cual determina que la temperatura optima de carbonización de las especies procesadas es de 3 a 2 ºC con una duración isotérmica de 30 minutos; el proceso de carbonización dura 17 horas en una producción continua de 2 Baths, que procesa residuos en condiciones ambientales.

Los resultados obtenidos a nivel de prototipo con la tecnología utilizada; Se pueden aplicar al carbón utilizado para la combustión doméstico. Acomodar la producción a nivel comercial (Escala1:1) permite mejorar el desempeño y eficiencia del producto y/o visibilizar nuevos usos; Como resultado, el contenido de humedad del material de entrada carbonizante se desprecia en todas las tecnologías de producción de carbón, en este trabajo se intentó evaluar la relación entre este contenido de humedad y la porosidad del carbón. Recibió, con los mismos parámetros de funcionamiento utilizados en el prototipo de la empresa JB MADERAS EXPORT. En el enfoque competitivo productivo, es necesario demostrar las características para mejorar la calidad del producto.

El proceso de carbonización, siempre comienza con la carga de material lignocelulósico, a temperatura ambiente, independientemente de la humedad de carga del residuo de capirona para obtener carbón, como si fuera suficiente para determinar el tiempo y la temperatura de la isoterma de carbonización, cuyo poder calorífico está determinado por el carbono sólido, el porcentaje de volátiles y el porcentaje de humedad (cuando se determina mediante la ecuación de Goutal en los procesos), puede variar.

La porosidad y otras propiedades fisicoquímicas, por otro lado, no son consideradas como características de la combustión, pero pueden ser demostradas luego de que el carbón es obtenido de la instalación del proyecto Fincyt-JB Maderas Export SAC–UNU-Ucayali, y formar parte de la caracterización.

Por lo tanto, nuestras operaciones forestales amazónicas deben ser minuciosamente evaluadas, investigadas e informadas sobre lo que sucedería.

En el proceso de carbonización, incluyendo variables externas, por ejemplo, la humedad del vagón de carbonización con residuos de capirona y su efecto en la humedad y porosidad del carbón; especialmente cuando se trata de trabajos de investigación avanzada que corresponderían a estudios de posgrado; el objetivo final es lograr un aprovechamiento ecológicamente sostenible de los residuos sólidos en la segunda y transformación de la madera con la menor huella de carbono posible (Pérez, 2020).

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Los procesos de carbonización han generado diversas tecnologías, que en la actualidad muchas de estas tecnologías se utilizan a nivel de redescubiertas, con el propósito de reciclar y utilizar los residuos de la madera para generar una gestión ambiental, en la disposición final de los residuos de la madera transformada. El estado del arte de la tecnología de la carbonización, continúan teniendo un denominador común: todos soslayan los factores externos en el antes y en el después de estos; estando a la fecha pendientes de ser conocidos siendo esta situación, un

nuevo problema para la innovación de la tecnología de la carbonización, con el propósito de involucrarnos en la eficiencia productiva que a la luz de los tiempos actuales tenemos que interrelacionar esta eficiencia productiva con el crecimiento económico, el cambio climático y la innovación tecnológica (Pérez, 2020).

1.2.1. Problema General

- ¿Cuál sería el efecto del contenido de humedad en la carga de los residuos de la madera aserrada de capirona (*Calycophyllum spruceanum Benth)* con la porosidad del carbón vegetal producido en el Prototipo del proyecto: FINCYT-JB Maderas Export SA-UNU Pucallpa 2017?

1.2.2. Problemas Específicos

- ¿Cuál es la humedad del carbón producido a partir de residuos de madera aserrada de capirona (*Calycophyllum spruceanum* Benth) en el prototipo del Proyecto FINCYT – JB Maderas Export SA – UNU –Pucallpa 2017; cuando los residuos son cargados a diferente humedad ambiental?

- ¿Cuál sería la porosidad a distintos porcentajes de humedad en la carga durante el proceso de carbonización obtenida a partir de residuos de madera aserrada de capirona *(Calycophyllum spruceanum* Benth) con distinto contenido de humedad de carga en el prototipo del proyecto FINCYT – JB Maderas Export SA – UNU – Pucallpa 2017?

- ¿Cómo se explicaría los efectos de la variación de humedad de carga de residuos de madera aserrada de capirona (*Calycophyllum spruceanum* Benth) en el prototipo del proyecto FINCYT – JB Maderas Export S.A.C. en la variación de la humedad y la porosidad del carbón?

1.3. OBJETIVO GENERAL Y OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1.3.1. Objetivo General

- Determinar el efecto en la porosidad del carbón obtenido en el prototipo del proyecto FINCYT – JB Maderas Export S.A – UNU – Pucallpa 2017 con residuos de madera aserrada capirona (*Calycophyllum spruceanum* Benth), con diferente contenido de humedad de carga.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Determinar el efecto del contenido de humedad en el carbón vegetal obtenido durante el proceso de carbonización, obtenida a partir de residuos de madera aserrada de capirona (*Calycophyllum spruceanum* Benth) en el prototipo del proyecto FINCYT – JB Maderas Export S.A – UNU Pucallpa 2017.

- Determinar la porosidad en el carbón vegetal obtenido durante el proceso de carbonización, obtenida a partir de residuos de madera aserrada de capirona (*Calycophyllum spruceanum*

Benth) en el prototipo del proyecto FINCYT – JB Maderas Export S.A – UNU Pucallpa 2017.

- Explicar los efectos de humedad de carga utilizadas para la variación de la humedad y porosidad obtenida a partir de residuos de madera aserrada de capirona (*Calycophyllum spruceanum* Benth) en el prototipo del proyecto FINCYT – JB Maderas Export S.A – UNU Pucallpa 2017.

1.4. HIPÓTESIS Y/O SISTEMA DE HIPÓTESIS

1.4.1. Hipótesis General (Hi)

- Si se elabora carbón vegetal a partir de residuos de madera aserrada de capirona (*Calycophyllum spruceanum* Benth) con distinto contenido de humedad en el prototipo del proyecto FINCYT – JB Maderas Export S.A – UNU – Pucallpa 2017, entonces se observará la relación de los efectos de la humedad en el contenido de la porosidad del carbón obtenido".

1.4.2. Hipótesis Específicas

- Si se aplica diferente humedad de carga en los residuos de la madera aserrada de Capirona (*Calycophyllum spruceanum* Benth), en el proceso de carbonización en el Prototipo del proyecto: FINCYT-JB Maderas Export SA-UNU, se observará su efecto en la humedad del carbón.

- Si se aplica diferente humedad de carga en los residuos de la madera aserrada de Capirona (*Calycophyllum spruceanum* Benth), en el proceso de carbonización en el Prototipo del proyecto: FINCYT-JB Maderas Export SA-UNU, se observará su efecto en la porosidad del carbón.

- Si se aplica diferente humedad de carga en los residuos de la madera aserrada de Capirona (*Calycophyllum spruceanum* Benth), en el proceso de carbonización en el Prototipo del proyecto: FINCYT-JB Maderas Export SA-UNU, se observará su efecto en la relación que hay entre la humedad y la porosidad del carbón.

1.5. VARIABLES

1.5.1. Variable Independiente

- Humedad de carga de los residuos de la madera aserrada a carbonizar de capirona (*Calycophyllum spruceanum Benth*).

T1. Vagón 1 con 1 m^3 de residuo de capirona + 10 litros de agua.
T2. Vagón 2 con 1 m^3 de residuo de capirona + 20 litros de agua.
T3. Vagón 3 con 1 m^3 de residuo de capirona + 30 litros de agua.
T4. Vagón 4 con 1 m^3 de residuo de capirona + 40 litros de agua.

1.5.2. Variable Dependiente

- La humedad y porosidad del carbón vegetal, de capirona *(Calycophyllum spruceanum* Benth), obtenido en el Prototipo

del proyecto: FINCYT-JB Maderas Export S.A-UNU. y la relación entre ambas variables según tratamiento.

Indicadores:

- Contenido de Humedad de carga los residuos sólidos de la madera de Capirona: Se preparó previamente antes de cargar al vagón correspondiente al horno de carbonización; a partir de la formulación de una humedad teórica predeterminada, la cual previa homogenización entre los residuos y la cantidad de agua adicionada. Y en las condiciones expuestas se determinó la humedad y la porosidad y las relaciones entre ambas del carbón obtenido.
- Humedad del ambiente Vagón con 1 m^3 de residuo de capirona en el proceso de carbonización.
- Para la determinar la porosidad del carbón obtenido: se realizó **l**uego del proceso de carbonización en cuatro vagones a distintos contenidos de humedad. La operacionalización de las variables, la determinación de nuestros indicadores de humedad y porosidad del carbón la capirona (*Calycophyllum spruceanum* Benth), en el Prototipo del proyecto: FINCYT-JB Maderas Export S.A-UNU, se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 1

Operacionalización de las variables

DEFINICIÓN DE VARIABLES	OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES	DISEÑO DE LA INVESTIGACION
X_1: INDEPENDIENTE Contenido de humedad de los residuos de la madera aserrada a carbonizar.	Humedad de los residuos de capirona (cada vagón con un contenido adicional de humedad), con 4 repeticiones por vagón Vagón 1. con 1 m^3 de residuo de capirona + 10 Lt de agua. Vagón 2. con 1 m^3 de residuo de capirona + 20 Lt de agua. Vagón 3. con 1 m^3 de residuo de capirona + 30 Lt de agua. Vagón 4.con 1 m^3 de residuo de capirona + 40 Lt de agua.	Volumen de madera capirona M3 a carbonizar / vagón FINCYT-JB Maderas Export S.A.-UNU, departamento de Ucayali, 2018.	M^3 / vagón 1,2,3,4 con diferente contenido de humedad	**TIPO O DISEÑO METODOLÓGICO:** Exploratorio experimental y correlacional, transversal El diseño completamente al azar con un nivel de significancia α 0,05 utilizando software SPSS, Análisis de correlación sometidos a la prueba de Tukey.
Y_1: DEPENDIENTE Porosidad del carbón vegetal obtenido la de capirona (*Calycophyllum spruceanum* Benth)	Humedad del carbón obtenido de desechos de madera aserrada de capirona (*Calycophyllum spruceanum* Benth) y su relación con el % de carbono, producido en el prototipo del proyecto FINCYT-JB Madera Export SA-UNU, departamento de Ucayali 2018.	Porcentaje Humedad del carbón vegetal.	% de humedad Densidad en g/cm^3	
	Explica los efectos de la porosidad del carbón vegetal según el contenido de humedad de carga de madera aserrada de capirona (*Calycophyllum spruceanum* Benth), con distinto contenido de humedad.	Porcentaje de Porosidad del carbón obtenido.	% de porosidad.	
	La densidad de la capirona (*Calycophyllum spruceanum* Benth) un prototipo de proyecto: FINCYT-JK Maderas Export S.A.-UNU departamento de Ucayali.	Relación entre el contenido de humedad y porosidad del carbón obtenido.	% de humedad y su relación con la porosidad del carbón.	

1.6. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

Con los datos obtenidos de las variables se genera mayor conocimiento sobre el proceso de la producción del carbón vegetal de capirona en función a su característica para tomar en cuenta los efectos de los factores externos como la humedad de carga al momento de iniciar la carbonización. Lo expresado está relacionado directamente con otros factores y características del carbón vegetal de capirona ya estudiadas (Pérez, 2020).

Se confirmó la hipótesis (H1), de los efectos de la humedad de los residuos de la madera de capirona estudiada con el proceso de carbonización en la humedad y porosidad del carbón; las relaciones entre sí. Y relacionada con el prototipo de carbonización utilizado a fin a la búsqueda permanente de innovaciones que tiendan al mayor perfeccionamiento de la tecnología para la producción industrial del carbón vegetal en la región Ucayali, que contribuirá en forma positiva con la disminución de las emisiones que contaminan el medio ambiente.

1.7. VIABILIDAD

Un factor importante de la viabilidad fue disponer de los residuos de madera capirona, cerca del prototipo en operación del proyecto FINCYT-JB Maderas Export SAC-UNU, en el cual se realizó la fase experimental de la carbonización; las determinaciones fisicoquímicas del producto obtenido se realizaron en el laboratorio de química de la Universidad Nacional de Ucayali.

La viabilidad económica fue asumida por la contribución adicional del graduando.

El equipo técnico, estuvo a cargo del asesor Docente de la Universidad Nacional de Ucayali y otros profesionales colaboradores como del Departamento de Ingeniería Industrial de Operaciones, y Director Adjunto del Centro de Estudios de Competitividad del Instituto Tecnológico Autónomo de México y docentes de la Facultad de Ciencias Forestales y ambientales de la Universidad Nacional de Ucayali.

En consecuencia, se dispuso de lo necesario para realizar la carbonización, se aplicó la metodología para analizar el producto obtenido, y hubo el interés en desarrollar el presente estudio por parte del graduando.

1.8. LIMITACIONES

La ejecución de la presente investigación se realizó sin contratiempos y limitaciones.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES

Ordóñez et al., (2015), en su investigación “Densidad de las maderas mexicanas por tipo de vegetación con base en la clasificación de J. Rzedowski: compilación Madera y bosques”. Se realizó una revisión bibliográfica de la densidad básica de la madera de diversas especies con énfasis en especies maderables en México por tipo de cobertura vegetal. Los ecosistemas y las especies incluidas están basados en la clasificación de la vegetación de México elaborada por J. Rzedowski que, si bien es vigente, es necesario tomar en cuenta que hay nuevos avances en la identificación taxonómica y/o reclasificación. Se proporciona la densidad de la madera para 636 especies y se identifican 738 especies sin información. Asimismo, se proporcionan los datos de la densidad máxima y mínima por tipo de ecosistema y el listado correspondiente de la densidad por especie (sp.), por tipo de ecosistema. El conocimiento de la densidad de la madera, no solo permite darle un mejor uso como recurso natural, sino que adquiere relevancia en la conversión del volumen de las existencias reales (m^3) a biomasa (t) y en particular para la estimación del contenido, captura o secuestro de carbono (C). Para esto último, el contar con el valor de la densidad de la madera, permite hacer estimaciones más precisas (de la biomasa y de las concentraciones de carbono). Este hecho ha tomado relevancia ante el mercado del secuestro de carbono como medida de conservación de la cobertura vegetal, el pago por servicios ambientales, en particular como estrategia en la mitigación del cambio

climático y para los inventarios de emisiones de gases de efecto invernadero y MRV (monitoreo, reporte y verificación) de proyectos REDD (reducción de emisiones por deforestación y degradación evitada).

El proyecto: FINCYT-JB Maderas Export SA-UNU, se ejecutó en el mes de marzo del año 2018 **“**Desarrollo y validación de un prototipo para la fabricación de carbón vegetal con carbono fijo superior al 90%, sin perjuicio del medio ambiente en la Región de Ucayali”, para reciclar los residuos de la madera aserrada y generar una gestión ambiental integral instituto de manera sostenible, con la producción de un carbón vegetal de alta calidad. En vez de vender estos residuos, (2 camionadas por día de producción a solo dos mil soles) a carboneros artesanales para la producción de carbón Vegetal de manera precaria con alta carga de contaminación tanto en la atmosfera y como en el suelo; en esta situación inicial la empresa JB Maderas Export SA, únicamente se liberaba como residuo de su aserradero y mantenía su ambiente industrial sin residuos y por el otro lado estaba generando indirectamente los efectos ambientales negativos por la producción de carbón vegetal artesanal, eludiendo la corresponsabilidad de esta contaminación. La tecnología utilizada resulto de hibridar la tecnología brasilera a nivel industrial de las siderurgias con la tecnología de la producción en lotes utilizando vagones en lotes (tecnología alemana); logrando construir en dos líneas para generar producción continua del carbón vegetal. Estas dos líneas (de carbonización y pre calentamiento), ha permitido reutilizar la energía calórica demandada por una línea de producción, en la segunda línea de carga para una utilización simultanea de la energía demandada en la

carbonización y la energía resultante de esta carbonización para utilizarla en el precalentamiento y calentamiento al 35% en la otra línea, en la cual se filtran los sólidos suspendidos el material volátil y los otros gases de la carbonización de la primera línea, en la segunda línea; con una eficiencia energética del 70%, más que cuando la carbonización se realizaría en una sola línea; esta innovación energética también es consecuencia de la reutilización de la energía de los gases de la combustión para la generación de energía térmica que se utiliza como fuente energética para el proceso de carbonización; consecuencia de los reciclamientos de los flujos térmicos que la emisión del sistema de carbonización tenga emisiones con 50ppm de C0 (en un horno artesanal superan las 2000 partes por millón. Finalmente, la capacidad de producción de carbón vegetal es de 800 Kg/ línea en un periodo de 30 horas; (15 horas de calentamiento y 15 de carbonización). Se adjunta en el anexo un panel fotográfico del prototipo (Pérez, 2020).

2.1.1. Proceso de la madera para su transformación en carbón vegetal

FAO (s.f.). La fase de la carbonización puede ser decisiva en la fabricación de carbón vegetal, si bien no se trata de la más costosa. A menos que se complete lo más eficientemente posible, puede crear un riesgo para la operación global de la producción de carbón, puesto que los bajos rendimientos en la carbonización repercuten a lo largo de toda la cadena de producción, en la forma de mayores costos y desperdicios de los recursos (Pérez, 2020).

La madera consiste de tres componentes principales: celulosa, lignina y agua. La celulosa, la lignina y algunas otras materias están fuertemente ligadas entre sí y constituyen el material denominado madera. El agua es absorbida o retenida como Moléculas de agua en la estructura celulosa/lignina. La madera secada al aire o "estacionada" contiene todavía 12-18% de agua absorbida. La madera en crecimiento, recientemente cortada o "no estacionada", contiene además agua líquida, llevando el contenido total de agua a alrededor del 40-100%, expresado en porcentaje del peso de la madera seca al horno (Pérez, 2020).

Berrocal (2019), evaluó el proceso de producción del carbón vegetal de la empresa Ecobosques a partir de residuos de T. grandis, como parte de este trabajo se evalúa el método de producción en fosa de tierra utilizando residuos de trozas húmedas y secas y residuos de madera aserrada húmeda, así como el potencial económico que presentan los residuos para producir carbón. Obtuvo un rendimiento de 13%; sin embargo; el tratamiento troza-seca registra 24% con un alto porcentaje de carbón grueso (18%), por lo que se recomienda utilizar materia prima en dicha condición, la fosa tuvo una duración de 103 horas (4.32 días) en promedio para la carbonización y el consumo de leña promedio fue de 12 kilogramos.

El rendimiento de la carbonización está principal y directamente influenciado por las Propiedades químicas, físicas, mecánicas y anatómicas de la madera utilizada para su elaboración, y por las condiciones del proceso productivo, principalmente la temperatura, velocidad de calentamiento y tiempos de residencia, así como la atmosfera de reacción (Pereira et al., 2012). Si consideramos la

disponibilidad de madera, tanto para su uso directo como para la producción de carbón, es fundamental hablar del género Eucalytus L´Hér, el cual constituye uno de los principales representantes dentro de la actividad forestal mundial. Actualmente, el cultivo de eucaliptos en Argentina ocupa un lugar de preponderancia, las estimaciones disponibles más recientes indican que hay aproximadamente 300.000 ha cultivadas con diferentes especies de este género, ubicadas principalmente en las provincias mesopotámicas que concentran casi el 90% de la superficie implantada (Gorzycki, 2019). Esta es, además, la región con mayor grado de industrialización y, dentro de ella, la zona noreste de entre Ríos es considerada el mayor núcleo de eucaliptos del País. Ante la necesidad de preservar los recursos provenientes de los bosques Nativos o destinarlos a usos de mayor sustentabilidad, una posibilidad consiste en reemplazar la materia prima proveniente de los mismos por otra que presente características similares o superiores. Teniendo en cuenta esto, el objetivo de este trabajo fue caracterizar las propiedades endoenergéticas de la madera y el carbón de diferentes materiales del género Eucalyptus, incluyendo diferentes especies, híbridos y clones (FAO, s.f.). El presente trabajo fue financiado con aportes de INTA a través de los proyectos: PL 385 “Aportes a la diversificación productiva y el agregado de valor en el Noreste de Entre Ríos”, PE I146 “Mejoramiento genético de especies forestales cultivadas y nativas de rápido crecimiento”, PE I148 “Proceso y Tecnologías sostenibles para el agregado de valor en las cadenas y regiones” y PE I149 “Bioenergía en origen como estrategia para el desarrollo de la agroindustria y el desarrollo territorial sostenible (Gauna et al., 2022).

Tabla 2

La temperatura de carbonización sobre rendimientos y composición del carbón vegetal

Temperatura de carbonización °C	**Análisis químico del carbón**		**Rendimiento de carbón sobre masa seca al horno**
	% carbono fijo	% material volátil	(0% de humedad)
300	68	31	42
500	86	13	33
700	92	7	30

Fuente: (Martins, 1980 y Pérez, 2020).

El rendimiento de carbonización, es decir, la eficiencia del proceso de transformación de la madera en carbón, osciló entre 23.8 y 34.6%. Los genotipos que presentaron mayor rendimiento fueron BE, CL, EG, ET y EC, mientras que aquellos ubicados en el extremo opuesto resultaron GC24, EG36, ED, GC12 y GC8. Particularmente para el caso de rendimiento, los trabajos analizados evalúan algunas de las especies aquí estudiadas o clones de las mismas, hallando resultados de similar magnitud. Nuevamente, para los híbridos GC y GT, así como para EG36, estos son los primeros datos de los que se tiene conocimiento. Un rendimiento alto del proceso de carbonización es deseable, ya que aumenta la eficiencia del proceso y la cantidad de producto final, pudiendo considerarse satisfactorio aquellos cercanos al 30%. Sin embargo, demás de las características propias de la madera, otro factor fundamental para determinar el rendimiento son las condiciones del proceso que, a su vez, afectan otras propiedades del producto resultante, tales como el contenido de carbón fijo y el poder calorífico (Simetti et al., 2018 y Marchesan et al., 2020). En base a esto, si bien los resultados encontrados permiten establecer una valoración relativa (ranking) de los

genotipos ensayados, queda pendiente una investigación más detallada acerca del efecto de estas condiciones sobre los materiales testeados (Gauna et al., 2022).

En cuanto a las propiedades del carbón elaborado con los diferentes materiales, una de las características más importantes es la densidad aparente relativa, la cual está determinada por las condiciones de la pirolisis y por la densidad de la madera a partir de la cual se obtiene (Silva et al., 2018; Ramos et al., 2019). Una mayor densidad del carbón, generalmente, aumenta su resistencia mecánica y es una característica fundamental a ser tenida en cuenta cuando su destino es la producción siderúrgica (Ramos et al., 2019). Es por ello que resulta deseable que las densidades sean tan altas como sea posible (> 0.25 – 0.30 g/cm^3; (Andrade et al., 2018; Dufoumy et al., 2019). Los resultados obtenidos en este trabajo se encuentran por encima de ese rango, con valores extremos de 0.280 y 0.431 g/cm^3, con un efecto significativo de los materiales probados. Entre aquellos de mayor densidad se encuentran GC9, EC, ED, GC8, GC27 y ET, mientras que los materiales de menor densidad resultaron EG y EG36. Los valores encontrados coinciden, en gran medida, con aquellos reportados por la bibliografía para diferentes materiales de Eucalyptus. Los resultados obtenidos para los híbridos GC y GT31, así como para el clon EG36, son los primeros resultados reportados de los que se tiene conocimiento (Gauna et al., 2022).

En cuanto a la humedad de equilibrio, esta se ubicó entre 7.3 y 10.5%. Los materiales que presentaron un menor nivel de humedad fueron ET, CL, GC9, EC y GT31, todos ellos por debajo de 9.2%. En el otro extremo, se ubicaron EG36, ED y EG, con un contenido de humedad

superior al 10%. Los valores hallados se encuentran dentro de los usualmente reportados por la bibliografía, que varían entre 2 y 10%. De manera análoga a la madera (aunque en un nivel menor), el carbón vegetal es un material higroscópico cuya estructura porosa y gran superficie específica le permiten adsorber vapor de agua, variando su contenido de humedad según las condiciones de humedad relativa del ambiente (Costa, 2020). Esta característica puede verse influida, a su vez, por las características de la madera de origen y los parámetros del proceso de carbonización, como la temperatura final o la tasa de calentamiento (Costa, 2020).

Para uso doméstico, existen algunos estándares europeos que establecen límites de referencias para el contenido de humedad del carbón vegetal (7% la norma belga NBN M11-001; 8% la norma alemana DIN 51749), mientras que la norma N° 40 de la Secretaría de Agricultura y Abastecimiento de Brasil establece un contenido máximo del 5%. En cuanto a los carbones elaborados en Argentina, algunos trabajos reportan valores aceptables entre 5 y 10% de humedad (De Bedia, 2018). En el caso de la industria siderúrgica, él contenido de humedad es una de las características del carbón vegetal que interfieren directamente en el funcionamiento de los altos hornos, siendo deseable contenidos menores al 7%, si bien suele aceptarse hasta 10%, aunque en estos casos se aplican descuentos por calidad. Sobrepasar estos niveles puede afectar la eficiencia energética, resistencia mecánica, liberación excesiva de gases y retraso en la ignición del carbón (Costa, 2020). A este respecto, la mayoría de los materiales ensayados se encontrarían dentro del rango aceptable tanto para su uso doméstico como siderúrgico. Es necesario

remarcar que estos valores fueron obtenidos a partir de muestras molidas, por lo que sería conveniente realizar nuevos ensayos sobre muestras de carbón con dimensiones similares a las utilizadas en esta industria para validar los resultados encontrados (Gauna et al., 2022).

La proporción de cenizas de los materiales analizados osciló entre 0.3 y 2%, con un efecto significativos de los diferentes genotipos sobre esta característica. La bibliografía consultada presenta un rango de variación similar a encontrado en este trabajo, con valores entre 0.17 y 1,9%. Al igual que en la madera, las cenizas afectan negativamente el poder calorífico, además de repercutir en las tareas de mantenimiento y limpieza de hornos y calderas. Por otro lado, de acuerdo con Ramos et al. (2019), las cenizas de los materiales de Eucalyptus están compuestas principalmente por óxidos metálicos que, durante la producción de acero, son transferidos a la aleación metálica, contaminándola y afectando su composición química. Por lo tanto, los minerales que componen las cenizas pueden afectar las propiedades reductoras de estos materiales. En este sentido, varios autores mencionan que, en siderurgia, el contenido de cenizas del carbón debe ser lo más bajo posible, siendo deseable un contenido en torno o menor al 1%. Si tomamos esto como referencia los materiales CL, GT31, EG36, GC8, GC27 y EG serían aptos para este uso industrial, mientras que EG9 y EG24 (1.1%) serian marginalmente aptos (Gauna et al., 2022).

En cuanto a su uso doméstico, un buen carbón vegetal tiene, típicamente, un contenido de cenizas de alrededor del 3%, lo cual dependerá de la especie considerada, la cantidad de corteza incluida en la madera que generó el carbón y la cantidad de contaminación con tierra

y arena (De Bedia, 2018). En nuestro continente, la norma N° 40 de la secretaria de Agricultura y Abastecimiento de Brasil establece como valor de referencia aceptable para el uso doméstico un contenido de cenizas menor a 1.5% (Marchesan et al., 2020). Un dato interesante es que, las cenizas son consideradas residuos, pueden tener aplicaciones industriales (Gauna et al., 2022).

Panduro (2012), En el marco de su proyecto: “Utilización industrial y Mercado de diez maderables potenciales de bosques secundarios y primarios residuales”, se realizó el “Estudio de Transformación Química de Diez maderas potenciales de bosques secundarios y primarios”. La producción de carbón vegetal en la Amazonía es una opción para reciclar los residuos producidos durante la extracción y conversión primaria de la madera en el bosque, es decir en los aserraderos, contribuyendo así en el crecimiento de la población amazónica y al desarrollo socioeconómico, ya que el método actualmente se utiliza para la producción de carbón vegetal a mano.

Esencialmente, para obtener carbón vegetal de la madera, todo lo que debe hacer es crear una barrera física que selle la madera del mundo exterior, evitando que el oxígeno del aire la caliente y se incendie. Esto logra la carbonización. Las diferentes técnicas utilizadas se basan en diferentes métodos de creación de esta barrera física, que puede ser de tierra, ladrillo, hormigón armado y metal. Entre las diferentes formas de secar y calentar la leña. Depende de si el proceso de producción es continuo o discontinuo. En un proceso continuo, el carbón se adquiere sin interrupción, a diferencia de un proceso discontinuo, donde se requieren varios días entre la adquisición del carbón y la siguiente adquisición. Las

tecnologías continuas y de alta producción, con sistemas de control más o menos complejos se denominan tecnologías industriales, que se diferencian de las tecnologías manuales como los pilotes tradicionales, que son un proceso discontinuo (Pérez, 2020).

La producción de carbón vegetal constituye una oportunidad para reciclar los residuos, no solo de la industria del mecanizado de la madera, sino también de los residuos de la producción de rollizos.

El carbón vegetal se elabora tradicionalmente a partir de especies que producen un producto denso y de combustión lenta. Estas especies crecen lentamente y por lo tanto son muy vulnerables a la explotación intensiva (Pérez, 2020). Por lo tanto, existe, la necesidad de fomentar la diversificación y el uso de especies de plantación o especies que producen baja densidad de carbono. Aunque los carbones menos densos pueden tener diferentes propiedades físicas, no hay diferencia desde una perspectiva energético (FAO, 1983). También reporta los resultados obtenidos en las diez especies estudiadas, cuyos resultados se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 3

Características físicas del carbón de diez especies maderables de bosques secundarios y primarios remanentes en la región Ucayali

Especies	Contenido de humedad madera %	Rendimiento (%)	Contenido de humedad carbón %	Contenido de Cenizas %	Materia volátil %	Poder calorífico superior Kcal/kg	Densidad (g/cm^3)	Carbono fijo %
Apeiba membranácea Aubl (Maquizapa ñagcha)	12.71	33.08	10.51	2.11	8.40	030.61	0.28	78.93
Apuleia leiocarpa (Vogel) J.F. Macbr. (Ana caspi)	12.30	38.60	3.6	4.08	6.04	7108.97	0.51	86.62
Brosimun utile (Kunth) Oken (Panguana)	12.78	33.28	2.05	1.69	5.40	7636.14	0.23	90.86
Croton matourensis Aubl (Aucatadijo)	12.39	35.21	3.25	3.07	7,22	7090.28	0.30	86.46
Jacaranda copaia (Aubl.) D. Don (Huamanzamana)	11.09	34.18	1.25	2.71	10,30	7072.78	0.21	85.74
Matisia cordata Bonpl (Sapote)	11.87	35.30	3.07	14.36	4,78	6306.9	0.28	77.79
Septotheca tessmannii Ulbr (Utucuro)	13.78	30.41	6.45	5.20	3,14	7091.47	0.33	85.21
Schizolobium parahyba (Vell.) S.F.Blake (Pashaco blanco)	12.48	43.16	2.44	2.57	6,44	7301.71	0.25	88.55
Simarouba amara Aubl. (Marupa)	13.20	28.07	5.39	1.77	2,40	7416.96	0.26	90.44
Terminalia oblonga (Ruiz &Pav) Steud. (Yacushapana amarilla)	12.92	39.33	1.53	5.28	7.08	7048.29	0.44	86.11

Fuente: (Pérez, 2020).

Concluyendo que: Bajo las condiciones experimentales se ha demostrado que se puede producir carbón con las maderas ensayadas con rendimientos y poder calorífico superior a los valores promedio para maderas similares.

Sobre la determinación del poder calorífico en carbones vegetales, Pinchi (2012), utilizó el método de Goutal, para la especie cuyo resultado de su investigación del poder calorífico es el siguiente resultado (Pérez, 2020).

Tabla 4

Poder calorífico superior del carbón vegetal de diferentes especies de plantas forestales de Ucayali

PODER CALORÍFICO SUPERIOR (kcal/kg)				
ESPECIE	***PROMEDIO***	***MAX***	***MIN***	***C.V (%)***
Dypterix odorata	7 563.821	7 611.720	7 467.457	0.630
Manilkara bidentata	7 434.909	7 563.231	7 301.422	1.503
Myroxylon balsamun	7 328.395	7 432.004	7 212.980	0.898
Calycophyllum spruceanum	7 294.867	7 537.694	7 148.151	1.713
Copaifera officinalis	7 187.309	7 372.468	7 035.417	1.538
Aspidosperma varguesii	7 156.841	7 322.174	7 085.194	1.011
Aniba amazónica	7 375.375	7 491.909	7 227.989	1.215
gggCedrelinga Catenaeformis	7 281.375	7 509.805	7 089.094	1.988
Virola sp	7 050.380	7 222.806	6 846.827	1.946
Hura crepitans	6 933.812	7 014.066	6 856.326	0.812

Fuente: (Perez, 2020).

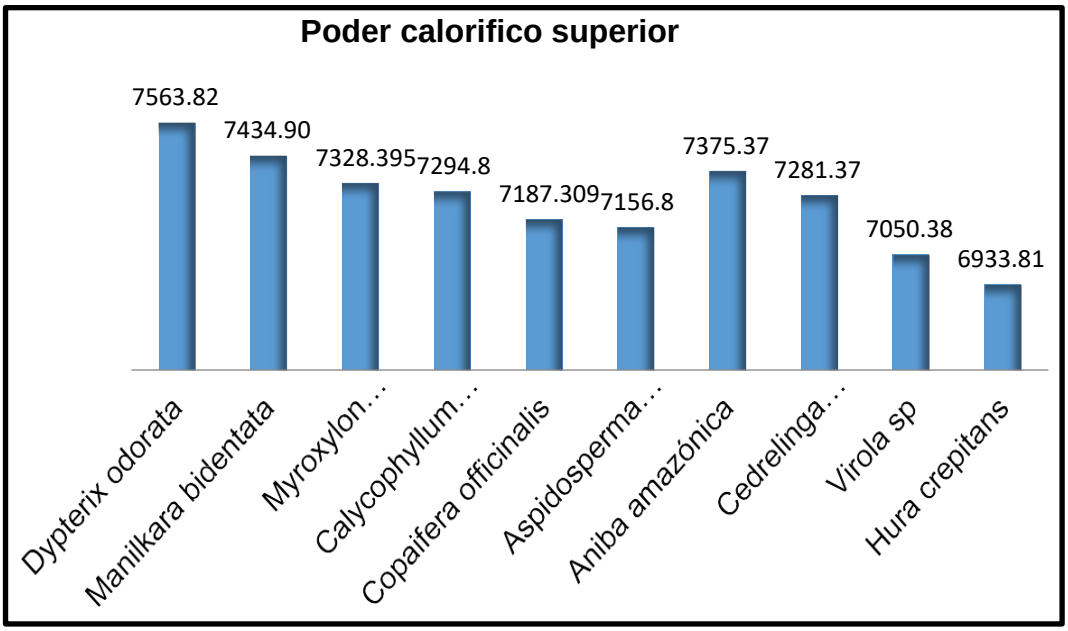
Los valores caloríficos superiores muestran un máximo de 7 563,821 kcal/kg, para la especie *Dypterix odorata (Shihuahuaco) y un mínimo* de 6 933,812 Kcal/Kg para la especie Hura crepitans (Catahua Amarilla). Los valores para el resto de especies están muy cerca de los valores anteriores, pero muestran una tendencia a la baja si se consideran las densidades en bosques primarios. Además, la tabla muestra que el coeficiente de variación para los datos obtenidos está

dentro de los valores que hacen que la media sea representativa, ya que todos los valores del Coeficiente de Variación están por debajo del 30%.

Los valores caloríficos superiores que se muestran en la tabla 4, son inferiores a los mencionados por Remigio (1983), quien encontró valores de 8, 000 – 8,665 Kcal /kg al estudiar el carbón vegetal de cuatro bosques del Perú (Pérez, 2020).

Figura 1

Variación del poder calorífico superior promedio del carbón vegetal



La figura 1, muestra el poder calorífico de las 10 especies en un intervalo de 6 933,812 – 7 563,821 kcal/kg, difiriendo de lo mostrado por Briane y Doat (1985), y Rivera (1987) donde el poder calorífico superior del carbón puede variar de 6 500 a 8 000 kcal/kg y 7 736,73 y 8 755,6 kcal/kg respectivamente. Se muestra el estudio del poder calorífico superior de la especie *Dypterix odorata* (Shihuahuaco) para 10 especies, con un valor de 7563,821 kcal/kg, lo que difiere de lo encontrado por Márquez (2009) quienes determinaron el poder calorífico del carbón

vegetal en *Pinus caribea*, *Dicrostachys cinérea, Conocarpus erecta, Quercus oleoide y Guazuma tomentosa,* del orden de 8 000 kcal/kg. Asimismo, en la especie *Dypterix odorata* (Shihuahuaco) estudiada por Vela y Panduro (2010), presentó un poder calorífico de 9,136 kcal/kg. El objetivo fue conocer las propiedades físicas y la composición química inmediata de 10 carbones forestales obtenidos a mano y así determinar su calidad para uso doméstico. Los resultados obtenidos mostraron que las densidades aparentes de las especies *Hura crepitans* (Yellow Catahua) *y Myroxylon balsamun* (Estoraque) *variaron* entre 0,176 y 0,522 g/cm^3, el contenido de humedad vario entre 3,66 – 5,07% para las especies *Manilkara bidentata* (Quinilla colorada) y *Hura crepitans* (Catahua amarilla)*;* el poder calorífico superior entre 6 933,812 – 7 563,821 Kcal/kg entre *Hura crepitans* (Catahua amarilla) y *Dypterix odorata* (Shihuahuaco)*;* contenido de volátiles entre 7,26 – 2,26% entre *Dypterix odorata* (Shihuahuaco) *y Virola sp* (Cumala); contenido de cenizas 1 665 – 6 175% entre *Myroxylon balsamun* (Estoraque) y *Aspidosperma varguesii* (Quillobordon); contenido de carbono fijo 73,545 – 89,11% entre las especies *Virola sp* (Cumala) *y Dypterix odorata* (Shihuahuaco).También se encontró mediante un análisis de correlación que la densidad aparente no afecta significativamente el valor de las variables de humedad, carbono fijo, cenizas y sustancias volátiles y valor calórico. Además, un análisis de correlación entre el carbono sólido y una mayor producción de calor pueden determinar que existe una relación directa entre ambas variables. Los picos de 10 especies cumplen con los estándares internacionales de calidad, excepto *Copaifera officinalis* (Copaiba), *Cedrelinga Catenaeformis* (Tornillo), *Hura crepitans* (Catahua)

y Virola sp (Cumala), que se ubican en los primeros lugares en volatilidad, contenido de sustancia (Pérez, 2020).

Según Ochoa (2015), un análisis comparativo de los sistemas de producción de carbón vegetal en Tambopata – Madre de Dios – Perú concluyó que el rendimiento promedio de carbón vegetal de *Dipterix odorata* (shihuahuaco) fue de 3,11% en colmena y 31,68% en horno artesanal; El rendimiento promedio de carbono de *Hymenaea coubaril* VAR (azúcar huayruro) fue de 2,67% en el horno tipo abeja y de 22,2% en el horno tipo artesanal. El tiempo total de carbonización en el horno tipo colmena fue de 16 días; mientras que el proceso de carbonización total en el horno tipo artesanal fue de 32 días.

La densidad de carbono promedio para Dypterix odorata (shihuahuaco) fue de 0,66 g/cm^3 en horno tipo abeja y de 0,38 g/cm^3 en horno artesanal; La densidad de carbono promedio de Hymenaea courbaril var (azúcar huayo) fue de 0,72 g/cm^3 en el horno tipo colmena y de 0,8 g/cm^3 en el horno tipo artesanal. El contenido de humedad promedio del carbón en la especie Dypterix odorata (shihuahuaco) fue de 6,03% en el horno tipo colmena y de 3,69% en el horno tipo artesanal; El contenido de humedad promedio del carbón Hymenaea courbaril var (azúcar huayo) fue de 7,03% en el horno tipo abeja y de 6,1% en el horno tipo artesanal. El poder calorífico promedio del carbón para Dypterix odorata (shihuahuaco) fue de *7 671,37* Kcal/kg en horno tipo colmena y de *7512,9* Kcal/kg en el horno tipo artesanal; mientras que el poder calorífico medio del carbono en Hymenaea courbaril L. (Azúcar huayo) fue de *7374,56* Kcal/kg en horno tipo colmena y de *6 524,167* Kcal/kg en horno artesanal (Pérez, 2020).

Contenido de humedad de las astillas de madera. Por otro lado,

Ochoa (2015), menciona que para determinar el contenido de humedad de la madera se aplicó la Norma Técnica del Perú (NTP) N° 251.010.1980: Se tomaron 10 muestras de madera al azar y pequeñas. Cada uno fue probado y luego pesada. Estas muestras se colocaron en una estufa a 103 ± 20 ºC y luego se pesaron diariamente hasta alcanzar un peso constante.

Para determinar el contenido de humedad de las piezas se utilizó la siguiente fórmula (Pérez, 2020):

$$\mathbf{CH\ \frac{Pha - Psa}{Pha} \times 100}$$

Dónde:

Ch = Es el contenido de humedad de la pieza expresado en porcentaje.

Pha = Es el peso húmedo de las piezas expresado en gramos.

Psa = Es el peso seco de las piezas expresado en gramos.

2.1.2. Contenido de humedad del carbón

La energía térmica de la madera se ha empleado desde la antigüedad para satisfacer las necesidades domesticas de cocción de alimentos y calefacción (Ríos, Santos y Gutiérrez, 2017). El uso de combustibles a partir de la biomasa Favorece el balance de las emisiones de carbono registradas durante la Generación de energía. Además, la leña, residuos de la industria maderera y Otros tipos de biomasa tienen gran potencial como fuente de energía. La carbonización de la madera duplica su contenido energético y reduce 75% el peso original, lo cual facilita su transporte y almacenamiento. Sin embargo, múltiples factores determinan la calidad del carbón Vegetal como las especies vegetales empleadas, método de elaboración, tipo de horno utilizado y pericia del

producto. En 2016 la producción de carbón y leña en México fue de 630 900 m^3r (9.4% de los productos Forestales); siendo los principales estados productores de carbón Durango y Sonora (secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat, 2017). La producción de carbón está basada en diversas especies forestales Como encino, mezquite, huizache, ébano, jabín y machiche, las cuales tienen Características que favorecen niveles altos de calidad y rendimiento. Se Emplean principalmente hornos tradicionales de tierra tipo parva, fosa, media Naranja argentino y colmena brasileña (Antal y Gronli, 2003). También otros Factores influyen en el rendimiento y calidad del carbón como el tipo de leña, Contenido de humedad, acomodo de la madera en el horno y tiempo Elaboración (Cruz et al., 2020).

El contenido de humedad se determinó según la Norma ASTM o -1 762. Del Carbón obtenido se pesó 2 gramos y se colocó en un crisol de porcelana de 31.3856 g de peso, siendo llevado a la estufa a 1 03+/- 2 ºC por 24 horas. Posteriormente se descontó el peso del crisol (31.3856 g), obteniendo el peso Se reemplazaron los resultados en la fórmula siguiente (Pérez, 2020) del carbón, esto se realizó para ambas especies forestales y tipo de horno.

$$\% Ch = \frac{Phc-Psc}{Phc} x100$$

Dónde:

% Ch = Es el contenido de humedad del carbón expresado en porcentaje.

Phc = Peso húmedo o acondicionado del carbón.

Psc = Peso seco de las muestras del carbón.

Tabla 5

Características físicas del carbón vegetal

	PCI	Contenido	Humedad	G	PCS	PCS	Error
					Experimental	Demirbas	
Tipo de Residuo	[MJ/kg]	[%]	[%]		[MJ/kg]	[MJ/kg]	[%]
Herbáceos	18.7	4.7	7.2	0.49	19.94	19.08	4
Herbáceos y madera	18.7	4.7	5.4	0.48	19.89	18.67	6

Fuente: (Ponce et al, 2012 y Pérez, 2020).

Earl (1975), establece las siguientes características físicas para el carbón de madera:

Peso específico. ..... 0,2 – 0,5

Peso específico real. ..... 1,3 – 1,5

Valor calorífico.....7,1 Kcal/g

Estabilidad..... Inerte si se condiciona durante 24 horas

Dureza..... Variable según densidad de la madera

Remigio (1983), en su estudio de carbón procedente de cuatro maderas del Perú, Licania elata (apacharama), Eschweilera equitoensis (machimango colorado), Guarea trichilioides (requia colorada), Eucalyptus globulus del valle del Mantaro, determinó las características físicas siguientes:

Densidad aparente..... 0 34 – 0,55 g/cm^3

Poder calorífico superior.....8 000 – 8 665 Kcal/kg

GIT (1974), citado por Remigio (1983), determinó que la antracita tiene 7 100 Kcal/kg; el carbón de piedra bituminoso 7 300 Kcal/kg; y el

petróleo bruto 10 800 Kcal/Kg. Así mismo menciona que el poder calorífico del Kerosene varía de 11 000 a 11 700 Kcal/Kg; el Butano Comercial el poder calorífico inferior (PCI) es 10 938 Kcal/Kg y el poder calorífico superior (PCS) es 11 867 Kcal/Kg; el Propano comercial su poder calorífico inferior (PCI) es 11 082 Kcal/Kg y el poder calorífico superior (PCS) es 12 052 Kcal/Kg (Pérez, 2020).

Doat, mencionado por Pérez (2020), en su estudio efectuado con 111 especies de maderas tropicales, encontró un poder calorífico promedio de 4,770 cal/g; así mismo determinó que no existe correlación entre la densidad de la madera y el poder calorífico expresado en cal/g; pero sí encontró una excelente correlación cuando el poder calorífico es expresado en cal/cm^3.

Al respecto, Aguinelio y Batista (1980), muestran que el contenido de humedad del carbón depende de dos factores: temperatura a la que se obtiene y la humedad del ambiente en el que se expone. Una comparación del contenido de humedad promedio del carbón obtenido en este trabajo, que es 4,86% a 6,72%, muestra que supera el promedio reportado por Senyszyn (1973); citado por Pérez (2020) quien encontró un contenido de humedad de 4,00%; para carbonización a 450 ºC. De manera similar, el contenido máximo de humedad de este estudio fue confirmado por Corado (1984); citado por Pérez (2020), mostrando que la humedad desaparece cuando se completa el proceso de carbonización. El nivel de humedad depende de las condiciones climáticas y del tipo de instalaciones de almacenamiento. Siempre que el carbón no esté en contacto directo con el agua, su contenido de humedad rara vez supera el 5%.

Marcos (1989), muestra que, en general, el contenido de humedad de la madera tiene un efecto mucho mayor sobre la producción de carbono que la especie de madera de la que se obtiene. Esto significa que cuanto mayor sea el contenido de humedad de la madera, menor será la producción de carbono. La FAO (1983), menciona que el agua se absorbe o almacena como moléculas de agua en la estructura celulosa/lignina. Y la madera secada al aire o "esponjada" todavía contiene 12 -18% de agua, a diferencia de la madera en crecimiento recién cortada o "no esponjada", también contiene agua líquida, lo que eleva el contenido total de agua expresado como porcentaje a aproximadamente 0-100%, de pulpa de madera secada al horno. FAO (1983), señala que antes de que la carbonización, el agua de la madera debe eliminarse completamente en forma de vapor, por lo que se necesita mucha energía para evaporar el agua, por lo que se recomienda utilizar la mayor cantidad de luz solar posible. Secado previo de la madera antes de la carbonización, lo que mejora significativamente la eficiencia. El agua que queda en la leña para carbonizar debe evaporarse en un pozo u horno, y esa energía debe obtenerse quemando parte de la misma leña que se convertiría en carbón vegetal aprovechable. Patiño y Pezet (1992), afirma en la misma línea que a mayor humedad, mayor es el tiempo de proceso necesario para eliminar el agua de la madera e iniciar el proceso de pirólisis (Pérez, 2020).

2.2. BASES TEÓRICAS

FAO (s.f.), aunque no es la más cara, la etapa de carbón puede ser decisiva en la fabricación de carbón vegetal. Si no se prepara de la

manera más eficiente posible, puede amenazar la operación general de la producción de carbón, porque la baja eficiencia del carbón se refleja en costos más altos y desperdicio de recursos a lo largo de la cadena de producción. La madera consta de tres componentes principales: celulosa, lignina y agua. La celulosa, la lignina y algunos otros materiales se unen estrechamente para formar un material llamado madera. El agua se absorbe o almacena como Moléculas de agua en la estructura de celulosa/lignina. La madera secada al aire o "esponjada" todavía debe contener 12-18% de agua absorbida. La madera en crecimiento, recién cortada o "sin secar", también contiene agua líquida, por lo que el contenido total de agua es aproximadamente 40-100%, expresado como porcentaje del peso seco de la madera en el horno. Antes de que se produzca la carbonización, el agua de la madera debe eliminarse por completo en forma de vapor. La evaporación del agua requiere mucha energía, por lo que usaría al sol tanto como sea posible para presecar la madera antes de carbonizarla mejora significativamente la eficiencia. El agua que queda en la madera para la carbonización debe evaporarse en un pozo o en un horno, y esa energía debe obtenerse quemando parte de la misma madera, que en cambio podría usarse para carbón vegetal utilizable. Como primera etapa de la carbonización en horno, la madera se seca a una temperatura de 100°C, o menos, hasta el contenido de humedad, y luego la temperatura de la madera secada al horno se eleva a aproximadamente 280°C. La energía para estos pasos proviene de la combustión parcial de la madera cargada en el horno o fosa, y es una reacción

Absorbente de energía o endotérmica (Pérez, 2020). Cuando la madera se seca y se calienta a unos 280 °C, comienza a descomponerse

espontáneamente, produciendo carbono más vapor de agua, ácido acético y compuestos químicos más complejos, principalmente alquitranes y gases no condensables que consisten principalmente en hidrógeno, monóxido y bióxido de carbono. Se introduce aire en el horno o pozo de carbón para que parte de la madera se queme, y el nitrógeno de ese aire también se convierta en gas. El oxígeno del aire se utiliza para quemar parte de la madera, a temperaturas superiores a 280°C. Esto libera energía, por lo que esta reacción se considera exotérmica. Este fraccionamiento espontáneo o carbonización, continúa hasta que solo queda un residuo carbonizado, llamado char. Si no se suministra más calor externo, el proceso se detiene y la temperatura alcanza un máximo de unos 400°C. Sin embargo, este carbón todavía contiene cantidades significativas de alquitrán residual junto con la ceniza de la madera original. El contenido de cenizas del carbón es de alrededor del 30 por ciento en peso, y el resto es carbón sólido, alrededor del 67 a 70 por ciento. El calentamiento adicional aumenta el contenido de carbono sólido, lo que elimina y descompone aún más el alquitrán. Una temperatura de 500 °C da un contenido típico de carbono solido de alrededor del 85% y un contenido volátil de alrededor del 10%. A esta temperatura, la producción de carbón es de aproximadamente el 33% de la madera quemada para carbonización. Sin contar la madera que ha sido quemada para carbonizar el remanente. Por lo tanto, el rendimiento teórico del carbón a partir del rendimiento y composición del carbón (Pérez, 2020).

Tabla 6

Efecto de la temperatura de carbonización sobre rendimientos y composición del carbón vegetal

Temperatura de carbonización	Análisis químico del carbón		Rendimiento de carbón sobre masa seca al horno
°C	% carbono fijo	material volátil	(0% de humedad)
300	68	31	42
500	86	13	33
700	92	7	30

Fuente: (Martins, 1980 y Pérez, 2020).

La baja temperatura de carbonización da una mayor producción de carbón, pero es de baja calidad, corrosivo porque contiene alquitrán ácido y no se quema con una llama limpia y sin humo. Un buen carbón comercial debe contener aproximadamente un 75% de carbono sólido, lo que requiere una temperatura final de carbonización de aproximadamente 500°C. El rendimiento del carbón vegetal también varía algo según el tipo de madera. Existe evidencia de que el contenido de lignina de la madera tiene un efecto positivo en el rendimiento del carbón vegetal; el alto contenido de lignina da un alto rendimiento de carbono. La madera densa también tiene a producir carbón denso y fuerte, lo cual también es deseable. Sin embargo, la madera muy densa a veces produce carbón quebradizo, ya que la madera tiende a desmoronarse durante la carbonización. La friabilidad del carbón aumenta con el aumento de la temperatura de carbonización y aumenta el contenido de carbono sólido, mientras que la concentración de volátiles disminuye. Una temperatura de 450 – 500 °C asegura un equilibrio óptimo entre friabilidad y alto contenido de carbono sólido. Muchas posibles variables de carbonización son difíciles de definir para un procedimiento óptimo. Los mejores resultados se obtienen normalmente utilizando maderas duras sanas,

medias y densa. La madera debe estar lo más seca posible y normalmente bien partida para retirar trozos de más de 20 cm de espesor. La leña que debe quemarse en hornos o fosas para secar y carbonizar los residuos puede ser de menor calidad y de menor tamaño. Su única función es producir calor para secar y calentar el resto hasta la temperatura de carbonización. Para toda la carga se debe aspirar a una temperatura final en torno a los 500 °C, lo que es difícil de conseguir porque la circulación del aire y los efectos de refrigeración son irregulares y crean puntos fríos que provocan incendios o carbonización de la madera. Si se intenta una temperatura final total de 500 °C en un pozo u horno con circulación de aire deficiente o irregular, parte del carbón puede quemarse hasta convertirse en cenizas, dejando otras partes de la carga sólo parcialmente carbonizadas. Por lo tanto, es importante utilizar estufas bien diseñadas y hechas para funcionar correctamente para producir carbón vegetal eficiente (Pérez, 2020).

2.2.1. Fases de la Carbonización

Browne; citado por Beall (1970), dividido el proceso de la pirolisis en cuatro zonas o fases de temperaturas, todas las cuales pueden ocurrir simultáneamente en maderas de considerable dureza: Zona A. Temperatura inferior a 200 ºC, donde solo se producen gases no condensables: Vapor de agua con trazas de dióxido de carbono, ácido fórmico y acético. Zona B. 200 ºC a 280 ºC, produce los mismos gases que la zona A, pero mucho menos vapor de agua y carbono; en esta zona las reacciones son endotérmicas y los productos son casi íntegramente inflamables. Zona C. 280 ºC a 500 ºC, donde la pirolisis activa ocurre en

condiciones que provocan reacciones secundarias entre los productos. Los productos son en su mayoría inflamables (monóxido de carbón, metano). Zona D. Por encima de 500 ºC, donde el residuo consiste principalmente en carbono, que es un sustrato muy activo para reacciones secundarias posteriores (Pérez, 2020) FAO (1983); Pérez y Compean (1989), por otro lado, comparten la opinión de que la humedad se está descomponiendo, lo que reduce el valor calorífico o el valor calorífico del carbón. Marcos (1989), clasifica tres tipos de carbón saturado según su porcentaje de humedad, por ejemplo: carbón secado al aire si su contenido de humedad es de 4 y 9,5% (base húmeda), carbón húmedo si es 10 y 15% y húmedo si es el contenido de humedad es de 4 y 9,5%. La humedad es superior al 15%. A La Torre (1992) muestra que la humedad se pierde durante el proceso de carbonización y el grado de humedad depende, naturalmente, de las condiciones climáticas y del tipo de instalaciones de almacenamiento. Si bien el carbón vegetal no está en contacto directo con el agua, su contenido de humedad rara vez supera el 5 por ciento; para fines industriales, se considera deseable un contenido de humedad inferior al 4 por ciento. Por su parte, FAO (1983); Pérez y Compean (1989) coinciden en que si el carbón no se quema adecuadamente o si el carbón ha absorbido ácidos pirogénicos y alquitranes solubles por la lluvia, que puede pasar. Cuando se quema en pozos o pilas, la higroscopicidad del carbón aumenta y su humedad natural o de equilibrio puede aumentar de 0 a 15% o más. Marcos (1989) muestra que la humedad de equilibrio higroscópico de la madera es muy importante porque es menos higroscópico en el carbón vegetal (Pérez, 2020). Es evidente que el carbón vegetal con un alto contenido de

humedad (10% o más) tiende a desmoronarse y desintegrarse cuando se calienta en las fundiciones, lo que no es deseable para la producción de hierro (FAO, 1983). El contenido de humedad del carbón, como la madera, puede denominarse húmedo (h) o seco (h´). Según las siguientes fórmulas (Marcos, 1989):

$$h = \frac{(Ph-Po)}{Ph.} \qquad h' = \frac{(Ph-Po)}{Po.}$$

Donde:

Ph = Peso húmedo.

Po = Peso seco, obtenido después de un secado en estufa en 100 ±3°C, hasta que dos pesadas consecutivas sean iguales.

Los valores de h son siempre menores o iguales a los de h´, ya que siempre Ph es mayor o igual que Po. Únicamente son iguales cuando Ph = Po es decir, al cero por ciento de humedad. La relación entre ambas es (Pérez, 2020):

$$h = \frac{(1)}{1+h}$$

2.2.2. Poder Calorífico

La capacidad calorífica se define como la cantidad de energía que libera el combustible por unidad de masa durante la combustible; en rigor, deben distinguirse los conceptos de poder calorífico superior (si los gases de la combustión se recogen en forma condensada) y poder calorífico inferior (si los gases de combustión se eliminan de esa forma). Se mide en julios/Kg o Kcal /Kg. El poder calorífico del carbón es casi el mismo que el del carbón. La medida dada por la bomba calorimétrica se considera un

indicador suficiente. (Marcos, 1989). El poder calorífico de un combustible depende en gran medida de su composición química. Cuanto mayor sea el contenido de carbono, mayor será el valor calórico. También depende de la humedad del aire, cuanto mayor es la humedad del aire, menor es la cantidad de material combustible y más calor se invierte en evaporar el agua, por lo que el poder calorífico es menor. (Marcos, 1989). Se puede esperar que el carbón con un alto contenido de materia volátil tenga un poder calorífico ligeramente más alto que el carbón con un alto contenido de carbono fijo y esto se debe a la diferencia calorífica entre el carbón y el hidrógeno. Earl (1975) y Cordero et al., (1987); citado por Marcos (1989), indica un poder calorífico de aproximadamente 7500 Kcal/kg a temperaturas entre 450 y 600 °C. Marcos (1989), señala que el carbón tiene un poder calorífico superior al de la madera y esta es una de las principales causas de carbonización de la madera. La razón principal de esta diferencia es que el carbón tiene un mayor contenido de carbono que la madera. Por tanto, existe una relación directa entre el contenido de carbono alcanzado y el valor calórico resultante. Del mismo modo, compara la madera y el carbón señala que este último da más calor al quemarse que la madera por su mayor poder calorífico. El poder calorífico medio del carbón es de 7 000 Kcal /Kg y de la madera de 3 500 y 4 000 Kcal /Kg (Pérez, 2020).

2.3. DEFINICIONES CONCEPTUALES

2.3.1. ¿Qué es el carbón?

El carbón es un combustible orgánico no homogéneo, Batalla et al.,

(2010), el carbón vegetal es un producto forestal que viene diversificando sus usos con grandes potencialidades. Batalla et al., (2010), es así que ahora se le puede encontrar como pigmento en la industria alimentaria, en la producción de acero debido a su baja reactividad, como purificador de aguas y en la industria médica como fármaco para tratar problemas digestivos. Gracias a estas nuevas utilidades, el horizonte del carbón vegetal está tomando Revuelo sobre su tradicional uso energético y se inserta cada vez más en la industria Mundial (Batalla et al., 2010). El carbón vegetal es un combustible producto de la Combustión anaeróbica de la madera, es decir una combustión sin oxígeno, solo madera expuesta a altas temperaturas durante un tiempo determinado (Batalla et al., 2010). Esta reacción de carbonizaciones llamada PIROLISIS y tiene los muchos productos (Pérez, 2020).

La producción sostenible de carbón mediante la gestión y la planificación Adecuada de las fuentes de suministro, así como las buenas prácticas de Manufactura que permitan un uso eficiente del recurso y una producción bajo una apropiada infraestructura y tecnología; pueden tener también un notable Efecto positivo al reducirla migración desde zonas rurales o forestales a Ciudades, promover la conservación del recurso forestal y elevar los ingresos de la población. Las intervenciones para aportar soluciones a largo plazo no son fáciles de realizar, especialmente en países tropicales pobres que carecen de los necesarios recursos financieros, de capacidad institucional y de personal especializado (Batalla et al., 2010).

Cabe mencionar, que el país debe empezar a tener una política distinta al uso que le da al carbón vegetal. Este producto que muchas

veces tiene como destino final las pollerías, es potencial para la industria química por lo que ya se debería estar pensando en instalar plantaciones destinadas para este producto,

Así como una organización de todas las fuentes potenciales de residuos de los Diferentes aserraderos. Brasil, es un ejemplo de ello; lo que comenzó como una Idea para detenerla deforestación de las poblaciones locales por el recurso energético, actualmente es una política de estado en la cual se propone que a partir del 2013 ya no se extraerá carbón de los bosques naturales e incluso se ha puesto una meta definida para el 2020.

Esto último se ha planteado debido a la exportación de carbón que tienen Brasil a Europa para tratar el acero (Batalla et al., 2010).

Humedad: Puede ser plena, superficial, residual y de equilibrada. La superficie pierde carbón durante el secado al aire, el residuo es el contenido en carbón seco en la atmósfera del laboratorio y desaparece a 106ºC; la humedad de equilibrio es la cantidad de humedad que el carbón puede contener a una temperatura de 30 ºC y una humedad relativa del 96º y 97%. La humedad total es la suma de la humedad residual y superficial.

Materia volátil: Esta es la parte que se libera como gas cuando se calienta el carbón. Compuesto por hidrocarburos y otros gases resultantes de la descomposición y la destilación.

Cenizas: Es un material mineral no combustible, cuya proporción depende del tipo de carbón utilizado en la mina.

Carbono fijo: El carbono fijo del carbón aumenta con el rango, es

la parte de la muestra que no es volátil y se oxida en estado sólido sin volátiles, se encuentra en el residuo después de la determinación de volátiles; Si se elimina la ceniza de este residuo, se obtiene carbón sólido como separación, si se conoce la humedad, la ceniza y los volátiles.

Poder calorífico: El poder calorífico del carbón es la energía total liberada en el proceso de combustión de las materias primas (carbón + aire) a una temperatura de 298 Kg y una presión de 1 atmósfera, utilizando las proporciones estequiométricas de las materias primas (Pérez, 2020).

2.3.2. Manejo y Transporte del Carbón

Muchos carbones son cuidadosamente preparados y tamizados para cumplir con los requerimientos de utilización específica. Con el objetivo de realizar la total valoración técnica y económica del carbón, se debería hacer el máximo esfuerzo para garantizar que tales propiedades sean protegidas.

En la práctica es virtualmente imposible debido a que el carbón tiene que ser transportado por diferentes medios de un lugar a otro, y antes de su uso es frecuente almacenarlo en pilas por varios períodos de tiempo. Dependiendo de la localización geográfica, el carbón puede estar sometido a altas y bajas temperaturas ambientales, al igual que a grandes fluctuaciones en la humedad relativa (Pérez, 2020).

2.3.3. Consideraciones sobre el almacenamiento de carbones

La exposición del carbón a condiciones atmosféricas prevalecientes (humedad y temperatura) puede causar un deterioro en su calidad y una reducción en su valor económico. Este proceso está influenciado por la tasa y grado de reducción de tamaño de partícula. Este y otros procesos pueden llegar a cambiar el contenido de humedad, para producir varios efectos por la oxidación del carbón y el desarrollo de la combustión espontánea (un gran problema debido a que origina cambios en las propiedades físicas y químicas de las pilas de carbón). Algunas sugerencias para minimizar el riesgo de oxidación espontánea del carbón almacenado en pilas son: Nivelar, afirmar y drenar el terreno donde descansan las pilas de carbón, transportar el carbón lo menos posible, disminuir la altura de las pilas para disminuir el peligro de combustión facilitando la disipación del calor, almacenar bajo agua carbones de baja temperatura de inflamación, evitar los silos cerrados, ubicar la cara de la pila que enfrenta el viento apisonada para evitar focos de autocombustión, para carbones de distinta procedencia se deben apilar por separado, evitando el almacenamiento de finos de carbones de bajo rango por más de 4 semanas, nunca exponer el carbón a la radiación calorífica prolongada, como por ejemplo al lado de una caldera u horno (Pérez, 2020).

2.3.4. Proceso de Combustión

En la práctica usual la pirolisis es realizada en hornos con combustión interna. En tales hornos se introduce una cantidad controlada

de aire para quemar una porción de la carga de madera (combustión), para calentar el horno y proporcionar energía para el secado, calentamiento y carbonización del resto de la madera. Este principio de funcionamiento se utiliza en los hornos más comunes: hornos de tierra y hornos de cerámica. Este proceso se denomina comúnmente la carbonización. En estos hornos se puede separar el proceso de producción de carbón en 4 etapas: combustión secada, carbonización (pirólisis) y enfriamiento (Da Costa, 2018).

La carbonización comienza con la combustión parcial de la madera existente dentro del horno. Esta etapa proporciona calor para iniciar la carbonización de la madera. Los productos de combustión llevan el calor de la combustión para dentro del horno, calentando la madera, secándola y llevándola a la temperatura de carbonización. En estos hornos aproximadamente 10 a 20% (masa) de la madera es consumida en la combustión. La segunda etapa es el secado, cuando la madera comienza a calentarse y se libera el agua de la madera. Un calentamiento posterior libera el agua residual y lleva la madera a la temperatura de carbonización (Da Costa, 2018).

La tercera etapa es cuando se produce la carbonización. La carbonización se inicia a aproximadamente 270 ºC, después que la humedad de la madera llega a cerca de cero, y es una reacción exotérmica resultante de la descomposición de la celulosa y la lignina. Como esta etapa es exotérmica, ya no es necesaria una la fuente de calefacción para continuar el proceso. La entrada de aire es parcialmente cerrada y el proceso de carbonización procede hasta que toda la madera se ha transformado en carbón. Los gases y compuestos volátiles

producidos en la carbonización (ácido acético, agua, alcohol metílico, alquitrán, (CO, CO2, CH4, H2 y N2) se liberan a la atmósfera, restando en el horno el carbón vegetal. La etapa final, el enfriamiento se alcanza cuando la temperatura del carbón vuelve a la temperatura ambiente (Da Costa, 2018).

2.3.5. Combustion de carbón

Cuero y Lucero (2020), La combustión de carbón vegetal sin el cumplimiento de las normas establecidas para su producción, ha ocasionado porque hace muchos años a los habitantes del barrio nueva granada, generando problemas de salud, como lo son las afectaciones respiratorias e infecciones cutáneas, en virtud de la emisión de cenizas a raíz de la combustión de carbón vegetal sin las mediadas establecida para esta actividad, además, afectaciones ambientales que se evidencia en la tala de árboles, contaminación del aire y afectaciones a la fauna y flora que habita en el sector. Por ello, generar una estrategia medio ambiental que permita minimizar el impacto de la calidad del aire producida por la combustión del carbón vegetal en la población; vislumbrando a mitigar los daños a causa de la práctica de obtención de carbón vegetal, además, conocer los impactos que genera la combustión de carbón vegetal, determinar las consecuencias para la salud y el medio ambiente que se forjan con la combustión de carbón vegetal y crear una estrategia ambiental enfocada a la disminución de la contaminación del aire por la combustión de carbón vegetal en el Barrio Nueva Colombia del distrito de Buena ventura. La calidad del aire es un problema que no se circunscribe a una región determinada, sino que es un problema mundial

ya que el aire no tiene límites geográficos y dichos contaminantes pueden ser dispersados por la acción de los vientos (Pérez, 2020).

2.3.6. Comportamiento del carbón durante el calentamiento

Un aumento de la temperatura provoca cambios químicos y físicos en el carbón: los químicos producen gases, vapores condensables y un residuo sólido constituido casi exclusivamente por carbón, estos procesos dependen de la velocidad y temperatura del calentamiento de las partículas. Las propiedades físicas afectan su grado de plasticidad; las partículas forman una masa esférica compacta que se expande y solidifica nuevamente, denominada coque o carbón (Pérez, 2020).

2.3.7. Descripción cualitativa del proceso de combustión de carbones

El carbón con granulometría pequeña, finos hasta 5 mm, se oxida como partículas independientes, suspendidas en aire en los quemadores de lecho fluidizado, en ellos, las partículas pasan por diversas etapas (Pérez, 2020):

- Pre calentamiento.
- Secado.
- Post calentamiento.
- Pirólisis o gasificación.
- Combustión del coque o char y de los gases de pirólisis.

Estas etapas se dan a altas velocidades, lo que asegura una alta transferencia de masa y energía y por lo tanto una combustión casi

completa (Pérez, 2020).

2.3.8. Humedad del carbón

Contenido de humedad del carbón Alcanzado después del equilibrio con el medio ambiente; expresado en porcentaje, rara vez supera el 6%, según la ubicación, aunque el carbón utilizado con fines industriales es barato, estimado en menos del 4%. La remoción de humedad del carbón se logra a temperaturas superiores a 100 ºC (Pérez, 2020).

2.3.9. Porosidad del carbón vegetal

En este caso se considera únicamente la porosidad (n) como una propiedad física, es decir como un parámetro numérico. Se define como el volumen ocupando los espacios vacíos (Vv) o volumen poroso (Vp, IUPAC) por unidad de volumen total de roca (Vt), y se expresa en porcentaje (Alonso, 2013):

$$n = (Vv / Vt) \times 100$$

Igual que la densidad, la porosidad admiten ciertas matizaciones y se establecen distintos tipos, siendo los principales: la “porosidad total” y la “porosidad abierta”. De acuerdo con las características de los espacios vacíos contemplados, pueden considerarse otros tipos de porosidad: “cerrada”, “accesible” a un determinado fluido, “comunicada” o “efectiva” para un determinado comportamiento (Alonso, 2013).

La porosidad total (n) se define como el volumen total de vacíos por unidad de volumen total de roca. En este caso deben contabilizarse todos

los espacios vacíos presentes: abiertos y cerrados, accesibles y no accesibles. Su valor no puede obtenerse de forma experimental, ya que incluye entre los espacios vacíos los no comunicados con el exterior (poros no accesibles). Su determinación se realiza de forma indirecta a partir del valor de ambas densidades (Alonso, 2013).

La porosidad abierta (n) se conoce también como porosidad accesible o comunicada, y se define de la misma forma como el volumen de poros abiertos (Va) o comunicados entre sí y con el exterior (accesibles al agua normalmente) por unidad de volumen total de carbón (Vt) (Alonso, 2013):

$$\mathbf{no = (Va / Vt) x 100}$$

Esta porosidad se determina normalmente mediante técnicas experimentales, basadas en introducir un fluido en los poros y cuantificar su volumen. El procedimiento más común es el método de la pesada hidrostática y a mencionado, en dicho ensayo se saturan los poros con agua –normalmente al vacío– de acuerdo con las especificaciones de la Norma seguida y se obtiene la porosidad abierta “accesible al agua”. Otro método utilizado es por inyección de mercurio, en este caso se introduce mercurio a presión en los poros y a partir del volumen inyectado se determina la porosidad abierta “accesible al mercurio”. En la mayoría de las rocas los valores obtenidos en ambos ensayos son parecidos, siendo ligeramente mayor la porosidad accesible al agua, ya que el mercurio no llega a introducirse en los poros muy pequeños (< 0.003 µm), y dicho ensayo tampoco considera los poros con accesos muy grandes (> 100 µm). La porosidad total es, por definición, el máximo valor de porosidad que

presenta un material. En el caso ideal de que todos sus poros estén conectados con el exterior de la muestra, la porosidad total y la porosidad abierta coinciden. En la mayoría de las rocas la diferencia entre ambos valores es normalmente pequeña, dicha diferencia mide el nivel de comunicación del sistema poroso. Esta porosidad presenta gran interés en la caracterización de las rocas como materiales de construcción, ya que está relacionada con su capacidad de absorber de agua y su comportamiento frente al deterioro (Alonso, 2013).

La porosidad abierta es el parámetro más significativo de los materiales, y en particular de las rocas industriales, ya que condiciona su capacidad para almacenar fluidos, influyendo en sus restantes propiedades físicas, así como en su actividad química y, en última instancia, en su durabilidad y calidad. La diferencia de porosidad entre las distintas rocas es muy notable, así las cristalinas se caracterizan por sus bajos valores (alrededor el 1%), mientras que las detríticas presentan valores mucho más altos (alrededor del 15%) (Alonso, 2013).

El carbón activado es un material que posee una estructura altamente porosa, es preparado artificialmente a través de un proceso de carbonización, para que exhiba un mayor grado de porosidad y superficie interna. El carbón vegetal, después de la activación incrementa su área superficial hasta 300 veces debido a la formación de poros internos de diferentes dimensiones (Prías et al., 2011).

Las placas están separadas y tienen distintas orientaciones, por lo que existen espacios entre ellas, a los que se les denominan poros, que brindan al carbón activo su principal característica: una gran área superficial, y por lo tanto, una alta capacidad adsorbente. Las áreas de la

mayoría de los carbones activados comerciales están entre 500 a 1500 m^2 /g (Sevilla, 2011).

Entre los microcristales que constituyen el carbón, existen huecos o espacios vacíos los cuales se denominan poros. El área superficial total de estos poros, incluida el área de sus paredes, es muy amplia, siendo ésta la principal razón de su gran capacidad de absorción. De acuerdo con la terminología de la IUPAC, los poros cuyo tamaño no excede de 2 nm son llamados microporos, que son donde ocurre el fenómeno de adsorción en mayor medida, los que exceden de 50 nm son llamados macroporos, éstos juegan un papel importante en el transporte del adsorbato a través de los mesoporos hasta los microporos, los mesoporos son de tamaño intermedio a los valores mencionados (entre 2 y 50 nm). El volumen de los microporos es en general mayor de 0.2 cm^3/g pudiendo alcanzar elevados valores de área de superficie específica interna. Podemos clasificar el carbón activo en granular y polvo, dependiendo del tamaño de grano del mismo (grano grueso o grano fino) (Sevilla, 2011).

Las propiedades adsorbentes de un carbón activado no dependen únicamente de la superficie y la porosidad. En particular, las sustancias polares se retienen débilmente sobre la superficie (apolar) del carbón. En estos casos, la fijación al carbono de “heteroátomos”, principalmente oxígeno e hidrógeno, formando estructuras o grupos funcionales tipo ácido carboxílico, lactosas, carbonilo, etc., elevan la afinidad de las sustancias polares por la superficie del adsorbente y pueden imprimir un carácter ácido-base al carbón (Sevilla, 2011).

Estructura física: El carbón activo posee una estructura microcristalina que recuerda en cierta medida a la del grafito. Esta

estructura que presenta el carbón activo da lugar normalmente a una distribución de tamaño de poro bien determinada. Así, se pueden distinguir tres tipos de poros según su radio: macroporos (r>25 nm), mesoporos (25>r>1 nm) (Sevilla, 2011).

Tamaño de poros: El carbón tiene una gran variedad de tamaños de poros, los cuales pueden clasificarse de acuerdo a su función, en poros de adsorción y poros de transporte. Los primeros consisten en espacios entre placas graníticas con una separación de entre una y cinco veces el diámetro de la molécula que va a retenerse. En éstos, ambas placas de carbón están lo suficientemente cerca como para ejercer atracción sobre el adsorbato y retenerlo con mayor fuerza. Los poros mayores que los de adsorción son de transporte, y tienen un rango muy amplio de tamaño, que van hasta el de las grietas que están en el límite detectable por la vista, y que corresponde a 0.1mm. En esta clase de poros, sólo una placa ejerce atracción sobre el adsorbato y entonces lo hace con una fuerza menor, o incluso insuficiente para retenerlo. Actúan como caminos de difusión por los que circula la molécula hacia los poros de adsorción en los que hay una atracción mayor. Por lo tanto, aunque tiene poca influencia en la capacidad del carbón activo afectan a la cinética o velocidad con la que se lleva a cabo la adsorción. Otra clasificación de los poros, es el de la IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemists), que se basan en el diámetro de los mismos, de acuerdo a lo siguiente (Sevilla, 2011):

- Microporo: Menores a 2 nm.
- Mesoporos: Entre 2 y 50 nm.
- Macroporos: Mayores a 50 nm (típicamente de 200 a 2000 nm).

Los microporos tienen un tamaño adecuado para retener moléculas pequeñas que aproximadamente corresponden a compuestos más volátiles que el agua, tales como olores, sabores y muchos solventes. Los macroporos atrapan moléculas grandes, tales como las que son cloradas o las sustancias húmicas (ácidos húmicos y fúlvicos) que se generan al descomponenrse la materia orgánica. Los mesoporos son los apropiados para moléculas intermedias entre las anteriores (Sevilla, 2011).

Por lo tanto, la capacidad de un carbón activo para retener una determinada sustancia no solo depende de su área superficial, sino también de la proporción de poros internos que tenga dicho carbón, y del tamaño de los mismos (un tamaño adecuado para un poro debe oscilar entre 1 y 5 veces el diámetro de la molécula a retener). La distribución del tamaño del poro depende fundamentalmente de tres factores: el origen de la materia prima, el tipo de activación, y la duración del proceso de activación (Sevilla, 2011).

Importancia de la textura porosa de los carbones: Optimizar la textura porosa y química superficial de un carbón no siempre es una tarea sencilla máxime si tenemos en cuenta que la textura porosa y la química superficial pueden están interrelacionadas. Por ejemplo, un aumento en el contenido en grupos superficiales oxigenados puede modificar la textura porosa de un carbón, ya que se pueden bloquear parte de los microporos lo que disminuye la accesibilidad al sistema poroso. Un tratamiento térmico a temperaturas elevadas para eliminar grupos superficiales puede también producir un colapso de la textura porosa disminuyendo también el volumen de poros. Así, a veces puede ser es necesario llegar a soluciones de compromiso cuando se pretende optimizar la textura porosa

y química superficial de un carbón (Sevilla, 2011).

2.3.10. Densidad del Carbón

Ordóñez et al., (2015), La densidad de la madera es propia de cada especie vegetal, depende de la cantidad y tipo de elementos celulares que la constituyen. La mayoría de las propiedades físicas y mecánicas de la madera como: la dureza, el peso, la resistencia al impacto y a la abrasión están directamente relacionadas con la densidad; asimismo estas características se asocian con las condiciones climáticas que prevalecen en la región donde los individuos crecen. De acuerdo con sus características, la madera puede ser empleada en la industria para la fabricación y/o producción de: escuadría, celulosa, triplay, postes, pilotes, leña, carbón y durmientes (Semarnat, 2011).

La densidad del carbón vegetal es una propiedad física importante ya que, densidades altas a igualdad de peso, suponen volúmenes más pequeños y por tanto más facilidad de transporte. Además, en el uso industrial, interesan carbones densos ya que a igualdad de volumen producen mayor número de calorías en su combustión. La densidad del carbón vegetal depende del material utilizado para su obtención. La densidad del carbón vegetal aumenta con la densidad del material que se utilice para su obtención. Ya que generalmente las frondosas (encinas, robles, etc.) son más densas que las coníferas (pinos), la densidad del carbón vegetal obtenido con madera de frondosas es mayor que el de coníferas. Además, si durante el proceso de carbonización, la madera ha soportado grandes presiones, el carbón vegetal obtenido es más denso (Sevilla, 2011).

La densidad es una propiedad elemental y fundamental de los materiales, relacionada con la naturaleza de sus constituyentes y la existencia de espacios vacíos entre ellos. La densidad (D) se define como la masa (M) por unidad de volumen (V), y se expresa en kg/m^3:

$$D = M / V$$

Densidad aparente: Es el peso por unidad de volumen de una masa homogénea de carbón activo. Para asegurar la sedimentación uniforme del carbón granulado en el cilindro medidor, se utiliza un sistema de alimentación mediante tolvas vibrantes (Sevilla, 2011).

Densidad real: Es la densidad del esqueleto de una partícula de carbón. Queda determinada por desplazamiento de volúmenes de aire, en el interior de la estructura porosa, con helio o con mercurio (Sevilla, 2011).

Conocida la masa y el volumen de una muestra rocosa se determina de forma inmediata su densidad. En los materiales porosos tanto la masa como el volumen admiten ciertas matizaciones y, en consecuencia, se pueden establecer distintos tipos de densidad. Fundamentalmente se distingue dos: “densidad de los granos minerales” y “densidad de la roca seca”. También se consideran otros tipos de densidad, obtenidos a partir de distintos ensayos, como la “densidad de la roca húmeda” (para un determinado contenido en humedad) y la “densidad corregida” o “densidad del esqueleto” (cuando el volumen de roca no incluye los poros abiertos, pero incluye los cerrados).

2.4. BASES EPISTEMOLÓGICAS

El positivismo es un pensamiento filosófico que afirma que el conocimiento auténtico es el conocimiento científico y que tal conocimiento solamente puede surgir de la afirmación de las hipótesis a través del método científico. En consecuencia, elegimos este tema porque permite trabajar con el contenido conceptual, procedimental y actitudinales que articulan incluir efectos de los factores externos. Los procesos, (porcentaje de la humedad de la carga a carbonizar) vinculadas a la producción cotidiana del carbón vegetal en el prototipo para relacionar estos efectos con el poder calorífico y el medio ambiente. Creemos que nuestro estudio permitirá que nuestra hipótesis sea demostrado a fin de mejorar aún más la calidad del carbón vegetal en función de su poder calorífico haciendo una producción sostenible y competitiva con el propósito de dar una adicionalidad de eficiencia en la producción de carbón vegetal y con este aporte tener evidencias concretas para el diseño y construcción de los equipos para la producción a escala industrial con el objetivo de abastecer la demanda nacional y reconocer al carbón vegetal como un subproducto de la actividad forestal de manera competitivo (Pérez, 2020).

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN

La presente investigación corresponde a un estudio exploratorio – experimental; además es correlacional y transversal:

Es exploratorio porque se efectúa normalmente cuando el objetivo a examinar un tema o problema de investigación poco estudiado, del cual se tiene muchas dudas o no se ha abordado antes. Es decir, normalmente preceden estudios de otros alcances, “abren el terreno” (Ruso, s.f.). Es experimental porque es un tipo de investigación que bien utiliza experimentos y los principios encontrados en el método científico. Los experimentos pueden ser llevados a cabo en el laboratorio o fuera de él. Se debe observar y medir datos del carbón vegetal obtenido a partir de los residuos de la madera de Capirona, y cargar al horno del prototipo para su carbonización (Pérez, 2020).

Es correlacional porque es un tipo de estudio que tiene como propósito evaluar la relación que exista entre dos o más conceptos categoría, o variable en un contexto en particular. Los estudios cuantitativos correlacionales miden el grado de relación entre esas dos o más variables, cuantifican relaciones (Pérez, 2020). Es decir, miden cada variable presuntamente relacionada y después también miden y analizan la correlación. Tales correlaciones se expresan en hipótesis sometidas a pruebas. (Hernández, et al., 2014). Es transversal porque los diseños de investigación transaccional o transversal recolecta datos en un solo

momento en un tiempo único. Su propósito es describir variable, analizar su incidencia e interrelación en un momento dado.

3.2. DISEÑO Y ESQUEMA DE INVESTIGACIÓN

En la planificación de la investigación se utilizó el método de Diseño Completo al Azar (DCA), los tratamientos consistieron en 4 vagones de residuo de capirona tratados con diferentes contenidos de humedad (según modelo FINCYT Ver en Anexo) y 4 repeticiones aleatorias por vagón, un total de 16 unidades experimentales. Los valores medios obtenidos se sometieron a pruebas de Tukey con un nivel de significancia de $\alpha = 0,05 = 5\%$.

En este estudio, ANVA consideró los siguientes tratamientos investigados:

- **Variable Independiente (x)** = Humedad y porosidad de la madera aserrada (capirona) o material de desecho aserrado. Humedad diferente de residuos de capirona (*Calycophyllum spruceanum* Benth) en vagones diferentes (Pérez, 2020):

  T1. Vagón 1 con 1 m^3 de residuo de capirona + 10 litros de agua.
  T2. Vagón 2 con 1 m^3 de residuo de capirona + 20 litros de agua.
  T3. Vagón 3 con 1 m^3 de residuo de capirona + 30 litros de agua.
  T4. Vagón 4 con 1 m^3 de residuo de capirona + 40 litros de agua.

- **Variable dependiente (y)** = Porosidad del carbón obtenido en cada vagón.

Modelo matemático:

$$Yij = U + Ti + eij$$

- **Yij =** Observación cuales quiera de la unidad experimental, que corresponde al i-ésimo tratamiento.
- **U =** Media general.
- **Ti =** Efecto del y ésimo tratamiento en estudio.
- **Eij =** Error o residual.

Tabla 7

Conformación de las repeticiones y tratamientos

Observaciones (j)	**Tratamiento (i)**				**Total**
	T1	**T2**	**T3**	**T4**	
	Y11	Y21	Y31	Y41	Y11
	Y12	Y22	Y32	Y42	Y21
Total	Y13	Y23	Y33	Y43	Y31
Número de	Y14	Y24	Y34	Y44	Y41
Observaciones	Y11	Y12	Y13	Y14	
Media	n	n	n	n	
	Y11	Y12	Y13	Y14	Y41

Fuente: (Pérez, 2020).

Tabla 8

Fuentes de variación, tratamientos y error

Fuente de variación	**Gl**
Tratamientos	(t-1) = 3
Error Experimental	t (r-1) =12
Total	tr – 1 = 15

3.2. POBLACIÓN Y MUESTRA

La población estuvo constituida por todos los desperdicios de la madera de la especie capirona (*Calycophyllum spruceanum* Benth) que se han generado en la empresa JK Maderas Export S.A en el primer trimestre del año 2018.

La muestra constituyó en la carga de los residuos de madera capirona tomadas al azar, correspondiente a la carbonización programada para los días 21 y 25 de mayo y los días 01 y 11 de junio del 2018 (Pérez, 2020).

3.3. INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

Para realizar el presente trabajo primero se tuvo que obtener el carbón vegetal de capirona (*Calycophyllum spruceanum Benth*) a partir de los residuos de la madera aserrada, el estado de humedad de este material fue semi seco y no fue determinado antes del procesamiento de carbonización, por lo se optó por de añadir agua de acuerdo a los tratamientos establecidos dentro de cada vagón luego de cargar un metro cúbico de residuo de madera estratificada dejando espacios de una pulgada entre camada de residuos. La estructura de cada vagón FYNCYT es de metal de acero inoxidable cerrado en forma hermética en la parte exterior, y el calor ingresa por los espacios intermedios del forro interior del vagón que tenía unas perforaciones para calentar y carbonizar mediante vapor, Además otras perforaciones dentro de la cámara de carbonización para dar salida al del vapor de agua y otros gases del residuo de la especie capirona. La fuente de calor era alimentadada por

desperdicios de capirona (leña) hasta alcanzar una temperatura de 1200 °C Para la carbonización en los vagones se alcanzó temperaturas alrededor de 470 °C. Total el proceso de carbonización tuvo una duración de 30 horas, luego se esperó que se enfríe por un lapso de 36 horas para tomar las muestras del carbón.

El prototipo FINCYT-JB maderas export S.A.-UNU, tuvo un rendimiento hasta 33% de carbón vegetal comercial.

Las técnicas para la recolección de datos en el presente estudio fueron a partir del carbón proveniente de los tratamientos con diferentes contenidos de agua añadida a los residuos de capirona al momento de iniciar la carbonización de los residuos de la madera de capirona, midiendo la variable independiente, acondicionamiento de la humedad del residuo de madera antes de ser carbonizado y determinando la variable dependiente humedad y porosidad del carbón en forma indirecta cuyos pasos realizados se indica en los procedimientos. En el enfoque competitivo productivo, es necesario demostrar las características para mejorar la calidad del Producto, al lograr un producto con menos emisiones de gases contaminantes y mayor poder calórico.

3.4.1. Procedimiento

Molienda del carbón a ser analizado: El carbón obtenido en cada vagón muestreado al azar a las 32 horas luego de terminado la carbonización, previo al análisis fue necesario realizar la molienda reduciendo a partículas finas, y se tamizo del carbón molido con tamiz malla fina No. 60.

Determinación de la humedad (H%): Para determinar la Humedad, se siguió los siguientes pasos (Pérez, 2020):

Pesaje de cada muestra:

- Primero: Se colocó el crisol solo (sin muestra) en la balanza y se determinó su peso.
- Segundo: Se colocó en el crisol 2 gramos de muestra.
- Se llevó cada muestra a la estufa a 105 ºC por un tiempo de 24 horas.
- Luego de transcurrido el tiempo; se sacó las muestras de la estufa y se las puso en la campana secadora.

A continuación, se determinó el peso seco (PS) en la balanza descontando el valor del peso del crisol solo y con dicho valor se calculó la humedad de la muestra utilizando la siguiente fórmula (Pérez, 2020):

$$H\% = \frac{PH - PS}{PH} \times 100$$

Donde:

H%: Humedad del Carbón.

PH: Peso húmedo o acondicionado de la muestra.

PS: Peso seco de la muestra.

Densidad del carbon vegetal: Se determinó en cm^3, sumergiendo en agua todos los tratamientos y repeticiones de muestras de carbón vegetal en un vaso de precipitado, utilizando el método de vasos comunicantes graduados. Se realizó al final del experimento, el resultado es el promedio por planta (Graña, 2018).

El principio de Arquímedes afirma que “todo cuerpo sumergido en un fluido experimenta un empuje vertical y hacia arriba igual al peso de fluido desalojado”. El procedimiento empleado es el siguiente: se pesa una bola de acero galvanizado (antes se utilizaba una bola de vidrio llena de mercurio) en tres fluidos distintos: aire, agua y una mezcla de líquidos miscibles en la que flota la muestra y no se disuelve.

ww Vg =+→=+ Wr (4)

Ww = peso de la bola en el agua

Dw = densidad del agua.

De estas pesadas se pueden obtener el peso real de la bola y su volumen.

- D= M/V.
- D= Densidad.
- M= Masa en gramos.
- V= Volumen en cm^3

El principio de Arquímedes se aplica a objetos de cualquier densidad. En caso de conocer la densidad del objeto, su comportamiento al estar sumergido dentro de un fluido puede ser (Terán, 2014):

- Si el objeto es más denso que el fluido en el cual está sumergido, el objeto se hundirá (Terán, 2014).
- Si la densidad del objeto es igual a la del fluido en el cual está sumergido, el objeto no se hundirá ni flotará (Terán, 2014).
- Si el objeto es menos denso que el fluido en el cual está sumergido, el objeto flotara en la superficie del fluido (Terán, 2014).

- Debido al efecto del empuje, los cuerpos sumergidos en un fluido tienen un peso aparentemente menor a su verdadero peso, y le llamamos peso aparente. El valor de la fuerza de empuje se determina mediante la diferencia del peso real y la del peso aparente, es decir (Terán, 2014):

Empuje = peso real – peso aparente

Como todo cuerpo que sea sumergido en un líquido se ajustara a una profundidad a la cual su peso sea igual al del agua desplazada, el peso del cuerpo está dado por la expresión (Terán, 2014):

$$F_{cpo} = P_{cpo} = \rho_{cpo} \bullet V_{cpo} \bullet g$$

Y el peso del fluido desplazado o fuerza de empuje ejercida por el líquido está dada por la expresión (Terán, 2014):

$$E = \rho_{liq} \bullet V_{cpo} \bullet g$$

Donde:

- E = es el empuje.
- V_{cpo} = el volumen que desplaza el cuerpo
- ρ_{liq} = la densidad del líquido donde se sumerge el cuerpo.
- g = 9.81 m/s^2

Como el peso específico (Pe) de la sustancia está dado por:

$$Pe = \rho_{liq} \bullet g$$

Entonces también podemos escribir la expresión:

$$E = Pe \bullet V_{cpo}$$

El producto del volumen del cuerpo por la densidad del fluido es igual a la masa del fluido desalojado, correspondiente a un volumen idéntico al que tiene el cuerpo sumergido. El producto de dicha masa por la aceleración de la gravedad nos da su peso. Por lo tanto. También podemos calcular el empuje que sufren los cuerpos que están sumergidos en un fluido usando la expresión (Terán, 2014):

$$\mathbf{E = V_{cpo} \bullet \rho_{liq} \bullet g = m_{líq} \bullet g}$$

De acuerdo a todo lo anterior, el empuje que recibe un cuerpo sumergido en un líquido puede determinarse por alguna de las siguientes expresiones:

Empuje = Peso del fluido desalojado.

Empuje = Peso real – peso aparente en el líquido.

Empuje = (densidad del cuerpo) (volumen del cuerpo sumergido) (gravedad).

$$\mathbf{E = \rho_{cpo} \bullet V_{cpo} \bullet g}$$

Empuje = *(Peso específico de la sustancia) (Volumen del líquido desalojado)*

$$\mathbf{E = Pe \bullet V_{cpo}}$$

Empuje = (masa del líquido desplazado) (gravedad)

$$\mathbf{E = m_{líq} \bullet g}$$

Empuje = (densidad del líquido) (volumen del líquido desalojado) (gravedad)

$$\mathbf{E = \rho_{liq} \bullet V_{liq} \bullet g}$$

Conviene recordar que, para la aplicación de las fórmulas anteriores, en caso de que el *cuerpo este totalmente sumergido, el*

volumen del cuerpo es igual al volumen de líquido desalojado, y que cuando el cuerpo flota parcialmente en el líquido, el volumen del líquido desalojado es igual solamente al volumen de la parte del cuerpo que se encuentra sumergido (Terán, 2014).

El concepto de empuje nos puede ayudar a *determinar la densidad de un cuerpo sólido* (ρ_{cpo}). Para ello determinamos primero la masa real $\mathbf{m_r}$ del cuerpo con ayuda de una balanza. Después, sumergimos el objeto en un líquido de densidad conocida ($\rho_{liq.c}$), por ejemplo, el agua y determinamos la masa aparente del objeto $\mathbf{m_a}$, la cual será menor que la anterior. De acuerdo al principio de Arquímedes, esta diferencia se debe al empuje del agua, y por lo tanto la diferencia $\mathbf{m_r - m_a}$ es igual a la masa del agua desalojada por el cuerpo.

La densidad del cuerpo está dada por la expresión (Terán, 2014):

$$\boldsymbol{\rho}_{cpo} = \frac{m_r}{(m_r - m_a)} \rho_{liq.c}$$

También podemos *determinar la densidad de un líquido*. Para ello, primero obtenemos la masa aparente $\mathbf{m_a}$ de un cuerpo de masa $\mathbf{m_r}$ sumergido en un líquido de densidad conocida ($\boldsymbol{\rho_{liq.c}}$). La diferencia de masa $\mathbf{(m_r - m_a)}$ es igual a la masa del volumen de líquido desalojado (Terán, 2014).

Volumen total del poro: El volumen total de los poros y el porcentaje de porosidad presente en las muestras de carbón y del carbonizado (González, 2007), se calculan a partir de los valores de densidad real, *real* ρ, y aparente. El volumen total de poros, *VT*, incluye todos los poros con radios inferiores a 12 um detectables por el helio. Este

volumen total, *VT*, se calcula a partir de la siguiente expresión (Ruiz *et al.*, 2001 y Rubiera *et al.*, 1999):

$$V_T(cm^3/g) = \left[\frac{1}{\rho_{aparente}} - \frac{1}{\rho_{real}}\right]$$

Porosidad: La caracterización de la textura de las muestras de carbón implicó la determinación de densidades aparentes respectivamente, y mercurio porosimetría. Las superficies totales de las muestras se determinaron a partir de la densidad real se midió utilizando un picnómetro. Este aparato determina el volumen de la muestra midiendo la presión cambio de un gas sonda en un volumen calibrado (Rubiera et al., 1999).

$$\varepsilon(\%) = \left[1 - \left(\frac{\rho_{aparente}}{\rho_{real}}\right)\right] \times 100$$

3.5. TÉCNICA DE RECOJO, PROCESAMIENTO Y PRESENTACIÓN DE DATOS

Se realizaron 4 repeticiones, (tratamientos experimentales de la carbonización de los residuos de la madera de capirona) en el prototipo del proyecto: Fincyt-Jk Maderas Export.Sac. - UNU, en cada una de ellas se evaluó el porcentaje de humedad asignado para cada vagón que ingresa al horno de carbonización y la determinación del poder calorífico del carbón vegetal obtenido en las condiciones optimizadas en el proceso de carbonización (Pérez, 2020).

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

4.1. CONTENIDO DE HUMEDAD DEL CARBÓN DE CAPIRONA (*Calycophyllum spruceanum* Benth), EN EL PROTOTIPO DEL PROYECTO FINCYT – JB MADERAS EXPORT S.A.

Los resultados del análisis de varianza del contenido de humedad del carbón de capirona (*Calycophyllum spruceanum* Benth), en el prototipo del proyecto FINCYT – JB MADERAS EXPORT S.A.; se estableció que existe diferencias altamente significativas ($P< 0,000$) entre los tratamientos estudiados; con un coeficiente de variabilidad de 2,15% y coeficiente de determinación $R^2= 0,9847$, éste último nos indica que los valores de la variable de respuesta es explicada en un 98,47% por el tratamiento aplicado y el 1,53 por ciento es debido a otros factores que no son controlados por el investigador.

De acuerdo con la tabla 9 y la figura 2, al efectuar la prueba de comparación múltiple de promedios de Tukey ($P<0,05$), se encontró que el T^4 (con 1 m^3 de carbón de Capirona + 40 l de agua), obtuvo el mayor promedio, en relación porcentaje de humedad con 8,31%, siendo este superior al T^3 (con 1 m^3 de carbón de Capirona + 30 l de agua), con un promedio de 6,69%, seguido del T^2 (con 1 m^3 de carbón de Capirona + 20 l de agua), quien presento un promedio de 4,49%, y finalmente el T^1 (con 1 m^3 de carbón de Capirona + 10 l de agua), presentó el menor porcentaje de humedad con 4,63%.

Tabla 9

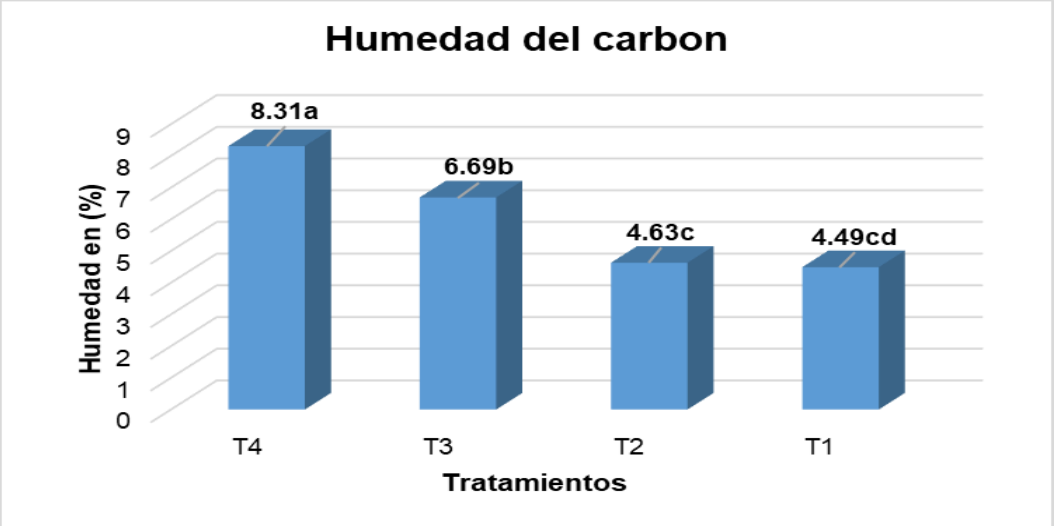
Contenido de humedad del carbón de capirona (Calycophyllum spruceanum Benth), en el prototipo del proyecto FINCYT – JB MADERAS EXPORT S.A. y la significancia según Tukey con una significancia del 5%

Tratamientos	Repeticiones	Humedad (%)	Significancia
T4	4	8,31	A
T3	4	6,69	B
T2	4	4,63	C
T1	4	4,49	Cd

En relación a las diferencias significativas el T^4 (con 1 m^3 de carbón de Capirona + 40 l de agua), presentó diferencias altamente significativas con todos los tratamientos en estudios existiendo diferencias significativas con el T^3 (con 1 m^3 de carbón de Capirona + 30 l de agua), y altamente significativa con el T^2 (con 1 m^3 de carbón de Capirona + 20 l de agua), y el T^1 (con 1 m^3 de carbón de Capirona + 10 l de agua), presentó el menor contenido de humedad con 4,63% y 4,49%.

Figura 2

Comparación del contenido de humedad del carbón de capirona (Calycophyllum spruceanum Benth), en el prototipo del proyecto FINCYT – JB MADERAS EXPORT S.A.



4.2. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL CARBÓN DE CAPIRONA (*Calycophyllum spruceanum* Benth), EN EL PROTOTIPO DEL PROYECTO FINCYT – JB MADERAS EXPORT S.A

4.2.1. Volumen de carbón de capirona (*Calycophyllum spruceanum* Benth), en el prototipo del proyecto FINCYT – JB MADERAS EXPORT S.A

Los resultados del análisis de varianza del volumen del carbón de capirona (*Calycophyllum spruceanum* Benth), en el prototipo del proyecto FINCYT – JB MADERAS EXPORT S.A.; se estableció que existe diferencias altamente significativas (P< 0,000) entre los tratamientos estudiados; con un coeficiente de variabilidad de 1,26% y coeficiente de determinación R^2= 0,9857, éste último nos indica que los valores de la variable de respuesta son explicados en un 98,47% por el tratamiento aplicado y el 1,43 por ciento es debido a otros factores que no son controlados por el investigador.

Tabla 10

Volumen del carbón de capirona (Calycophyllum spruceanum Benth), en el prototipo del proyecto FINCYT – JB MADERAS EXPORT S.A. y la significancia según Tukey con una significancia del 5%

Tratamientos	Repeticiones	Volumen (cm^3).	Significancia
T4	4	54,18	a
T3	4	53,62	b
T2	4	53,23	c
T1	4	51,77	d

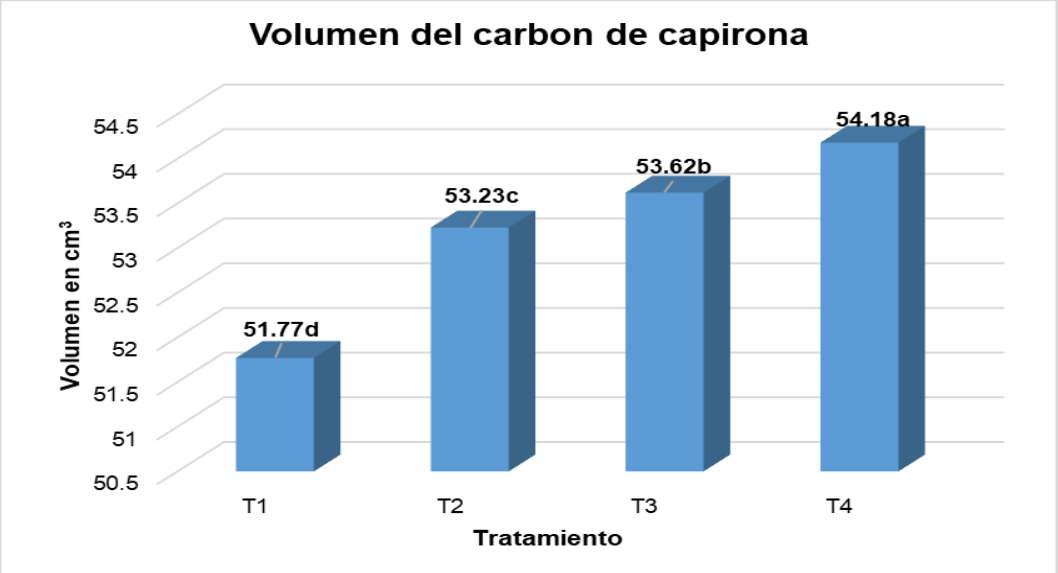
De acuerdo con la tabla 10 y la figura 3, al efectuar la prueba de comparación múltiple de promedios de Tukey (P<0,05), se encontró que

el T^4 (con 1 m^3 de carbón de Capirona + 40 l de agua), obtuvo el mayor promedio, en relación al volumen con 54,18 cm^3, siendo este superior al T^3 (con 1 m^3 de carbón de Capirona + 30 l de agua), con un promedio de 53,62 cm^3, seguido del T^2 (con 1 m^3 de carbón de Capirona + 20 l de agua), quien presentó un promedio de 53,23 cm^3 y finalmente el T^1 (con 1 m^3 de carbón de Capirona + 10 l de agua) presentó el menor volumen con 51,77 cm^3.

En relación a las diferencias significativas el T^1 (con 1 m^3 de carbón de Capirona + 10 l de agua), presentó diferencias altamente significativas con todos los tratamientos en estudios existiendo diferencias significativas con el T^2 (con 1 m^3 de carbón de Capirona + 20 l de agua), y altamente significativa con el T^3 (con 1 m^3 de carbón de Capirona + 30 l de agua), y el T^4 (con 1 m^3 de carbón de Capirona + 40 l de agua), presentó en mayor contenido de humedad con 51,77 cm^3.

Figura 3

Volumen del carbón de capirona (Calycophyllum spruceanum Benth), en el prototipo del proyecto FINCYT – JB MADERAS EXPORT S.A.



4.2.2. Densidad real del carbón de capirona (*Calycophyllum spruceanum* Benth), en el prototipo del proyecto FINCYT – JB MADERAS EXPORT S.A

Los resultados del análisis de varianza de la densidad del carbón de capirona (*Calycophyllum spruceanum* Benth), en el prototipo del proyecto FINCYT – JB MADERAS EXPORT S.A.; se estableció que existe diferencias altamente significativas (P< 0,000) entre los tratamientos estudiados; con un coeficiente de variabilidad de 1,36% y coeficiente de determinación R^2= 0,9850, éste último nos indica que el valor de la variable de respuesta se explica en un 98,50% por el tratamiento aplicado y el 1,5 por ciento es debido a otros factores que no son controlados por el investigador.

Tabla 11

Muestra densidad real, prueba de promedio de Tukey con una significancia del 5%, de la densidad en el carbón de capirona (Calycophyllum spruceanum Benth), en el prototipo del proyecto FINCYT – JB MADERAS EXPORT S.A.

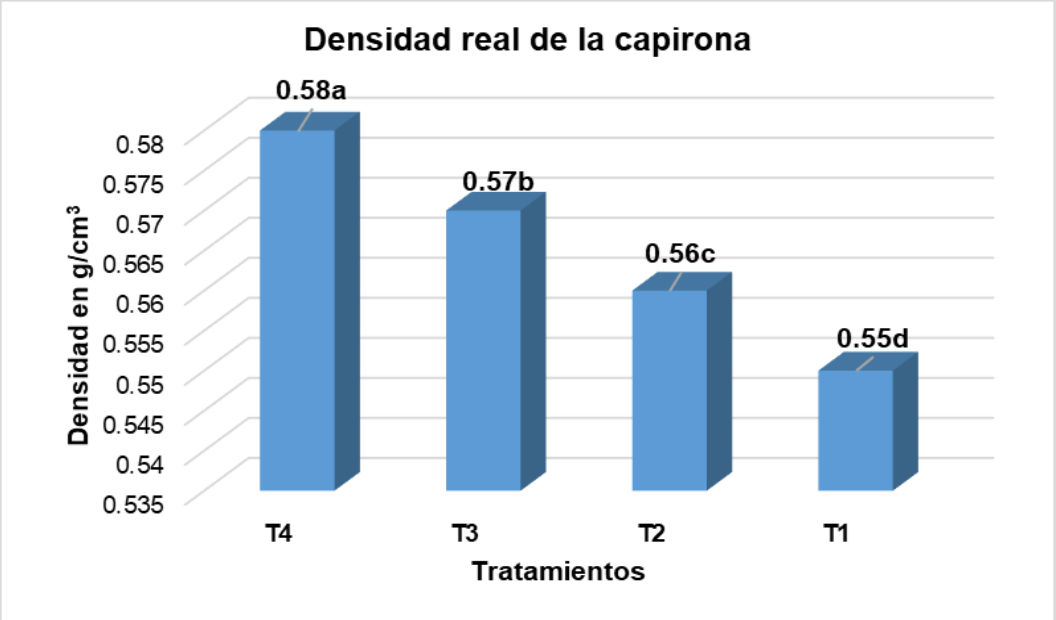
Tratamientos	Repeticiones	Densidad (g/cm^3)	Significancia
T4	4	0,58	A
T3	4	0,57	B
T2	4	0,56	C
T1	4	0,55	d

De acuerdo con la tabla 11 y la figura 4, al efectuar la prueba de comparación múltiple de promedios de Tukey (P<0,05), se encontró que el T^4 (con 1 m^3 de carbón de Capirona + 40 l de agua), presentó en la mayor densidad con un promedio de 0,58 g/cm^3, seguido del T^3 (con 1 m^3

de carbón de Capirona + 30 l de agua) y el T^2 (con 1 m^3 de carbón de Capirona + 20 l de agua), quienes presentaron un promedio de 0,57 g/cm^3 y 0,56 g/cm^3, y finalmente el T^1 (con 1 m^3 de carbón de Capirona + 10 l de agua), presentó la menor densidad con un promedio de 0,55 g/cm^3.

Figura 4

Densidad real del carbón de capirona (Calycophyllum spruceanum Benth), en el prototipo del proyecto FINCYT – JB MADERAS EXPORT S.A.



4.2.3. Densidad aparente del carbón de capirona (*Calycophyllum spruceanum* Benth), en el prototipo del proyecto FINCYT – JB MADERAS EXPORT S.A

Los resultados del análisis de varianza de la densidad del carbón de capirona (*Calycophyllum spruceanum* Benth), en el prototipo del proyecto FINCYT – JK MADERAS EXPORT S.A.; se estableció que existe diferencias altamente significativas (P< 0,000) entre los tratamientos estudiados; con un coeficiente de variabilidad de 1,03% y coeficiente de determinación R^2= 0,9969, éste último nos indica que los valores de la

variable de respuesta es explicada en un 99,69% por el tratamiento aplicado y el 0,31 por ciento es debido a otros factores que no son controlados por el investigador.

Tabla 12

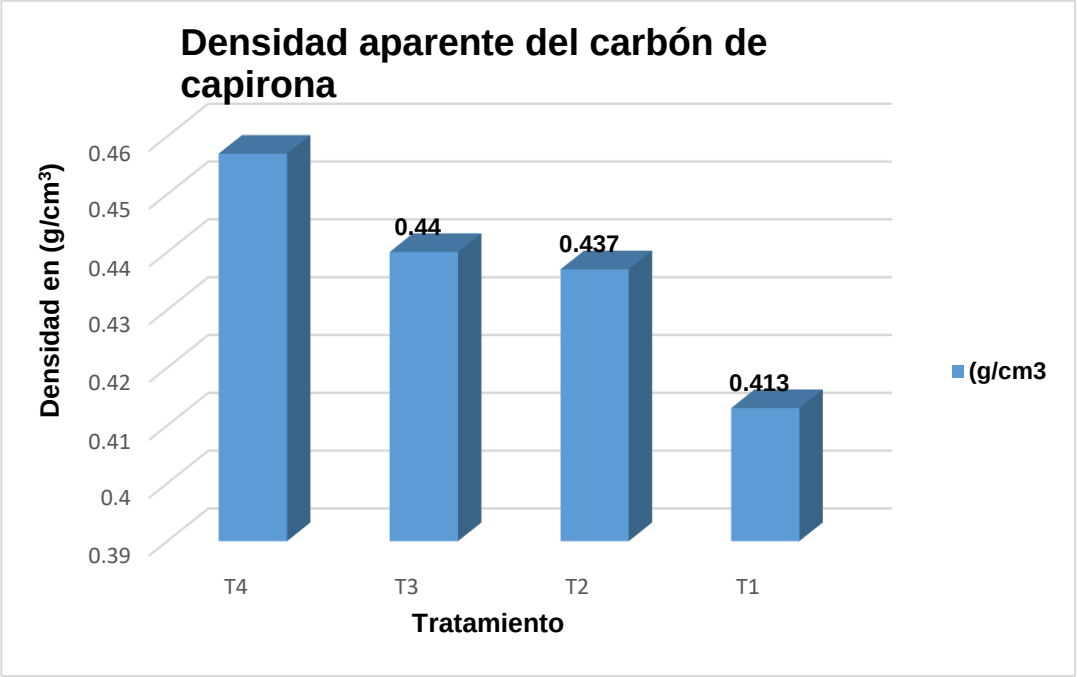
Muestra densidad aparente, prueba de promedio de Tukey con una significancia del 5%, de la densidad en el carbón de capirona (Calycophyllum spruceanum Benth), en el prototipo del proyecto FINCYT – JB MADERAS EXPORT S.A.

Tratamientos	Repeticiones	Densidad aparente en (g/cm^3).	Significancia
T4	4	0,457	a
T3	4	0,440	b
T2	4	0,437	c
T1	4	0,413	d

De acuerdo con la tabla 12 y la figura 5, al efectuar la prueba de comparación múltiple de promedios de Tukey (P<0,05), se encontró que el T^4 (con 1 m^3 de carbón de Capirona + 40 l de agua), presento la mayor densidad aparente con un promedio de 0,457 g/cm^3, seguido del T^3 (con 1 m^3 de carbón de Capirona + 30 l de agua) y el T^2 (con 1 m^3 de carbón de Capirona + 20 l de agua), quienes presentaron un promedio de 0,440 g/cm^3 y 0,437 g/cm^3, y finalmente el T^1 (con 1 m^3 de carbón de Capirona + 10 l de agua), presentó la menor densidad aparente con un promedio de 0,413 g/cm^3.

Figura 5

Densidad aparente del carbón de capirona (Calycophyllum spruceanum Benth), en el prototipo del proyecto FINCYT – JB MADERAS EXPORT S.A.



El porcentaje de porosidad del carbón de capirona (*Calycophyllum spruceanum* Benth), en el prototipo del proyecto FINCYT – JB MADERAS EXPORT S.A.

Los resultados del análisis de varianza del porcentaje de porosidad del carbón de capirona (*Calycophyllum spruceanum* Benth), en el prototipo del proyecto FINCYT – JK MADERAS EXPORT S.A.; se estableció que existe diferencias altamente significativas (P< 0,000) entre los tratamientos estudiados; con un coeficiente de variabilidad de 2,52% y coeficiente de determinación R^2= 0,9838, éste último nos indica que los valores de la variable de respuesta es explicada en un 98,38% por el tratamiento aplicado y el 1,62 por ciento es debido a otros factores que no son controlados por el investigador.

Tabla 13

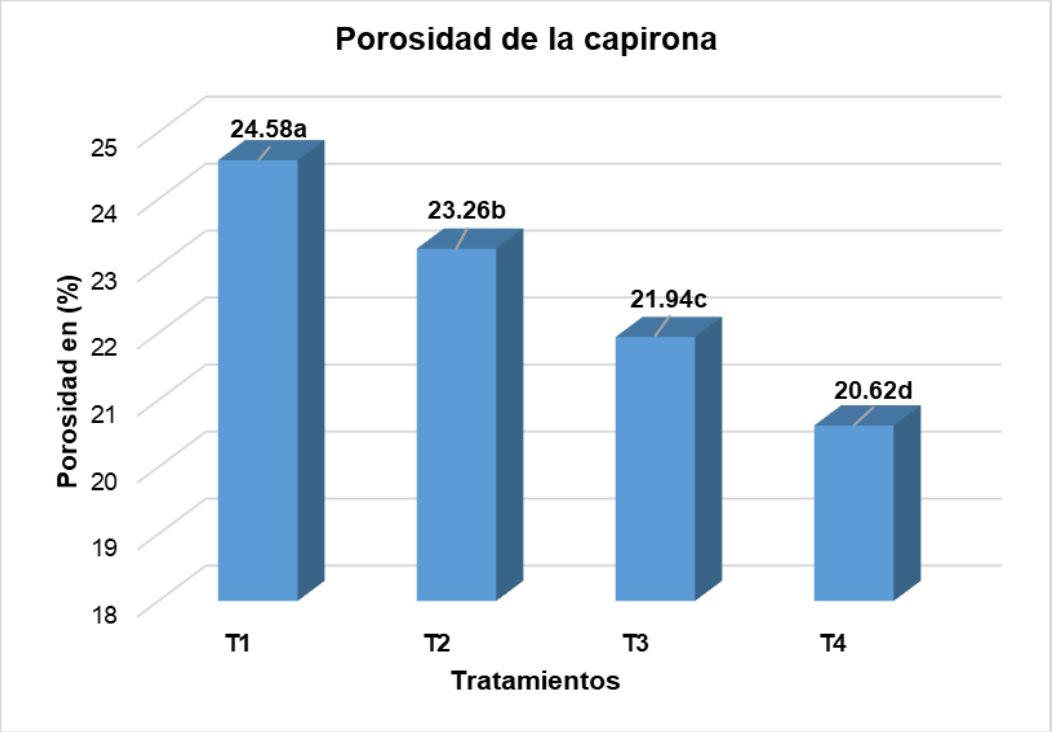
Muestra prueba de promedio de Tukey con una significancia del 5%, del porcentaje de porosidad del carbón de capirona (Calycophyllum spruceanum Benth), en el prototipo del proyecto FINCYT – JB MADERAS EXPORT S.A.

Tratamientos	Repeticiones	Porosidad en (%)	Significancia
T1	4	24,58	A
T2	4	23,26	B
T3	4	21,94	C
T4	4	20,62	d

De acuerdo con la tabla 13 y la figura 6, al efectuar la prueba de comparación múltiple de promedios de Tukey (P<0,05), se encontró que el T^1 (con 1 m^3 de carbón de Capirona + 10 l de agua), presentó el mayor porcentaje de porosidad con un promedio de 24,58%, seguido del T^3 (con 1 m^3 de carbón de Capirona + 30 l de agua) y el T^2 (con 1 m^3 de carbón de Capirona + 20 l de agua), quienes presentaron un porcentaje de porosidad con un promedio de 23,26% y 21,94%, y finalmente el T^4 (con 1 m^3 de capirona de Capirona + 40 l de agua), presentó el menor porcentaje de porosidad con un promedio de 20,62%.

Figura 6

Porcentaje de porosidad del carbón de capirona (Calycophyllum spruceanum Benth), en el prototipo del proyecto FINCYT – JB MADERAS EXPORT S.A.



4.2.4. El volumen total de los poros del carbón de capirona (*Calycophyllum spruceanum* Benth), en el prototipo del proyecto FINCYT– JB MADERAS EXPORT S.A.

Los resultados del análisis de varianza del volumen total de los poros del carbón de capirona (*Calycophyllum spruceanum* Benth), en el prototipo del proyecto FINCYT – JB MADERAS EXPORT S.A.; se estableció que existe diferencias altamente significativas (P< 0,000) entre los tratamientos estudiados; con un coeficiente de variabilidad de 0,65% y coeficiente de determinación R^2= 0,9908, éste último nos indica que los valores de la variable de respuesta es explicada en un 99,08% por el tratamiento aplicado y el 0,92 por ciento es debido a otros factores que no son controlados por el investigador.

Tabla 14

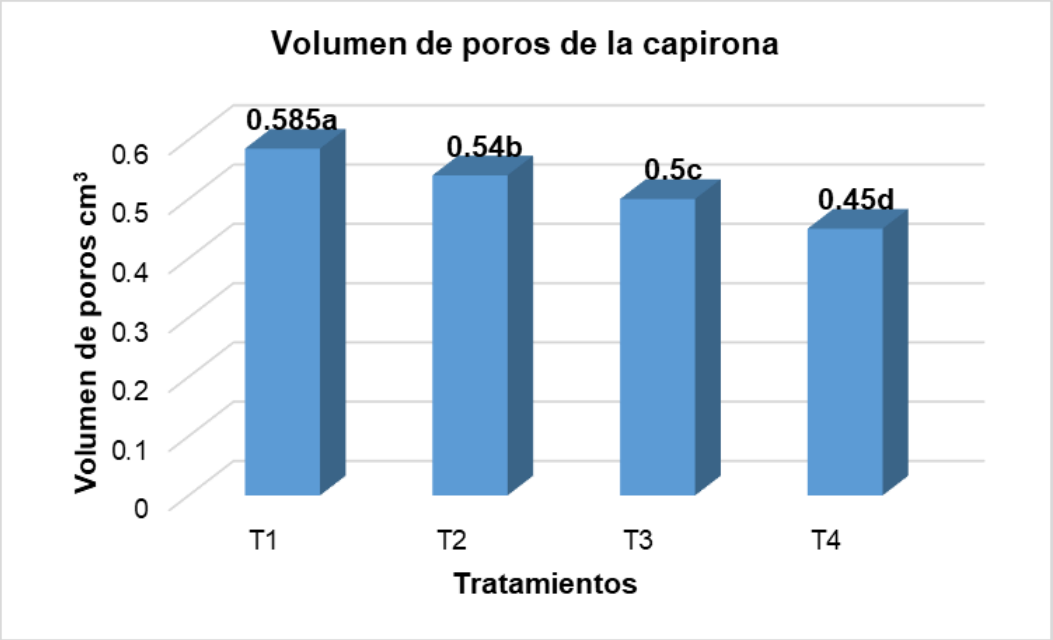
Muestra prueba de promedio de Tukey con una significancia del 5%, del volumen total de los poros del carbón de capirona (Calycophyllum spruceanum Benth), en el prototipo del proyecto FINCYT – JB MADERAS EXPORT S.A.

Tratamientos	Repeticiones	Volumen total de los poros en (cm^3/g).	Significancia
T1	4	0,585	A
T2	4	0,54	B
T3	4	0,50	C
T4	4	0,45	d

De acuerdo con la tabla 14 y la figura 6, al efectuar la prueba de comparación múltiple de promedios de Tukey (P<0,05), se encontró que el T^1 (con 1 m^3 de carbón de Capirona + 10 l de agua), presento el mayor volumen total de los poros con un promedio de 0,58 cm^3/g, seguido del T^3 (con 1 m^3 de carbón de Capirona + 30 l de agua) y el T^2 (con 1 m^3 de carbón de Capirona + 20 l de agua), quienes presentaron un volumen total de los poros con un promedio de 0,54 cm^3/g y 0,50 cm^3, y finalmente el T^4 (con 1 m^3 de carbón de Capirona + 40 l de agua), presentó el menor volumen total de los poros con un promedio de 0,45 cm^3.

Figura 7

Volumen total de los poros del carbón de capirona (Calycophyllum spruceanum Benth), en el prototipo del proyecto FINCYT – JB MADERAS EXPORT S.A.



4.3. NIVEL DE RELACIÓN ENTRE LOS FACTORES RELACIONADOS A LA DENSIDAD DEL CARBÓN VEGETAL, EN CAPIRONA (*Calycophyllum spruceanum* benth), EN UCAYALI

4.3.1. Nivel de relación entre la humedad y el volumen del carbón vegetal en capirona (*Calycophyllum spruceanum benth*)

Para determinar el nivel de relación entre la humedad y el volumen del carbón vegetal en capirona se describe en la siguiente tabla.

Tabla 15

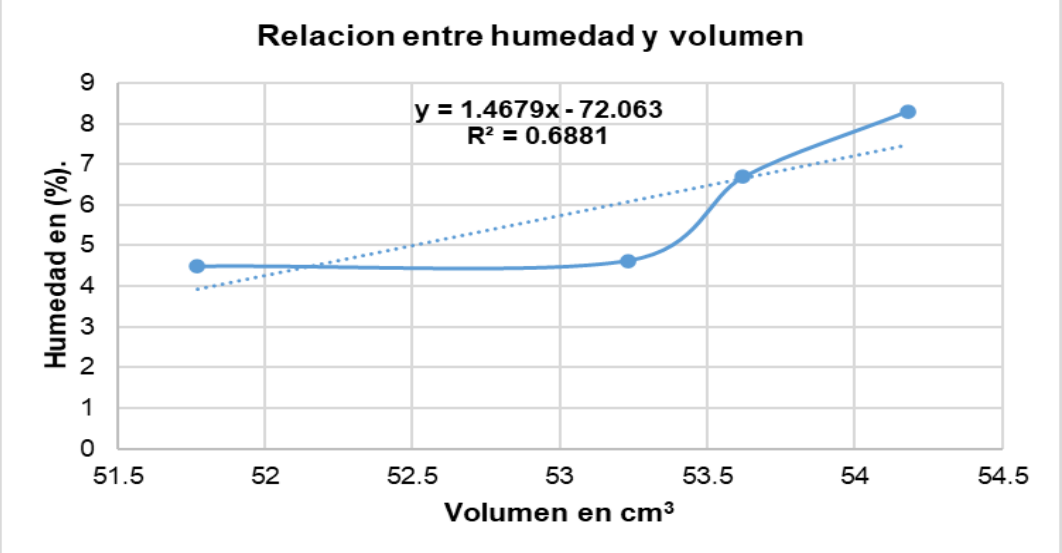
Promedio de la humedad y el volumen del carbón vegetal en capirona (Calycophyllum spruceanum benth), en Ucayali

Tratamientos	Repeticiones	Humedad (%)	Volumen en (cm^3)
T4	4	8,31	54,18
T3	4	6,69	53,62
T2	4	4,63	53,23
T1	4	4,49	51,77

Sometida los datos entre la humedad y el volumen en capirona (*Calycophyllum spruceanum* Benth), a una ecuación de regresión de estas dos variables, se determinó que existe un coeficiente de determinación R^2= 0,6881 entre ambas variables, éste último nos indica que el valor de las variables de respuesta es explicada en 68,81% por el tratamiento aplicado y el 31,19% por ciento es debido a otros factores, tal como se observa en la siguiente figura, la ecuación que mejor se ajusta a este modelo es y = 1,4679x – 72,063.

Figura 8

Diagrama de dispersión de la humedad y el volumen del carbón en la capirona (Calycophyllum spruceanum Benth), en Ucayali



Sometida los datos de la humedad y el volumen de la capirona (*Calycophyllum spruceanum* Benth), a un análisis correlacional de estas dos variables, se determinó que existe una correlación altamente significativa e inversa obtuvo un valor S = 0,00 > 0,05 se rechaza la hipótesis nula y se acepta la de investigación entre el poder la humedad y el volumen, donde se obtuvo un valor de 82,95, tal como se observa en la tabla 15, estos datos nos indican que, a mayor contenido de humedad, existe un incremento significativo del volumen.

4.3.2. Nivel de relación entre la humedad y densidad real del carbón vegetal en capirona (*Calycophyllum spruceanum* Benth)

Para determinar el nivel de relación entre la humedad y el volumen del carbón vegetal en capirona se describe en la siguiente tabla:

Tabla 16

Muestra promedio de la humedad y la densidad real del carbón vegetal en capirona (Calycophyllum spruceanum Benth), en Ucayali

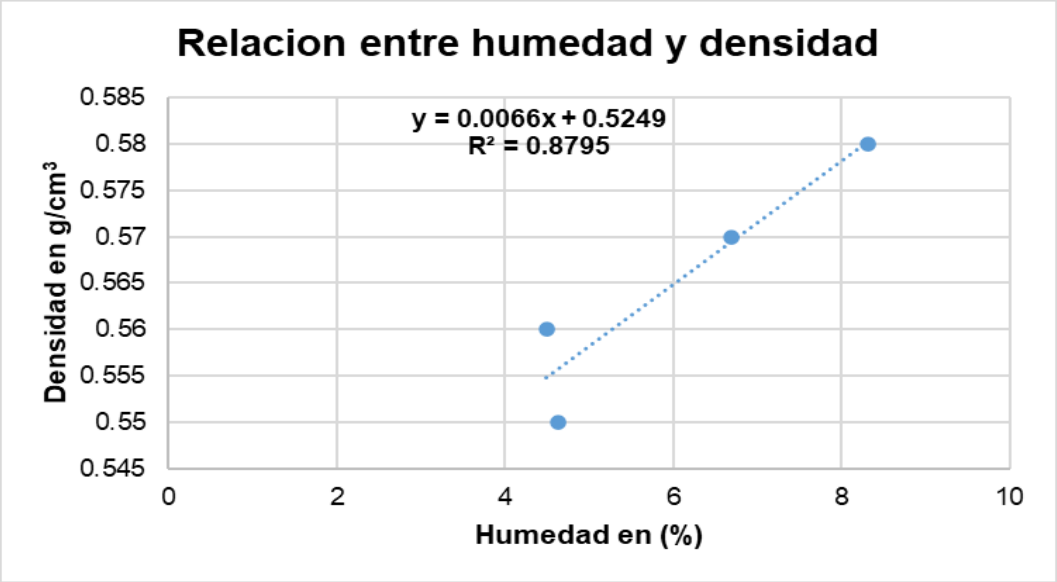
Tratamientos	Repeticiones	Humedad (%)	Densidad real en (g/cm^3)
T1	4	4,63	0,55
T2	4	4,49	0,56
T3	4	6,69	0,57
T4	4	8,31	0,58

Sometida los datos entre la humedad y el volumen en capirona (*Calycophyllum spruceanum* benth), a una ecuación de regresión de estas dos variables, se determinó que existe un coeficiente de determinación R^2= 0,8795 entre ambas variables, éste último nos indica que los valores de las variables de respuesta son explicados en 90,90% por el tratamiento

aplicado y el 12,05% por ciento es debido a otros factores, tal como se observa en la siguiente figura, la ecuación que mejor se ajusta a este modelo es y = 0,0066x + 0,5249.

Figura 9

Muestra línea de regresión y correlación entre la humedad y la densidad real del carbón vegetal y el material volátil en capirona (Calycophyllum spruceanum Benth)



Sometida los datos de la humedad y el volumen de la capirona (*Calycophyllum spruceanum* Benth), a un análisis armonizar de estas dos variables, se determinó que existe una correlación altamente significativa obtuvo un valor S = 0,00 > 0,05 se rechaza la hipótesis nula y se acepta la de investigación entre el poder la humedad y el volumen, donde se obtuvo un valor de 0,9534, tal como se observa en la tabla 16, estos datos nos indican que, a mayor contenido de humedad, existe un incremento significativo de la densidad.

4.3.3. Nivel de relación entre la humedad y densidad aparente del carbón vegetal en capirona (*Calycophyllum spruceanum Benth*).

Para determinar el nivel de relación entre la humedad y la densidad aparente del carbón vegetal en capirona se describe en la siguiente tabla:

Tabla 17

Muestra promedio de la densidad aparente y el poder calorífico del carbón vegetal en capirona (Calycophyllum spruceanum Benth), en Ucayali

Tratamientos	Repeticiones	Humedad (%)	Densidad aparente en (g/cm^3)
T1	4	4,63	0,413
T2	4	4,49	0,437
T3	4	6,69	0,440
T4	4	8,31	0,457

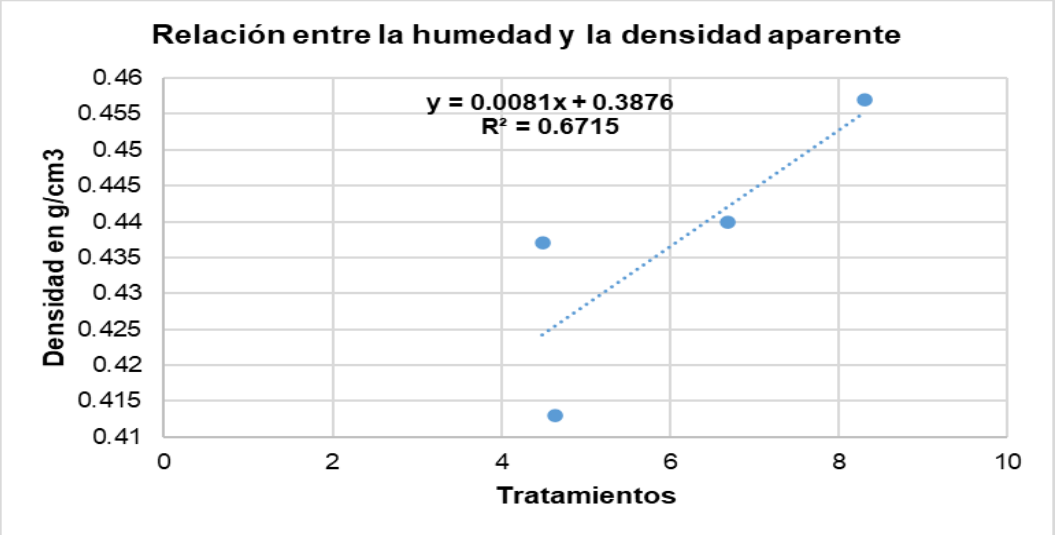
Sometida los datos entre la densidad y el poder calorífico en capirona (*Calycophyllum spruceanum Benth*), a una ecuación de regresión de estas dos variables, se determinó que existe un coeficiente de determinación R^2= 0,6715 entre ambas variables, éste último nos indica que los valores de las variables de respuesta es explicada en 67,15% por el tratamiento aplicado y el 32,85% por ciento es debido a otros factores, tal como se observa en la siguiente figura, la ecuación que mejor se ajusta a este modelo es y = 0,0081x + 0,3876.

Sometida los datos de la humedad y la densidad aparente poder calorífico de la capirona (*Calycophyllum spruceanum Benth*), a un análisis armonizar de estas dos variables, se determinó que existe una correlación altamente significativa e inversa y obtuvo un valor S = 0,00 >

0,05 se rechaza la hipótesis nula y se acepta la de investigación entre la humedad y densidad aparente, donde se obtuvo un valor de 0,861, tal como se observa en la tabla 17, estos datos nos indican que, a mayor contenido de humedad, existe un incremento significativo de la densidad aparente.

Figura 10

Muestra línea de regresión y correlación entre la humedad y la densidad aparente del carbón vegetal en capirona (Calycophyllum spruceanum Benth), en Ucayali



4.3.4. Nivel de relación entre la humedad y la porosidad del carbón vegetal en capirona (*Calycophyllum spruceanum* Benth)

Para determinar el nivel de relación entre la humedad y la porosidad del carbón vegetal en capirona se describe en la siguiente tabla:

Tabla 18

Muestra promedio de la porosidad en porcentaje y el poder calorífico del carbón vegetal en capirona (Calycophyllum spruceanum Benth), en Ucayali

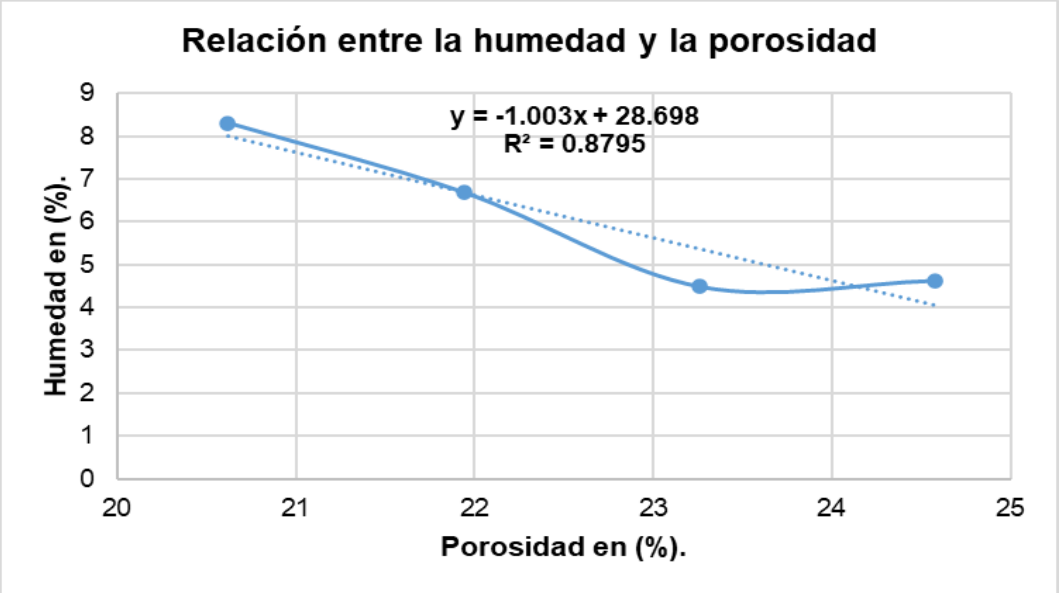
Tratamientos	Repeticiones	Humedad (%)	Porosidad en (%)
T1	4	4,63	24,58
T2	4	4,49	23,26
T3	4	6,69	21,94
T4	4	8,31	20,62

Sometida los datos entre la humedad y la porosidad en capirona (*Calycophyllum spruceanum* Benth), a una ecuación de regresión de estas dos variables, se determinó que existe un coeficiente de determinación R^2= 0,8795 entre ambas variables, éste último nos indica que los valores de las variables de respuesta es explicada en 87,95% por el tratamiento aplicado y el 12,05% por ciento es debido a otros factores, tal como se observa en la siguiente figura, la ecuación que mejor se ajusta a este modelo es y = -1,003x + 28,698.

Sometida los datos de la humedad y la densidad aparente poder calorífico de la capirona (*Calycophyllum spruceanum* Benth), a un análisis armonizar de estas dos variables, se determinó que existe una correlación altamente significativa e inversa y obtuvo un valor S = 0,004 > 0,05 se rechaza la hipótesis nula y se acepta la de investigación entre la humedad y densidad aparente, donde se obtuvo un valor de 0,681, tal como se observa en la tabla 18, estos datos nos indican que, a mayor contenido de humedad, existe una disminución significativa de la porosidad del carbón vegetal.

Figura 11

Muestra línea de regresión y correlación entre la humedad y la porosidad del carbón vegetal en capirona (Calycophyllum spruceanum Benth), en Ucayali



4.3.4. Nivel de relación entre la humedad y el volumen total de la porosidad del carbón vegetal en capirona (*Calycophyllum spruceanum* Benth)

Sometida los datos entre la humedad y el volumen total de la porosidad en el carbón vegetal de capirona (*Calycophyllum spruceanum* Benth), a una ecuación de regresión de estas dos variables, se determinó que existe un coeficiente de determinación R^2= 0,8780 entre ambas variables, éste último nos indica que los valores de las variables de respuesta es explicada en 87,80% por el tratamiento aplicado y el 12,20% por ciento es debido a otros factores, tal como se observa en el siguiente gráfico, la ecuación que mejor se ajusta a este modelo es y = -29,701x + 21,438.

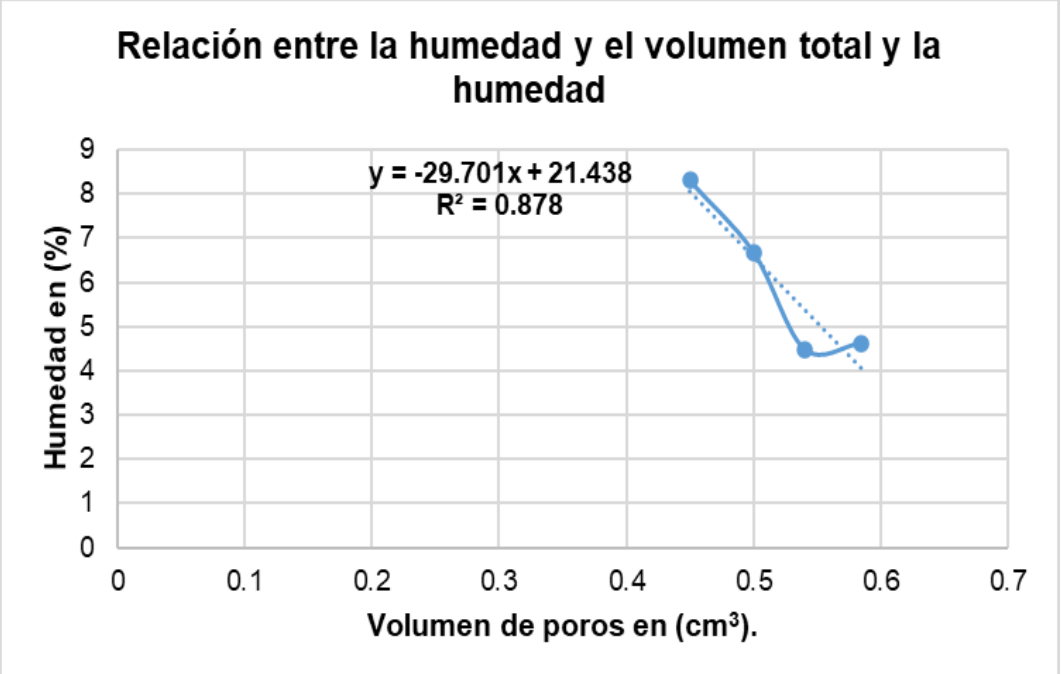
Tabla 19

Muestra prueba de promedio de Tukey con una significancia del 5%, del volumen total de los poros del carbón de capirona (Calycophyllum spruceanum Benth), en el prototipo del proyecto FINCYT – JB MADERAS EXPORT S.A.

Tratamientos	Repeticiones	Humedad (%)	Volumen total de los poros en (cm^3)
T1	4	4,63	0,585
T2	4	4,49	0,54
T3	4	6,69	0,50
T4	4	8,31	0,45

Figura 12

Muestra línea de regresión y correlación entre la humedad y el volumen total de la porosidad del carbón vegetal en capirona (Calycophyllum spruceanum Benth), en Ucayali



Sometida los datos de la humedad y el volumen total de la porosidad de la capirona (*Calycophyllum spruceanum* Benth), a un análisis armonizar de estas dos variables, se determinó que existe una

correlación altamente significativa e inversa y obtuvo un valor S = 0,001 > 0,05 se rechaza la hipótesis nula y se acepta la de investigación entre la humedad y densidad aparente, donde se obtuvo un valor de 0,735, tal como se observa en la **tabla 14**, estos datos nos indican que, a mayor contenido de humedad, existe una disminución significativa de la porosidad del carbón vegetal.

CAPÍTULO V

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En relación a los resultados del “Efecto del contenido de humedad de carga en los residuos de madera aserrada de capirona (*Calycophyllum spruceanum* Benth); con la porosidad del carbón vegetal producido en el prototipo del proyecto FINCYT – JB MADERAS EXPORT S.A – UNU, Departamento de Ucayali 2017”, se arribó a lo siguiente.

En relación al porcentaje de humedad se encontró que el T^1 (con 1 m^3 de residuo de Capirona + 10 l de agua), obtuvo el mayor promedio, en relación porcentaje de humedad con 8,31%, siendo este superior al T^2 (con 1 m^3 de residuo de Capirona + 20 l de agua), con un promedio de 6,69%, y una correlación altamente significativa e inversa y obtuvo un valor S = 0,00 > 0,05 se rechaza la hipótesis nula y se acepta la de investigación entre el poder la humedad y el volumen, donde se obtuvo un valor de – 0,865, poder calorífico del carbón vegetal y el porcentaje de humedad en capirona (*Calycophyllum spruceanum* Benth), a un análisis correlacionar de estas dos variables, se determinó que existe una correlación altamente significativa e inversa entre el poder calorífico del carbón vegetal y el porcentaje de humedad, donde se obtuvo un valor de –0,9013 En relación a la humedad el T 1 con 1 m^3 de residuo de Capirona + 10 l de agua, se obtuvo en promedio 4,63% de humedad, El T2 con 1 m^3 de residuo de Capirona + 20 l de agua, obtuvo como resultado 4,87%, El T3 con 1 m^3 de residuo de Capirona + 30 l de agua, obtuvo como resultado 6,68%, y finalmente el T 4 con 1 m^3 de residuo de Capirona + 40 l de agua, quien obtuvo 8,29% respectivamente (Pérez, 2020).

En relación a la porosidad en términos generales, al comparar los tres carbones, los carbonizados procedentes del carbón de El Cerrejón tienen los valores más altos de porosidad, mientras que los de la mina La Yolanda, los más bajos. Esto sugiere que hay relación entre la porosidad de los carbonizados y el rango del carbón, es decir, que a mayor rango de este se desarrolla menos porosidad respecto de otro de menor rango. En los carbonizados de los tres carbones originales se encontró que la porosidad y el volumen total de poro se reducen al aumentar la temperatura y el tiempo de desvolatilización. Además, que la porosidad y el volumen total de poro disminuyen al aumentar el rango del carbón original sin tratar, donde se encontró un porcentaje de porosidad, que fluctuó entre el 50% y el 54,5%, mientras que el volumen total del poro se encontraba entre el 0,70 y el 0,83 cm^3/g de carbón (González y Burgos, 2007). Estos datos son similares a los encontrados en el presente trabajo de investigación donde la porosidad estuvo por debajo del 25% y el volumen total del poro se encontró por debajo o igual al 0,61 cm^3/g de carbón.

El carbón vegetal para ser considerado de buena calidad para uso doméstico, debe tener baja humedad, bajo contenido de material volátil. Vela y Panduro (2010), menciona que al realizar la determinación de contenido de humedad del carbón de la madera del genero Dypterix (shihuahuaco) en un horno colmena brasilero, encontró que el contenido de humedad era de 3,47%, mientras la materia volátil fue de 4,15%. Estos datos tienen mucha relación con los resultados obtenidos del T^2 con 4,87 y el T^1 con 4,63% de material volátil, mientras que el contenido de humedad en ambos tratamientos es relativamente más alto (Pérez, 2019). Panduro (2012) de 1,25% con Jacaranda copaia (Aubl.) D. Don y parecidos con Septotheca tessmannii Ulbr con 6,45% (Pérez, 2020). Indicando que la humedad depende básicamente de la temperatura final de

carbonización y la humedad del ambiente en el que está expuesto el carbón (Pérez, 2019).

En cuanto a la densidad se encontró que el T^4 (con 1 m^3 de carbón de Capirona + 40 l de agua), presento la mayor densidad con un promedio de 0.58 g/cm^3, aspectos como la densidad de la madera tienen implicaciones diversas, entre las que se encuentran: las aplicaciones en la industria maderera, la mejora genética en plantaciones forestales, la captura de carbono y su eficiencia como biocombustible. Por lo anterior, es recomendable abordar el estudio de las características de la madera mediante estudios de caso tanto para plantaciones forestales como ambientes naturales, se determinó densidades entre los 0,35 y 0,8 g/cm^3 (Ordóñez et al., 2015). El tratamiento con mayor densidad en el carbón lo presenta el producido con troza- seca, seguido del carbón de aserrada-húmeda y el carbón de troza húmeda, sus valores se encontraron entre 0,27 y 0,47 g/cm^3. Respecto a los carbones comerciales se obtuvo que para el carbón X y carbón Y no presentaron diferencias significativas en el CH ni en la densidad, pero la densidad de los carbones de teca (tratamientos) si es diferente significativamente respecto a los carbones comerciales (Berrocal, 2019). Determinó una densidad aparente de 0,59 y 0,46 g/cm^3 en el carbón vegetal. El contenido de humedad varío entre 4,16 a 6,13%, la densidad entre 0,27 a 0,47 g/cm^3 (Berrocal, 2019).

CONCLUSIONES

En relación a los resultados sobre el “Efecto del contenido de humedad de carga en los residuos de madera aserrada de capirona (*Calycophyllum spruceanum* Benth) T1.- Vagón 1 con 1 m^3 de carbón de capirona + 10 litros de agua, T2.- Vagón 2 con 1 m^3 de carbón de capirona + 20 litros de agua, T3. Vagón 3 con 1 m^3 de carbón de capirona + 30 litros de agua, T4.- Vagón 4 con 1 m^3 de carbón de capirona + 40 litros de agua; en la humedad y porosidad del carbón vegetal producido en el prototipo del proyecto FINCYT – JB MADERAS EXPORT S.A – UNU, Departamento de Ucayali 2017”. Se llegaron a las siguientes conclusiones.

Hubo diferencias significativas entre los tratamientos en cuanto al contenido de humedad y porosidad en el carbón de capirona y que según la prueba de Tukey al 5% de significación se encontró que:

- A mayor contenido de humedad de la carga en la carbonización, mayor porcentaje de humedad en el carbón, mayor volumen del carbón, mayor densidad real del carbón, mayor densidad aparente del carbón destacando en mayor el T4 con valores de 8.31%, 54,18 cm^3, 0.58 g/cm^3, 0.457 g/cm^3, con relación a los demás tratamientos y al T1 que tuvo que tuvo valores más bajos de 4,49%, 51.77 cm^3, 0.55 g/cm^3, 0.413 g/cm^3 con respecto a las variables indicadas respectivamente.

- A menor contenido de humedad de carga de horno, mayor porcentaje de porosidad del carbón y mayor volumen de porosidad del carbón con valores en T1 de 24.58% y 0.585cm^3/g, y menores valores en los demás tratamientos siendo el más bajo en T4 de

20.62% y 0.45cm^3/g con respecto a las variables indicadas respectivamente.

- A mayor porcentaje de humedad del carbón mayor volumen del carbón; a mayor densidad aparente mayor densidad real; a mayor humedad mayor densidad del carbón, a mayor humedad menor pososidad, a mayor humedad menor volumen total de Poros del carbón.

- A menor humedad de carga de la carbonización mayor porosidad y más bajo contenido de material volátil por lo tanto un carbón de mejor calidad.

SUGERENCIAS

En relación a los resultados, del estudio se sugiere:

- Elaboración de un carbón vegetal de capirona con características físicas superiores de menor humedad y mayor porosidad, amigables con el medio ambiente por contener menos material volátil, como lo obtenido con el T1 (1 m^3 de carbón de Capirona + 10 l de agua) en el prototipo del proyecto FINCYT – JB MADERAS EXPORT S.A – UNU.

- A los carboneros artesanales e informales y a las autoridades se les debe dar a conocer los resultados este experimento para mejorar la tecnología de elaboración del carbón vegetal especialmente los que utilizan los residuos de los aserraderos con el objetivo de tener menos emisiones de gases al carbonizar y carbón con mejor calidad y menor contaminación al medio ambiente. Así mismo si se desea mantener las características de calidad del carbón vegetal se recomienda almacenarlo en condiciones de baja humedad, temperatura media, en sacos limpios, en ambiente techados ya que se encontró que las condiciones ambientales de mayor humedad disminuyen las calidades del carbón vegetal.

- Seguir realizando más ensayos y pruebas en la elaboración y obtención de carbón vegetal en diferentes especies forestales con diferentes contenidos de humedad y su efecto en la porosidad con el prototipo del proyecto: FINCYT-JB Maderas Export S.A. – UNU.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A La Torre Martínez, E. (1992). *Elaboración de carbón en hornos de Mampostería* Amatepec, México.

Aguinelio, G.; Batista, D. O. (1980). *"Uso de madeira para fins energéticos, teoríada carbonización da madeira"*. Serie publicaciones técnicas. Fundacao Centro Tecnológico de Minas Gerais/ CETEC. Belo Horizonte. Pp 29 – 47.

Alonso, J. (2013). Propiedades físicas: densidad y porosidad.

Andrade, F. W. C., Tomazello Filho, M., & Moutinho, V. H. P. (2018). Influence of wood physical properties on charcoal from Eucalyptus spp. Floresta e Ambiente.

Antal, M. J. Gronli, M. (2003). The Art. Science, and Technology of Charcoal Production. Industrial and Engineering Chemistry Research, 42 (8).

Batalla, M. D., Asencios, A. G., Yepes, D. S., & Mora, E. G. (2010). El carbón vegetal: alternativa de energía y productos químicos. Xilema, 23(1), 95-103.

Beall, F. (1970). *Thermal degration of wood components.* U.S. Department of agriculture. Madison, Wis. 26 p.

Berrocal Méndez, N. S. (2019). Producción de carbón vegetal a partir de residuos de *Tectona grandis* L.f, manufacturado por Ecobosques, San Joaquín de Cutris, San Carlos, Alajuela, Costa Rica. Obtenido de: https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/10856/TGF_Nadya_Berrocal_M%C3%A9ndez.pdf?sequence=6&isAllowed=y

Briane, D., Doat, J. (1985). *Guide Technique de la carbonisation. La fabrication da charbon de bois.* Agence Francaice pour la Maitrise de L'Energie

Association Bois de feu – Centre Technique Forestier Tropical. France. 180 p.

Costa, L. J. (2020). Relação água-carvão vegetal de eucalipto produzido em diferentes temperaturas.

Cruz Montelongo, C. D. L., Herrera Gamboa, J., Ortiz Sánchez, I. A., Ríos Saucedo, J. C., Rosales Serna, R., & Carrillo-Parra, A. (2020). Caracterización energética del carbón vegetal producido en el Norte-Centro de México. Madera y bosques, 26(2).

Cuero, V., & Lucero, M. (2020). Combustión de carbón vegetal, enemigo latente del medio ambiente. Sabia: Revista científica. Edición No 6 Año 2020, 6(1), 171-175.

Da Costa Pinheiro, P. C. (2018). La producción del carbón vegetal.

De Bedia, G. (2018). Carbón de Madera Santiagueño: sus usos y calidad. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria-EEA Santiago del Estero.

Dufoumy, A., Van De Steene, L., Humbert, G., Guibal, D., Martin, L., & Blin, J. (2019). Influence of pyrolysis conditions and the nature of the wood on the quality of charcoal as a reducing agent. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 137, 1-13.

Earl, D. (1975). Informe sobre el carbón vegetal. Roma, FAO. 94 p.

FAO. (s.f.). *Métodos simples para fabricar carbón vegetal.* Departamento Montes, capítulo 4. www.fao.org/3/a-x5328s/X5328S07.htm

FAO. (1983). *Métodos simples para fabricar carbón vegetal.* Dirección de Recursos Forestales, Departamento de Montes. FAO - Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, Italia.

Gauna, J. M., Raffaeli, N., Tonello, M. L., Harrand, L., Mastrandrea, C. A., Martinez, M. S., & Barotto, J. (2022). Potencial de especies, clones puros

e híbridos de Eucaliptos para elaboración de carbón vegetal.

González, A. F. R., & Burgos, J. M. B. (2007). Efecto de las condiciones de desvolatilización de carbones pulverizados sobre las características físicas de carbonizados. Ingeniería e Investigación, 27(1), 32-40.

Gorzycki, R. (2019). Informes de Cadenas de Valor: Forestal, papel y muebles. Marzo 2019. Año 4 – N° 14. Ministerio de Hacienda. Argentina. 38 pp. ISSN 2525-0221.

Graña Sandoval, E. B. (2018). Efecto de la carencia de macro-nutrientes (NPK-Ca- Mg-S) en el crecimiento del cultivo de sacha inchi (*Plukenetia volubilis* L.), en Pucallpa Ucayali.

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, R. & Baptista Lucio, P. (2014). Metodología de la Investigación. 6ta. Edición. Mc Graw Hill. México.

Marchesan, R., De Oliveira, D. N., Da Silva, R. C., de Carvalho, L. A., Gomes, R. T., & Almeida, V. C. (2020). Quality of charcoal from three species of the eucalyptus and the Corymbia citriodora species planted in the south of Tocantins. Floresta, 50(3), 1643-1652.

Marcos, F. (1989). *El carbón vegetal. Propiedades y obtención.* Agroguías Mundi-Prensa.

Márquez, M. F. (2009). *Aprovechamiento energético de la biomasa forestal: una alternativa sostenible*. Universidad del Pinar del Rio. 52 p.

Martins. (1980). *Biomassa, biocombustiveis, bioenergía.* Brasil, ministério da Minas y energía. Brasilia. 100 p.

Ochoa Landa, A. (2015). *“Análisis comparativo de dos sistemas de producción de carbón vegetal de dos especies forestales de Tambopata – Madre de Dios”;* Universidad Nacional de Ucayali, Pucallpa Perú.

Ordóñez Díaz, J. A. B., Galicia Naranjo, A., Venegas Mancera, N. J., Hernández

Tejeda, T., Ordóñez Díaz, M. D. J., & Dávalos-Sotelo, R. (2015). Densidad de las maderas mexicanas por tipo de vegetación con base en la clasificación de

Panduro, C. (2012). “Utilización industrial y mercado de diez especies maderables potenciales de bosques secundarios y primarios residuales” serie: PD 512/08 Rev.2 (I). 18 p.

Patiño Valera, F. & Pezet Valdés, M. (1992). *Tecnología para la construcción y operación de hornos de Mampostería.* INIFAP. México.

Pereira, B. L. C.; Oliveira, A. C.; Carvalho, A. M. M.; Carneiro, A. D.; Santos, L. C.; Vital, B. R. (2012). Quality of wood and charcoal from Eucalyptus clones for ironmaster use. International Journal of Forestry Research. 8 pp.

Pérez Angulo, J. M. (2020). Efecto del contenido de humedad en los residuos de la madera aserrada de capirona (*Calycophyllum spruceanum* Benth); con el poder calorífico del carbón vegetal producido en el prototipo del proyecto: Fincyt-jk maderas export SA-UNU, departamento de Ucayali, 2018.

Pérez, M., Compean, G. (1989). *Características físico-químicas y de producción en carbón de tres tipos de leñas de Durango.* INIFAP-Durango. Memorias de la Primera Reunión Nacional Sobre Dendroenergía. División de Ciencias Forestales. Chapingo, México.

Pérez Reátegui, F. I. (2019). Efecto del contenido de humedad en los residuos de madera aserrada de Capirona (*Calycophyllum spruceanum* Benth) con el porcentaje del material volátil y humedad en el carbón vegetal, región Ucayali 2018.

Pinchi, R. C. (2012). *Propiedades físicas y composición química inmediata del carbón vegetal del residuo de aserrío primario en diez especies forestales obtenidas artesanalmente en la Provincia de Coronel Portillo-Región Ucayali;* Universidad Nacional de Ucayali – Perú.

Ponce Ballester, E., Corma Canos, A., Renz, M. (2012). *El proceso de carbonización hidrotermal aplicado a la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos. Tesis de master en química sostenible.* Universidad politécnica de valencia, Instituto de Tecnología Química.

Prías Barragán, J. J., Rojas González, C. A., Echeverry Montoya, N. A., Fonthal, G., & Ariza Calderón, H. (2011). Identificación de las variables óptimas para la obtención de carbón activado a partir del precursor guadua angustifolia kunth. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 35(135), 157-166.

Ramos, D. C., Carneiro, A. D. C. O., Tangstad, M., Saadieh, R., & Pereira, B. L. C. (2019). Quality of wood and charcoal from eucalyptus clones for metallurgical use. Floresta e Ambiente, 26.

Remigio, D. (1983). *Rendimiento y calidad del carbón y análisis del líquido piroleñoso de cuatro maderas del Perú.* Tesis Ingeniero Forestal. UNA – La Molina. Lima. 78 p.

Ríos, I., Santos, J., & Gutiérrez, C. (2017). Biocombustibles sólidos: una solución al calentamiento global. Revista Ciencia, 68(4), i1-i7.

Rivera Inga, P. R. (1987). *Estudio de las características físico-químicas de la madera y el carbón de once especies tropicales de Madre de Dios.* Tesis Ingeniero Forestal. Universidad Nacional Agraria la Molina, Lima. 92 p.

Rubiera, F., Parra, J. B., Arenillas, A., Hall, S. T., Shah, C. L. & Pis, J.J. (1999). Propiedades texturales en fracciones de carbón separadas por densidad.

Combustible, *78* (14), 1631-1637.

Ruiz, B., Parra, J. B., Pajares, J. A., & Pis, J. J. (2001). Study of porous development in pyrolysis chars obtained from a low-volatile coal. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 58, 873-886.

Ruso, C. (s.f.). *Metodología de la investigación* Zeus.inf.cl>DII711>Cap 4. Rzedowski, J. 1978. Vegetación de México. Limusa, México.

Saavedra Paredes, C., Dolmos Castro, M., Garcia Linares, K. P., Ruiz Reátegui, L. M. (2017). Estudio: Propiedades físicas y Químicas del carbón obtenido en la producción piloto. En: Proyecto desarrollo y validación de prototipo para la fabricación de carbón vegetal con carbono fijo superior al 90% y sin perjudicar al medioambiente en la Región de Ucayali: Convenio: 037 – INNOVATE PERÚ – PITEI – 2016. 8p.

Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales – SEMARNAT. (2017). Anuario Estadístico de la Producción Forestal. Cd. de México.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales - SEMARNAT. (2011). Anuario Estadístico de la Producción Forestal 2011. Semarnat. México. 224 p.

Sevilla, U. D. (2011). Manual del carbón activo. Aula. aguapedia. org, 1-89.

Silva, M. F. D., Fortes, M. M., & Sette Junior, C. R. (2018). Characteristics of wood and charcoal from Eucalyptus clones. Floresta e Ambiente, 25.

Simetti, R., Bonduelle, G. M., & Da Silva, D. A. (2018). Wood quality of five Eucalyptus species planted in Rio Grande do Sul, Brazil for charcoal production. Journal of Tropical Forest Science, 30(2), 175-181.

Terán, L. V. (2014). Principio de Arquímedes. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo Escuela Preparatoria No. 4 Vida Científica, 2(3).

Vela, W. C., & Panduro, C. (2010). Determinación del rendimiento y análisis gravimétrico del carbón vegetal de la madera del género Dypterix (Shihuahuaco) en un horno colmena. *(2011) v. 7 (1)*.

ANEXOS

ANEXO 1

ANÁLISIS DE VARIANZA

Tabla 1A. Análisis de varianza contenido de humedad carbón de capirona (*Calycophyllum spruceanum* Benth), en el prototipo del proyecto FINCYT – JB MADERAS EXPORT S.A.

F.V.	G. L.	SC	CM	FC	Pr>F
Tratamiento	3	35,6626	11,8875	257,67	0,00
Error	12	0,5536	0,0461		
Total	15	36,2162			

C.V	R^2
2,15	98,47%

Tabla 2A. Análisis de varianza del volumen del carbón de capirona (*Calycophyllum spruceanum* Benth), en el prototipo del proyecto FINCYT – JB MADERAS EXPORT S.A.

F.V.	G. L.	SC	CM	FC	Pr>F
Tratamiento	3	12,7224	4,24081	268,74	0,00
Error	12	0,1894	0,01578		
Total	15	12,9118			

C.V	R^2
1.26	98,53%

Tabla 3A. Análisis de varianza de la densidad real del carbón de capirona (*Calycophyllum spruceanum* Benth), en el prototipo del proyecto FINCYT – JB MADERAS EXPORT S.A.

F.V.	G. L.	SC	CM	FC	Pr>F
Tratamiento	3	0,001465	0,000488	263,08	0,00
Error	12	0,000022	0,000002		
Total	15	0,001487			

C.V	R^2
1,36	98,50%

Tabla 4A. Análisis de varianza de la densidad aparente del carbón de capirona (*Calycophyllum spruceanum* Benth), en el prototipo del proyecto FINCYT – JB MADERAS EXPORT S.A.

F.V.	G. L.	SC	CM	FC	Pr>F
Tratamiento	3	0,004041	0,001347	1293,20	0,00
Error	12	0,000013	0,000001		
Total	15	0,004054			

C.V	R^2
1,03	99,69%

Tabla 5A. Análisis de varianza del porcentaje de porosidad del carbón de capirona (*Calycophyllum spruceanum* Benth), en el prototipo del proyecto FINCYT – JB MADERAS EXPORT S.A.

F.V.	G. L.	SC	CM	FC	Pr>F
Tratamiento	3	0,004614	0,001538	242,18	0,00
Error	12	0,000076	0,000006		
Total	15	0,004691			

C.V	R^2
2,52	98,38%

Tabla 6A. Análisis de varianza del volumen total de los poros del carbón de capirona (*Calycophyllum spruceanum* Benth), en el prototipo del proyecto FINCYT – JB MADERAS EXPORT S.A.

F.V.	G. L.	SC	CM	FC	Pr>F
Tratamiento	3	0,055086	0,018362	430,49	0,00
Error	12	0,000512	0,000043		
Total	15	0,055598			

C.V	R^2
0,65	99,08%

Tabla 7A. Análisis de correlacional del nivel de relación de la humedad, volumen y densidad del carbón de capirona (*Calycophyllum spruceanum* Benth), en el prototipo del proyecto FINCYT – JB MADERAS EXPORT S.A.

Correlación Pearson	Volumen	Densidad real	Densidad aparente
Humedad	-0,9013 0,00	0,9534 0,00	0,861 0,00

Tabla 8A. Análisis de correlacional del nivel de relación de la humedad, la porosidad y el volumen total de los poros del carbón de capirona (*Calycophyllum spruceanum* Benth), en el prototipo del proyecto FINCYT – JB MADERAS EXPORT S.A.

Correlación Pearson	Porosidad	Volumen total de los poros
Humedad	0,681 0,004	0,735 0,001

ANEXO 2

PANEL FOTOGRÁFICO



Foto 1A. Planta de carbonización, pirolisis en el horno del prototipo del proyecto: FINCYT-JK Maderas Export S.A. en Pucallpa en el que se introdujeron los residuos de madera y los tratamientos 10, 20,30,40 litros de agua por vagón respectivamente.



Foto 2A. Horno para carbonización de los residuos de capirona, del prototipo del proyecto: FINCYT-JK Maderas Export S.A. en Pucallpa.



Foto 3A. Tablero de control de los sensores de temperatura y humedad para la pirolisis en el horno del prototipo del proyecto: FINCYT-JK Maderas Export S.A. en Pucallpa.



Foto 4A. Carbón vegetal de capirona elaborado en el prototipo del proyecto: FINCYT-JB Maderas Export S.A.



Foto 5A. Residuos de madera listos para la elaboración de Carbón vegetal de capirona elaborado en el prototipo del proyecto: FINCYT-JB Maderas Export S.A.



Foto 6A. Vagones con carbón vegetal de capirona elaborado en el prototipo del proyecto: FINCYT-JB Maderas Export S.A.



Foto 7A. Cálculo del volumen del carbón vegetal de capirona con el prototipo del proyecto: FINCYT-JB Maderas Export S.A.



Foto 8A. Montaje de muestras para el cálculo del volumen del carbón vegetal de capirona con el prototipo del proyecto: FINCYT-JB Maderas Export S.A.



Foto 9A. Cálculo del volumen del carbón vegetal de capirona con el prototipo del proyecto: FINCYT-JB Maderas Export S.A.



Foto 10A. Cálculo de la cantidad de agua para el volumen del carbón vegetal de capirona con el prototipo del proyecto: FINCYT-JB Maderas Export S.A.



Foto 11A. Muestras de carbón para determinar la humedad del carbón vegetal de capirona con el prototipo del proyecto: FINCYT-JB Maderas Export S.A.



Foto 12A. Determinación de la humedad del carbón vegetal de capirona con el prototipo del proyecto: FINCYT-JB Maderas Export S.A.



Foto 13A. Reactivos utilizados en la elaboración del carbón vegetal de capirona con el prototipo del proyecto: FINCYT-JB Maderas Export S.A.



Foto 14A. Tamizados de muestras para la elaboración del carbón vegetal de capirona con el prototipo del proyecto: FINCYT-JB Maderas Export S.A.



Foto 15A. Tamizados y desfragmentación de muestras para la elaboración del carbón vegetal de capirona con el prototipo del proyecto: FINCYT-JB Maderas Export S.A.



Foto 16A. Muestras listas para el análisis en laboratorio del carbón vegetal de capirona con el prototipo del proyecto: FINCYT-JB Maderas Export S.A.