



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

CARACTERIZACIÓN DE MUESTRAS DE CARBÓN VEGETAL OBTENIDAS A PARTIR DE ESPECIES ARBÓREAS ENDÉMICAS DEL ECUADOR MEDIANTE ESPECTROSCOPIA RAMAN

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

ANDRADE MOLINA KEVIN ALEJANDRO

kevin.andrade01@epn.edu.ec

DIRECTOR: Ing. PANTOJA SUAREZ LUIS FERNANDO Ph.D.

fernando.pantoja@epn.edu.ec

**FECHA
Quito, marzo 2022**

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por **ANDRADE MOLINA KEVIN ALEJANDRO**, bajo mi supervisión.

Ing. Luis Pantoja Ph.D.

DIRECTOR DE PROYECTO

DECLARACIÓN

Yo, **Andrade Molina Kevin Alejandro**, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Andrade Molina Kevin Alejandro

DEDICATORIA

El presente trabajo es dedicado a mis abuelitos, René y Elena, quienes siempre me han apoyado sobre todas las cosas para seguir adelante y por haber cuidado de mí desde mi nacimiento hasta la actualidad. Gracias a ellos he sido, soy y seré una persona de bien, con valores inquebrantables inculcados por ellos.

De igual forma, se lo dedico a mi madre, hermanas y hermano que son mi inspiración para seguir creciendo como persona y profesional, hasta llegar a ser un ejemplo para ellos.

Kevin Andrade

AGRADECIMIENTO

Primeramente, agradezco a Dios por haberme dado el don de la vida, la salud y la estabilidad emocional para comenzar, desarrollar y terminar el presente trabajo de titulación. Gracias por bendecir cada día de mi vida y guiarme en todos mis estudios.

A mis abuelitos quienes fueron, son y seguirán siendo mi tesoro máspreciado, los mismos que a diario me demostraron su cariño y apoyo incondicional. Ellos fueron los principales en desear lo mejor para mí con cada consejo, con cada abrazo, con cada llamado de atención. Gracias por ayudarme a crecer como persona, guiando mi vida estudiantil, personal y profesional.

A mi madre, por amarme y apoyarme siempre como una amiga leal. Agradezco por su cariño y atención prestada en todo momento.

A mis hermanas y hermano, que con su apoyo y su presencia me ayudan a seguir luchando por su bienestar y futuro.

A mis amigos de infancia que siguen presentes, mis amigos del colegio que aún los veo y a mis amigos de la universidad que compartimos un sin número de anécdotas que quedarán como gratos recuerdos.

Agradezco al Dr. Luis Fernando Pantoja, quien con su ayuda, tiempo y conocimientos me guiaron para la realización del presente trabajo. Gracias a su disponibilidad de tiempo hacia mi persona, a la comprensión y la ayuda prestada en todo momento, he logrado culminar dicho proyecto.

Agradezco al Ing. Luis Huilca, quien me recibió de la mejor manera dentro del Laboratorio de Fundición, permitiéndome ocupar sus instalaciones para desarrollar y obtener las muestras propuestas en mi tesis.

Doy las gracias al personal del Laboratorio de Nuevos Materiales, quienes me ayudaron con los ensayos correspondientes de las muestras necesitadas.

A mi colegio, Juan Pío Montúfar, donde adquirí vastos conocimientos y valores que me han formado como persona y me han ayudado en el transcurso de este trayecto.

ÍNDICE

CERTIFICACIÓN.....	i
DECLARACIÓN.....	ii
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTO.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
ÍNDICE DE TABLAS.....	xiii
RESUMEN.....	xiv
ABSTRACT.....	xv
INTRODUCCIÓN.....	1
Objetivo general.....	3
Objetivos específicos.....	3
Alcance.....	4
1. MARCO TEÓRICO.....	5
1.1. Ecosistema.....	5
1.1.1. Ecosistemas Montanos del Ecuador.....	6
1.1.1.1. Bosque Montano.....	7
1.1.1.2. Bosques Montanos Bajos.....	8
1.1.1.3. Bosques Montanos Altos.....	8
1.1.2. Usos y afectaciones al ambiente.....	9
1.2. Tipos de especies forestales arbóreas endémicas del Ecuador de donde se obtiene carbón vegetal.....	11
1.3. La Madera.....	12
1.3.1. Definición.....	12
1.3.2. Propiedades.....	12
1.3.2.1. Propiedades Físicas.....	12
1.3.2.3. Propiedades Químicas.....	16
1.3.2.4. Propiedades Térmicas.....	17
1.3.2.5. Propiedades Eléctricas.....	17
1.3.3. Diferentes Métodos para la Producción de Carbón Vegetal.....	17
1.3.3.1. Métodos Artesanales.....	18
1.3.3.2. Métodos Industriales.....	21
1.3.4. Carbonización en atmósfera controlada.....	23
1.3.4.1. Proceso de Carbonización dentro del Horno Implementado.....	25
1.4. Carbón Vegetal.....	27
1.4.1. Definición.....	27

1.4.2.	Propiedades.....	27
1.4.2.1.	Cantidad de carbono fijo	27
1.4.2.2.	Poder calórico	28
1.4.2.3.	Cantidad de humedad.....	28
1.4.2.4.	Densidad aparente.....	29
1.4.2.5.	Material volátil	29
1.4.2.6.	Contenido de cenizas.....	29
1.4.2.7.	Aplicaciones.....	30
1.5.	Espectroscopía Raman	31
1.5.1.	Descripción del efecto Raman.....	31
1.5.1.1.	Dispersión Rayleigh o Elástica.....	31
1.5.1.2.	Dispersión Raman o Inelástica.....	31
1.5.2.	Descripción de la técnica de caracterización por espectroscopía Raman	34
1.5.3.	Equipo.....	36
1.5.3.1.	Partes específicas que forman el equipo de espectroscopía Raman.....	36
1.5.3.2.	Funcionamiento.....	37
1.5.4.	Espectros.....	37
1.5.4.1.	Bandas.....	39
1.5.5.	Limitantes.....	41
1.5.6.	Ventajas y Desventajas.....	42
1.5.6.1.	Ventajas.....	42
1.5.6.2.	Desventajas	42
1.5.7.	Usos y Aplicaciones	42
2.	METODOLOGÍA.....	44
2.1.	Implementación del horno de atmósfera controlada	44
2.1.1.	Descripción	44
2.1.2.	Estructura del Horno	44
2.1.2.1.	Materiales, Herramientas y/o Equipos.....	44
2.1.2.2.	Fabricación	45
2.1.2.3.	Acople.....	47
2.1.3.	Zona de calentamiento.....	48
2.1.3.1.	Materiales, Herramientas y/o Equipos.....	48
2.1.3.2.	Fabricación	48
2.1.3.3.	Acople.....	48
2.2.	Instalación del horno en el espacio de trabajo.....	49
2.3.	Muestras empleadas para la parte práctica.....	50
2.4.	Proceso para la obtención de las muestras de carbón vegetal con presencia de gas	51

2.4.1.	Preparación de la muestra	51
2.4.2.	Preparación del equipo de trabajo.....	52
2.4.3.	Proceso de carbonización	52
2.4.4.	Extracción de la muestra carbonizada.....	53
2.5.	Proceso para la obtención de las muestras de carbón vegetal de forma tradicional.....	54
2.6.	Proceso de recolección de carbón vegetal en diferentes puntos de la ciudad de Quito.....	56
2.7.	Muestras analizadas	56
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	58
3.1.	Resultados	58
3.1.1.	Cambios en volúmenes y densidades	58
3.1.2.	Espectroscopía Raman.....	65
3.1.2.1.	Deconvolución de bandas	65
3.1.2.2.	Relación de intensidad I_D/I_G	68
3.1.2.3.	Relación de intensidad $I_D/I_{D'}$	68
3.1.2.4.	Espectros antes de la deconvolución y tablas resultantes después de la deconvolución	69
3.1.2.5.	Variación de parámetros	78
3.2.	Discusión	82
3.2.1.	Cambios en volúmenes y densidades	82
3.2.2.	Deconvolución de bandas	83
3.2.2.1.	Relaciones de intensidad	93
3.2.2.2.	Relaciones con la banda G	93
3.2.3.	Muestras de Carbón Vegetal Recolectadas al Azar	96
3.3.	Comparación con otros trabajos.....	102
3.3.1.	Comparación 1.....	102
3.3.2.	Comparación 2.....	105
3.3.3.	Comparación 3.....	107
3.4.	Antecedentes del consumo de carbón vegetal	109
3.4.1.	Investigación cualitativa	109
3.4.1.1.	Entrevistas	110
3.4.2.	Investigación cuantitativa	111
3.4.2.1.	Mercado objetivo.....	111
3.4.2.2.	Segmentación de Mercado	111
3.4.2.3.	Encuestas	112
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	114
4.1.	Conclusiones	114

4.2. Recomendaciones	116
Referencias Bibliográficas	118
ANEXOS.....	127

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Bosque montano del Ecuador.....	5
Figura 1.2. Biodiversidad de bosques montanos en Ecuador.....	6
Figura 1.3. Bosque montano.....	7
Figura 1.4. Bosque montano bajo.....	8
Figura 1.5. Bosque montano alto.....	9
Figura 1.6. Biodiversidad de bosques montanos en Ecuador.....	10
Figura 1.7. Vegetación de bosques montanos en Ecuador.....	11
Figura 1.8. Direcciones del esfuerzo suministrado.....	13
Figura 1.9. Perspectivas microscópicas de las paredes celulares de la madera de baja y alta densidad, respectivamente.....	14
Figura 1.10. Dirección de los esfuerzos de los diferentes tipos de resistencias aplicados a las fibras de la madera.....	16
Figura 1.11. Horno tipo fosa.....	19
Figura 1.12. Horno tipo parva.....	19
Figura 1.13. Diagrama de horno tipo parva sueca.....	20
Figura 1.14. Horno de ladrillo.....	21
Figura 1.15. Horno metálico.....	22
Figura 1.16. Horno metálico de barriles de aceite.....	23
Figura 1.17. Horno de atmósfera controlada.....	23
Figura 1.18. Tubo de cuarzo cerrado con conductos de entrada y salida (bridas internas y externas).....	24
Figura 1.19. Saltos energéticos de un electrón. Al existir un decaimiento se emiten tres fotones, formando así, la dispersión Rayleigh, Raman Stokes y Raman Anti-Stokes .	32
Figura 1.20.a) Radiación electromagnética de frecuencia ν_0 que se esparce al interaccionar con una muestra. b) Dispersión Raman Stokes (izquierda), Dispersión Raman Anti-Stokes (derecha). c) Banda intensa sin efecto Raman en ν_0 (central); Banda de Stokes en $\nu_0-\nu$ (izquierda); Banda Anti-Stokes $\nu_0+\nu$ (derecha).....	33
Figura 1.21. Bandas Raman Anti-Stokes, Rayleigh y Raman Stokes.....	35
Figura 1.22. Diagrama básico para realizar espectroscopía Raman.....	37
Figura 1.23. Espectro Raman del paracetamol.....	38
Figura 1.24. Espectros Raman de algunos materiales de carbono sp^2 . En manera ascendente: carbono amorfo; nanohornos de carbono de pared simple (SWNH); grafeno dañado; nanotubos de carbono de pared simple (SWNT); grafito pirolítico	

altamente orientado (HOPG); grafeno monocapa cristalino. La banda G' es llamada también 2D y la banda G'' es llamada también 2D'.	40
Figura 2.1. Horno implementado.	44
Figura 2.2. Carcasas metálicas externas.	46
Figura 2.3. a) Estructura interna del horno fabricado de ladrillo refractario. b) Canaletas de la sección interna donde se colocan las resistencias.	47
Figura 2.4. Horno ensamblado completamente.	47
Figura 2.5. Bobinado del alambre Kanthal.	48
Figura 2.6. Acople de los alambres bobinados dentro de las canaletas.	49
Figura 2.7. Instalación del horno en el espacio de trabajo.	50
Figura 2.8. Troncos de madera de cada especie.	50
Figura 2.9. a) Corte de los troncos de madera. b) Cubos obtenidos del proceso de corte.	51
Figura 2.10. a) Cubo de madera limpia, lijada y con su respectiva nomenclatura para toma de dimensiones. b) Registro de la masa del cubo de madera.	51
Figura 2.11. a) Proceso de carbonización. b) Horno enfriado.	53
Figura 2.12. a) Registro de dimensiones de la muestra carbonizada. b) Registro de la masa de la muestra carbonizada.	54
Figura 2.13. Partes sobrantes de los troncos de cada especie cortados en el aserradero.	54
Figura 2.14. a) Cabina de ladrillos no quemados. b) Lámina de cartón cubriendo las especies de madera que se encuentran dentro de la cabina.	55
Figura 2.15. a) Quema de la lámina de cartón. b) Cabina de ladrillos cubierta con chamba. c) Apagado del carbón resultante por medio de tierra.	55
Figura 2.16. Equipo Raman Horiba LabRAM HR Evolution.	56
Figura 3.1. a) Muestra de carbón vegetal obtenida mediante el proceso de carbonización dentro del horno con presencia de aire de la especie palo rosa. b) Muestra de carbón vegetal obtenida mediante el proceso de carbonización dentro del horno sin presencia de aire de la especie palo rosa.	58
Figura 3.2. Toma de medidas de la muestra de carbón vegetal palo rosa, extraída después del proceso de carbonización dentro del horno sin presencia de aire.	59
Figura 3.3. a) Muestra de carbón vegetal obtenida mediante el proceso de carbonización dentro del horno con presencia de gas argón de la especie palo rosa. b) Toma de medidas de la muestra de carbón vegetal palo rosa, extraída después del proceso de carbonización dentro del horno.	59
Figura 3.4. Volumen inicial y final de las muestras obtenidas con gas argón dentro del horno.	61

Figura 3.5. Volumen inicial y final de las muestras obtenidas sin gas argón dentro del horno.	62
Figura 3.6. Densidad inicial y final de las muestras obtenidas con gas argón dentro del horno.	63
Figura 3.7. Densidad inicial y final de las muestras obtenidas sin gas argón dentro del horno.	64
Figura 3.8. (a) Espectro resultante, curva de ajuste y deconvolución de bandas de la muestra de carbón vegetal(pumamaqui) obtenida en el horno de atmósfera controlada con gas argón. b) Espectro resultante, curva de ajuste y deconvolución de bandas de la muestra de carbón vegetal (pumamaqui T) producida de forma tradicional.....	66
Figura 3.9. (a) Espectro resultante por espectroscopía Raman de la muestra de carbón vegetal(motilón) obtenida en el horno de atmósfera controlada con gas argón. (b) Espectro resultante por espectroscopía Raman de la muestra de carbón vegetal (motilón T) producida de forma tradicional.	69
Figura 3.10. (a) Espectro resultante por espectroscopía Raman de la muestra de carbón vegetal (pumamaqui) obtenida en el horno de atmósfera controlada con gas argón. (b) Espectro resultante por espectroscopía Raman de la muestra de carbón vegetal (pumamaqui T) producida de forma tradicional.....	71
Figura 3.11. (a) Espectro resultante por espectroscopía Raman de la muestra de carbón vegetal (palo rosa) obtenida en el horno de atmósfera controlada con gas argón. (b) Espectro resultante por espectroscopía Raman de la muestra de carbón vegetal (palo rosa T) producida de forma tradicional.....	73
Figura 3.12. (a) Espectro resultante por espectroscopía Raman de la muestra de carbón vegetal (charmuelan) obtenida en el horno de atmósfera controlada con gas argón. (b) Espectro resultante por espectroscopía Raman de la muestra de carbón vegetal (charmuelan T) producida de forma tradicional.....	75
Figura 3.13. (a) Espectro resultante por espectroscopía Raman de la muestra de carbón vegetal (cascarilla) obtenida en el horno de atmósfera controlada con gas argón. (b) Espectro resultante por espectroscopía Raman de la muestra de carbón vegetal (cascarilla T) producida de forma tradicional.	77
Figura 3.14. Variación del $FWHM_D$ de las muestras obtenidas en el horno y de las muestras tradicionales.	79
Figura 3.15. Variación del $FWHM_G$ de las muestras obtenidas en el horno y de las muestras tradicionales.	80
Figura 3.16. Variación de la relación A_D/A_G de las muestras obtenidas en el horno y de las muestras tradicionales.....	81

Figura 3.17. Variación de la relación I_D/I_G de las muestras obtenidas en el horno y de las muestras tradicionales.....	81
Figura 3.18. Variación de la relación del $FWHM_D/FWHM_G$ de las muestras obtenidas en el horno y de las muestras tradicionales.	82
Figura 3.19. Espectros resultantes de las diez muestras de carbón vegetal (cinco muestras obtenidas en el horno y cinco muestras producidas de forma tradicional) analizadas por espectroscopía Raman.	85
Figura 3.20. Gráfico de σ_G (posición $_G$) frente a Γ_G ($FWHM_G$) para diferentes tipos de carbono amorfo. Los datos se registraron con $\lambda_L= 514\text{nm}$	94
Figura 3.21. Gráfico de Γ_D ($FWHM_D$) frente a Γ_G ($FWHM_G$) para una gran variedad de carbonos aromáticos desordenados.	95
Figura 3.22. Gráfico de σ_G (posición $_G$) frente a Γ_G ($FWHM_G$) para diferentes tipos de carbono amorfo. Los datos se registraron con $\lambda_L= 514\text{nm}$	100
Figura 3.23. Gráfico de Γ_D ($FWHM_D$) frente a Γ_G ($FWHM_G$) para una gran variedad de carbonos aromáticos desordenados.	101
Figura 3.24. a) Espectros resultantes por espectroscopía infrarroja (línea continua) y espectros de segunda derivada (2d) (línea punteada) de diferentes fracciones de carbón vegetal. b) Espectros Raman normales en la región espectral de 1800–1000 cm^{-1} de fracciones de carbón vegetal: [a] >2 mm; [b] 1–0,5 mm; [c] <0,5 mm; [d] carbono orgánico soluble (SOC) extraído de la fracción más fina (<0,5 mm). c) Espectros Raman mejorados en superficie (SERS) y análisis de ajuste de curvas del carbono orgánico soluble (SOC) extraído de tres fracciones de carbón vegetal.	103
Figura 3.25. a) Espectro Raman del carbón de Venecia obtenido en un reactor de lecho fijo. b) Espectro Raman del carbón vegetal obtenido en el horno de atmósfera controlada de la especie pumamaqui. c) Micrografías MEB de los carbonizados.	106
Figura 3.26. a) Espectros NIR medios de las muestras de carbón de <i>Tabebuiaserratifolia</i> y <i>Eucalyptusgrandis</i> . b) Espectros del infrarrojo medio de la madera de <i>Tabebuiaserratifolia</i> y del carbón vegetal.	108

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Elementos del horno de atmósfera controlada.	24
Tabla 2.1. Características del Equipo Raman.	56
Tabla 2.2. Parámetros del equipo de espectroscopía Raman.	57
Tabla 2.3. Muestras empleadas para el análisis mediante espectroscopía Raman.....	57
Tabla 3.1. Parámetros antes y después del proceso de carbonización con gas argón dentro del horno.....	60
Tabla 3.2. Parámetros antes y después del proceso de carbonización sin gas argón dentro del horno.....	60
Tabla 3.3. Características Raman resultantes de la deconvolución de bandas de la muestra de carbón vegetal (motilón) obtenida en el horno de atmósfera controlada con gas argón y de la muestra de carbón vegetal (motilón T) producida de forma tradicional.	70
Tabla 3.4. Características Raman resultantes de la deconvolución de bandas de la muestra de carbón vegetal (pumamaqui) obtenida en el horno de atmósfera controlada con gas argón y de la muestra de carbón vegetal (pumamaqui T) producida de forma tradicional.	72
Tabla 3.5. Características Raman resultantes de la deconvolución de bandas de la muestra de carbón vegetal (palo rosa) obtenida en el horno de atmósfera controlada con gas argón y de la muestra de carbón vegetal (palos rosa T) producida de forma tradicional.	74
Tabla 3.6. Características Raman resultantes de la deconvolución de bandas de la muestra de carbón vegetal (charmuelan) obtenida en el horno de atmósfera controlada con gas argón y de la muestra de carbón vegetal (charmuelan T) producida de forma tradicional.	76
Tabla 3.7. Características Raman resultantes de la deconvolución de bandas de la muestra de carbón vegetal (cascarilla) obtenida en el horno de atmósfera controlada con gas argón y de la muestra de carbón vegetal (cascarilla T) producida de forma tradicional.	78
Tabla 3.8. Segmentación geográfica del país en el 2010.	111
Tabla 3.9. Segmentación geográfica aproximada del país en el 2020.	111
Tabla 3.10. Segmentación demográfica del país en el 2010.	111
Tabla 3.11. Segmentación demográfica aproximada del país en el 2020.....	112

RESUMEN

En el presente trabajo, se estudió el proceso de carbonización de cinco diferentes especies de madera. Para esto, se implementó un horno de atmósfera controlada con gas argón, variando las temperaturas y tiempos de trabajo, con la finalidad de obtener carbón vegetal y estudiarlo. Las muestras utilizadas fueron motilón, pumamaqui, palo rosa, charmuelan y cascarilla provenientes directamente de los bosques del Cantón Montúfar de la provincia del Carchi. Mediante la espectroscopía Raman se logró el estudio estructural de estas muestras carbonizadas obtenidas en el horno, del carbón vegetal producido de forma tradicional de las mismas especies y de muestras de carbón recolectado en diferentes puntos de la ciudad; todo esto con el objetivo de determinar la similitud estructural entre las muestras resultantes. Los espectros Raman equivalen a obtener las huellas dactilares de una persona, ya que son únicas y características de cada individuo, y en este caso de cada muestra. Con todo este análisis se obtuvo el espectro característico de cada muestra, y que, partiendo del mismo, se efectuó la deconvolución de las bandas de cada uno, obteniendo así información que afirma que las muestras de carbón vegetal tienen parámetros, espectros (huellas) y bandas parecidas, pero completamente diferentes una de otras; que, aunque se asemejen en ciertos parámetros, son totalmente distintas.

Palabras clave: carbón vegetal, carbonización, espectroscopia Raman, identificación.

ABSTRACT

In the present work, the carbonization process of five different wood species was studied. For this purpose, a controlled atmosphere furnace with argon gas was implemented, varying temperatures and working times, in order to obtain charcoal and study it. The samples used were motilón, pumamaqui, palo rosa, charmuelan and cascarilla from the forests of Montúfar Canton in the province of Carchi. By means of Raman spectroscopy, the structural study of these carbonized samples obtained in the kiln, of the charcoal produced in a traditional way from the same species and of charcoal samples collected in different points of the city was achieved; all this with the objective of determining the structural similarity between the resulting samples. Raman spectra are equivalent to obtaining the fingerprints of a person, since they are unique and characteristic of each individual, and in this case of each sample. With all this analysis, the characteristic spectrum of each sample was obtained and, based on it, the deconvolution of the bands of each one was carried out, thus obtaining information that affirms that the charcoal samples have similar parameters, spectra (fingerprints) and bands, but completely different from each other; that, although they are similar in certain parameters, they are totally different.

Keywords: charcoal, carbonization, Raman spectroscopy, identification.

I CERTIFY that the above and foregoing is a true and correct translation of the original document in Spanish

Maria Verónica Aguirre Repetto, PHD

C.C: 1710659283

Expert Independent Translator

CAMBRIDGE Reference Number: 159EC00200004

COUNCIL OF THE JUDICIARY: 184986542

SENECYT :1016-4678-932100

MINISTRY OF LABOR: recognition code: SETEC-REC-2019-104



Firmado electrónicamente por:
**MARIA VERONICA
AGUIRRE REPETTO**

CARACTERIZACIÓN DE MUESTRAS DE CARBÓN VEGETAL OBTENIDAS A PARTIR DE ESPECIES ARBÓREAS ENDÉMICAS DEL ECUADOR MEDIANTE ESPECTROSCOPIA RAMAN

INTRODUCCIÓN

La madera es la materia prima que provee más energía a nivel mundial que cualquier otra, por lo tanto, tendría que ser catalogada como uno de los combustibles más fundamentales. Los países encaminados a prosperar, consideran a la leña y al carbón vegetal como los combustibles del futuro; por otro lado, los países ya desarrollados aprecian dichos recursos, los mismos que son sumamente codiciados como fuente de energía en la industria y profundamente utilizados en el consumo del hogar [1].

Estados Unidos conforma el mercado de carbón vegetal más grande, debido a su extensa población y altos ingresos. El 54% de la población total cuentan con parrillas de carbón y el 95% de estos consumidores llegan al uso de 884.000 toneladas anualmente, es decir, alrededor de 600 millones de dólares anuales [2]. Por lo cual, alrededor de todo el mundo, el mercado de carbón vegetal es una gran opción de avance económico.

Actualmente, prevalece una problemática vinculada a la producción de carbón vegetal en nuestro país, ya que los métodos tradicionales de producción que con frecuencia se usan, implican daño a la calidad del aire (contaminación ambiental), por otro lado, demandan ingentes cantidades de materia prima (madera) para cubrir la demanda. El hecho de que la recolección de árboles para la producción de carbón vegetal cause deforestación sigue siendo objeto de debate y depende obviamente de la resolución gubernamental [3]. Las posibles opciones de incrementar las políticas de control sobre la producción del carbón vegetal y el cuidado de los bosques, se puede lograr con una comprobación de los reglamentos y leyes [4]. Así, la mejor manera de explotar la riqueza del país con intención de progreso y desarrollo, pero respetando las leyes, es impulsando la fabricación de carbón vegetal para el sector industrial y domiciliario de manera sustentable, y que no atente con el patrimonio natural de la nación. Con esta producción se aumenta el avance económico y social, se origina un movimiento de dinero entre lo rural y urbano, disminuyendo así, la pobreza [1].

Importancia

El carbón vegetal es un material con un alto contenido de carbono y un gran poder calorífico empleado particularmente para combustión y calefacción [5]. Desde hace varios años este material es comúnmente utilizado para aplicaciones industriales como fabricación de ladrillos, producción de acero, desecación de frutos, proveedor de nitidez a las bebidas alcohólicas como el vino, whisky, cerveza, entre otras; debido a su manejo y almacenamiento simple [6]. En aplicaciones domésticas predomina como combustible para calefacción y asaderos en el sector urbano, y en el sector rural básicamente como combustible para cocción de alimentos.

Conociendo el uso que se le da a este material, es indispensable destacar la preocupación por la deforestación, la degradación de las especies arbóreas de las cuales son utilizadas para la producción, y por supuesto la contaminación ambiental [7].

Ya que este material proviene de los árboles, tiene grandes ventajas frente a otros materiales, pero llama la atención que la minería del carbón y su combustión produce gran variedad de sustancias volátiles, como es el monóxido de carbono (CO), el cual es un gas sumamente venenoso y tóxico, provocando consecuencias negativas para la salud humana [6]. En el presente trabajo se intenta conseguir muestras de carbón vegetal que presenten propiedades semejantes a las del carbón vegetal que se produce y comercializa sin o con mínimo control. Dichas muestras serán obtenidas mediante la implementación de procesos tecnológicos, que a su vez podrían prevenir el daño a la calidad del aire [8].

En ese ámbito, las especies arbóreas endémicas que están sujetas a serias explotaciones para adquirir sus insumos, son de gran relevancia, ya que en futuros estudios se pueden proponer programas de prevención en dichas zonas. De esta manera se logrará minimizar pérdidas de vegetación en peligro de desaparecer, e inducir el principio del desarrollo sostenible [9].

Justificación

El presente trabajo de titulación se realiza con el fin de hacer un estudio del carbón vegetal obtenido de varias especies arbóreas endémicas del Ecuador en peligro de extinción, de las cuales proviene el material vegetal que abastece a la ciudad de Quito. Se pretende realizar análisis y comparaciones mediante la técnica de caracterización de

espectroscopía Raman. A través de un horno de atmósfera inerte se obtuvieron muestras de carbón vegetal bajo condiciones controladas. Los espectros Raman de esas muestras fueron cotejados con los espectros de muestras de carbón vegetal producidos de forma tradicional. Adicionalmente, se obtuvieron espectros Raman de muestras de carbón vegetal recolectadas en diferentes puntos de la ciudad. Estas pruebas y resultados servirán para realizar el estudio comparativo entre los materiales y definir ciertas propiedades de los mismos [10]. Así, se obtienen los espectros característicos de cada muestra, esta etapa es el equivalente a obtener las huellas dactilares de una persona, ya que son únicas y características de cada individuo.

Además, el presente estudio brindará información que puede ser útil para la obtención de este combustible por métodos diferentes al tradicional, considerando el uso de hornos para recrear propiedades semejantes a las reales. Cabe destacar que los espectros Raman pueden ser utilizados como herramienta de trazabilidad de cualquier muestra de carbón vegetal [7].

Objetivo general

- Caracterizar muestras de carbón vegetal obtenidas a partir de especies arbóreas endémicas del Ecuador mediante espectroscopía Raman.

Objetivos específicos

- Producir muestras artificiales de carbón vegetal bajo condiciones controladas en el laboratorio.
- Caracterizar las muestras obtenidas en el laboratorio.
- Recolectar muestras de carbón vegetal en diferentes puntos de la ciudad.
- Caracterizar las muestras recolectadas.
- Identificar las especies arbóreas utilizadas para la obtención de carbón vegetal en Quito.
- Comparar los resultados.

Alcance

El presente proyecto de titulación comprende la implementación de un horno de atmósfera controlada, la elaboración del plano de conjunto y planos de taller de los elementos que conforman este equipo. También, incluye la preparación de muestras de carbón vegetal a partir de madera obtenida de especies endémicas del Ecuador mediante el proceso de carbonización en atmósfera inerte. Se ha utilizado espectroscopía Raman para la obtención de los espectros característicos de las muestras y la deconvolución de los mismos. Así, se identificaron las bandas características de los espectros de todas las muestras analizadas por esta técnica de caracterización de materiales. Cabe recalcar que, la caracterización Raman se realizó a las muestras obtenidas bajo una atmósfera inerte, producidas de forma tradicional y recolectada en diferentes puntos de la ciudad. Finalmente, se incluye la interpretación y la comparación de los resultados obtenidos.

1. MARCO TEÓRICO

El Ecuador es un país singular por su abundante riqueza en flora y fauna, esta riqueza se encuentra comprendida por diferentes variables ambientales como: el suelo, el relieve, el bioclima, regímenes de inundación, etc. Estas variables se relacionan y dan lugar a distintos panoramas innatos que comparten con diversos modelos de vegetación y continuas amenazas entregadas por una permanente y persistente influencia del ser humano sobre los recursos naturales [11]. Por tal motivo, esto conlleva a un serio problema ambiental, ya que los bosques son atacados e incinerados, perdiendo así flora en el territorio nacional y contaminando el medio ambiente.

1.1. Ecosistema

Ecosistema se define como un conjunto de individuos que se relacionan entre sí, y con su ambiente físico; contiene particularidades de historia evolutiva, relaciones entre organismos, semblante y apariencia de la vegetación, las mismas que ponen en constancia la considerable composición de la fauna. Esta definición presenta relaciones en el comportamiento entre los organismos y los componentes abióticos. Para conseguir la caracterización de la biodiversidad y la representación gráfica de sus modelos geográficos, se debe configurar la clasificación de ecosistemas [11].

Los bosques montanos forman parte de delicados ecosistemas que adquieren gran diversidad de fauna y flora que se aprecian por su nivel elevado de singularidad. Por su considerable grado de endemismo son reconocidos [12].

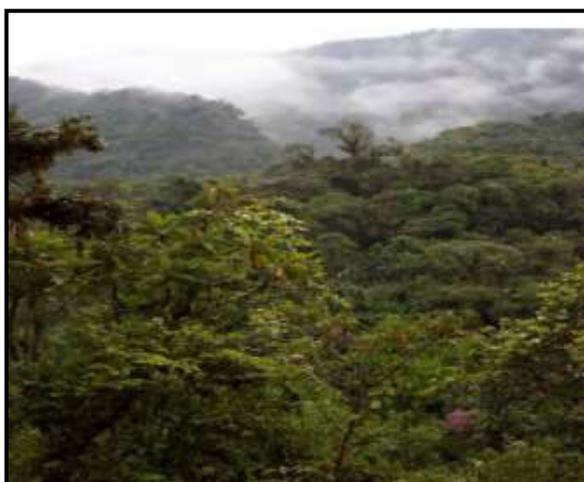


Figura 1.1. Bosque montano del Ecuador.
(Fuente: MAE-FAO, 2015)

1.1.1. Ecosistemas Montanos del Ecuador

Ecuador dispone de ecosistemas montanos en la costa, sierra y oriente. Este bosque también conocido como nublado, es identificado por la existencia de gran variedad de fauna y flora nativa, en gran cantidad endémica. Aquí se localiza el 50% de toda la flora del Ecuador. Debido a que estos bosques son almacenadores de biodiversidad, permiten la regulación hídrica y conservan una elevada calidad del agua, son de gran importancia para la humanidad. Los bosques montanos son esenciales para garantizar el sistema hídrico de las cuencas, ya que detienen el 20% sobre la capacidad habitual de la precipitación. Cuando aumenta en altitud, aumenta igualmente la variedad de la flora, esto se da entre las cejas andinas [12].

La lluvia y la niebla en los bosques montanos andinos, altoandinos y subandinos se transforman en una contribución extra de agua hacia el sistema, debido a que son transportadas por el viento. Esta contribución es un elemento considerable del balance hídrico debido a la magnitud que tienen para detener el agua de la niebla y el descenso de la transpiración. El beneficio de la lluvia horizontal posee un gran significado en los bosques montanos pluviestacionales. La mayoría de estos bosques tienen la particularidad de contener zonas de pequeña precipitación y una habitual aparición de neblina. El porcentaje de agua obstaculizada por la vegetación está entre 15% y 20% de la precipitación cuando se encuentran bajo condiciones húmedas, y alcanza hasta el 60% en condiciones más expuestas [12].



Figura 1.2. Biodiversidad de bosques montanos en Ecuador.
(Fuente: MAE-FAO, 2015)

1.1.1.1. Bosque Montano

Es la típica configuración andina, en florística y estructura. Su entorno físico es distinto, posee menores temperaturas que en las partes bajas y una habitual concentración de niebla. Está localizada sobre la faja montano baja, en un grado de altitud desde los 1.500 msnm hasta los 2.900 msnm en el sur de las estribaciones occidentales de los Andes, y de 1.800 msnm hasta los 3.000 msnm en el norte. En las cordilleras de la Costa no aparece. En las cordilleras amazónicas y estribaciones, va desde los 1.800 a los 2.800 msnm en el sur y de los 2.000 msnm hasta los 2.900 msnm en el norte [13]. El espacio cubierto por los bosques andinos se ha considerado en 2.983,673 hectáreas, con un índice de pérdida de bosques de 13.000 hectáreas anuales [14]. Aparecen algunas características ecológicas distintas entre la cordillera occidental y oriental, por ejemplo, por los vientos húmedos que llegan de la cuenca Amazónica, las laderas son húmedas; a su vez, aparecen evidentes desigualdades en la estructura de la configuración florística [12].

Por la riqueza en diversos componentes, en este tipo de bosques montanos se localiza gran variedad de especies arbóreas que son usadas para un sin número de aplicaciones como son: usos medicinales, leña para la elaboración de carbón vegetal, usos ornamentales, construcción de cercas, ebanistería, carpintería, entre otros [15].



Figura 1.3. Bosque montano.
(Fuente: MAE-FAO, 2015)

1.1.1.2. Bosques Montanos Bajos

Dichos ecosistemas siempre verde montanos bajos confinan una cuantiosa variedad de flora en la región andina. En las derivaciones orientales estos tipos de bosques son extremadamente húmedos y prolongados, en cambio, al norte de Ecuador (Chocó) y en los sectores occidentales de Colombia no son tan prolongados. La franja de este bosque siempre verde occidental es más angosta y poco húmeda, finalizando en la frontera de Ecuador y Perú [12].

Por lo cual, la propagación más sureña de los bosques húmedos del área del Chocó está conformada por estos bosques del norte de Perú/sur de Ecuador. No obstante, los valles secos que se encuentran próximos de su límite al sur, dividen a las zonas de bosque siempre verde parcialmente bajo y abandonado [16].

En el extremo occidental el endemismo es mucho más grande, pero en el oriental es más variado, esto se da al relacionar la variedad entre los bosques en las ramificaciones de la Cordillera de los Andes. De esta forma, un gran número de especies logran ser endémicas en ciertas áreas pequeñas [12].



Figura 1.4. Bosque montano bajo.
(Fuente: MAE-FAO, 2015)

1.1.1.3. Bosques Montanos Altos

Este tipo de bosque se esparce entre los 3.000 y 3.400 msnm, establece la flora de cambio entre el bosque de páramo y neblina. Dicho bosque se lo conoce también como Ceja Andina, debido a su fisonomía y a la abundancia de plantas epífitas y musgos, se considera semejante al bosque nublado, pero se diferencia en magnitud y configuración [12].

Se presenta con el aspecto de islas de bosque natural en superficies con inclinaciones notables. Debido a los derrumbes, deslaves y demás desastres naturales, así como los factores provocados por el ser humano como deforestación y emisiones contaminantes se produce el confinamiento de estos bosques. Por todos estos motivos se perjudica y existe un constante peligro para que la biodiversidad de estos bosques se mantenga. El bosque de Ceja Andina en la Reserva Ecológica El Ángel, se localiza en forma de islas en el interior de un cuño de páramo de frailejones. Estas fracciones son diminutas, por lo tanto, son fragmentos inservibles de un ecosistema y en riesgo de extinguirse [12].



Figura 1.5. Bosque montano alto.
(Fuente: MAE-FAO, 2015)

1.1.2. Usos y afectaciones al ambiente

Con el problema de la tala indiscriminada de los bosques y la contaminación por medio de gases al ambiente, se genera el riesgo de perder una extensa diversidad y beneficios ambientales que proporcionan gran provecho a la sociedad como:

- Panorama
- Suministro de agua
- Cuidado de suelos
- Captura de CO₂
- Producción de oxígeno
- Conservación de biodiversidad
- Medios genéticos
- Aspecto étnico-cultural
- Elementos maderables y no maderables.



Figura 1.6. Biodiversidad de bosques montanos en Ecuador.
(Fuente: MAE-FAO, 2015)

Una idea para mejorar la forma de aprovechamiento de los bosques andinos es la obtención directa de sus bienes físicos. Cabe recalcar que dicha actividad debería ejecutarse dentro de los criterios sostenibles, ya que puede llegar a ser completamente negativo para el ecosistema [11].

Estos tipos de bosques son ecosistemas poco reconocidos y gravemente amenazados en el Ecuador. Desde hace 15.000 años, el ser humano ha provocado impactos sumamente perjudiciales en el ambiente y se considera que se ha eliminado el 92,5% de los bosques a causa de la deforestación. En nuestro país se continúa empleando la tierra para pastoreos, cultivos y combustible en la totalidad de los Andes. Este método de deforestación, así como es empleada para limpiar grandes hectáreas de bosque con objetivos agrícolas y otros, es perjudicial para el medio ambiente [12]. El efecto invernadero se produce por la gran cantidad de dióxido de carbono desprendido. La tala de árboles y la cubierta vegetal destruyen el ecosistema, aumenta la carga de residuos de los ríos y apresura la erosión, produciendo que las inundaciones sean más dañinas [5].



Figura 1.7. Vegetación de bosques montanos en Ecuador.
(Fuente: MAE-FAO, 2015)

1.2. Tipos de especies forestales arbóreas endémicas del Ecuador de donde se obtiene carbón vegetal

La madera que se prefiere para la producción de carbón vegetal en el Ecuador, por su alta densidad, es la del arrayán. Sin embargo, por el nivel de tala de esta especie en el país, es muy complicado adquirirla. La tendencia de los últimos años es utilizar otros tipos de especies que se originan en diferentes provincias ecuatorianas (Azuay, Imbabura, Morona, Chimborazo, Cañar, Zamora, Pichincha, Carchi, entre otras) [17] para la producción de carbón vegetal. Algunas de las especies usadas son: moquillo (*Saurauia herthae Sleumer*), madroño (*Alzatea verticillata*), pumamaqui (*Oreopanax ecuadorensis Seem*), quishuar (*Buddleja incana*), almizcle (*Clethra fimbriata Kunth*), encenillo (*Weinmannia elliptica Kunth*), encino colorado (*Weinmannia cochensis Hieron*), palo rosa (*Vallea stipularis*), candellillo (*Abatia parviflora*), canelo (*Persea ferruginea Kunth*), charmuelan (*Myrsine guianensis*), samil (*Myrsine dependens*), radial (*Lomatia hirsuta*), motilón (*Hyeronima asperifolia*), cascarilla (*Cinchona officinalis*), árbol queñual (*Polylepis pauta Hieron*), botoncillo (*Gordonia fruticosa*), entre otros [12].

Como bien se sabe, el Ecuador posee inmensa diversidad de especies arbóreas, donde gran cantidad de estas han sido objeto de investigación, sobre todo por sus principios activos y su potencial para ser utilizadas como especies maderables o para la obtención de combustible (leña o carbón vegetal). Sin embargo, algunas de ellas aún no han sido estudiadas como materia prima para obtener carbón vegetal, por ejemplo: el motilón, pumamaqui, palo rosa, charmuelan y cascarilla. En este trabajo se caracterizó con espectroscopía Raman las muestras de carbón vegetal a partir de esas cinco especies. El ANEXO I., contiene la descripción de cada una de ellas.

1.3. La Madera

1.3.1. Definición

La madera es la materia prima adquirida de la zona inferior de la corteza de los árboles con tronco leñoso y representa un componente excelente debido a sus propiedades físicas como densidad, resistencia y flexibilidad. También presenta rendimientos estéticos, ambientales y económicos. En el Ecuador, hace 5 años se utilizaba alrededor de 5 millones de m³ al año de madera en su estado original para distintas aplicaciones como en construcción, tableros, muebles, leña y carbón. El principal origen de suministro de este material sigue siendo los bosques nativos, los cuales generan el 70% (3,5 millones de m³) [18].

Constituye parte del tronco de los árboles y su trabajo es conducir las sustancias nutritivas y el agua desde el suelo hacia las hojas, brindar sostén a las ramas que conforman la copa y mantener estable las sustancias de reserva. Debido a su porosidad y gran fortaleza en relación con su peso, la convierten en un material completamente distinto de los otros [19]. La madera está compuesta principalmente por oxígeno, hidrógeno y carbono, los cuales al combinarse generan los principales constituyentes de este material: lignina, celulosa y hemicelulosa en diferentes cantidades dependiendo de la especie [20]. Su pared celular es delgada y dúctil, pero se endurece con el pasar del tiempo, en especial, por el amontonamiento de celulosa, la cual, le brinda impermeabilidad y rigidez, ya que es una sustancia macromolecular de los glúcidos y lignina. Las fibras de celulosa constituyen un almacén en el que se acumula la lignina, únicamente cuando en la pared celular se consigna la lignina se genera la madera. La célula de la madera desgastada posee estructura definida, rígida y dura [19].

1.3.2. Propiedades

1.3.2.1. Propiedades Físicas

- **Heterogeneidad:** Aunque las maderas generadas por una especie idéntica tienen leves alteraciones, ningún árbol es igual a otro. Estas alteraciones se dan por la temperatura del lugar del que proviene el árbol, el suelo donde el árbol se instauró y los recursos de agua [21].

Anisotropía: La dirección del esfuerzo administrado tiene relación con el resultado mecánico, ya que en la parte interna del tronco se extienden fibras longitudinales [21][22]. Estas direcciones son:

- Radial: dirección en ángulo recto a la dirección axial que sigue un radio del tronco.
- Axial: dirección en ángulo recto al centro del tronco.
- Tangencial: dirección normal a la dirección axial o radial.

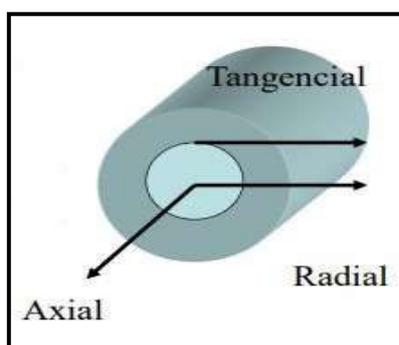


Figura 1.8. Direcciones del esfuerzo suministrado.
(Fuente: Barluenga, 2017)

- **Humedad:** La madera, ya que proviene de los árboles abarca desde un inicio gran proporción de agua en su interior. Es el vínculo que existe entre la cantidad de agua y el peso de la madera seca. La humedad en la madera de una especie es diferente de otra [23]. Esta propiedad existente entre el aire y la madera depende de los requisitos climáticos del ambiente en el que está localizado y expuesto el material; la proporción de agua en la madera, la humedad relativa y la temperatura del aire son los más considerables [24]. Este vínculo de humedad afecta de manera considerable las propiedades y el rendimiento de la madera, ya que este contenido es relevante [25].
- **Deformación:** Se presenta cuando el volumen de la madera cambia debido a la variación en la cantidad de humedad, contracción e hinchamiento. Esta variación en sentido de las fibras (conjunto de células que brindan soporte y se orientan a la dirección del eje), es solamente notable en dirección transversal. Todos estos cambios dimensionales radican en la absorción del agua de las paredes de las fibras leñosas, el agua se alberga entre las células provocando que se unan o se separen [22].

- **Densidad:** Detalla el grado de compactación de una sustancia. Se considera como la relación existente entre la cantidad de materia leñosa (masa de la madera), por unidad de volumen [21]. La densidad real, correspondiente a la pared celular, es la misma para todas las especies: $1,5 \text{ g/cm}^3$. La densidad aparente es diferente, incluso en maderas de la misma especie, esta depende del origen del árbol, del grado de humedad y de la abundancia de poros [22][26].

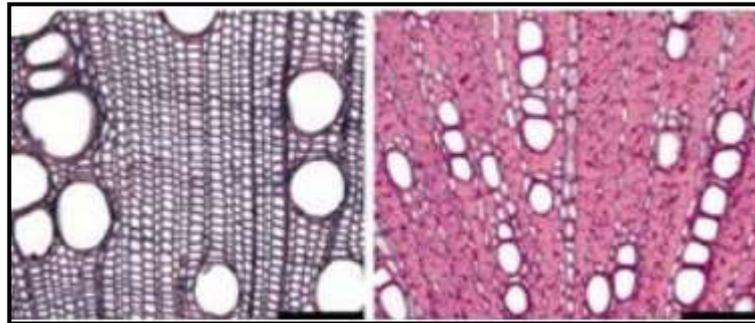


Figura 1.9. Perspectivas microscópicas de las paredes celulares de la madera de baja y alta densidad, respectivamente.

(Fuente: Castraño Ruiz & Jaramillo Ordoñez, 2017)

- **Peso:** El peso de la madera depende de ciertos factores como: edad del árbol (los árboles maduros son más densos y pesados que los árboles jóvenes), humedad (la madera que ha tenido tiempo de secarse es menos pesada que la recién cortada con sierra), velocidad de crecimiento (la madera que crece rápidamente es menos densa y pesada), resina (la madera que abarca este compuesto es más pesada que la que no lo contiene) y densidad (mientras exista menos espacio entre las fibras que componen la madera, mayor tejido leñoso y menor cantidad de aire presentará la muestra seca, dando lugar a que sea más pesada) [21].
- **Estabilidad:** La madera que ha sido cortada recientemente elimina agua hasta alcanzar una estabilidad con el hábitat. Las maderas con mayor estabilidad son aquellas que durante el secado se contraen un poco y conservan su forma. Esta propiedad depende de la posición del tronco y del crecimiento del árbol [25].
- **Aroma:** Su intensidad depende del lugar donde nació el árbol. Esta propiedad se origina gracias a componentes químicos retenidos en el duramen [22] (tejido inerte y fibroso que se encuentra en el tronco de ciertas especies) [21].

- **Aislamiento térmico:** La transmisión de calor es muy difícil gracias a los huecos que tiene la madera, considerándolo como un buen aislante térmico [25].
- **Aislamiento acústico:** Posee bajo aislamiento al sonido [22].

1.3.2.2. Propiedades Mecánicas:

- **Dureza:** Es la resistencia establecida por la madera a la penetración de herramientas o desgaste. Esta propiedad es mayor en árboles maduros que en los jóvenes y es menor en la albura (capa blanda localizada bajo la corteza de tallos leñosos que conduce los nutrientes provenientes de la fotosíntesis) que en el duramen (tejido inerte y fibroso que se encuentra en el tronco de ciertas especies) [21][22].
- **Hendibilidad:** Propiedad de la madera a fracturarse en la dirección de sus fibras, por medio de un esfuerzo transversal de tracción [22].
- **Elasticidad:** El módulo de elasticidad en compresión es menor que en tracción. Dicho módulo depende de la aplicación de las cargas, de la dirección del esfuerzo, de la humedad y de la especie de la madera [22].
- **Fatiga:** Es la tensión máxima que la madera puede resistir sin quebrarse [22].
- **Resistencia a la flexión:** En dirección tangencial o radial a las fibras, la madera no soporta absolutamente nada al esfuerzo de flexión, pero si lo hace cuando se lo ejerce en dirección perpendicular [22][27].
- **Resistencia a la compresión:** Esta propiedad se incrementa cuando se reduce el grado de humedad, sin embargo, es constante cuando se encuentra debajo del punto de saturación de las fibras que conforman la madera (30%). La resistencia es mayor cuando el esfuerzo se aplica en la dirección de las fibras [22][27].
- **Resistencia al corte:** Es la habilidad de soportar fuerzas que son próximas a que una zona del material resbale sobre la zona adyacente a ella. Esta acción ocurre paralelamente a las fibras que conforman la madera [27].

- **Resistencia a la tracción:** Esta propiedad se aumenta en la dirección paralela a las fibras que conforman la madera. La rotura en tracción se genera de forma inesperada. La resistencia se ve influenciada por la propiedad anisótropa de la madera y no depende del peso específico [27].

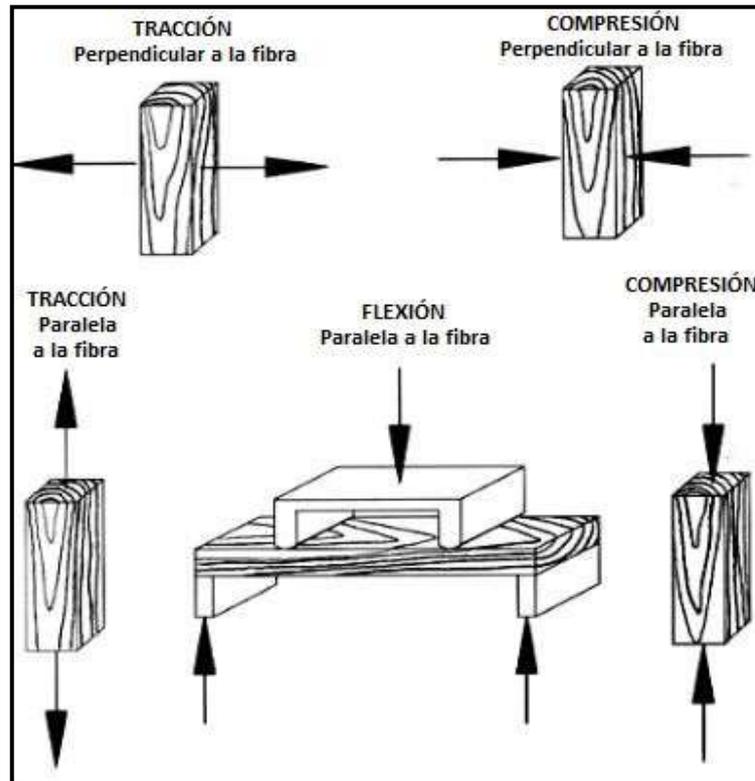


Figura 1.10. Dirección de los esfuerzos de los diferentes tipos de resistencias aplicados a las fibras de la madera.
(Fuente: Barluenga, 2017)

1.3.2.3. Propiedades Químicas

La composición química de la madera está dado por 50% de carbono, 42% de oxígeno, 6% de hidrógeno, 2% de nitrógeno y otros elementos. Por otro lado, la madera presenta tres diferentes componentes principales (celulosa, hemicelulosa y lignina), a su vez, se presenta en poco porcentaje material orgánico (extractivos) y material inorgánico (cenizas). Las propiedades mecánicas y físicas de la madera dependen de la composición química de la misma [27].

Componentes de la madera:

- Celulosa (40-50%): Es un polímero conformado por unidades de glucosa [27], conforma las paredes de las fibras de la madera y posee buena resistencia a la

tracción [22]. Es resistente a los agentes químicos y posee una estructura fibrosa o lineal, ayudándola a ser impenetrable al agua, insoluble en casi todos los disolventes, inalterable al aire seco y generando fibras compactas [28][27].

- Hemicelulosa (20-30%): Es un polisacárido constituido por cinco azúcares (manosa, xilosa, glucosa, galactosa y arabinosa). No compone fibras por sí misma [22], lo que la hace más vulnerable que la celulosa [27].
- Lignina (20-30%): Es un polímero natural, amorfo y aromático, formado por la unión de varios ácidos y alcoholes fenilpropílicos (coniferílico, cumarílico y sinapílico) que proporciona rigidez, dureza y protección [29][27]. Se encarga de unir las fibras de celulosa [22].
- Componentes secundarios (5-7%): Contribuyen con el aroma de la madera y con los efectos nocivos para los seres vivos. Estos componentes son: grasas, resinas, ceras, azúcares, almidones, compuestos nitrogenados y sustancias fenólicas [22]. Por otro lado, se presenta también la ceniza, la cual posee menor cantidad de potasio, calcio y magnesio; y cantidades diminutas de fósforo, hierro, níquel, azufre, silicio, plata, cobalto, aluminio, bario, plomo, sodio, titanio, manganeso y oro [27].

1.3.2.4. Propiedades Térmicas

La madera se contrae cuando se reduce la temperatura y se dilata con el calor, aunque este fenómeno no es muy notorio, ya que, al incrementarse la temperatura provoca una reducción de la humedad. El paso de calor es mejor en la dirección de las fibras que conforman la madera; aunque, este paso depende de la humedad, del peso específico y de la especie de madera [25][27].

1.3.2.5. Propiedades Eléctricas

La madera seca es un excelente aislante eléctrico, a medida que se incrementa la humedad, se disminuye su resistividad. Esta resistividad se aumenta cuando el peso específico es mayor, se disminuye en la dirección de las fibras y se incrementa en especies compuestas por resinas [25][27].

1.3.3. Diferentes Métodos para la Producción de Carbón Vegetal

Las distintas condiciones controladas de carbonización conllevan un correcto dominio del ingreso de aire en las áreas de descomposición térmica. Dicho dominio obedece al método de carbonización que se va a utilizar y/o proceso de calentamiento a emplear. Los métodos con mayor frecuencia para la producción de carbón son: fosas, huaironas, hornos y parvas [2].

La mayoría de los hornos empleados para producir carbón vegetal son elaborados de manera artesanal con componentes que se encuentran en la zona donde se produce la leña. En países africanos, dichos componentes pueden ser: hojas, ramas y recubiertos con tierra. En Ecuador, dicho componente puede ser el aserrín de madera ubicado encima de un montículo de pedazos de leña de distinto tamaño [30].

1.3.3.1. Métodos Artesanales

Estos métodos son los más antiguos y tradicionales, consisten en usar la tierra como protección contra el oxígeno y como aislante de la madera que se carboniza frente al aumento extremo de calor. Actualmente se siguen empleando estos métodos para producir mayor cantidad de carbón vegetal en comparación con otros métodos [30].

No se necesita de ningún tipo de financiamiento, se asientan en el lugar que se desee, requieren demasiado cuidado y control durante el proceso. Exige una óptima experiencia del personal que va a ejecutar el proceso, se desperdicia una pequeña cantidad del producto al momento de mezclarse con el suelo. En entornos muy húmedos existen algunos inconvenientes para su funcionamiento, ya que necesita de un adecuado drenaje externo. Sus periodos de producción son extensos y van desde 1 hasta 12 semanas [1].

- **Método de Fosa**

La capa de suelo debe ser franco arenosa, bastante profunda y cubierta con tierra. El periodo de proceso es bastante extenso, prolongándose en ocasiones hasta 12 semanas, y su capacidad es altísima de hasta 30 m³ [1].

Este método tiene un pequeño costo de inversión, por lo cual es aconsejado montarlo donde existe exceso de madera, se requiere tan solo de un hacha, una pala y fósforos. Dicho método desaprovecha demasiados recursos y es muy complicado manejar el desplazamiento de los gases dentro de la fosa. Gran cantidad de madera se consume terminando en cenizas, ya que ingresa gran cantidad de aire. Durante el quemado, la madera no se seca ni se calienta de forma adecuada, por lo que la otra parte acaba parcialmente carbonizada [30]. Debido a que la carbonización dentro de la fosa empieza en un borde y avanza hacia el otro, tanto los componentes volátiles como la calidad del carbón varían [30]. Es decir, en el borde donde el fuego empieza, el carbón fabricado es de estupenda calidad, pero en el otro borde muchas veces terminan maderas sin carbonizarse [1].



Figura 1.11. Horno tipo fosa.
(Fuente: Guillen, 2008)

- **Método de Parvas**

Llamado también pila de madera, es un método tradicional y usado en varios países. Consiste en montar una pila de leña y madera, cubierta con tierra y pasto encima de la superficie del suelo. Van desde 1 a 1,5 metros de altura y son aproximadamente de 4 metros de diámetro en la base. En esta base se presentan entradas de aire y una abertura por encima de los 20 centímetros. Es un método variable que se acomoda a la producción de pequeña y/o gran escala [1].



Figura 1.12. Horno tipo parva.
(Fuente: Guillen, 2008)

El concepto de proceso es similar al de la fosa, es decir, la madera a quemar se contiene en el interior de una impenetrable cámara de tierra. Para este método se inclina por un suelo delgado, duro y con rocas [30].

Las causas que frenan las magnitudes de las técnicas de parvas son el de conservar un estupendo cerrado frente el aire y un óptimo desplazamiento del mismo durante todo el tiempo de quemado. Es muy complejo localizar las penetraciones en la cubierta y repararlas, sobre todo en parvas muy extensas [30].

- **Método de Parva Sueca de Tierra con Chimenea**

La unión de una chimenea externa acoplada por un conducto fabricado bajo la pila de madera y la adherencia de una base circular, es la razón que lo diferencia con el método de parvas tradicional [1]. Dicha chimenea minimiza la pérdida de calor durante el proceso de carbonización y aumenta el desplazamiento del gas. Este método lograba producir enormes cantidades de carbón vegetal, pero disminuyó su uso con la llegada de los sistemas de hornos de ladrillo [30].

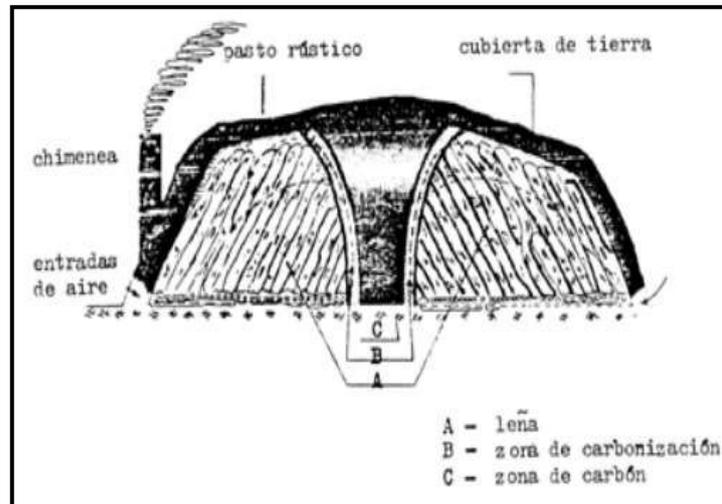


Figura 1.13. Diagrama de horno tipo parva sueca.
(Fuente: Guillen, 2008)

- **Método con Horno Casamance**

La base de este método se configura por dos capas de madera, la capa mediana se dispone en forma tangencial, atravesando la capa pequeña, y la capa pequeña se dispone en forma radial en torno al punto medio de la base. Este horno se envuelve con arbustos, pasto y con suelo de gran productividad agrícola. Dispone de un cúmulo recolector de líquidos y chimenea [1].

El diámetro de la base del horno Casamance cambia con respecto al volumen de la parva. Esta base fortalece el curso de aire en el interior de la parva, las capas conformadas por maderas de 40 centímetros de diámetro se reparten desde la mitad hasta un aproximado de 50 centímetros del borde de la base. Las maderas de 20 a 40 centímetros forran casi por completo el resto de la base, rodeando y fortaleciendo la parva. El último anillo está conformado de maderas de 20 a 40 centímetros de diámetro colocadas encima del borde externo de la base [30].

1.3.3.2. Métodos Industriales

Necesitan de un financiamiento inicial. No se los puede destruir o derribar para de nuevo ser montados en otra área, ya que son de condición fija. Su tiempo de duración es extenso y su inversión es recompensada por su eficiencia. Para que el traslado no sea un impedimento, el equipo debe ser armado cerca de la fuente de madera [1].

- **Método con Horno de Ladrillo**

Se caracteriza por ser uno de los métodos más populares y eficientes para la fabricación de carbón vegetal. Se requiere de un financiamiento prudente y no se necesita de mucha mano de obra. Ofrecen carbón de excelente calidad, idóneo para todo fin industrial o doméstico. Estos hornos deben ser simples y bastantes macizos para resistir las tensiones mecánicas de carga y descarga, a su vez, deben resistirlas tensiones térmicas del enfriamiento y calentamiento. Su tiempo aproximado de vida es de 6 a 10 años, este tiempo puede variar en el caso de que existan factores perjudiciales, como es el caso del clima [1].



Figura 1.14. Horno de ladrillo.
(Fuente: Guillen, 2008)

Alrededor de todo el mundo existen algunos tipos de estos hornos de ladrillos, como son: el horno medio naranja de Argentina, el horno colmena de Brasil y el horno Missouri de EE.UU. Una porción de la madera que se encuentra cargada en el interior de estos hornos es quemada, con el fin de que el sobrante sea carbonizado.

Otro ejemplo de los hornos de ladrillo, es el horno Schawartz de Europa, el cual desde un fogón externo utiliza un torrente de gas caliente que atraviesa el horno, con el fin de propagar el calor para secar, calentar y carbonizar la madera [30].

- **Método con Horno Metálico**

Son fabricados de acero o metal, la cubierta inferior del horno soporta las mayores tensiones debido al calor, por lo cual, su espesor debe ser mayor a los 3 milímetros. La tapa y la cubierta superior pueden tener un espesor máximo de 2 milímetros [30].

Su construcción tiene un precio mayor al de un horno de ladrillo, depende de una inversión inicial y de talleres especiales, son cilíndricos y transportables. Admite un gran dominio de la corriente de gases y de la entrada de aire. Las personas que se encargan del proceso dentro del horno deben prepararse, aunque no se necesita de tanta supervisión. El periodo de trabajo va de 2 a 4 días.



Figura 1.15. Horno metálico.
(Fuente: Guillen, 2008)

Pueden trabajar con cualquier especie de madera, pero esta debe tener una medida específica por lo que suelen ser cortadas. Su tiempo aproximado de vida es de 2 a 5 años. Al momento de instalar el horno se debe preparar el suelo para que sea estable [1].

- **Método con Horno Metálico fabricado de barriles de aceite**

Se fabrican empleando barriles metálicos de 55 galones. En este tipo de hornos se prefiere el uso de madera que se queme velozmente como madera de cáscara o palma de coco. Su proceso es fácil y se requiere de una mínima supervisión, ya que una sola persona puede supervisar hasta 10 hornos al mismo tiempo y generar 1,5 toneladas de carbón en una semana. Su capacidad por barril para producir carbón vegetal es pequeña [1].



Figura 1.16. Horno metálico de barriles de aceite.
(Fuente: Guillen, 2008)

El periodo de tiempo que dura el proceso de carbonización va de 120 a 180 minutos, continuando con un período de enfriamiento de 180 minutos. La madera a carbonizar debe ser cortada en un diámetro de 50 milímetros y un largo no mayor a 300 milímetros. Es un método costoso, ya que los barriles de aceite de segunda mano son caros, complicados de conseguir y sustituir [30].

1.3.4. Carbonización en atmósfera controlada

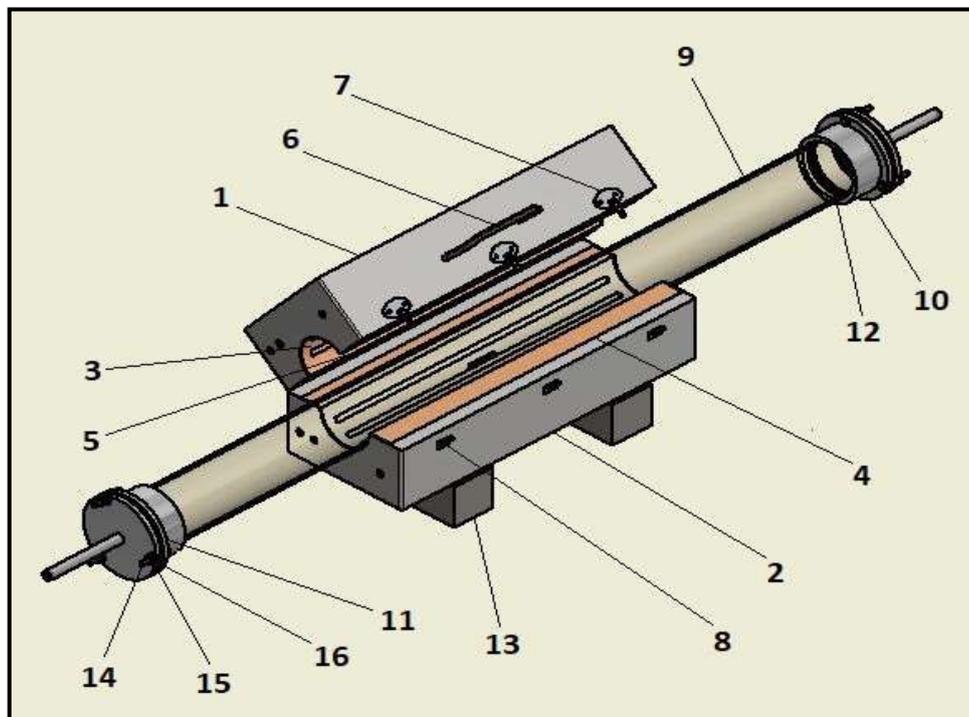


Figura 1.17. Horno de atmósfera controlada.
(Fuente: Propia, 2021)

Tabla 1.1. Elementos del horno de atmósfera controlada.

N°	Denominación
1	Carcasa metálica superior
2	Carcasa metálica inferior
3	Estructura interna superior
4	Estructura interna inferior
5	Unión
6	Sujetador
7	Broche superior
8	Broche inferior
9	Tubo de cuarzo
10	Brida interna
11	Brida externa
12	O-ring
13	Soporte del horno
14	Pernos métricos M8 de cabeza hexagonal
15	Tuercas hexagonales métricas M8
16	Arandelas métricas planas

(Fuente: Propia, 2021)

La carbonización, pirólisis o destilación seca es un proceso de descomposición térmica a vacío o en condiciones atmosféricas inertes (gas inerte), y la escasez de gases oxidantes, en el interior de un tubo cerrado con conductos de entrada y salida [20].

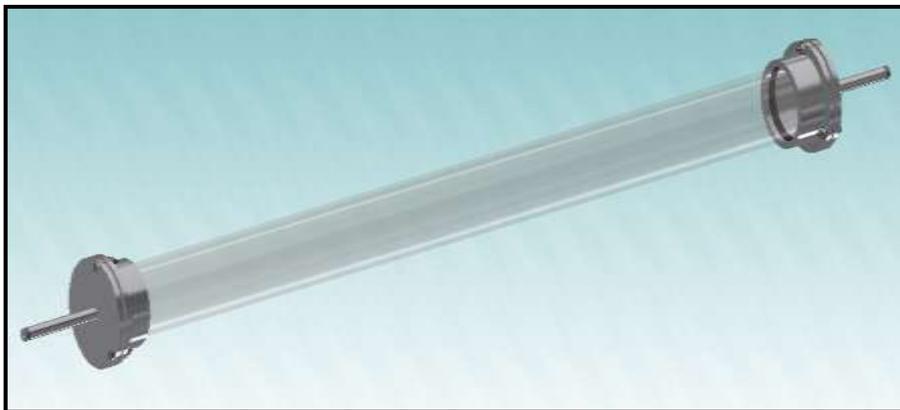


Figura 1.18. Tubo de cuarzo cerrado con conductos de entrada y salida (bridas internas y externas).

(Fuente: Propia, 2021)

Este conducto de salida está conectado a una bomba de vacío para extraer los gases que emite la descomposición de la madera [20]. El más susceptible de los principales constituyentes de la madera es la hemicelulosa, seguido de la celulosa; en cambio, la lignina es el constituyente más estable [31].

Por consecuencia de la destilación seca, se consigue la formación de carbón vegetal y del líquido piroleñoso, así como la liberación de volátiles (gases o vapores). Este líquido es una combinación de agua y sustancias orgánicas como son: etanol, ácido fórmico, ácido acético, furfural, metanol, ácido propiónico, alquitrán y compuestos fenólicos (sustancias de funciones fenol combinadas a estructuras aromáticas) [32][33]. A su vez, se produce una mezcla de gases no condensables que abarca monóxido y dióxido de carbono, etileno, hidrógeno, metano, entre otros [33].

La pirólisis posee un lugar valioso en la combustión de la madera, ya que mediante este proceso permite la liberación de energía térmica por parte del carbón vegetal y sus respectivos gases. La pirólisis convencional en la madera se acostumbra a iniciar a temperaturas por encima de los 100 °C hasta los 400 o 500 °C [34].

1.3.4.1. Proceso de Carbonización dentro del Horno Implementado

La transmisión de calor que se emite por parte de una fuente de calor, lleva a un incremento de temperatura dentro de la madera. Luego de esto, comienzan los efectos del proceso debido a dicho incremento de la temperatura que produce la liberación de gases y la formación de carbón. A continuación, se produce la emisión de los gases hacia el exterior, lo que da como resultado una transmisión de calor entre los gases calientes y la madera no carbonizada. Posteriormente, se produce la condensación de ciertos gases en las zonas más frías del contenedor en el que se encuentra la madera para generar alquitrán. Finalmente, se dan las reacciones de pirólisis secundarias (reacciones propias que producen la recurrencia sobre sí mismos) [34].

El carbón producido mediante destilación seca entre 280 y 380 °C posee un 78% de carbono, el resto se considera como material volátil. Este porcentaje se incrementa a 84% cuando se produce entre 380 y 500 °C, y a 91% entre 700 y 900 °C [20]. En la destilación seca de la madera se presentan cinco fases:

- **Pre-secado**

Cuando empieza a calentarse la madera, comienza esta etapa. Lo primero que se elimina es el agua contenida en las paredes celulares de la madera y se separan los gases de los compuestos orgánicos de las maderas que lo contienen, hasta alcanzar los 100 °C [20].

- **Secado**

Cuando se empieza el secado, la madera elimina gran porcentaje de agua, pero no en su totalidad, debido a que es un material higroscópico, es decir, atrae o entrega humedad que existe en el ambiente que la rodea en forma de líquido o vapor [23]. En esta fase la temperatura oscila entre los 100 y 150 °C. Se produce la eliminación de humedad, expulsando el dióxido de carbono y, liberando ácido acético y fórmico [31].

La madera debe secarse sin deterioro, en el mínimo tiempo y costo posible; de esta manera se obtiene un secado adecuado. En el caso que se desee secar con demasiada rapidez, existe el riesgo de provocar grietas internas y externas debido a la distribución del contenido de humedad por toda el área de la madera. En cambio, si se desea secar muy despacio, el coste de los recursos de secado sería costoso [35].

- **Transformación Endotérmica**

Esta transformación ocurre cuando se absorbe energía del entorno (horno), es decir, el calor se transmite desde el exterior hacia el interior del sistema. La proporción de energía potencial de los reactantes (madera) es menor que la de los productos (carbón). Por lo tanto, es necesario suministrar calor que proviene del entorno hacia los reactantes para que la reacción se produzca. La descomposición térmica de los vapores de aceite en gas y de la madera mientras se realiza el proceso de pirólisis, colabora a la transformación endotérmica del calor de reacción [36]. Es aquí donde se elimina las fracciones restantes del agua de la madera.

En esta fase se presenta la formación del monóxido y dióxido de carbono, así como vapores con porcentajes de ácido acético, alcohol metílico y trazas de alquitrán [20]. Esta etapa se la realiza a temperaturas entre 150 y 270 °C [37].

- **Fase exotérmica**

En esta fase se libera energía hacia el exterior del sistema en forma de calor. En esta etapa la temperatura es mayor a la temperatura de la transformación endotérmica. Es aquí en donde se convierten los reactantes en su totalidad, para dar lugar a los productos. La proporción de energía potencial de los reactantes es mayor que la de los productos, por ende, el exceso de energía se libera en modo de calor. La obtención del vapor de aceite del proceso de pirólisis, colabora a la fase exotérmica del calor de reacción [36]. La descomposición o fase exotérmica se la realiza a temperaturas mayores a 270 °C [37].

En esta fase se llega a la obtención máxima de ácido acético, alcohol metílico y alquitrán, los cuales son constituyentes del ácido piroleñoso. Se reduce la formación del monóxido y dióxido de carbono, y aumenta la producción de hidrocarburos. En esta etapa se incluye la carbonización, ya que cuando se alcanza la máxima producción de hidrocarburos, se incrementa la temperatura hasta 400 o 500 °C [20].

- **Enfriamiento**

Esta última etapa consiste en reducir la temperatura del carbón vegetal obtenido al final del proceso, y en disminuir la diferencia entre la temperatura del sistema y la temperatura del material resultante.

1.4. Carbón Vegetal

1.4.1. Definición

El carbón es un mineral constituido por la absorción sin oxígeno de la materia vegetal y de distintos elementos orgánicos. Se conforma de carbono cristalino con una configuración de capa aleatoria y con cierta cantidad de carbono amorfo bastante desordenado [38]. El carbón vegetal es un combustible sólido, se caracteriza por ser inerte, por tener un poder calorífico y reactividad superior a la madera, por su color negro y por su mayor cantidad de carbono fijo. No es perjudicado por elementos biológicos y es muy complicado que a condiciones normales atmosféricas sea alterado [39].

Este material es producto de la descomposición térmica de la biomasa sin presencia de aire a temperaturas mayores de 300 °C. Mediante cualquier tipo de biomasa se puede obtener carbón vegetal, pero generalmente se emplea madera. El proceso para su obtención dispone de una eficiencia energética menor al 50%, y al trabajar con el carbón vegetal como principio de energía se reduce la utilidad de la eficiencia global de los procedimientos [40].

1.4.2. Propiedades

Las propiedades que más sobresalen y afectan la calidad del carbón vegetal son:

1.4.2.1. Cantidad de carbono fijo

La cantidad de carbono que se encuentra en el carbón vegetal recibe el término de carbono fijo. Esta cantidad está vinculada con el contenido de lignina, ya que es el factor

que resiste más a la descomposición térmica. Por ende, es el que contribuye en su mayoría al carbón y es inversamente proporcional a la cantidad de holocelulosa [41]. La cantidad de carbono fijo varía entre 50 y 95%. El carbón se vuelve más quebradizo cuando tiene pequeñas cantidades de gases o vapores, y cuando su contenido es alto [42].

1.4.2.2. Poder calórico

Al momento de quemar un combustible se generan cantidades de calorías, a esto se lo conoce como poder calórico [41]. Cuando el poder calórico es superior, el calor que es indispensable para evaporar el agua que se produce al momento de la humedad del carbón y de la combustión de hidrógeno, no es tomado en cuenta.

Un carbón que posea pocos gases o vapores (sustancias volátiles) muestra mayor poder calórico que un carbón con más sustancias volátiles y bajo contenido fijo de carbono. A menor humedad, el poder calórico de la composición química de la madera y del carbón producido es mayor [42].

Esta propiedad depende de la temperatura de carbonización. Debido a que el carbón obtenido a 500 °C adquiere un contenido de carbono fijo más grande y sustancias volátiles con superior poder calórico, se define que este carbón posee un nivel calórico mayor que el carbón obtenido a 300 °C y 700 °C. El carbón que se obtiene a 300 °C mantiene elementos con pequeño valor calórico (resinas, alquitrán, etc.). A 700 °C la cantidad de carbono fijo es más grande pero ya no presenta sustancias volátiles de alto valor calórico. Por lo cual, se confirma una conexión favorable entre los niveles de carbono fijo y el poder calórico, pero una conexión negativa con la cantidad de sustancias volátiles [43].

1.4.2.3. Cantidad de humedad

Esta propiedad se elimina cuando ha culminado la destilación, depende de las circunstancias meteorológicas y de la forma de almacenaje. Casi siempre el porcentaje de humedad es del 1 al 16%, pero es aconsejable que sea menor al 4% para fines industriales. Si el carbón vegetal no es afectado por el agua o una cantidad considerable de humedad, su porcentaje no ascenderá al 5%. La humedad provoca que disminuya la cantidad calorífica del carbón [41].

1.4.2.4. Densidad aparente

Esta propiedad es notable, ya que los carbones densos generan más calorías en su combustión [44]. Esta densidad en la metalurgia y siderurgia tiene que ser lo más elevada posible [42].

La densidad aparente es la medida de la densidad del carbón tomando en cuenta su porosidad, los valores van desde 0,17 g/cm³ hasta 0,50 g/cm³ [44]. Estos valores varían según el tipo de madera de origen; aunque, también cambian por la condición de las muestras escogidas para la carbonización. Las fisuras internas robustas se presentan en muestras grandes de carbón vegetal fabricado, las cuales pueden ocultar el valor de la densidad aparente [43]. El carbón vegetal producido a altas temperaturas es menos denso que el producido a bajas temperaturas, ya que los gases o vapores se aumentan conforme se reduce la temperatura máxima de carbonización [44].

1.4.2.5. Material volátil

Abarca todos los desperdicios líquidos y alquitranosos presentes en el carbón vegetal que no desaparecieron en su totalidad en el proceso de destilación. La cantidad de dicha propiedad estima el tiempo para su transformación en carbón vegetal, ya que, cuando es baja la temperatura de carbonización y corto el tiempo al que está expuesto, la cantidad de volátiles es alta [41].

Esta cantidad volátil varía de 10 a 40%. Para que un carbón vegetal sea óptimo, debe tener alrededor de un 30% de estas sustancias. Un carbón que contenga menor porcentaje de material volátil será más complicado encenderlo, ya que es más quebradizo, pero no produce humo (combustión limpia). En cambio, cuando el carbón tiene alto porcentaje de este material volátil es más fácil de encenderlo, pero producirá humo [42].

1.4.2.6. Contenido de cenizas

Las cenizas son los restos inorgánicos resultantes de la combustión total del carbón. Su contenido depende del tipo de madera, de los contaminantes de la tierra y del contenido de corteza, varía entre 0,5 y 5,0%. Para que un carbón vegetal sea bueno, debe tener alrededor del 3% de cenizas [42]. El contenido de la materia inorgánica de la madera es directamente proporcional a la cantidad de ceniza. Consiste de dos fracciones: soluble e insoluble.

- La fracción soluble inorgánica afecta a los procesos industriales, ya que el carbón puede tener una cantidad máxima de cenizas.
- La fracción insoluble inorgánica, está conformada de sílice, provoca pérdida de poder calorífico y no perjudica a los procedimientos industriales. [41]

1.4.2.7. Aplicaciones

El carbón vegetal tiene distintos usos como recurso industrial:

- Secado directo e indirecto de productos.
- Combustible para la producción de cemento y cal.
- Desprendimiento de metales.
- Coloración de tintas y pinturas.
- Fabricación de pólvora.
- Labores de fundición.
- Absorbente de moléculas o iones.
- Clarificación de bebidas alcohólicas.
- Fuegos artificiales.
- Producción de plásticos y cauchos [42].

En cambio, para uso doméstico es recomendable emplear un carbón obtenido a temperatura máxima de 400 °C, por lo que resultaría poco denso, de fácil encendido y que produzca el menor humo posible [44]. Se utiliza como:

- Calefacción.
- Combustible doméstico para encendido de cocinas, parrillas, pollerías y asados.
- Recurso energético en ciertas comunidades rurales y semirurales [45].

Sin embargo, la deforestación es uno de los efectos negativos que ocasiona la fabricación de este producto. La fabricación del carbón vegetal y su combustión dan lugar a serios problemas ambientales, generando resultados perjudiciales para la salud humana. Uno de estos gases es el monóxido de carbono (CO), el cual es un gas sumamente venenoso y tóxico al ser conservado en entornos cerrados. Por lo tanto, es necesario ventilar dentro de las viviendas y apartar el brasero al momento de culminar con su uso, debido al riesgo de intoxicación.

1.5. Espectroscopía Raman

1.5.1. Descripción del efecto Raman

Es un fenómeno inelástico de dispersión de la luz, el cual proporciona el estudio de vibraciones y rotaciones moleculares [46]. Este efecto, es un fenómeno físico que se da por la interacción de la radiación que tiene el espectro electromagnético con la materia que impacta, más grande que la misma longitud de onda con la que irradia, causando que la luz se disperse en forma elástica o inelástica [47].

1.5.1.1. Dispersión Rayleigh o Elástica

Es aquella en donde el fotón dispersado conserva la misma longitud de onda, frecuencia y energía que el fotón incidente. Desde el estado básico original, la molécula es estimulada, hasta alcanzar el estado excitado, luego, decrece del estado excitado hasta el estado básico original [48]. No contribuye con nada de información respecto a la composición de la muestra resultante [49]. Existen algunas variables que demuestran el comportamiento de la intensidad y el ángulo con el que sale la luz, las principales variables que intervienen son: el ángulo de incidencia, la longitud incidente y el material a utilizar.

1.5.1.2. Dispersión Raman o Inelástica

En esta dispersión, en cambio, el fotón dispersado tiene diferente frecuencia, energía y longitud de onda que el fotón incidente. Se produce al momento que los fotones de la luz láser, estimula la molécula del entorno y la dirige desde el estado básico original hasta el estado excitado, luego de esto, los fotones decrecen del estado excitado al estado básico inferior (dispersión Raman Anti-Stokes) o superior (dispersión Raman Stokes), hasta el estado básico original [48]. La absorción dada por este último fotón, genera vibraciones moleculares, las cuales son localizadas por ciertos equipos, aportando de esta manera, información de la estructura molecular de la muestra. Las frecuencias Raman son las frecuencias actualizadas ($+V_r$; $-V_r$), propias de la condición física y química de la muestra, y que no dependen de la radiación incidente [46].

En este tipo de dispersión los cambios en las frecuencias que se producen, corresponden a transformación de energía. Los iones y átomos para constituir las redes cristalinas y moléculas sufren desplazamientos de rotación y vibración, estos movimientos se producen a frecuencias bien definidas en función de la masa de las partículas que participan y de la conducta dinámica de los enlaces reales [46]. Por lo tanto, la energía de luz incidente no alcanza para conseguir que la molécula se excite a un estado electrónico

de alta energía, por lo que el resultado producido de este esparcimiento es el cambio de estado vibracional de la molécula [50].

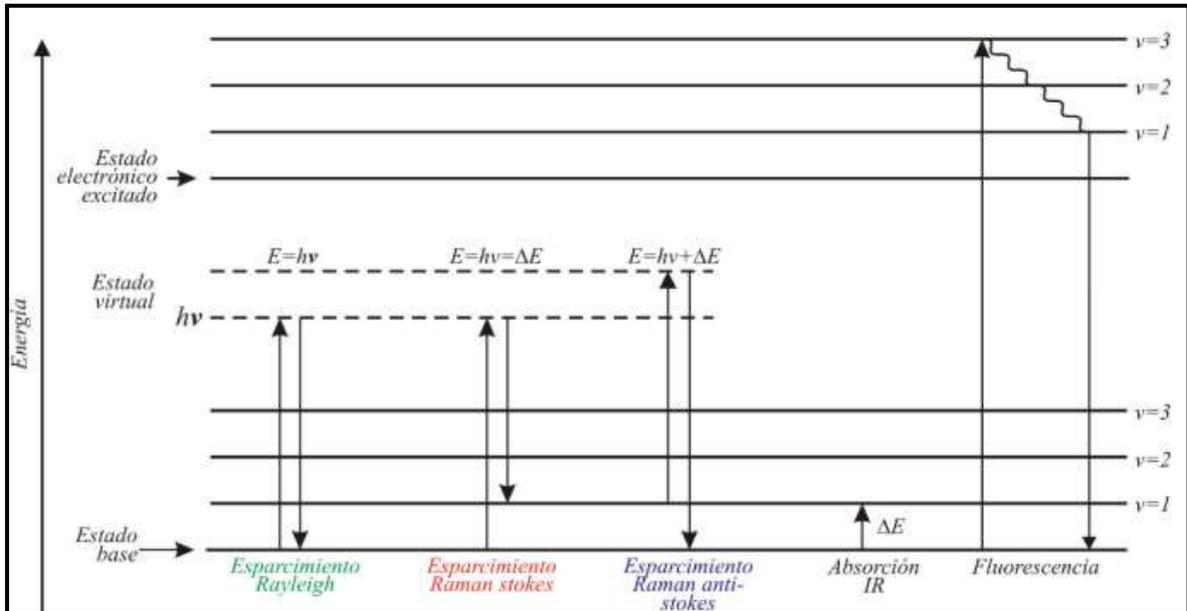


Figura 1.19. Saltos energéticos de un electrón. Al existir un decaimiento se emiten tres fotones, formando así, la dispersión Rayleigh, Raman Stokes y Raman Anti-Stokes (Fuente: Ramos et al., 2013)

La molécula es llevada por el fotón incidente a un nivel de energía de rotación y vibración no permitido, este cede de forma ágil, para conducir a uno de los niveles admitidos de energía emitiendo un fotón. La frecuencia con la que este fotón es arrojado va a depender del salto energético producido por la molécula. Existen los siguientes casos:

- Cuando el producto de la interacción fotón-molécula es un fotón dispersado a igual frecuencia que el fotón incidente, se establece que el choque es elástico, debido a que el fotón y la molécula no soportan cambios en su estado energético. El fotón dispersado y el incidente tienen la misma frecuencia (ν_0) y, la molécula regresa al nivel de energía que tenía antes del choque, estableciendo así la dispersión Rayleigh [46].
- Cuando el producto de la interacción fotón-molécula es un fotón dispersado a una diferente frecuencia del incidente, se establece que el choque es inelástico, es decir, presenta traspaso de energía entre la molécula y el fotón [46]. Si se da este caso, se puede presentar dos subcasos de esta dispersión:

- Dispersión Raman Stokes: Cuando el fotón incidente posee una frecuencia mayor que la del dispersado, se obtiene un traspaso de energía a la molécula por parte del fotón que, luego de realizar el salto al estado de energía no permitido, retorna a un estado permitido más grande al que tenía inicialmente. El fotón es dispersado con una frecuencia $(\nu_0 - \nu_r)$ [46][51].
- Dispersión Raman Anti-Stokes: Cuando el fotón incidente posee una frecuencia menor que la del dispersado, se obtiene un traspaso de energía al fotón por parte de la molécula. Es decir, antes que se produzca el choque, la molécula no se encontraba en su estado vibracional, sino que se encontraba en un estado de mayor energía. El fotón es dispersado con frecuencia $(\nu_0 + \nu_r)$ [46][51].

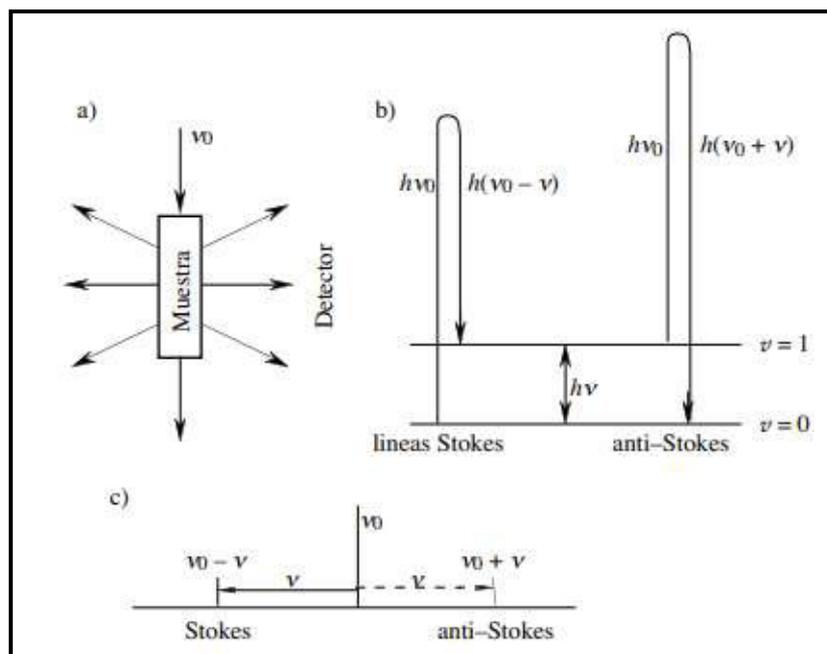


Figura 1.20.a) Radiación electromagnética de frecuencia ν_0 que se esparce al interactuar con una muestra. b) Dispersión Raman Stokes (izquierda), Dispersión Raman Anti-Stokes (derecha). c) Banda intensa sin efecto Raman en ν_0 (central); Banda de Stokes en $\nu_0 - \nu$ (izquierda); Banda Anti-Stokes $\nu_0 + \nu$ (derecha).

(Fuente: ALCALA, 2015)

1.5.2. Descripción de la técnica de caracterización por espectroscopía

Raman

La espectroscopía Raman es un procedimiento fotónico de resolución elevada, que otorga en un corto periodo de tiempo datos estructurales de elementos orgánicos y/o inorgánicos logrando de esta manera su reconocimiento [52]. Para su trabajo, utiliza los fundamentos antes mencionados, con el fin de crear los diferentes espectros que permiten descubrir las características de las muestras que se pretenden analizar.

Es una técnica que se fundamenta en la interacción de la radiación electromagnética y las partículas. Radica solamente en la interacción de la emisión y absorción por parte de la materia con su respectiva respuesta [47][53]. Mediante esta se crean espectros (huellas digitales) de los materiales [54], ya que al formar los diagramas da como resultado un espectro exclusivo del material, en donde los picos espectrales mantienen la misma posición, ratificando que los espectros son únicos, característicos y dependientes del material analizado [49]. En algunas ocasiones se puede variar las fuentes de luz del equipo, pero solamente crece o decrece la cantidad de absorción de los picos espectrales, y no varía su posición. Los espectros resultantes presentan tanto señal Raman como cierto tipo de ruido, el cual esconde la señal [48][53]. Existen tres clases de ruido: ruido de señal, ruido de fondo y ruido de oscuridad [55].

Su estudio trata de incidir un haz de luz monocromática de frecuencia (ν_0) sobre una muestra cuyas propiedades moleculares se pretenden determinar y analizar la luz dispersada por dicha muestra [47]. La mayor cantidad de luz dispersada ofrece la misma frecuencia que la luz incidente pero una fracción muy pequeña presenta un cambio frecuencial, consecuencia de la interacción de la luz con la materia [46].

El espectro Raman está constituido por una banda principal (Rayleigh) y dos bandas secundarias (Raman Stokes y Anti-Stokes). Las bandas secundarias están ubicadas de forma simétrica a los dos lados de la banda principal [46].

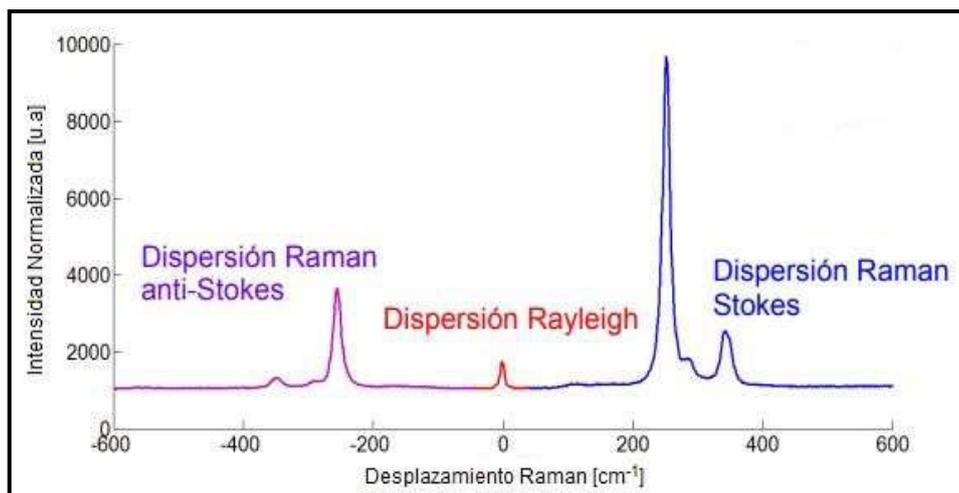


Figura 1.21. Bandas Raman Anti-Stokes, Rayleigh y Raman Stokes.
(Fuente: Massip, 2016)

Por lo tanto, la espectroscopía Raman es una técnica de análisis que se desarrolla de forma directa sobre el material que se desea analizar sin necesidad de algún tipo de preparación especial o específica. Teniendo en cuenta el material empleado, ciertos factores espectroscópicos característicos como la relación de intensidad, el ancho y la posición de la banda son usados para caracterizar las fallas [56].

Es uno de los métodos analíticos más poderosos hasta la fecha y, el que más rápido se adapta a las demandas del análisis muestral. Interviene en todos los medios de la investigación científica, ya que se fundamenta en vibraciones moleculares, las mismas que existen en cualquier cuerpo [46]. Ayuda a reconocer y distinguir la configuración de las moléculas, que va desde las amorfas hasta los cristales, de un estado gaseoso a sólido. Es producido por un dipolo eléctrico fluctuante originado por las incitaciones de los entornos esparcidos y el haz de luz incidente [56].

También ha concedido examinar el resultado vinculado entre las circunstancias de carbonización, la estructura de carbón y de tratamientos térmicos; así como el producto de la estructura en la reactividad de la gasificación [52]. La espectroscopia Raman es empleada como un método analítico viable, la cual tiene la capacidad de cubrir una vacante en la caracterización del carbón vegetal [57]. A su vez, se utiliza para caracterizar elementos fundamentados en carbono, como son:

- Carbonos perfectamente estructurados (diamantes).
- Carbonos aromáticos (nanotubos, nanocintas, grafeno).
- Carbonos amorfos [56].

1.5.3. Equipo

El equipo empleado es consistente y sencillo de usar, puesto que están conformados por una fuente de radiación (monocromática) responsable de crear la dispersión en una primera oportunidad. Este equipo ha ido mejorando con el pasar de los años, especialmente desde que surgió el láser de la fibra óptica y el dispositivo de carga acoplada (CCD), los mismos que fueron incluidos después de la aparición de la dispersión Raman. Hoy en día, existen equipos muy intensos que ejecutan un análisis completo de los espectros. Normalmente, todo equipo Raman está obligado en incluir ciertos componentes, sin embargo, existe la posibilidad de que estos tengan algún cambio [58].

1.5.3.1. Partes específicas que forman el equipo de espectroscopía Raman

- Láser: Fuente de luz monocromática utilizada para excitar la muestra. Este componente se encuentra en el interior del espectro electromagnético de la radiación ultravioleta (≈ 10 a 400 nm); de la luz visible (≈ 400 a 800 nm) y del infrarrojo cercano (≈ 800 a 2000 nm). Comúnmente, se utiliza fuentes de radiación del infrarrojo cercano. En su uso, la señal de ingreso transita por un conjunto de lentes y espejos, los mismos que ayudan a trasladar los haces de luz y difundirlos desde el láser o la muestra hasta los equipos de medición. Mediante el conjunto de espejos y prismas se logra emitir la muestra y recolectar la señal de salida, con el objetivo de calcular la diferencia entre la señal de ingreso y salida, y a su vez determinar la intensidad.
- CCD: Es responsable de guardar y manejar la señal recibida proveniente de las diferentes longitudes de onda que conforman la luz, para luego transformarla señal analógica en señal digital.
- Equipo Informático: Es un software apropiado que permite manejar los datos que llegan del CCD.
- Cabezal Óptico: Conjunto de lentes, espejos y filtros, que dirige la luz sobre el material con el que se va a trabajar. A su vez, recauda la dispersión Raman que retorna del mismo.
- Monocromador: Se encarga de liberar las longitudes de onda del haz de luz que se acumula dentro del cabezal.
- Fibra Óptica: Es el entorno que permite el paso de la luz monocromática proveniente del láser hasta la muestra, y el regreso hasta el monocromador [58].

1.5.3.2. Funcionamiento

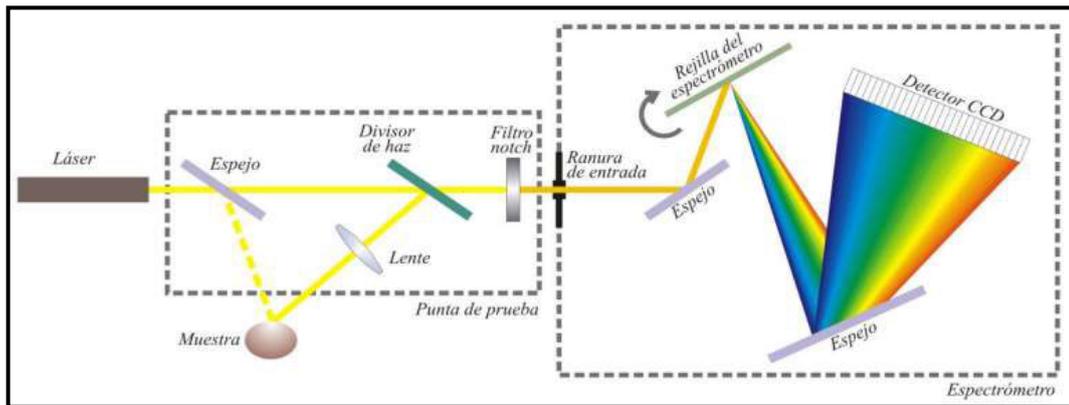


Figura 1.22. Diagrama básico para realizar espectroscopía Raman.
(Fuente: Ramos et al., 2013)

Inicialmente, se detecta la fuente de difusión propagada mediante un láser, en colaboración de prismas y espejos, se conduce la luz para que ésta choquen la muestra. Este desplazamiento se ejecuta incluso para el mismo láser, en el caso de que no esté ajustado, con la finalidad de alcanzar la zona de análisis [59].

Al instante de emitir luz por consecuencia de la dispersión, la muestra es focalizada por medio de espejos, y una vez más se conduce a la cámara de análisis. Antes de ingresar, la señal se traslada por medio de un filtro notch que suprime la señal procedente de Rayleigh; luego de esto, se permite el paso de la luz en el espectrofotómetro [59].

El equipo de espectroscopía Raman, es el encargado de difractar los haces de luz y calcular las distintas señales de absorción o intensidad, en relación a una cierta longitud de onda, para luego producir una señal que es conducida a los detectores, la cual puede ser de dos tipos: tubos fotomultiplicadores o detectores CCD. Estos últimos se encargan de transformar la señal analógica en señal digital. Finalmente, al obtener el espectro, este debe ser analizado [59].

1.5.4. Espectros

En un extremo del espectro Raman, aparece una sección para la dispersión Raman Stokes, y en el otro extremo, otra sección para la dispersión Raman Anti-Stokes. Normalmente se conserva la banda Raman Stokes, ya que es más potente y produce señales más destacadas para los distintos materiales con los que se trabaja [49][60].

En la sección Raman Anti-Stokes, se simboliza una reducida fracción de muestra, como combinaciones o aleaciones de metales, debido a una baja reacción de la red cristalina frente a la incidencia de los fotones sobre la muestra. En el espectro Raman se logra examinar distintas variables como características del material, por ejemplo, picos espectrales, posición de las bandas y el número de onda, entre otros; con el objetivo de definir con exactitud, la especie química y el material al que pertenece [54].

También se logra identificar la magnitud de bandas y picos, para elaborar investigaciones cuantitativas. Se puede establecer mediante la anchura de altura media (FWHM) la información de la aparición de tensiones que influye a las longitudes de enlace que participan en la dinámica vibracional. Un espectro Raman es la simbolización en un plano cartesiano del vínculo entre los desplazamientos de ondas en el eje de abscisas y las intensidades normalizadas de la dispersión inelástica en el eje de ordenadas [61].

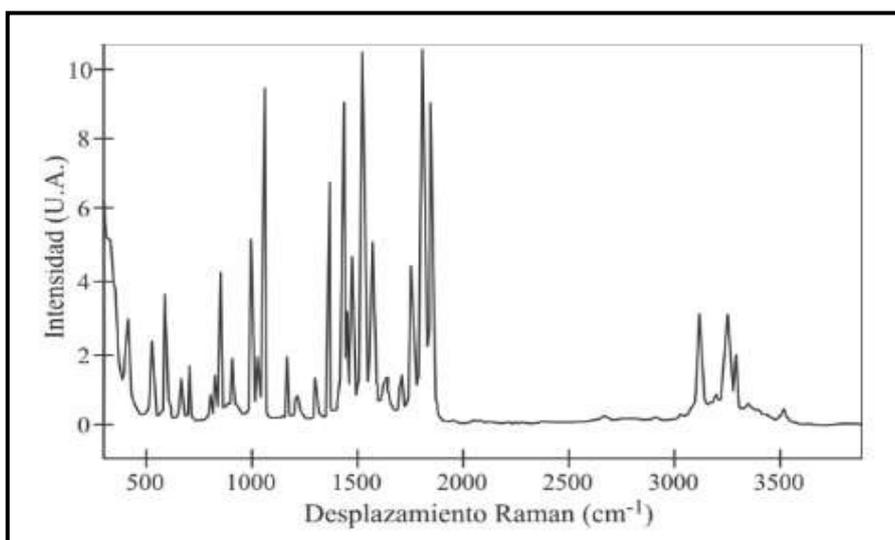


Figura 1.23. Espectro Raman del paracetamol.
(Fuente: Ramos et al., 2013)

La cantidad de picos se basa en el número de vibraciones eficientes en Raman que tiene el material. Los picos se encontrarán en el lado Stokes, cuando se haya establecido una vibración, en cambio, los picos permanecerán en el lado Anti-Stokes, cuando antes de la interacción, la molécula haya mostrado una vibración con los fotones de la fuente luminosa. Partiendo de los picos espectrales y del espectro, se logra identificar el tipo de interacción intramolecular que aparece, esto ayuda a comprender de mejor manera la conducta del material [49].

1.5.4.1. Bandas

Factores como posición de los átomos, masa, longitud del enlace y las fuerzas interatómicas son modificadores y alterantes de la frecuencia de la banda Raman. Por esta razón, todo tipo de efecto que varíe en estas propiedades provocará una distorsión en la frecuencia de la misma [62].

Explicando de mejor forma, la variación en el número de onda se genera por la aparición de impurezas químicas en la red cristalina y por el desorden cristalino. Por otro lado, la posición de la banda está completamente vinculada a la existencia de esfuerzos, ya que la reducción del número de onda del modo vibracional y el incremento del espaciado de la red, serán definidos por el esfuerzo de tracción. La forma y el ancho de banda Raman están totalmente vinculados con el orden cristalino. Analizando desde un inicio, el tiempo de vida de los fonones está vinculado con el ancho de banda, ya que con la existencia de desorden cristalino provoca una reducción del tiempo de vida de los fonones, lo que produce que el ancho de banda se incremente. En consecuencia, desde el ancho de banda se logra estimar la densidad de los defectos [62].

El carbono es un elemento químico no metálico, con número atómico 6 y, que adquiere una configuración electrónica global externa $[\text{He}] 2s^2 2p^2$, en el que se establece el gas noble anterior dentro de un corchete. Dicha configuración es apropiada al momento de requerir solamente los electrones más externos. La mayoría de los materiales de carbono poseen los tres tipos de hibridación de orbitales: sp^3 , sp^2 y sp ; pero en mayor porcentaje de átomos de carbono con sp^2 [63][64].

Es bien sabido que la estructura del grafito (sp^2) controla las explicaciones de los materiales de carbono. En gran porcentaje, las formas del carbono como: carbono tipo vidrio, carbón activado, fibras de carbono, carbono pirolítico, brea, negros de carbono, coque, mesofase carbonosa, entre otros, Poseen un vínculo con la estructura del grafito o del material gráfitico [64].

Así como se hablan de materiales gráfiticos, también aparecen los materiales no gráfiticos, los cuales se reparten en materiales gráfitezables, parcialmente gráfitezables y no gráfitezables. Los gráfitezables se originan a partir de precedentes abundantes en hidrógeno, abarcan una serie de controles cristalinos móviles, conducidos paralelamente entre sí, con enlaces atravesados. En cambio, los no gráfitezables se originan a partir de precedentes abundantes en oxígeno y mínimos en hidrógeno. Producen una amplia red

de enlaces rígidos entrelazados entre sí por distintas clases de carbono desordenado, brindando una enorme resistencia estructural al elemento [63][65].

Distintas formas del carbono no grafitizables son: el carbono tipo vidrio, el negro de carbono, el carbón activado, el carbón mineral, el carbonizado, el hollín y el carbón vegetal [63]. La forma más propia de estos sólidos es el carbonizado, ya que es el resultado de la carbonización del componente natural orgánico [63][66].

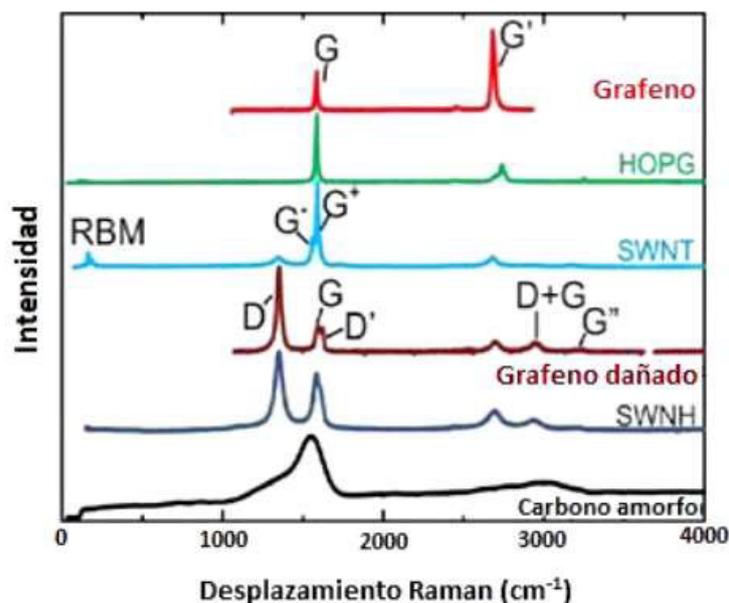


Figura 1.24. Espectros Raman de algunos materiales de carbono sp^2 . En manera ascendente: carbono amorfo; nanohornos de carbono de pared simple (SWNH); grafeno dañado; nanotubos de carbono de pared simple (SWNT); grafito pirolítico altamente orientado (HOPG); grafeno monocapa cristalino. La banda G' es llamada también 2D y la banda G es llamada también 2D'. (Fuente: Saito et al., 2011)

En 1980, se efectuó una investigación para definir las variaciones en los espectros Raman, la conducta y las propiedades de los materiales de carbón, como la carbonización, la grafitización y la coalificación (proceso en el cual la materia vegetal se transforma en carbón, de categoría cada vez más alta y con antracita como producto final). A la par, se desarrolló una investigación para tratar la práctica de la espectroscopia Raman a los coques y carbones. Esta investigación se encargó de la naturaleza orgánica e inorgánica de los carbones, la variación en la configuración mientras se efectúa la coquización del carbón, y la importancia de los minerales agregados en el proceso de carbonización del carbón. Dicho estudio establece cinco bandas (D'', D, A, G y D') en la estructura [57], adaptadas a la zona de 1000 hasta 1700 cm^{-1} [56]. Algunas de estas forman parte de las diferentes formas de carbono [67].

En ciertos casos, los espectros también disponen de ciertas bandas con un desplazamiento más alto. Este es el caso de la banda 2D [68] con valores que están entre 2700 y 2735 cm^{-1} , y es considerado un sobre tono de la banda D [57]. Debido a la dispersión de dos fonones, se produce esta banda. Mediante la provocación por parte del mecanismo de resonancia doble, es valorada como una banda activa [69][70]. Es constantemente visible, aún con muestras sin defectos [56]. Para los espectros resultantes, esta banda no existe, ya que la señal producida y los picos resultantes dentro del rango de la banda 2D, es producto del ruido generado. Este ruido presentado, posiblemente se produce porque la muestra no presenta mucho material, no es estable, se degrada con el tiempo o la intensidad del láser es demasiado alta.

1.5.5. Limitantes

Una de las pocas restricciones en el estudio del espectro dado por la espectroscopía Raman es el caso de la fotoluminiscencia. Dentro de esta aparecen dos fenómenos físicos: la fluorescencia y la fosforescencia. Este caso sucede en ambos fenómenos cuando, un constituyente extrae la radiación que entra, pero la diferencia reside en el periodo de tiempo que cada fenómeno demora en eliminar la radiación extraída [71].

La fluorescencia aparece cuando se está irradiando la muestra, por otra parte, en la fosforescencia la energía se acumula y se elimina de forma lenta. Al ocurrir la fluorescencia en las muestras y en los espectros, se manifiestan altercados debido a la magnitud de intensidad que aparece, siendo estas magnitudes superiores a la de la dispersión de Raman. Usualmente, al conseguir un espectro Raman, aparece en ciertos casos este fenómeno, el cual limita la exanimación de moléculas por el ruido, ocasionando un enmascaramiento de las bandas resultantes de Raman [58]. Existen ciertas formas para corregir este fenómeno:

- Sustituir la fuente monocromática con la cual se esté irradiando la muestra.
- Purificación de la muestra.
- Promediar la señal para optimizar la base señal-ruido.
- Emplear un láser pulsado.
- Reemplazar por otra técnica espectroscópica.
- Complementarla con otra técnica de estudio [50].

1.5.6. Ventajas y Desventajas

1.5.6.1. Ventajas

- Permite efectuar el estudio de soluciones acuosas, ya que la respuesta por parte del agua, es débil.
- Se pueden utilizar diferentes tipos de materiales como filamentos de polímeros, cristales, muestras biológicas, soluciones, polvos, muestras líquidas, metales oxidados o corroídos, etc.
- Es una técnica no invasiva ni destructiva, ya que no perjudica el material, porque únicamente se irradia la muestra con un láser monocromático de poca intensidad, evitando así, la destrucción de la muestra de estudio.
- Las muestras no necesitan ser preparadas para ser utilizadas.
- El estudio se desarrolla con un gran nivel de exactitud y en corto tiempo.
- Permite diferenciar componentes que presentan distinta forma de cristalización, pero igual estructura química [72].

1.5.6.2. Desventajas

- El fenómeno óptico de fluorescencia es el limitante de esta técnica.
- Las bandas son ocultas en ciertos casos por el ruido de fondo.
- Debido a la baja interacción de los fotones con la red cristalina, es difícil determinar metales o aleaciones excesivamente puras.
- Requiere de equipos o elementos muy delicados.
- Al trabajar con láseres de gran potencia, suelen perjudicar el material o cambiar el desplazamiento Raman [73].

1.5.7. Usos y Aplicaciones

- La técnica es empleada para el reconocimiento de diferentes tipos de explosivos, ya que no se necesita preparar la muestra. Esto es muy conveniente para la seguridad de edificios y aeropuertos.
- En las ciencias forenses, ya que no es una técnica destructiva, determina constituyentes sometidos a análisis, conservando la integridad de la evidencia.
- En biología y biomedicina, dicha espectroscopía es utilizada en ramas como odontología, dermatología, oftalmología y ortopedia. Logra diferenciar entre tejidos cancerosos u ordinarios.

- En la farmacología, permite controlar y supervisarla repartición de los ingredientes y de los excipientes de los fármacos.
- En biomedicina, se utiliza para realizar análisis de biopsias.
- Establecer la configuración de polímeros, reconociendo impurezas o elemento de una aleación.
- Reconocer los diferentes tipos de minerales en otros planetas, como se dio en el caso de la misión ExoMars 2016-2018 en Marte.
- Determinar el material del cual está elaborado cualquier tipo de obra, para colocarla en el periodo al que corresponde. Obligatoriamente, se necesita de una base de datos para cotejar los espectros resultantes.
- Es utilizada para el reconocimiento de diamantes, con el objetivo de determinar algún tipo de variación en el color y en su valor.
- En mineralogía y geología, esta técnica logra ejecutar un estudio estructural para concluir si una piedra preciosa es real o falsa.
- Manejar el volumen y la cristalización de las moléculas en los polímeros [58].

2. METODOLOGÍA

2.1. Implementación del horno de atmósfera controlada

2.1.1. Descripción

El horno de atmósfera controlada está conformado por dos partes que se acoplan entre sí, facilitando la carga del tubo de trabajo, o de una pieza de trabajo más pequeña. El diseño permite la comodidad de ubicar el horno en torno a un elemento fijo como un tubo con bridas, o alrededor de algún elemento que se mantenga estable. Ver Figura 2.1.

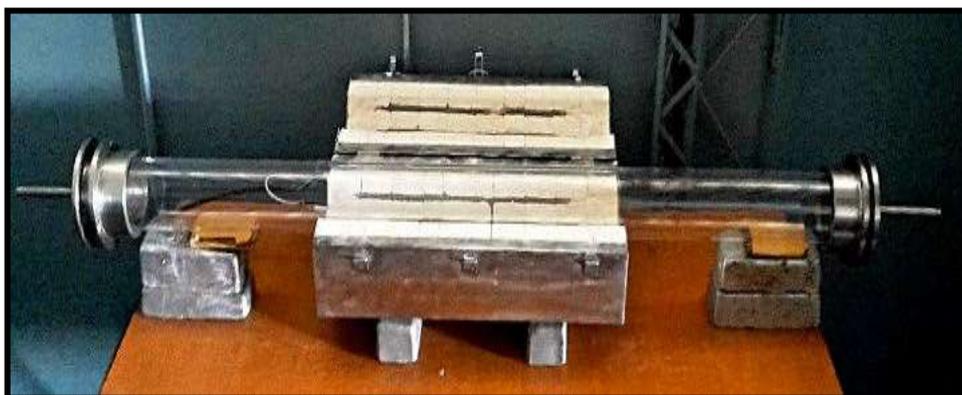


Figura 2.1. Horno implementado.
(Fuente: Propia, 2021)

Se compone de dos secciones rectangulares, la sección rectangular externa consta de dos carcasas metálicas (superior e inferior) que se abren y cierran mediante uniones de soldadura realizadas en la parte posterior de las carcasas. La sección rectangular interna se conforma de ladrillos refractarios, los mismos que se encuentran ensamblados dentro de cada una de las carcasas metálicas. Para más especificaciones y elementos que complementan al equipo de trabajo, ver el ANEXO XIII. (Ficha técnica del horno).

2.1.2. Estructura del Horno

2.1.2.1. Materiales, Herramientas y/o Equipos

- 20 ladrillos refractarios.
- 1 lámina metálica de acero inoxidable 304 de 1,22 x 2,44 m con espesor de 1,5 mm.
- 10 lb de mortero Polmax.
- Herramientas de mano como limadora, perforadora, etc.
- Cuchillas especiales de aleación de níquel.
- Fresa de diamante.

- Máquina láser de corte para metal.
- Máquina dobladora de láminas de metal de hasta 3 mm de espesor.
- Soldadura TIG, acompañada del gas inerte argón como atmósfera de protección.

2.1.2.2. Fabricación

➤ Sección Rectangular Externa

- 1) Inicialmente, se cortó a láser la lámina de acero para obtener dos cuerpos con las medidas requeridas y los radios de las aberturas donde se apoya el tubo de cuarzo.
- 2) A continuación, se doblaron las láminas metálicas con la máquina dobladora para conseguir la forma deseada.
- 3) Luego, se soldaron dos uniones en la parte posterior de cada carcasa, mediante soldadura TIG, para obtener el ensamblaje de las mismas.
- 4) Como paso final, se soldó un agarrador en la parte frontal de la carcasa superior, para permitir el movimiento de la misma y, 3 sujetadores en cada parte frontal de las carcasas para asegurar el cierre de las mismas.

Se escogió el acero inoxidable 304, ya que es la forma más común de acero usada a nivel global, debido a sus propiedades mecánicas y físicas, a su extraordinaria resistencia a la corrosión, resistencia calorífica, a su gran disposición en el mercado y a su costo, ya que actualmente este acero se comercializa entre \$ 1,55 y \$ 1,85 el kg. La composición química del mismo se detalla a continuación:

- $C \leq 0.08\%$
- $Si \leq 1.00\%$
- $Mn \leq 2.00\%$
- Cr 18% - 20%
- Ni 8% – 10,5% [74]

En la unión de las piezas metálicas, se empleó soldadura, ya que es uniforme y limpia debido a la carencia de humo y proyecciones. Se consigue también cordones más dúctiles, con mayor resistencia y menos susceptible a la corrosión en comparación con los otros métodos.



Figura 2.2. Carcasas metálicas externas.
(Fuente: Propia, 2021)

➤ **Sección Rectangular Interna**

- 1) Se cortó una sección de cada ladrillo en forma de media luna, para conseguir el mismo radio de las aberturas fabricadas en las carcasas metálicas de la sección externa.
- 2) En estas nuevas aberturas de media luna, se realizaron cortes por toda la sección de las mismas, adquiriendo así las canaletas donde irían colocadas las resistencias.

Todo esto se dio mediante cuchillas especiales de aleación de níquel, las mismas que han sido adquiridas y acopladas para el desarrollo específico del proyecto. Estas cuchillas se instalaron en una fresa de diamante donde se realizó el corte específico de cada área.

Los ladrillos refractarios son lisos y están adheridos uno con uno, para aumentar la firmeza de sujeción se agrega mortero, el cual también resiste altas temperaturas debido a su composición. Estos ladrillos son especiales en el revestimiento, soportan elevadas temperaturas sin afectar su estructura, sin dañar su resistencia y su conductividad térmica. Además de ejecutar su función de refractar, son extraordinarios depósitos de calor, es decir, conservan el calor al que son expuestos e incrementan la vida útil del equipo.

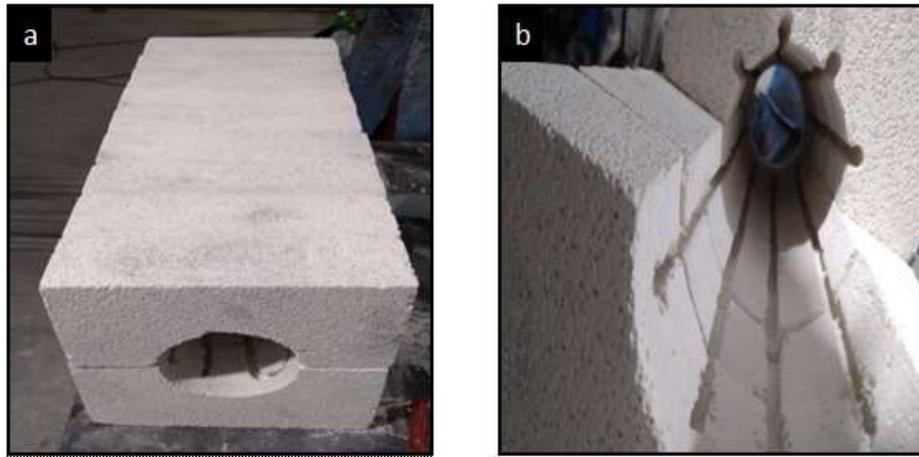


Figura 2.3. a) Estructura interna del horno fabricado de ladrillo refractario. b) Canaletas de la sección interna donde se colocan las resistencias.
(Fuente: Propia, 2021)

2.1.2.3. Acople

- 1) Primero, se acoplaron los ladrillos dentro de cada carcasa metálica.
- 2) Luego, se sujetaron los ladrillos por medio de una auto-presión realizada con la ayuda de una pequeña cantidad de mortero (arena, agua y cemento).
- 3) Finalmente, se soldaron 3 broches en las partes delanteras de las carcasas para brindar el cierre completo del horno cuando se lo desee.



Figura 2.4. Horno ensamblado completamente.
(Fuente: Propia, 2021)

No se colocó ningún aislante térmico, como por ejemplo lana de vidrio, ya que, al momento de levantar la carcasa superior, la presión que provocan los ladrillos, darían lugar que este aislante se aplaste provocando que se deforme, y los ladrillos se desplacen.

Se aplica poca cantidad de mortero para que no existan problemas en el bobinado. La auto-presión es tan grande que, para desmontar los ladrillos, estos deben romperse.

2.1.3. Zona de calentamiento

2.1.3.1. Materiales, Herramientas y/o Equipos

- Alambre Kanthal de 2 mm de espesor.
- Yeso extra duro de uso médico.
- Cuchillas especiales de aleación de níquel.
- Máquina bobinadora.

2.1.3.2. Fabricación

- 1) Se bobinó el alambre Kanthal.
- 2) Por todas las secciones de los radios de las aberturas conseguidas en los ladrillos de la sección rectangular interna, se efectuaron cortes, adquiriendo así, la forma de las canaletas donde irán colocados los alambres bobinados.



Figura 2.5. Bobinado del alambre Kanthal.
(Fuente: Propia, 2021)

2.1.3.3. Acople

- 1) Se sujetaron los alambres bobinados dentro de las canaletas de los moldes refractarios por auto-presión.
- 2) Se sellaron con yeso extra duro de uso médico los bordes abiertos que se encuentran en las esquinas de las canaletas, con la finalidad de brindar más soporte a las resistencias.

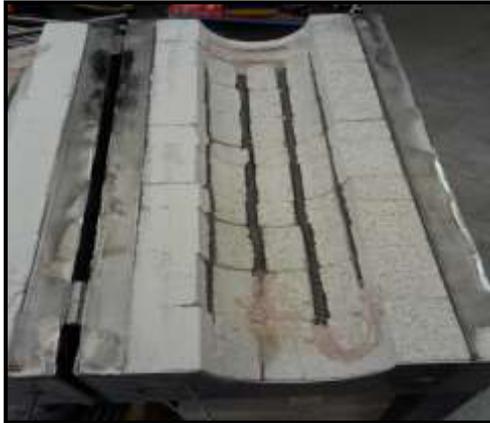


Figura 2.6. Acople de los alambres bobinados dentro de las canaletas.
(Fuente: Propia, 2021)

Se trabajó con la resistencia Kanthal, ya que es una aleación con la composición de 80% cromo y 20% níquel. Dicha aleación resiste elevadas temperaturas mayores a 900 °C y conserva una gran conductividad térmica. La resistividad térmica de la misma es de $1,52 \times 10^{-6} \Omega\text{m}$ a 1200 °C. Para este proyecto no se utilizó resistencias tubulares ya que las mismas soportan sólo hasta 350 °C.

La conexión está realizada en serie, ya que en esta se pueden conectar bobinas más robustas. Dicha bobina tiene el triple de alambre Kanthal para que no se degrade prematuramente bajo las condiciones de trabajo y esté muy bien reforzada, dando lugar a que la bobina quede robusta.

2.2. Instalación del horno en el espacio de trabajo

Antes de comenzar con la instalación, se realizó la limpieza de todo el espacio de trabajo, ya que el área no había sido utilizada por mucho tiempo. A su vez, se consiguió una mesa para ser utilizada como soporte del horno. La caja de control de temperatura que incluye el PID y el relé han sido conectados y programados con anterioridad por un profesional. A continuación, se especifica el proceso de instalación del equipo:

- 1) Inicialmente, se montó el horno sobre la mesa.
- 2) Luego, el tubo de cuarzo fue colocado sobre el canal de la estructura interna del horno, encajando perfectamente.
- 3) A continuación, se colocaron los O-rings alrededor de los dos extremos del tubo.
- 4) En seguida, se acoplaron las bridas internas sobre los O-rings.
- 5) Inmediatamente, se adaptaron y aseguraron las bridas externas a las bridas internas mediante los tornillos, abrazaderas y tuercas.

- 6) Después, se ensambló la válvula de entrada y salida a los respectivos conductos de las bridas externas.
- 7) Luego, se adaptó el regulador al cilindro de gas.
- 8) Más adelante, se acopló la manguera de entrada al regulador.
- 9) En seguida, se encajó la manguera de entrada y salida a sus respectivas válvulas.
- 10) Más tarde, se colocó el lubricante en la bomba de vacío hasta la señal indicada.
- 11) Finalmente, se conectaron los cables de entrada y salida de 220v, a la caja de control de temperatura y al horno respectivamente.



Figura 2.7. Instalación del horno en el espacio de trabajo.
(Fuente: Propia, 2021)

2.3. Muestras empleadas para la parte práctica

Para la parte práctica se utilizaron cinco muestras de madera de diferentes especies (motilón, pumamaqui, palo rosa, charmuelan y cascarilla), las cuales se recolectaron directamente de los bosques de la ciudad de San Gabriel, la cual es cabecera del Cantón Montúfar, ubicada en la provincia del Carchi en Ecuador.



Figura 2.8. Troncos de madera de cada especie.
(Fuente: Propia, 2021)

Luego de recibir los troncos de madera, se sometieron a un procedimiento de corte en un aserradero para conseguir cubos de aproximadamente 4 cm³.



Figura 2.9. a) Corte de los troncos de madera. b) Cubos obtenidos del proceso de corte.
(Fuente: Propia, 2021)

2.4. Proceso para la obtención de las muestras de carbón vegetal con presencia de gas

2.4.1. Preparación de la muestra

- 1) Se comienza lijando y limpiando el cubo con el que se va a trabajar, con la finalidad de quitar todo tipo de astillas y fragmentos que se encuentren en la superficie.
- 2) Una vez limpio el cubo, se escribe en una cara la letra representativa de la prueba a realizar y en la otra cara el número de la especie a la cual pertenece.
- 3) Se registra la masa y las dimensiones del cubo.
- 4) Se procede a ingresar el cubo dentro del tubo de cuarzo, empujándolo con una varilla.

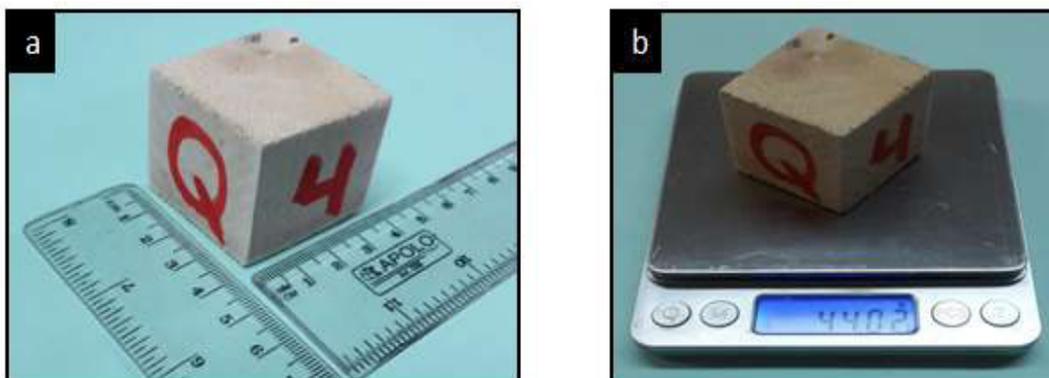


Figura 2.10. a) Cubo de madera limpia, lijada y con su respectiva nomenclatura para toma de dimensiones. b) Registro de la masa del cubo de madera.
(Fuente: Propia, 2021)

2.4.2. Preparación del equipo de trabajo

- 1) Una vez colocado el cubo de madera dentro del tubo, se procede a ensamblar y asegurar la brida interna y externa de acero inoxidable en el extremo del tubo por donde ingresó el cubo, ya que el otro juego de bridas ubicado en el extremo opuesto permanece ensamblado todo el tiempo.
- 2) Se conecta la manguera del gas a la válvula de entrada con sus respectivos acoples.
- 3) Se conecta la manguera de salida a la bomba de vacío.
- 4) Se lubrica la bomba de vacío con su respectivo aceite.
- 5) Se ubica la termocupla tipo K a lado del tubo de cuarzo.
- 6) Se cierra la carcasa superior del horno, logrando una cubierta alrededor del tubo.
- 7) Se conecta la bomba de vacío al tomacorriente.
- 8) Se conecta el cable de 220v de entrada al tomacorriente.

Todo el equipo se encuentra conectado y listo para usar.

2.4.3. Proceso de carbonización

En función de pequeños cubos de madera, se procedió a realizar varios procesos de carbonización, con la finalidad de encontrar las condiciones de trabajo adecuadas para conseguir carbón vegetal. Después de varios intentos, se logró establecer las condiciones óptimas para completar dicho proceso, las mismas que son detalladas a continuación:

- 1) **Tiempo de vaciado:** Se enciende la bomba de vacío para extraer cualquier tipo de gas que se encuentre en el interior del tubo, y se la mantiene por 20 minutos antes de encender el horno. La presión aproximada a la que se llega es de 5 Pa.
- 2) **Ingreso de gas:** Se abre la llave de paso del cilindro de gas con un flujo de 18 cm³/min (aproximadamente); se abre la válvula de entrada, permitiendo el ingreso del gas inerte al interior de la atmósfera a proteger. Finalmente se enciende el horno.
- 3) **Tiempo de pre-secado:** Después de 10 minutos de haber encendido el horno, la temperatura alcanza los (115 ± 10) °C.
- 4) **Tiempo de secado:** Una vez alcanzada la temperatura de (115 ± 10) °C, se conserva la misma durante 30 minutos con el fin de que pierda toda el agua y humedad.
- 5) **Tasa de aumento de temperatura para alcanzar la transformación endotérmica:** Se eleva la temperatura hasta los (250 ± 5) °C para conseguir la

descomposición térmica de los vapores de aceite en gas. Cabe recalcar que la velocidad de calentamiento es de 12 °C/min.

- 6) **Tiempo de transformación endotérmica:** En 15 minutos se alcanza los (250 ± 5) °C, se conserva esta temperatura durante 25 minutos. La muestra comienza espontáneamente a fraccionarse.
- 7) **Tasa de aumento de temperatura para alcanzar la fase exotérmica:** Se eleva la temperatura hasta los 400 °C para lograr que los reactantes se conviertan en su totalidad y dar lugar al mayor porcentaje de gases y ácido piroleñoso.
- 8) **Tiempo de fase exotérmica:** En 15 minutos se alcanza los 400 °C (temperatura de carbonización) y se culmina el proceso, obteniendo así, el residuo carbonizado llamado carbón vegetal.
- 9) **Tiempo de enfriamiento:** El enfriamiento de la muestra carbonizada y del equipo de trabajo, dura 5 horas aproximadamente.

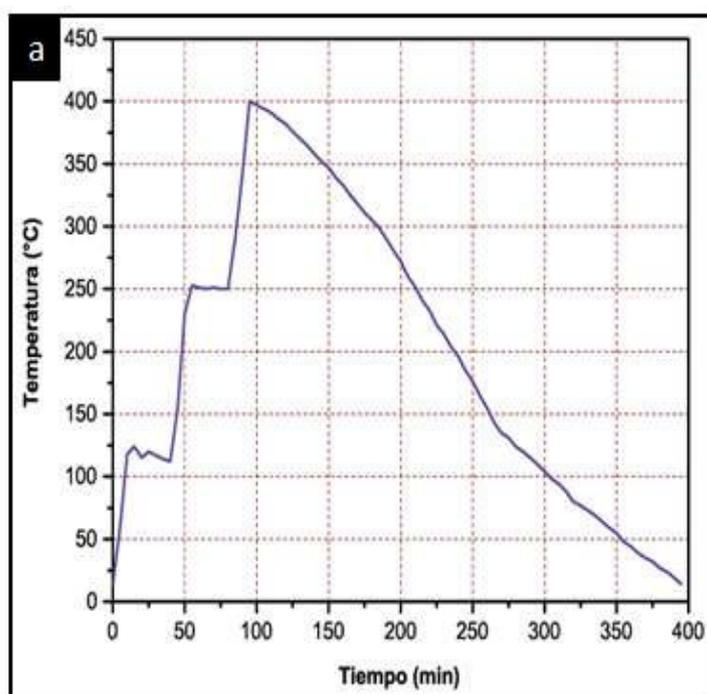


Figura 2.11. a) Proceso de carbonización. b) Horno enfriado.
(Fuente: Propia, 2021)

2.4.4. Extracción de la muestra carbonizada

1. La muestra resultante es extraída del interior del tubo mediante una varilla.
2. Es sujeta por medio de una pinza, para que no exista contacto alguno con los dedos, y así evitar que se contamine.
3. Se registra la masa y dimensiones.

4. Se guarda en el interior de un recipiente para evitar cualquier tipo de contacto y/o contaminación.

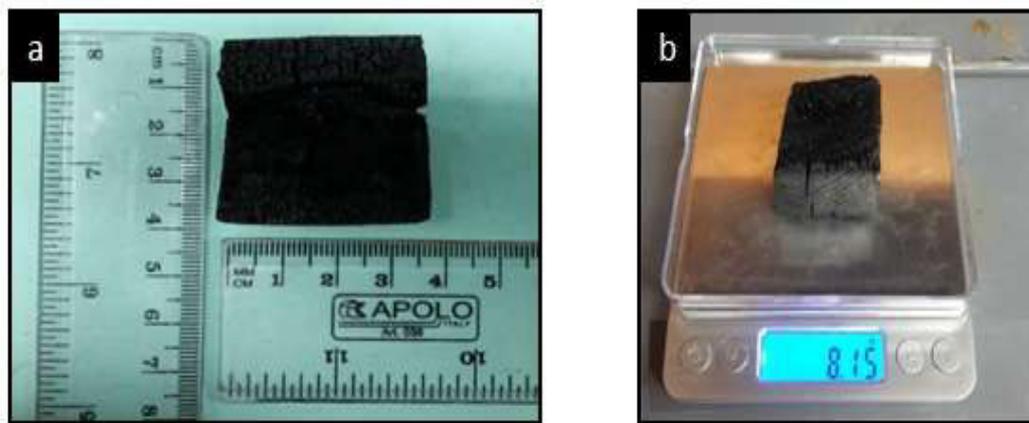


Figura 2.12. a) Registro de dimensiones de la muestra carbonizada. b) Registro de la masa de la muestra carbonizada.
(Fuente: Propia, 2021)

Para el detalle de cada prueba, ver el ANEXO XIV., y ANEXO XV.

2.5. Proceso para la obtención de las muestras de carbón vegetal de forma tradicional

Al momento de realizar el corte de los cubos en el aserradero, sobró una pequeña cantidad de tronco empleado de cada especie. Dichos residuos se utilizaron para realizar la obtención del carbón vegetal de forma tradicional de cada una de ellas.



Figura 2.13. Partes sobrantes de los troncos de cada especie cortados en el aserradero.
(Fuente: Propia, 2021)

El proceso consistió en armar una cabina de ladrillos no quemados para colocar las cinco especies de madera. Se introdujeron las especies, debidamente separadas y etiquetadas para que no se mezclen y evitar confusión. La parte superior hueca de la cabina se llenó con lámina de cartón, cubriendo de esta manera las especies de madera ubicadas dentro de la cabina.



Figura 2.14. a) Cabina de ladrillos no quemados. b) Lámina de cartón cubriendo las especies de madera que se encuentran dentro de la cabina.
(Fuente: Propia, 2021)

Se procedió a quemar toda la lámina de cartón. Luego de 20 minutos, mientras se quemaba la lámina y se iba consumiendo, se cubrió con tierra y chamba para evitar el acceso de aire. En un lapso de 2 horas dejó de generar humo, se retiró las chambas y se cubrió de tierra para apagar el carbón resultante.



Figura 2.15. a) Quema de la lámina de cartón. b) Cabina de ladrillos cubierta con chamba. c) Apagado del carbón resultante por medio de tierra.
(Fuente: Propia, 2021)

2.6. Proceso de recolección de carbón vegetal en diferentes puntos de la ciudad de Quito

Para este apartado, se procedió a recolectar una funda de 1,5 kg de carbón, en cada uno de los cinco diferentes mercados de la ciudad de Quito. Los mercados seleccionados fueron: Mercado de Solanda, Mercado La Magdalena, Mercado de San Roque, Mercado de Santa Clara y Mercado Central.

2.7. Muestras analizadas

Para el respectivo análisis de las muestras deseadas se utilizó el equipo de espectroscopia Raman representado en la Figura 2.16., con sus características y parámetros de trabajo indicados en las siguientes tablas:



Figura 2.16. Equipo Raman Horiba LabRAM HR Evolution.

(Fuente: <https://fim.epn.edu.ec/index.php/es/departamento-de-materiales/laboratorios/30-departamento-de-materiales/laboratorios-dm>)

Tabla 2.1. Características del Equipo Raman.

Tipo	Raman
Aplicaciones	Para laboratorios e industria farmacéutica
Técnica de observación	3D, confocal
Fuente de luz	Láser de 633 nm (rojo) Láser de 532 nm (verde)
Configuración	De mesa

(Fuente: Laboratorio de Nuevos Materiales)

Tabla 2.2. Parámetros del equipo de espectroscopía Raman.

Parámetro	Especificación
Tiempo de cálculo	4 segundos
Acumulación	9
Rango	100...399 cm^{-1}
Escaneo automático	On
Autoenfoco	Desactivado
AutoExposure	Off
Filtro de picos	Acumulación múltiple
Tiempo de retardo	0 segundos
Modo de lectura	Señal
Corrección ICS	Off
Corrección de oscuridad	Off
Temperatura del detector	-60,1
Instrumento	LabRAM HR Evol
Objetivo	x50LWD
Grado	600 gr/mm
Filtro ND	10%
Láser	532 nm
Agujero	150.001
Rango	Visible
Tiempo completo	5:25 mm:ss
Stage XY	Marzhauser
Stage Z	Marzhauser

(Fuente: Laboratorio de Nuevos Materiales)

Se analizaron un total de 15 muestras diferentes de carbón vegetal, las cuales se fragmentaron de forma manual y que se especifican a continuación:

Tabla 2.3. Muestras empleadas para el análisis mediante espectroscopía Raman.

Muestras	Obtención
Cinco muestras de carbón vegetal (motilón, pumamaqui, palo rosa, charmuelan y cascarilla)	Mediante un horno de atmósfera controlada con gas argón, implementado dentro del laboratorio.
Cinco muestras de carbón vegetal (motilón, pumamaqui, palo rosa, charmuelan y cascarilla)	Producidos por el método tradicional, en una cabina fabricada de ladrillos no quemados, simulando un método de parva.
Cinco muestras recolectadas al azar de carbón vegetal.	Mediante la adquisición en diferentes mercados de la ciudad de Quito (Mercado de Solanda, Mercado La Magdalena, Mercado de San Roque, Mercado de Santa Clara y Mercado Central)

(Fuente: Propia, 2021)

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Resultados

3.1.1. Cambios en volúmenes y densidades

Las masas de todas las muestras antes de realizar el proceso de carbonización fueron medidas con una balanza y, las dimensiones se escalaron con una regla y calibrador. Ver Figura 2.12. Así mismo, las muestras resultantes fueron medidas con un calibrador y pesadas en la misma balanza; aunque la toma de medidas fue mucho más complicada, ya que estas muestras en algunos casos se fragmentaban, dando lugar a la formación de varios trozos, y en otros casos se desintegraban. Ver Figura 3.1. Por lo tanto, no se conseguía una adecuada toma de medidas.

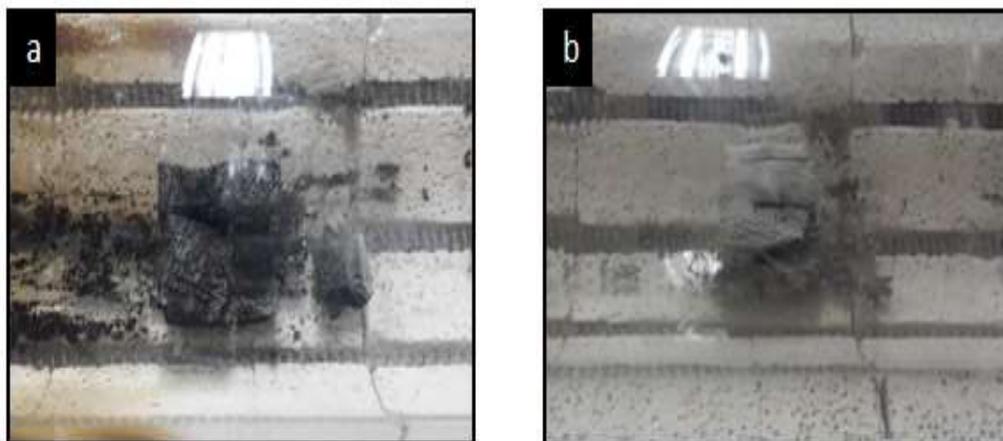


Figura 3.1. a) Muestra de carbón vegetal obtenida mediante el proceso de carbonización dentro del horno con presencia de aire de la especie palo rosa. b) Muestra de carbón vegetal obtenida mediante el proceso de carbonización dentro del horno sin presencia de aire de la especie palo rosa.

(Fuente: Propia, 2021)

Cabe mencionar que, inicialmente para determinar el funcionamiento del horno, establecer las diferentes condiciones de trabajo e intentar conseguir productos de carbón vegetal, se utilizaron muestras de madera para un proceso de carbonización con y sin presencia de aire. Estos resultados no fueron exitosos, ya que existió gran cantidad de ceniza, y al momento de extraer las muestras, sus volúmenes disminuyeron notablemente. Se lograba recuperar muy poca cantidad de las muestras carbonizadas, ya que se fragmentaban en varios trozos, ver Figura 3.2. Así mismo, se produjeron varias grietas y fisuras a simple vista. Para más detalle de cada prueba se recomienda revisar el

ANEXO XIV., y ANEXO XV. Estas muestras resultantes no fueron analizadas por espectroscopía Raman.



Figura 3.2. Toma de medidas de la muestra de carbón vegetal palo rosa, extraída después del proceso de carbonización dentro del horno sin presencia de aire.
(Fuente: Propia, 2021)

Después de establecer las condiciones de trabajo del horno y obtener resultados de carbón vegetal con y sin presencia de aire, se procedió a realizar el proceso de carbonización, únicamente con gas argón. Entre los resultados obtenidos se presenta una mínima cantidad de ceniza en las muestras obtenidas. Al momento de extraer las muestras, estas no se fragmentaron, por lo cual se logró recuperar gran cantidad de muestras carbonizadas, ya que se conservaron en un solo cuerpo, ver Figura 3.3. Se produjeron ciertas grietas y fisuras a simple vista.

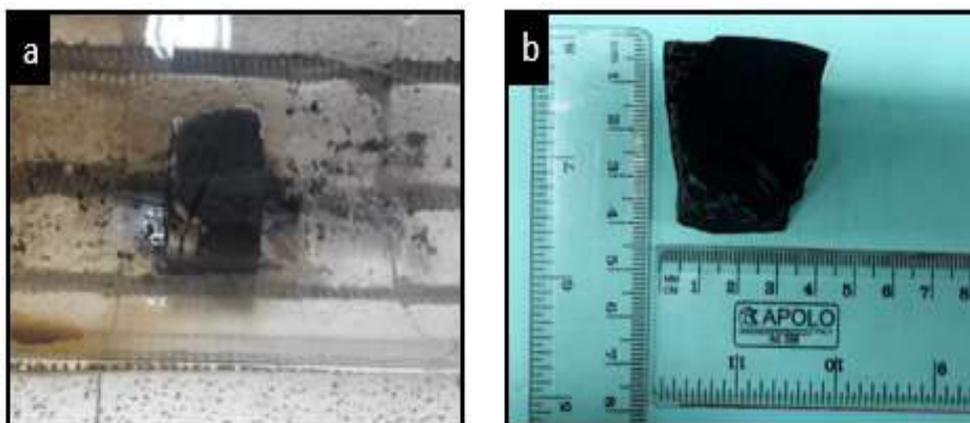


Figura 3.3. a) Muestra de carbón vegetal obtenida mediante el proceso de carbonización dentro del horno con presencia de gas argón de la especie palo rosa. b) Toma de medidas de la muestra de carbón vegetal palo rosa, extraída después del proceso de carbonización dentro del horno.
(Fuente: Propia, 2021)

Como tal, las densidades de las maderas se calcularon dividiendo las masas para el producto de las dimensiones (volumen). Las masas, volúmenes y densidades antes y

después de la carbonización con gas argón dentro del horno se presentan en el Tabla 3.1., y sin gas argón dentro del horno en la Tabla 3.2.

Tabla 3.1. Parámetros antes y después del proceso de carbonización con gas argón dentro del horno.

Muestras	Masa inicial [g]	Volumen inicial [cm ³]	Densidad inicial [g/cm ³]	Masa final [g]	Volumen final [cm ³]	Densidad final [g/cm ³]	Diferencia de densidades [g/cm ³]
Muestra 1 (Motilón)	38,67	68,88	0,56	8,26	33,48	0,25	0,31
Muestra 2 (Pumamaqui)	38,15	68,80	0,55	6,38	27,44	0,23	0,32
Muestra 3 (Palo Rosa)	39,69	70,60	0,56	9,81	45,33	0,22	0,35
Muestra 4 (Charmuelan)	44,02	70,52	0,62	8,15	31,68	0,26	0,35
Muestra 5 (Cascarilla)	47,61	75,85	0,63	9,95	39,17	0,25	0,37
Promedio			0,58			0,24	0,34

(Fuente: Propia, 2021)

Tabla 3.2. Parámetros antes y después del proceso de carbonización sin gas argón dentro del horno.

Muestras	Masa inicial [g]	Volumen inicial [cm ³]	Densidad inicial [g/cm ³]	Masa final [g]	Volumen final [cm ³]	Densidad final [g/cm ³]	Diferencia de densidades [g/cm ³]
Muestra 1 (Motilón)	38,69	70,60	0,55	6,04	28,59	0,21	0,34
Muestra 2 (Pumamaqui)	38,12	67,16	0,57	6,20	18,90	0,33	0,24
Muestra 3 (Palo Rosa)	39,71	77,49	0,51	8,09	44,64	0,18	0,33
Muestra 4 (Charmuelan)	44,07	75,85	0,58	6,18	20,01	0,31	0,27
Muestra 5 (Cascarilla)	47,70	72,28	0,66	8,36	38,57	0,22	0,44
Promedio			0,57			0,25	0,32

(Fuente: Propia, 2021)

A continuación, se presentan los resultados de la variación del volumen y la densidad de las muestras obtenidas con y sin argón dentro del horno que se construyó para la realización del proyecto.

La Figura 3.4., indica que los valores de volumen después del proceso de carbonización con gas, se reducen a más de la mitad de los valores de volumen inicial, en las especies de motilón (51,39%), pumamaqui (60,12%) y charmuelan (55,08%). En cambio, para las

especies palo rosa y cascarilla, sus valores se reducen en un 35,79% y 48,36%, respectivamente. En estos porcentajes se observan que la reducción de volúmenes en algunas especies, se lo hace casi en la misma proporción y en otras no; estableciendo que la diferencia entre el porcentaje mínimo y máximo de reducción es de 24,33%.

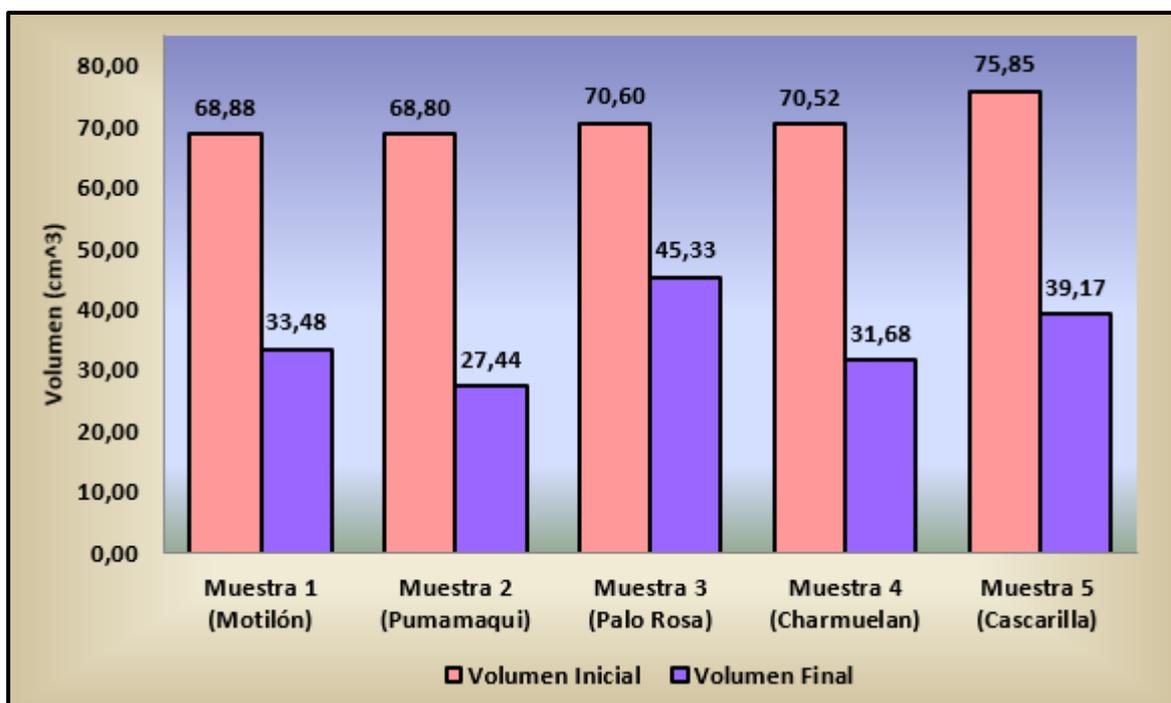


Figura 3.4. Volumen inicial y final de las muestras obtenidas con gas argón dentro del horno.
(Fuente: Propia, 2021)

La Figura 3.5., indica que los valores de volumen después del proceso de carbonización sin gas, se reducen a más de la mitad de los valores de volumen antes del proceso sin gas, en las especies de motilón (59,51%), pumamaqui (71,86%) y charmuelan (73,62%). En cambio, para las especies palo rosa y cascarilla, sus valores se reducen en un 42,39% y 46,64%, respectivamente. En estos porcentajes se observan que la reducción de volúmenes en algunas especies, se lo hace casi en la misma proporción y en otras no; estableciendo que la diferencia entre el porcentaje mínimo y máximo de reducción es de 31,23%.

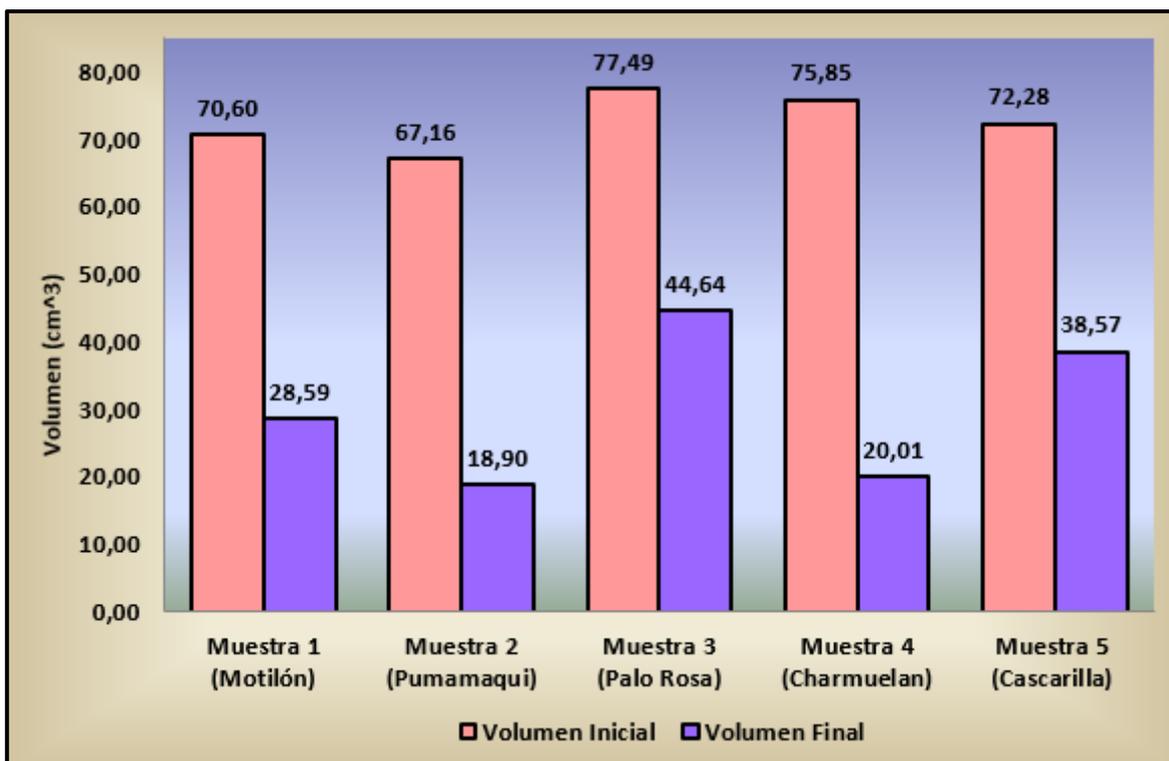


Figura 3.5. Volumen inicial y final de las muestras obtenidas sin gas argón dentro del horno.
(Fuente: Propia, 2021)

El volumen inicial de las muestras empleadas en el proceso con y sin gas es casi igual, ya que es la materia prima de partida. Sin embargo, existió una diferencia máxima de volúmenes iniciales entre ambos procesos de $6,89 \text{ cm}^3$, correspondiente a la especie palo rosa. De igual forma, se indica que los volúmenes después del proceso con gas, no presentan similitud con el porcentaje de reducción a los volúmenes después del proceso sin gas, reflejando una diferencia máxima entre ambos procesos de $18,54\%$, perteneciente a la especie charmuelan y una diferencia mínima de $1,72\%$, perteneciente a la especie cascarilla. Ver Figura 3.4., y Figura 3.5. Finalmente, se observa que en el proceso con gas argón, el volumen de las muestras no se reduce tanto como en el proceso sin gas dentro del horno.

La Figura 3.6., indica que todos los valores de densidad después del proceso de carbonización con gas argón, se reducen a más de la mitad de los valores de densidad antes del proceso con gas. Se observan los porcentajes por cada especie: motilón ($55,36\%$), pumamaqui ($58,18\%$), palo rosa ($60,71\%$), charmuelan ($58,06\%$) y cascarilla ($60,32\%$). Estos porcentajes demuestran que la reducción de densidad en todas las especies, se lo hace casi en la misma proporción, con una diferencia de $5,35\%$ entre el porcentaje mínimo y máximo de reducción.

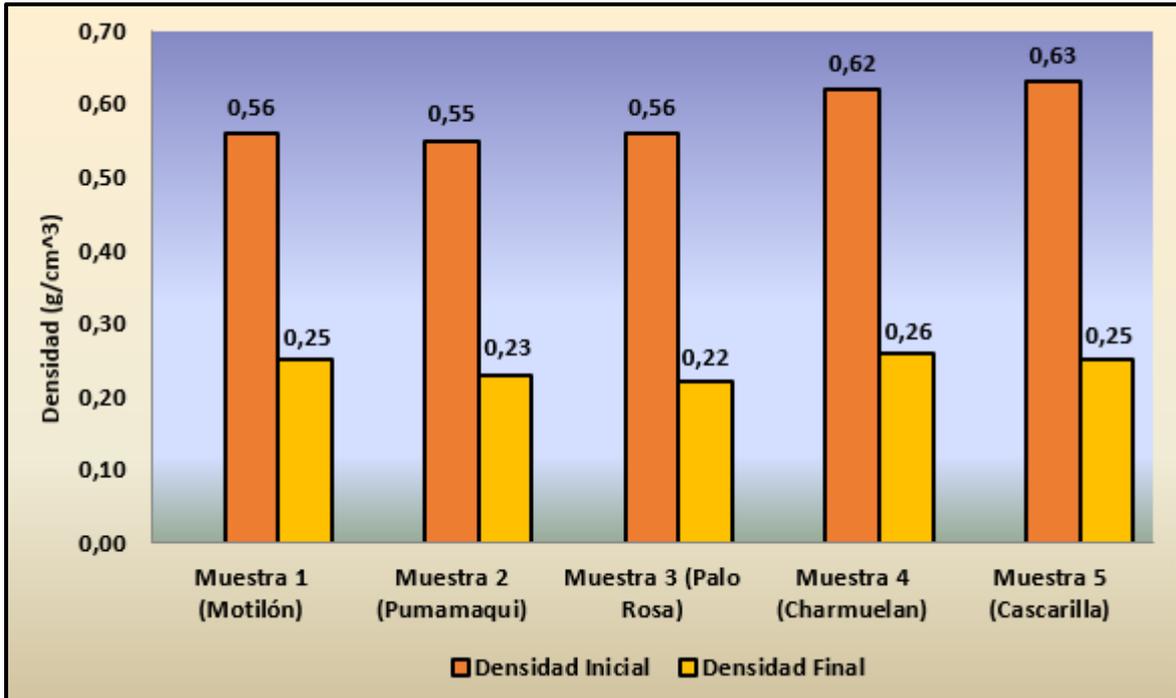


Figura 3.6. Densidad inicial y final de las muestras obtenidas con gas argón dentro del horno.
(Fuente: Propia, 2021)

La Figura 3.7., indica que los valores de densidad después del proceso de carbonización sin gas, se reducen a más de la mitad de los valores de densidad antes del proceso sin gas, en las especies de motilón (61,82%), palo rosa (64,71%) y cascarilla (66,66%). En cambio, para las especies pumamaqui y charmuelan, sus valores se reducen en un 42,11% y 46,56%, respectivamente. En estos porcentajes se observan que la reducción de densidad en algunas especies, se lo hace casi en la misma proporción y en otras no; estableciendo que la diferencia entre el porcentaje mínimo y máximo de reducción es de 24,55%.

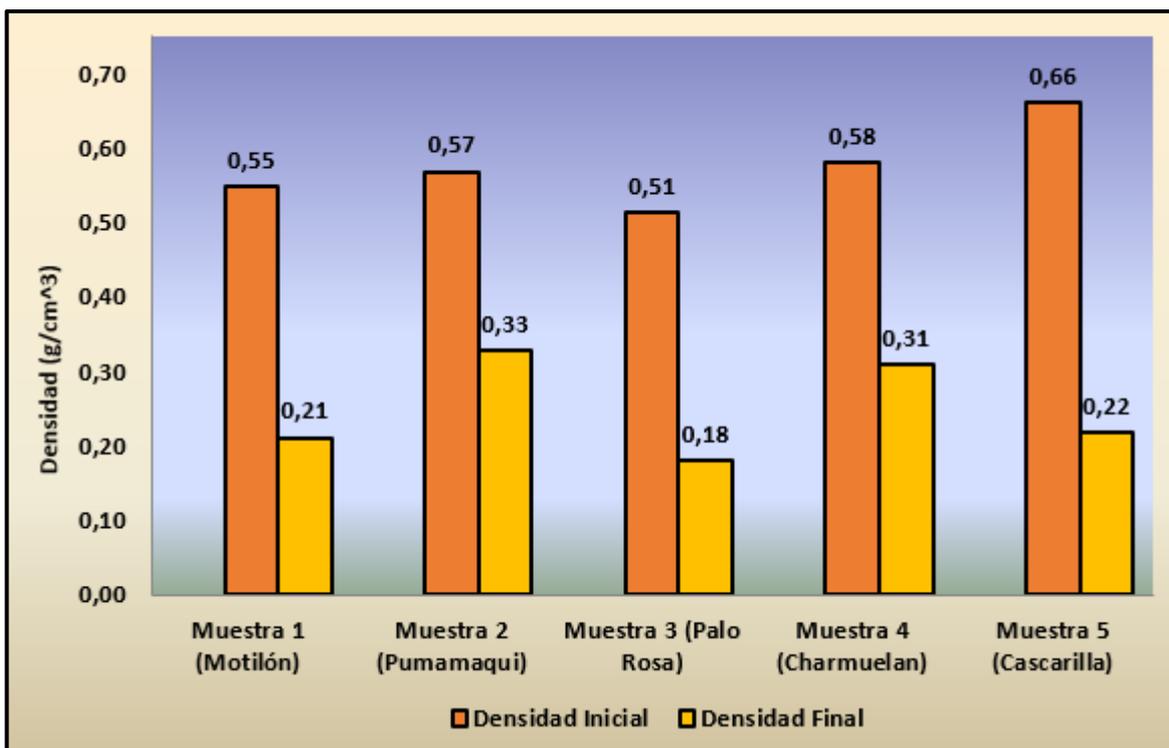


Figura 3.7. Densidad inicial y final de las muestras obtenidas sin gas argón dentro del horno.
(Fuente: Propia, 2021)

A su vez, se observa que las densidades antes del proceso de carbonización con gas, son casi iguales a las densidades antes del proceso sin gas, ya que es la materia prima de partida. Sin embargo, existió una diferencia máxima de densidades iniciales entre ambos procesos de $0,05 \text{ g/cm}^3$, correspondiente a la especie palo rosa. De igual forma, se indica que las densidades después del proceso con gas, no presentan similitud con el porcentaje de reducción a las densidades después del proceso sin gas, reflejando una diferencia máxima entre ambos procesos de 16,07%, perteneciente a la especie pumamaqui y una diferencia mínima de 1,15%, perteneciente a la especie charmuelan. Ver Figura 3.6., y Figura 3.7. Finalmente, se observa que en el proceso con gas argón, las densidades de las muestras permanecen casi constantes y no se reducen tanto como en el proceso sin gas.

Todos los parámetros, condiciones, tiempos, temperaturas, resultados y observaciones de los experimentos de cada muestra de madera dentro del horno, están registrados en el ANEXO XV.

3.1.2. Espectroscopía Raman

Como se lo ha dicho en apartados anteriores, esta técnica del cambio vibracional y rotacional de las moléculas a una determinada longitud de onda de un láser que incide en un material, existe una interacción de los fotones, interacción de la materia con los átomos, etc. Todas estas interacciones dan como resultado el espectro, el cual indica una intensidad óptica y una longitud de onda (inverso de la frecuencia).

Los picos de las bandas que se presentan en el espectro tienen cierto número de onda y cierta simetría entre sí [48][53]. Por ejemplo, existen materiales que tienen la misma composición química pero diferente simetría y/o forma de picos, debido a su alineación cristalográfica.

3.1.2.1. Deconvolución de bandas

A partir de los datos obtenidos del análisis de espectroscopía Raman de cada una de las muestras analizadas, y con la ayuda del software Origin 8, se logró obtener como resultado el espectro característico de cada muestra. En este espectro, se logró ubicar los cinco picos representativos y, mediante una serie de iteraciones se obtuvo la curva de ajuste acumulado (curva roja) y la deconvolución de los picos D y G, dando lugar a la aparición de las señales o bandas ocultas (D'', A y D') [75]. Ver Figura 3.8.

La calidad de datos obtenidos del espectro de la muestra analizada depende de las bandas Raman reveladas, de las relaciones de intensidad entre la señal apta y los diferentes orígenes de ruido relacionado al procedimiento de medición y, de la clase de la muestra examinada [55].

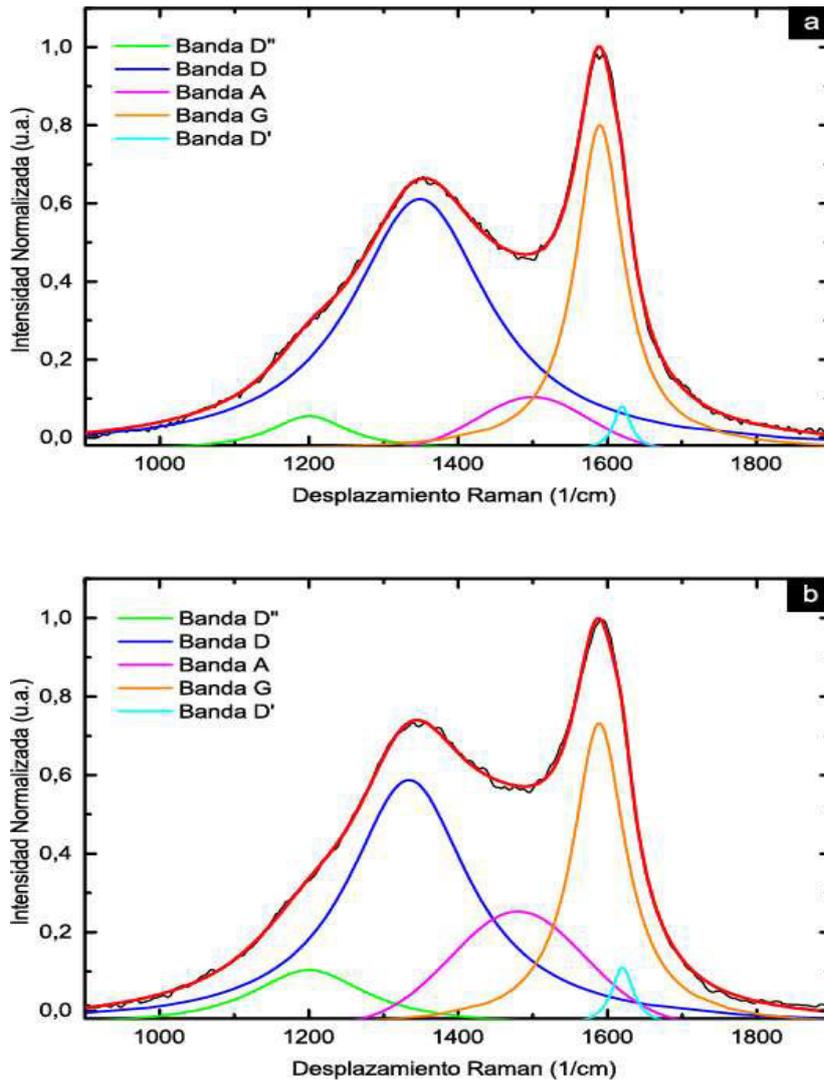


Figura 3.8. (a) Espectro resultante, curva de ajuste y deconvolución de bandas de la muestra de carbón vegetal(pumamaqui) obtenida en el horno de atmósfera controlada con gas argón. b) Espectro resultante, curva de ajuste y deconvolución de bandas de la muestra de carbón vegetal (pumamaqui T) producida de forma tradicional.
(Fuente: Propia, 2021)

Existen dos principales bandas, D y G. La banda D ocupa valores entre 1355 y 1380 cm^{-1} [57], frecuentemente se emplea el valor de $\sim 1360 \text{ cm}^{-1}$ para definirla [57][62]. La banda D se origina debido a la estructura desordenada del grafeno. La existencia de desorden en los sistemas de carbono hibridado sp^2 generando los espectros Raman de resonancia, en consecuencia establece que la espectroscopia Raman es una de las técnicas más poderosas para lograr la caracterización del desorden en los materiales de carbono sp^2 [76]. Esta banda se refiere a los defectos (dimensión de cristal finito, curvaturas, bordes, vacancias, límites de torsión e inclinación y defectos en general) en el plano entre unidades estructurales básicas adyacentes de carbono amorfo o desorden en el material sólido gráfico [57][62][75]. Es aquí donde participa un defecto y un fonón.

La banda G proviene de la extensión del enlace C-C en los componentes gráficos, y es habitual a todos los sistemas de carbono sp^2 [76]. La banda G se relaciona con la red gráfica ideal (grafito) y se debe a las vibraciones en el plano de las capas de las unidades estructurales básicas adyacentes (BSU) [57]. Va de 1500 hasta 1600 cm^{-1} [77], con frecuencia se emplea el valor de ~ 1580 cm^{-1} para definirla, esto se da por el modo E_{2g} en el punto del ancho a media altura (Γ) [57]. En el caso de que existan ciertas impurezas repartidas aleatoriamente en el grafeno, el pico G puede repartirse en dos picos, el pico G (1583 cm^{-1}) y el pico D' (1620 cm^{-1}). El argumento primordial es que los modos vibracionales encontrados de las impurezas pueden ejercer una acción de manera recíproca con los modos fonónicos ampliados del grafeno, lo que provocaría la división de este pico [76].

A más de dichas bandas esenciales, existen otras con sus respectivos valores de desplazamientos referenciales que complementan el estudio. Se presenta la banda D'' con un valor que va de 1100 a 1200 cm^{-1} [56], y se acostumbra a usar el valor de ~ 1200 cm^{-1} para definirla. Esta banda indica muestras demasiado defectuosas [78] y está vinculada con impurezas en la red gráfica [62], además está cerca de la banda D [56].

Como se explicó anteriormente, la banda D' se origina por la división de la banda G [76]. Esta nueva banda se localiza entre 1617 y 1625 cm^{-1} [57][79] aunque con mayor frecuencia se emplea el valor de ~ 1620 cm^{-1} para definirla [76]. Se vincula con grafitos imperfectos y con la red gráfica desordenada [57][75]. Finalmente, aparece la banda A, la cual va desde 1480 hasta 1500 cm^{-1} . Se vincula con la cantidad de carbono amorfo [75], aunque no genera información acerca del tipo de carbono.

Debido a la ruptura de la simetría del cristal, se provocan los defectos que excitan las bandas D y D' [56]. De tal forma, las secciones transversales diferenciales de las bandas D y D' son inversamente proporcionales al tamaño del cristalito (L_a) [80]. El número medio de defectos en el material, son proporcionales a las bandas D'', D' y D [81].

Las curvas de las bandas (D'', D, G y D') para ajustar los espectros son de tipo Lorentzianas [56][57], y la curva de la banda A es de tipo Gaussiana [56], esta última fue propuesta por Jawhariet al. [82] debido a la disposición estadística del carbono en la red gráfica distorsionada. En ciertos casos, para realizar una correcta deconvolución y que las curvas tengan relación entre sí, se jugó con los valores de posición de algunos picos para realizar diferentes iteraciones hasta obtener el resultado más óptimo. Ver ANEXO

IV. A más de las bandas resultantes, se refleja también cuatro parámetros de cada una de las bandas: posición, FWHM (ancho a media altura), área e intensidad; los cuales permiten situar principios cuantitativos que favorecen a cotejar el nivel de orden estructural en diversos tipos de materiales de carbono [64]. Dichos parámetros se presentan desde la Tabla 3.3 hasta la Tabla 3.7.

El desplazamiento de los picos se debe a los efectos de tensión [83], a los enlaces químicos y a la simetría de las moléculas, por lo cual, si la longitud del enlace químico de las moléculas varía gracias a algún efecto externos o interno, da lugar a que se genere el desplazamiento de los mismos [84].

3.1.2.2. Relación de intensidad I_D/I_G

Mediante la relación de intensidad (I_D/I_G), se puede apreciar la cantidad de defectos en el carbón, ya que si esta relación aumenta, también aumentan los defectos y la cantidad de carbono amorfo [68][75], pero disminuye el contenido de carbono grafitico [82]. A su vez, se estableció que dicha relación dependía de la longitud de onda, por lo que es otra evidencia de que la banda D se manifiesta de un efecto resonante [56]. El estudio de la relación de la banda D y G por medio de espectroscopia Raman, también brinda información acerca de la estructura cristalina del material (entre mayor sea esta relación, mayor será el grado de cristalinidad) [85], y sobre ciertas propiedades físicas [75]. Los espectros Raman se relacionan con una de las propiedades físicas más importantes, como es la densidad, ya que esta presenta una relación lineal con la intensidad espectral [86].

3.1.2.3. Relación de intensidad I_D/I_D'

El nivel de desorden está plenamente vinculado con los defectos del material, como bordes y vacancias [87]. La relación I_D/I_D' brinda información acerca de la naturaleza y concentración de los defectos, pero no del número [38]. Esta relación permite diferenciar entre los distintos tipos de defectos: $I_D/I_D'=3,5$ se ubica para los defectos de borde (límite) de torsión e inclinación; $I_D/I_D'=7$ se localiza para los defectos tipo vacancias; e $I_D/I_D'=13$ se encuentra para los defectos sp^3 [56][87] (defectos de salto) [82]. Esta hibridación sp^3 insinúa que los defectos posiblemente introducen adátomos de carbono (átomo localizado en la superficie de un cristal) o pueden generarse ciertos enlaces entre los contaminantes y los átomos de carbono del grafeno [88].

3.1.2.4. Espectros antes de la deconvolución y tablas resultantes después de la deconvolución

Como se puede observar, las líneas comparativas cruzan por la mitad de las bandas D y G del espectro de la Figura 3.9b (motilón T), pero esto no ocurre en el caso de la Figura 3.9a (motilón), las cuales cortan en distinto punto de las bandas, diferente del centro, indicando que las bandas de ambos espectros se encuentran en posiciones diferentes. El FWHM de la banda G en los dos casos es igual, aunque el FWHM de la banda D en la Figura 3.8a (motilón) es más grande que en el FWHM del espectro del otro caso.

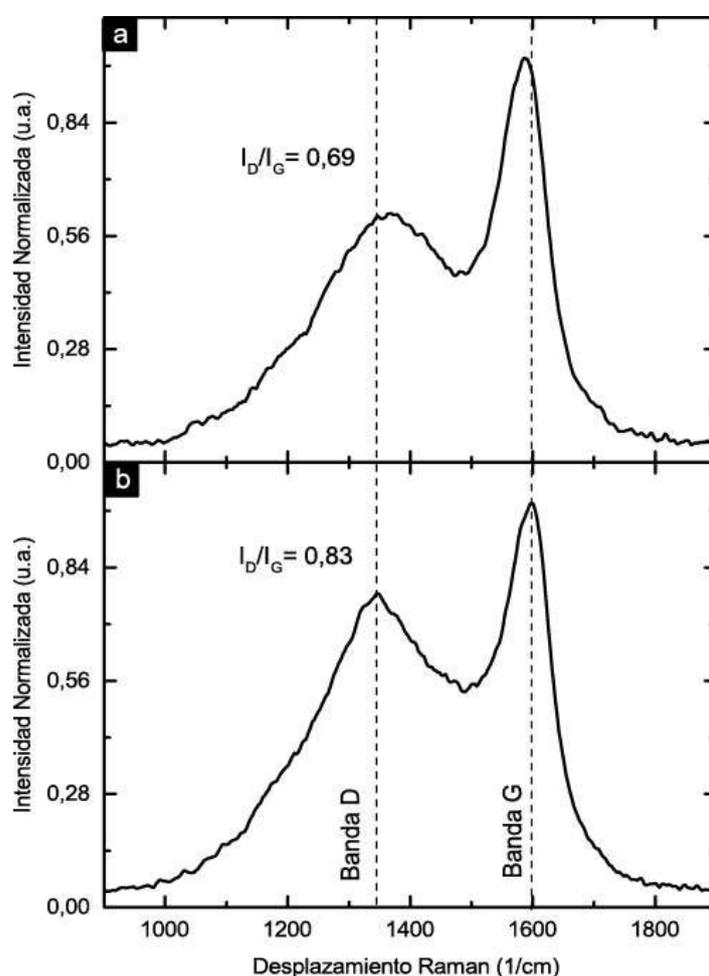


Figura 3.9. (a) Espectro resultante por espectroscopía Raman de la muestra de carbón vegetal(motilón) obtenida en el horno de atmósfera controlada con gas argón. (b) Espectro resultante por espectroscopía Raman de la muestra de carbón vegetal (motilón T) producida de forma tradicional.
(Fuente: Propia, 2021)

Considerando los valores de intensidad entre los dos espectros, se indica que la relación I_D/I_G difiere en 0,14. La relación I_D/I_D entre ambos presenta una diferencia de 0,38. Se

aprecia que los dos tipos de relación son mayores en la muestra motilón T que en la muestra motilón. Ver valores en la Tabla 3.3.

Al cotejar los valores de la Tabla 3.3, se logra percibir que la banda D'' en los dos casos tienen la misma posición; el FWHM de las muestras presenta una diferencia de 17,94 cm^{-1} ; y el área revela una considerable diferencia de 20,12 u.a. Por otro lado, considerando la banda D, se observa que la posición entre las dos muestras varía en 15,43 cm^{-1} ; el FWHM entre ambas revela una gran diferencia de 43,75 cm^{-1} ; y el área indica una diferencia de 16,59 u.a. Así mismo, observando la banda A, se indica que la posición entre ambas muestras varía en 20 cm^{-1} ; el FWHM refleja una gran diferencia de 27,17 cm^{-1} ; y el área presenta una diferencia grande de 33,45 u.a. De la misma forma, la banda G presentada señala que la posición entre ambas muestras varía en 9,09 cm^{-1} ; el FWHM entre los dos casos varía solamente en 2,02 cm^{-1} ; y el área refleja una mínima diferencia de 3,02 u.a. Finalmente, se logra apreciar que la posición de la banda D', en los dos casos es igual; el FWHM entre las dos muestras revela una mínima diferencia de 2,43 cm^{-1} ; y el área varía solamente en 0,31 u.a.

En el ANEXO IV.1., se puede apreciar la respectiva deconvolución de las bandas de la muestra obtenida en el horno de atmósfera controlada (motilón) y de forma tradicional (motilón T) perteneciente a la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Características Raman resultantes de la deconvolución de bandas de la muestra de carbón vegetal (motilón) obtenida en el horno de atmósfera controlada con gas argón y de la muestra de carbón vegetal (motilón T) producida de forma tradicional.

Muestra	Parámetro	D''	D	A	G	D'	I _D /I _G	I _D /I _{D'}
Motilón	Posición (cm^{-1})	1200	1349,94	1500	1583	1620		
	FWHM (cm^{-1})	138,69	232,09	176,89	76,78	32,71		
	Área (u.a.)	13,44	205,67	24,64	98,21	7,28		
	Intensidad (u.a.)	0,061	0,564	---	0,814	0,141	0,69	4
Motilón T	Posición (cm^{-1})	1200	1334,51	1480	1592,09	1620		
	FWHM (cm^{-1})	156,63	188,34	204,06	78,80	30,28		
	Área (u.a.)	33,56	189,08	58,09	95,19	6,97		
	Intensidad (u.a.)	0,136	0,639	---	0,769	0,146	0,83	4,38

(Fuente: Propia, 2021)

Por otro lado, como se aprecia, las líneas comparativas cruzan por el mismo punto de las bandas D y G de la Figura 3.10a (pumamaqui) y Figura 3.10b (pumamaqui T), manifestando que ambas bandas de los espectros se encuentran en posiciones similares. El FWHM de la banda G en los dos casos es igual, sin embargo, el FWHM de la banda D en la Figura 3.10b (pumamaqui T) tiene un leve incremento en comparación con el FWHM del espectro del otro caso.

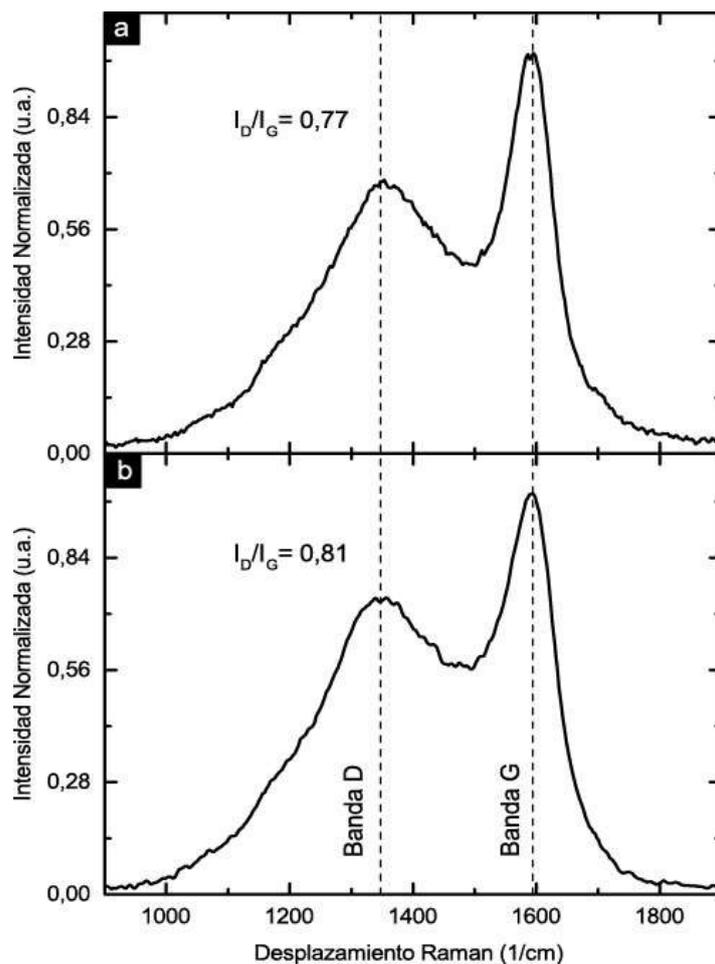


Figura 3.10. (a) Espectro resultante por espectroscopía Raman de la muestra de carbón vegetal (pumamaqui) obtenida en el horno de atmósfera controlada con gas argón. (b) Espectro resultante por espectroscopía Raman de la muestra de carbón vegetal (pumamaqui T) producida de forma tradicional.

(Fuente: Propia, 2021)

Observando los valores de intensidad entre ambos espectros, se indica que la relación I_D/I_G difiere solo en 0,04. La relación I_D/I_D' entre ambas tiene una diferencia de 1,59. Se aprecia que la relación I_D/I_G en la muestra pumamaqui T es mayor que en la muestra pumamaqui; en cambio, la relación I_D/I_D' en la muestra pumamaqui es mayor que en la muestra pumamaqui T. Ver valores en la Tabla 3.4.

Comparando los valores de la Tabla 3.4, se observa que la banda D'' en los dos casos tienen la misma posición; el FWHM de las muestras indica una enorme diferencia de 61,5 cm^{-1} ; y el área revela una considerable diferencia de 24,9 u.a. De igual modo, considerando la banda D, se señala que la posición entre las muestras difiere en 15,01 cm^{-1} ; el FWHM entre ambas revela una gran diferencia de 26,72 cm^{-1} ; y el área indica una diferencia grande de 32,17 u.a. Además, observando la banda A, se percibe que la posición entre ambas muestras varía en 20 cm^{-1} ; el FWHM refleja una gran diferencia de 37,57 cm^{-1} entre los dos casos; y el área presenta una diferencia grande de 40,49 u.a. Por otro lado, la banda G señala que la posición entre ambas muestras, varía solamente en 1,22 cm^{-1} ; el FWHM entre los dos casos, indica una pequeña diferencia de 7,95 cm^{-1} ; y el área varía solamente en 2,12 u.a. Por último, se logra percibir que la posición de la banda D', en los dos casos es la misma; el FWHM entre las dos muestras revela una pequeña diferencia de 7,50 cm^{-1} ; y el área refleja una mínima diferencia de 3,42 u.a.

En el ANEXO IV.2., se puede apreciar la respectiva deconvolución de las bandas de la muestra obtenida en el horno de atmósfera controlada (pumamaqui) y de forma tradicional (pumamaqui T) perteneciente a la Tabla 3.4.

Tabla 3.4. Características Raman resultantes de la deconvolución de bandas de la muestra de carbón vegetal (pumamaqui) obtenida en el horno de atmósfera controlada con gas argón y de la muestra de carbón vegetal (pumamaqui T) producida de forma tradicional.

Muestra	Parámetro	D''	D	A	G	D'	I _D /I _G	I _D /I _{D'}
Pumamaqui	Posición (cm^{-1})	1200	1348,91	1500	1590	1620		
	FWHM (cm^{-1})	127,62	225,04	173,66	78,44	28,37		
	Área (u.a.)	17,49	227,37	25,16	102,56	4,98		
	Intensidad (u.a.)	0,087	0,643	---	0,832	0,111	0,77	5,79
Pumamaqui T	Posición (cm^{-1})	1200	1333,90	1480	1588,78	1620		
	FWHM (cm^{-1})	189,12	198,32	211,23	86,39	35,87		
	Área (u.a.)	42,39	195,20	65,65	104,68	8,40		
	Intensidad (u.a.)	0,142	0,626	---	0,771	0,149	0,81	4,20

(Fuente: Propia, 2021)

Así también, observando la Figura 3.11a (palo rosa) y Figura 3.11b (palo rosa T), se indica que las líneas comparativas cruzan por puntos diferentes de las bandas D y G en ambos espectros, demostrando que estas bandas se encuentran en posiciones diferentes. El FWHM de la banda G en los dos casos no es igual, ya que la banda del

espectro palo rosa es un poco más ancha que la banda del otro espectro. Considerando el FWHM de la banda D en el espectro palo rosa, se observa un considerable incremento en comparación con el FWHM del espectro del otro caso, demostrando que no tienen el mismo FWHM.

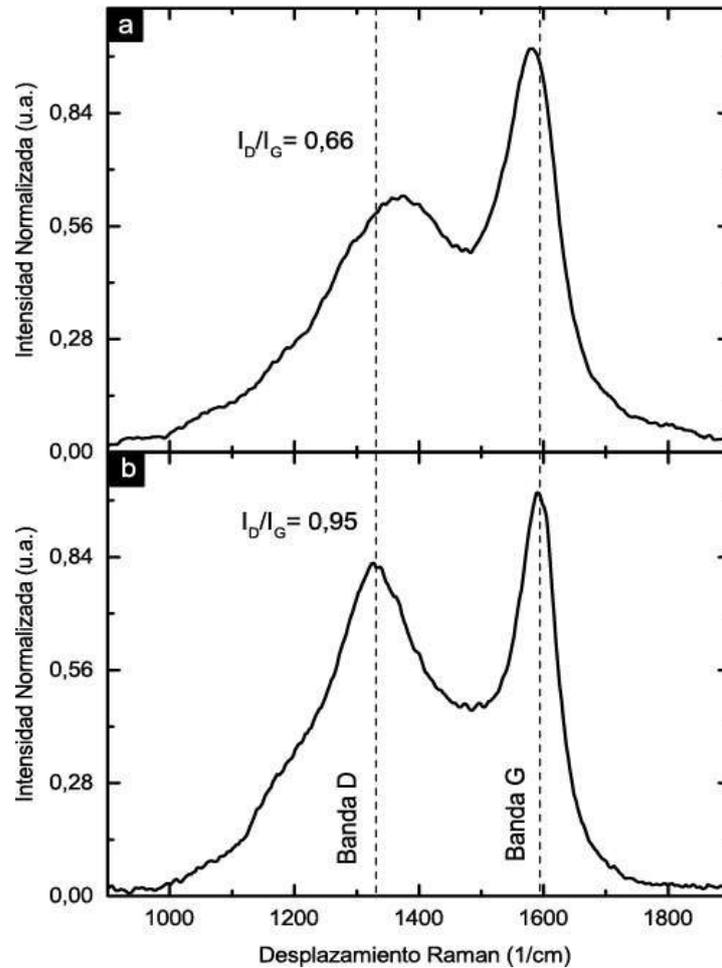


Figura 3.11. (a) Espectro resultante por espectroscopía Raman de la muestra de carbón vegetal (palo rosa) obtenida en el horno de atmósfera controlada con gas argón. (b) Espectro resultante por espectroscopía Raman de la muestra de carbón vegetal (palo rosa T) producida de forma tradicional.

(Fuente: Propia, 2021)

Teniendo en cuenta los valores de intensidad entre los dos espectros, se indica que la relación I_D/I_G difiere en 0,29. La relación I_D/I_D' entre ambos presenta una diferencia de 2,18. Se aprecia que la relación I_D/I_G en la muestra palo rosa T es mayor que en la muestra palo rosa; en cambio, la relación I_D/I_D' en la muestra palo rosa es mayor que en la muestra palo rosa T. Ver valores en la Tabla 3.5.

Al contrastar los valores de la Tabla 3.5, se observa que la posición de la banda D'' en los dos casos difiere en 10 cm⁻¹; el FWHM de las muestras indica una diferencia grande de 45,20 cm⁻¹; y el área revela una diferencia de 8,59 u.a. Así mismo, tomando en cuenta la banda D, se indica que la posición entre las muestras difiere en 22,28 cm⁻¹; el FWHM entre ambas revela una enorme diferencia de 67,25 cm⁻¹; y el área indica una pequeña diferencia de 3,88u.a. De la misma forma, relacionando los valores de la banda A, se percibe que la posición entre ambas es la misma; el FWHM entre los dos casos refleja una diferencia de 7,21 cm⁻¹; y el área presenta una gran diferencia de 28,53u.a. A su vez, la banda G indicada establece que la posición entre ambas difiere en 10 cm⁻¹; el FWHM entre los dos casos presenta una diferencia de 16,96 cm⁻¹; y el área refleja una considerable diferencia de 28,93u.a. Finalmente, se logra visualizar que la posición de la banda D' en los dos casos es la misma; el FWHM entre las dos muestras revela una mínima diferencia de 2,59 cm⁻¹; y el área varía solamente en 2 u.a.

En el ANEXO IV.3., se puede apreciar la respectiva deconvolución de las bandas de la muestra obtenida en el horno de atmósfera controlada (palo rosa) y de forma tradicional (palo rosa T) perteneciente a la Tabla 3.5.

Tabla 3.5. Características Raman resultantes de la deconvolución de bandas de la muestra de carbón vegetal (palo rosa) obtenida en el horno de atmósfera controlada con gas argón y de la muestra de carbón vegetal (palos rosa T) producida de forma tradicional.

Muestra	Parámetro	D''	D	A	G	D'	I _D /I _G	I _D /I _{D'}
Palo Rosa	Posición (cm ⁻¹)	1200	1351,29	1500	1580	1620		
	FWHM (cm ⁻¹)	156,85	244,22	161,57	80,74	25,16		
	Área (u.a.)	14,21	225,12	13,62	112,90	2,21		
	Intensidad (u.a.)	0,057	0,586	---	0,890	0,056	0,66	10,46
Palo Rosa T	Posición (cm ⁻¹)	1190	1329,01	1500	1590	1620		
	FWHM (cm ⁻¹)	111,65	176,97	168,78	63,78	27,75		
	Área (u.a.)	22,80	221,24	42,15	83,97	4,21		
	Intensidad (u.a.)	0,130	0,795	---	0,838	0,096	0,95	8,28

(Fuente: Propia, 2021)

Además, como se puede apreciar, la línea comparativa de la izquierda cruza por distintos puntos de la banda D del espectro mostrado en la Figura 3.12a (charmuelan) y Figura 3.12b (charmuelan T). Por otro lado, la línea comparativa de la derecha cruza exactamente por la mitad de la banda G del espectro charmuelan T, pero levemente

hacia un costado derecho de la misma banda en el espectro charmuelan. Todo esto demuestra que ambas bandas de los dos espectros se encuentran en posiciones distintas. El FWHM de la banda G en los dos casos es igual, sin embargo, el FWHM de la banda D en el espectro charmuelan, tiene un pequeño incremento en comparación con el FWHM del espectro del otro caso, demostrando que no tienen el mismo FWHM.

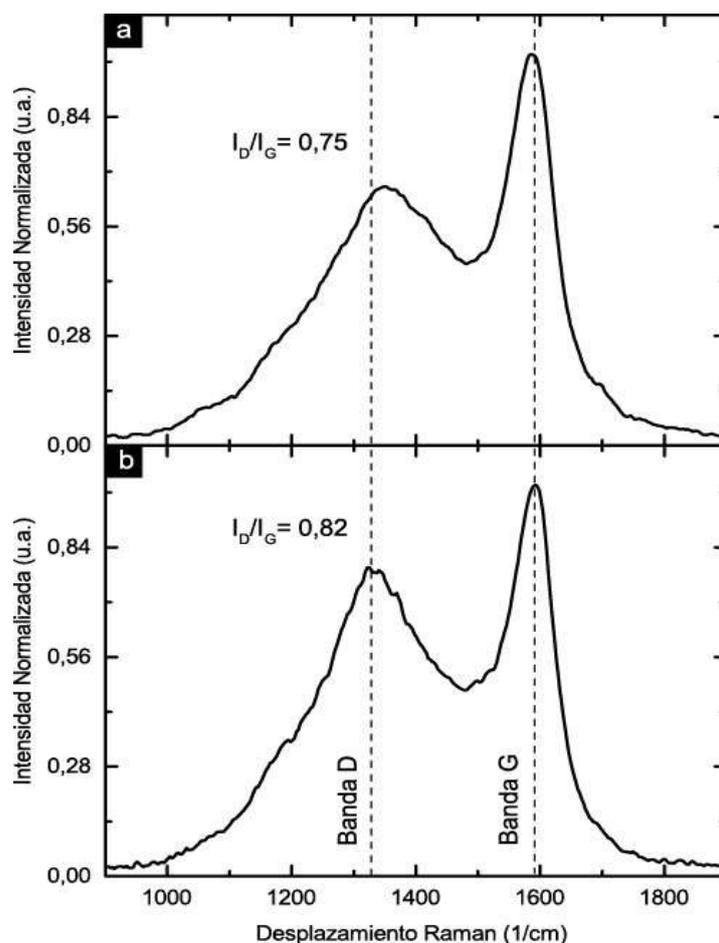


Figura 3.12. (a) Espectro resultante por espectroscopía Raman de la muestra de carbón vegetal (charmuelan) obtenida en el horno de atmósfera controlada con gas argón. (b) Espectro resultante por espectroscopía Raman de la muestra de carbón vegetal (charmuelan T) producida de forma tradicional.

(Fuente: Propia, 2021)

Considerando los valores de intensidad entre los dos espectros, se indica que la relación I_D/I_G difiriere en 0,07. La relación I_D/I_D' entre ambos tiene una diferencia de 6,36. Se aprecia que los dos tipos de relación son mayores en la muestra charmuelan T que en la muestra charmuelan. Ver valores en la Tabla 3.6.

Comparando los valores de la Tabla 3.6, se observa que la banda D'' en los dos casos tienen la misma posición; el FWHM de las muestras indica una diferencia de $12,97 \text{ cm}^{-1}$; y

el área revela una diferencia de 17,99 u.a. De igual manera, la banda D indica que la posición entre las dos muestras difiere en $20,95 \text{ cm}^{-1}$; el FWHM entre ambos casos refleja una enorme diferencia de $60,39 \text{ cm}^{-1}$; y el área indica una diferencia grande de 43,01 u.a. A su vez, observando los valores de la banda A, se establece que la posición entre ambas muestras difiere en 20 cm^{-1} ; el FWHM entre los dos casos refleja una gran diferencia de $30,22 \text{ cm}^{-1}$; y el área presenta una considerable diferencia de 30,66 u.a. De igual modo, la banda G indicada establece que la posición entre ambas muestras es parecida, con una mínima variación de 5 cm^{-1} ; el FWHM entre los dos casos presenta una pequeña diferencia de $4,03 \text{ cm}^{-1}$; y el área refleja una pequeña diferencia de 5,44 u.a. Por último, se visualiza que la posición de la banda D' en los dos casos es parecida, con una mínima variación de 2 cm^{-1} ; el FWHM entre las dos muestras revela una diferencia de $7,01 \text{ cm}^{-1}$; y el área indica una mínima diferencia de 2,33 u.a.

En el ANEXO IV.4., se puede apreciar la respectiva deconvolución de las bandas de la muestra obtenida en el horno de atmósfera controlada (charmuelan) y de forma tradicional (charmuelan T) perteneciente a la Tabla 3.6.

Tabla 3.6. Características Raman resultantes de la deconvolución de bandas de la muestra de carbón vegetal (charmuelan) obtenida en el horno de atmósfera controlada con gas argón y de la muestra de carbón vegetal (charmuelan T) producida de forma tradicional.

Muestra	Parámetro	D''	D	A	G	D'	I_D/I_G	$I_D/I_{D'}$
Charmuelan	Posición (cm^{-1})	1200	1349,38	1500	1585	1620		
	FWHM (cm^{-1})	139,08	232,46	165,27	78,08	29,65		
	Área (u.a.)	18,88	231,51	20,16	104,30	4,20		
	Intensidad (u.a.)	0,086	0,634	---	0,850	0,090	0,75	7,04
Charmuelan T	Posición (cm^{-1})	1200	1328,43	1480	1590	1618		
	FWHM (cm^{-1})	152,05	172,07	195,49	74,05	22,64		
	Área (u.a.)	36,87	188,50	50,82	98,86	1,87		
	Intensidad (u.a.)	0,154	0,697	---	0,849	0,052	0,82	13,40

(Fuente: Propia, 2021)

Finalmente, como se observa, la línea comparativa de la izquierda cruza por la mitad de la banda D de los espectros presentados en la Figura 3.13a (cascarilla) y Figura 3.13b (cascarilla T), pero esto no ocurre en el caso de la banda D, ya que la línea comparativa de la derecha cruza levemente hacia un costado de la mitad de la banda G en ambos espectros. El FWHM de la banda G en el espectro cascarilla, es un poco más grande que

en el espectro del otro caso. Así mismo, el FWHM de la banda D en el espectro cascarilla presenta un notable incremento en comparación con el FWHM del espectro del otro caso, demostrando que no tienen el mismo FWHM.

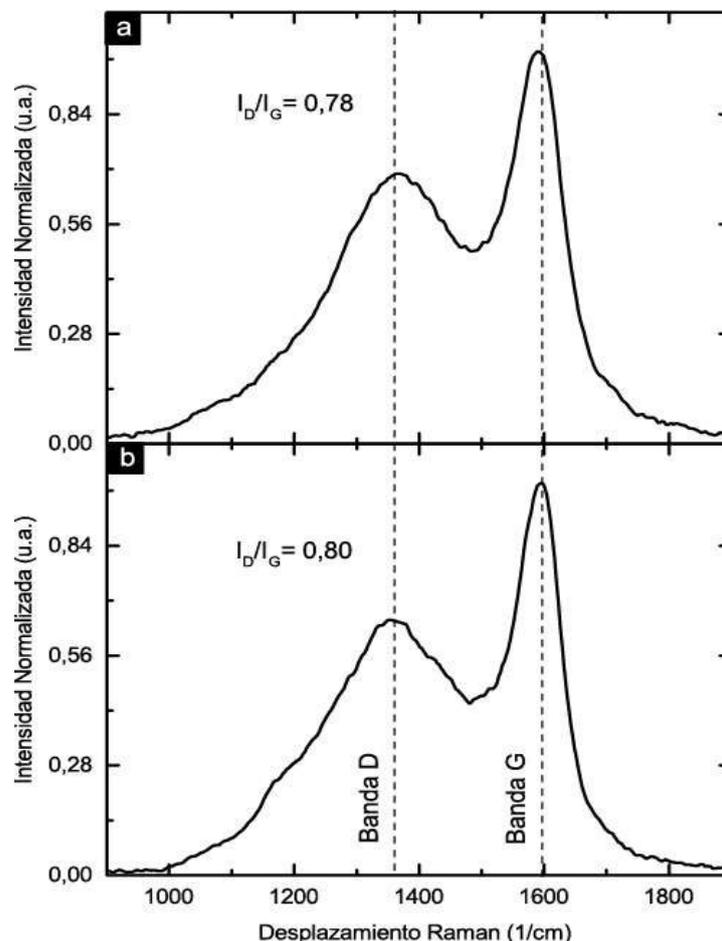


Figura 3.13. (a) Espectro resultante por espectroscopía Raman de la muestra de carbón vegetal (cascarilla) obtenida en el horno de atmósfera controlada con gas argón. (b) Espectro resultante por espectroscopía Raman de la muestra de carbón vegetal (cascarilla T) producida de forma tradicional.

(Fuente: Propia, 2021)

Observando los valores de intensidad entre ambos espectros, se indica que la relación I_D/I_G difiere en 0,04. La relación I_D/I_D' entre los dos presenta una diferencia de 4,84. Se aprecia que los dos tipos de relación son mayores en la muestra cascarilla que en la muestra cascarilla T. Ver valores en la Tabla 3.7.

Comparando los valores de la banda D'' en la Tabla 3.7, se observa que la posición en los dos casos es la misma; el FWHM de las dos muestras indica una enorme diferencia de $82,99 \text{ cm}^{-1}$; y el área varía solamente en 1,25 u.a. A su vez, considerando la banda D, se señala que la posición entre las dos muestras difiere en $4,89 \text{ cm}^{-1}$; el FWHM entre

ambas revela una diferencia de $8,03 \text{ cm}^{-1}$; y el área indica una gran diferencia de 25,65 u.a. De igual modo, observando la banda A, se percibe que la posición entre ambas muestras, varía en 10 cm^{-1} ; el FWHM entre ambos casos refleja una diferencia de $6,80 \text{ cm}^{-1}$; y el área presenta una pequeña diferencia de 4,91 u.a. Adicionalmente, la banda G presentada señala que la posición entre las dos muestras es casi igual, difiriendo únicamente en 2 cm^{-1} ; el FWHM entre los dos casos indica una diferencia de $15,75 \text{ cm}^{-1}$; y el área refleja una considerable diferencia de 23,02 u.a. Finalmente, se logra percibir que la posición de la banda D', en los dos casos tienen similar posición, con una variación insignificante de 2 cm^{-1} ; el FWHM entre las dos muestras revela una diferencia de $8,81 \text{ cm}^{-1}$; y el área indica una pequeña diferencia de 5,07 u.a.

En el ANEXO IV.5., se puede apreciar la respectiva deconvolución de las bandas de la muestra obtenida en el horno de atmósfera controlada (cascarilla) y de forma tradicional (cascarilla T) perteneciente a la Tabla 3.7.

Tabla 3.7. Características Raman resultantes de la deconvolución de bandas de la muestra de carbón vegetal (cascarilla) obtenida en el horno de atmósfera controlada con gas argón y de la muestra de carbón vegetal (cascarilla T) producida de forma tradicional.

Muestra	Parámetro	D''	D	A	G	D'	I _D /I _G	I _D /I _{D'}
Cascarilla	Posición (cm ⁻¹)	1200	1351,25	1500	1592	1620		
	FWHM (cm ⁻¹)	203,49	219,01	175,37	89,91	19,97		
	Área (u.a.)	21,23	228,89	27,13	120,13	2,46		
	Intensidad (u.a.)	0,066	0,665	---	0,850	0,078	0,78	8,53
Cascarilla T	Posición (cm ⁻¹)	1200	1346,36	1490	1590	1618		
	FWHM (cm ⁻¹)	120,50	210,98	182,17	74,16	28,78		
	Área (u.a.)	19,98	203,24	32,04	97,11	7,53		
	Intensidad (u.a.)	0,105	0,663	---	0,833	0,166	0,80	3,99

(Fuente: Propia, 2021)

3.1.2.5. Variación de parámetros

Así mismo, tomando en cuenta las muestras obtenidas en el horno y de forma tradicional, se logra hacer un análisis de las variaciones de diferentes parámetros de los mismos, explicados a continuación:

Los valores del $FWHM_D$ que se ha presentado en todas las muestras tradicionales en comparación con las muestras del horno, ver Figura 3.14., están asignadas debido al incremento del tamaño de los cristalitas (L_a), y a una distribución estructural dentro de las muestras de carbón vegetal [89], es decir, resultó de una función de incremento del orden estructural [90][91].

Este $FWHM_D$ se conecta con la distribución y variación estructural en el interior de las muestras, mientras continúan en el proceso de carbonización. Se refleja una relación inversa entre el $FWHM_D$ y el aumento de poliaromáticos, así también, una relación con la volatilización de los conjuntos oxigenados [92]. Por lo cual, mientras el $FWHM_D$ sea mayor, la relación de volatilización y los poliaromáticos serán menores, como es el caso de todas las muestras del horno, ver Figura 3.14. Las bandas Raman y la aromatización aparecen desde los 300 °C, aproximadamente [91].

Por otro lado, considerando los valores de $FWHM_D$, se evidencia que el carbón vegetal resultante de todas las muestras tradicionales tiene un ancho a media altura más bajo que el de las muestras obtenidas en el horno; por ende, se establece que dichos carbones tradicionales presentan bajo ordenamiento estructural y alto grado de cristalinidad.

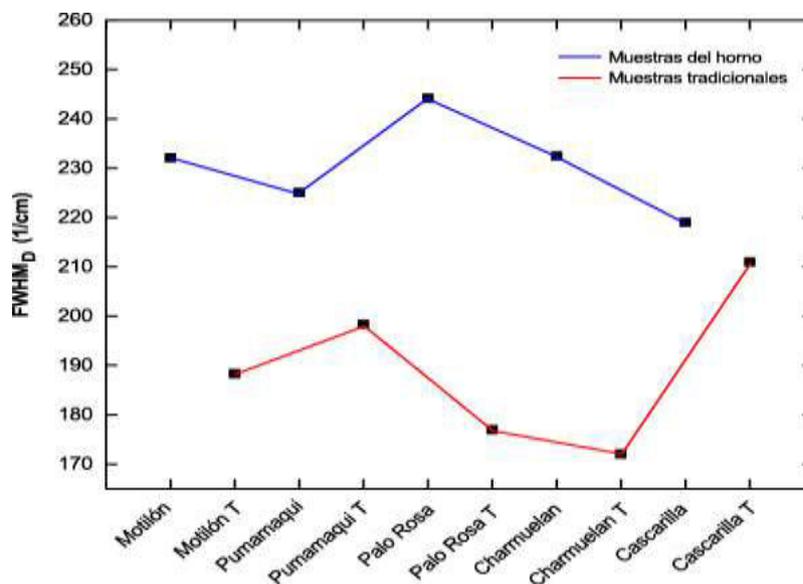


Figura 3.14. Variación del $FWHM_D$ de las muestras obtenidas en el horno y de las muestras tradicionales.
(Fuente: Propia, 2022)

El $FWHM_G$ permite cuantificar el orden estructural en el interior de las muestras de carbón, dado que es el señalador primordial del orden estructural de los carbonos sp^2 [93][94]. El incremento del desarrollo térmico va enlazado a un incremento en el orden estructural, lo que provoca una reducción del $FWHM_G$, siendo inversamente proporcional. En la Figura 3.15., se observa como las muestras tradicionales (palo rosa T, charmuelan T y cascarilla T) presentan un parámetro $FWHM_G$ reducido, provocando un orden estructural y desarrollo térmico elevado. [91][92][95][96].

Así mismo, la reducción del $FWHM_G$ se origina gracias a la disminución de los sitios amorfos desordenados sp^2 , y al incremento considerable de los cristalitas de carbono ordenados. La variación en el $FWHM_G$ se ha vinculado con las variaciones en la reflectancia del carbón vegetal, lo que refleja una disminución cuando la cantidad poliaromática ordenada y la temperatura ascienden [97].

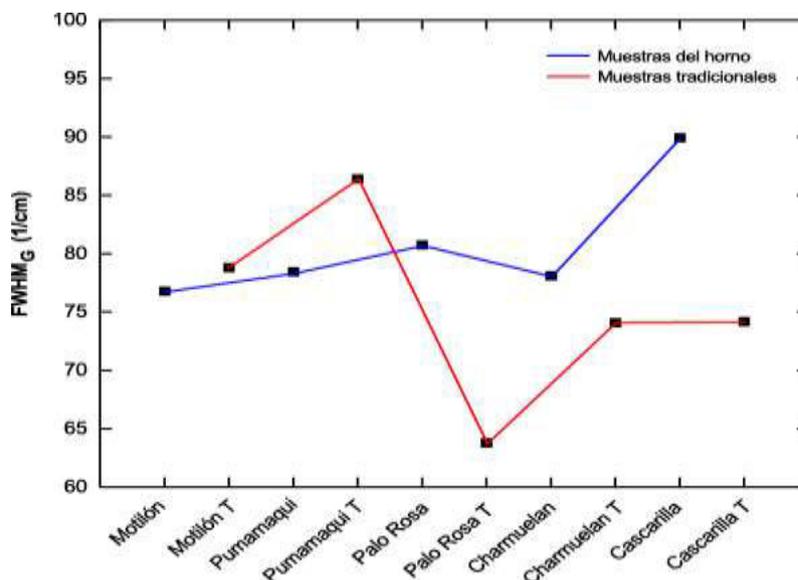


Figura 3.15. Variación del $FWHM_G$ de las muestras obtenidas en el horno y de las muestras tradicionales.
(Fuente: Propia, 2022)

El parámetro A_D/A_G se origina debido a la dificultad de las variaciones combinadas de ancho e intensidad con la temperatura durante el proceso de carbonización, ya sea por el método tecnológico o tradicional. Esto se da gracias a que el orden estructural se incrementa con la temperatura [96]. La Figura 3.16., indica que la muestra palo rosa T tiene un valor de relación A_D/A_G demasiado alto en comparación con todas las demás muestras, esto debido al aumento de su orden estructural.

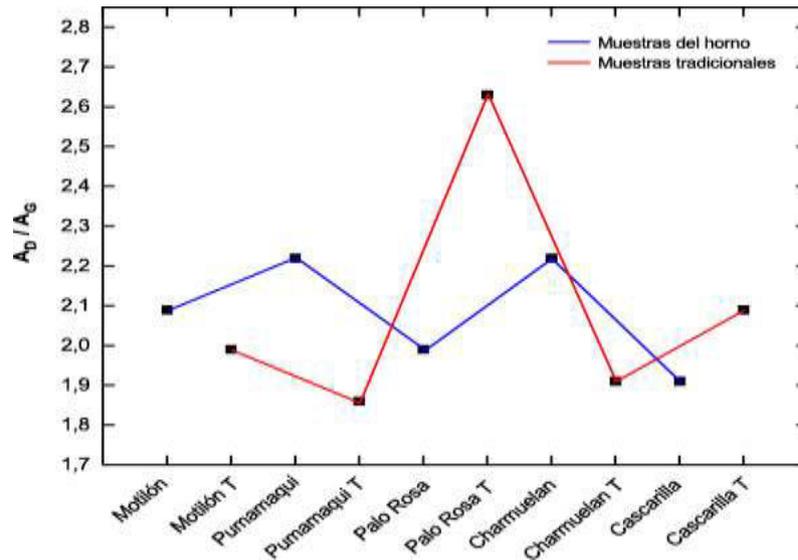


Figura 3.16. Variación de la relación A_D/A_G de las muestras obtenidas en el horno y de las muestras tradicionales.

(Fuente: Propia, 2022)

Dicha relación I_D/I_G , es inversamente proporcional al ordenamiento estructural del carbono, al desarrollo térmico y al tamaño del cristalito de grafitos ordenados [89]. Como se aprecia en la Figura 3.17., esta relación es mayor en todas las muestras de carbón vegetal producido de forma tradicional en comparación con las muestras del horno. Este parámetro se ha enlazado con la disminución del ancho de la banda G, con respecto al incremento de temperatura durante el proceso de carbonización, debido a que los anillos aromáticos en el interior de las muestras empiezan a agruparse [93][94].

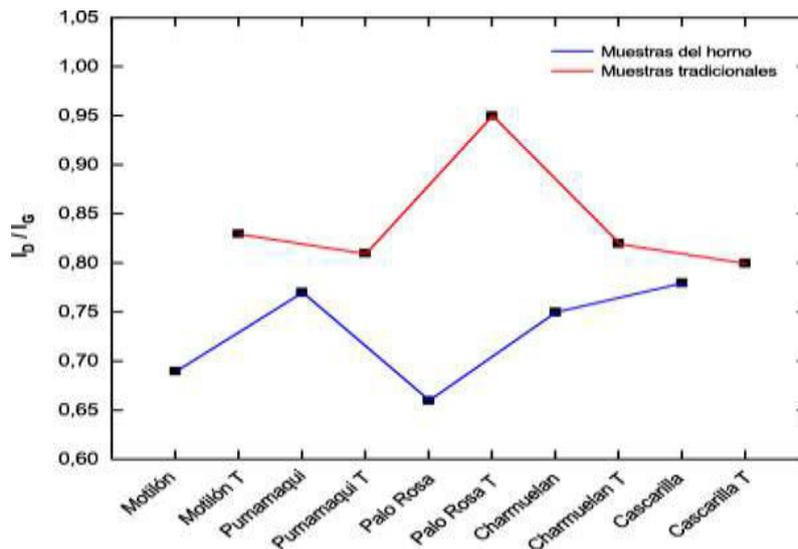


Figura 3.17. Variación de la relación I_D/I_G de las muestras obtenidas en el horno y de las muestras tradicionales.

(Fuente: Propia, 2022)

La Figura 3.18., refleja que la muestra palo rosa T y cascarilla T tienen valores de relación $FWHM_D/FWHM_G$ demasiado elevados en comparación con el resto de muestras tradicionales, resultado del posible desarrollo térmico, el cual a través del proceso de carbonización revela variaciones en los cristalitas gráficas ordenados y en las estructuras desordenadas. Dicha relación $FWHM_D/FWHM_G$ se ve afectada por la deconvolución de las bandas [89]. La homogeneidad de los espectros de todas las muestras, señalan que las tendencias de $FWHM_D$ no se alteran por la constitución del carbón vegetal analizado [91][92][95][96].

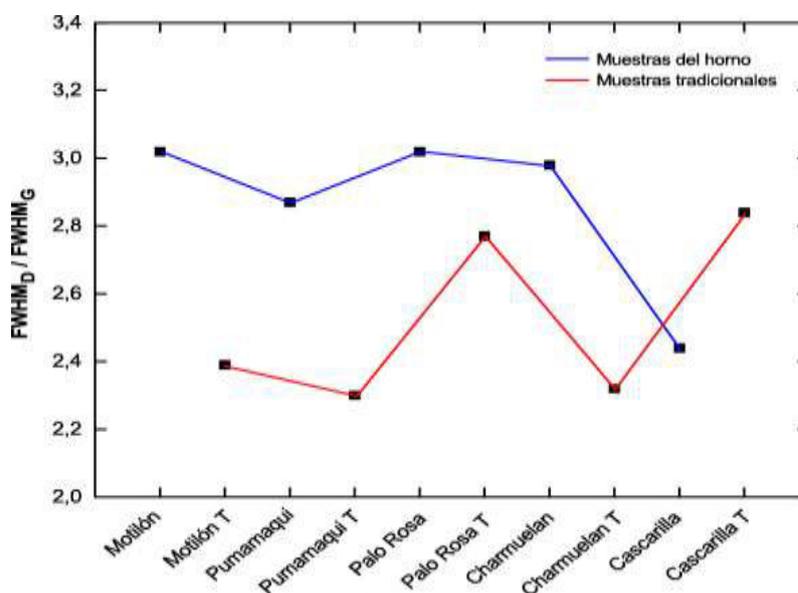


Figura 3.18. Variación de la relación del $FWHM_D/FWHM_G$ de las muestras obtenidas en el horno y de las muestras tradicionales.
(Fuente: Propia, 2022)

3.2. Discusión

3.2.1. Cambios en volúmenes y densidades

Las diferencias presentadas anteriormente en la sección de resultados indican que los volúmenes después del proceso de carbonización con gas argón y aire indican una diferencia máxima de 18,54% para la especie charmuelan y mínima de 1,72% para la especie cascarilla. Por otro lado, las densidades reflejan una diferencia máxima de 16,07% para la especie pumamaqui y mínima de 1,15% para la especie charmuelan. Todo esto radica indiscutiblemente con la presencia del gas argón durante todo el proceso de carbonización, ya que gracias a la reacción química durante el proceso que se da entre el carbono y el oxígeno es menor.

Si la carbonización se realiza en presencia del aire, se va a tener presencia de oxígeno, el mismo que reacciona con los componentes químicos de la madera (carbono, oxígeno, hidrógeno, nitrógeno), generando así la descomposición de la lignina y, por ende, la degradación del carbono que presenta la madera, produciendo gran cantidad de gases, principalmente el monóxido de carbono, metano y etileno. Debido a este consumo de carbono, provoca que se genere mayor cantidad de ceniza, porque la madera no se conservó en forma de carbón, sino que se quemó por completo, es decir, llega al punto de desintegrarse parcial o totalmente, reduciendo de esta forma su masa y volumen.

En cambio, con gas argón se trata de conformar una atmósfera inerte que impida o disminuya la presencia de oxígeno del aire, y por ende evitar la reacción de los componentes de la madera, especialmente del carbono que constituye el 50%, con el oxígeno del aire, deteniendo así la degradación del carbono; aunque si se generan reacciones entre los mismos componentes químicos de la madera como es el monóxido de carbono, metano, dióxido de nitrógeno y etileno, pero en menor cantidad en comparación con el aire. Al no darse una degradación extrema de carbono, se extrae menos ceniza y gases, la muestra resultante presentará átomos de carbono en su estructura y algunos componentes como resinas y grasas; por lo tanto, la madera carbonizada se conserva en un solo cuerpo, y la reducción de masa y volumen no será tan grande.

3.2.2. Deconvolución de bandas

La obtención de las muestras de carbón vegetal mediante el horno de atmósfera controlada con gas argón permite que la remoción del material volátil sea mucho más rápida, por lo que se obtiene un resultado más poroso y menos denso. Así mismo, se obtiene una mínima cantidad de ceniza y una nula fragmentación de las muestras carbonizadas. Mediante este método se tiene un mayor control del proceso de carbonización de la materia prima, ya que mediante el método tradicional posiblemente se obtiene un resultado anisotrópico (una sola muestra de carbón puede presentar diferentes regiones).

Gracias a la deconvolución de los picos D y G dados por el espectro Raman, se obtuvieron las diferentes señales independientes o bandas ocultas (D'', A y D') en dicho espectro. Mediante esta acción, se logró obtener un reporte espectral, el cual contiene información detallada acerca de los diferentes parámetros de cada una de las bandas con respecto al tipo de curva empleada (Lorentziana o Gaussiana) como: centro de gravedad,

ancho a media altura (FWHM), área, posición, grados de libertad e intensidad; los mismos que permiten determinar principios cuantitativos que favorecen a cotejar el nivel de orden estructural en diversos tipos de materiales de carbono.

Al momento de que las muestras fueran expuestas al gas argón y oxígeno durante el proceso de carbonización, es muy probable que distintos factores como la posición de los átomos, la masa, los enlaces moleculares y las fuerzas interatómicas se hayan alterado, ocasionando que algunos parámetros como la frecuencia de las bandas varíe. La variación en el número de onda se genera por la aparición de impurezas químicas en la red cristalina y por el desorden cristalino causado por las reacciones que provoca el oxígeno. Así mismo, la forma y el ancho de banda Raman están totalmente vinculados con el orden cristalino.

Por otro lado, el monóxido y dióxido de carbono, el metano y el etileno que se generan en el proceso de carbonización con gas argón y mayormente con aire alteran el desorden cristalino, haciéndolo más grande, provocando una reducción del tiempo de vida de los fonones, y por ende un incremento en el ancho de banda. Las disposiciones y superposiciones de las bandas también sufren alteraciones, ya que estas se generan por las diferentes longitudes de onda que son causadas por el aumento de los distintos enlaces moleculares que vibran a ciertas frecuencias, y son afectados por la presencia de del material volátil y los mismos gases generados en la carbonización con gas y mayoritariamente con aire. Por estas razones, cualquier tipo de factor que actúe sobre las muestras durante la carbonización, ocasionará una distorsión en los parámetros de las bandas D y G.

Cabe recordar que este análisis deconvolutivo se realizó solamente con las muestras producidas dentro de un horno de atmósfera controlada con gas argón, con las muestras obtenidas de forma tradicional por el método de parva y las muestras recolectadas; y no se realizó este proceso con las muestras obtenidas dentro del horno con aire, ya que, por tema de tiempo, disposición del laboratorio y uso de los equipos, no se logró analizar por espectroscopía Raman. Ver Tabla 2.3.

En la Figura 3.19., se presentan todos los espectros de las muestras de carbón vegetal obtenidas en el horno y de forma tradicional, demostrando que la forma y la disposición de las curvas del espectro es propio de cada muestra.

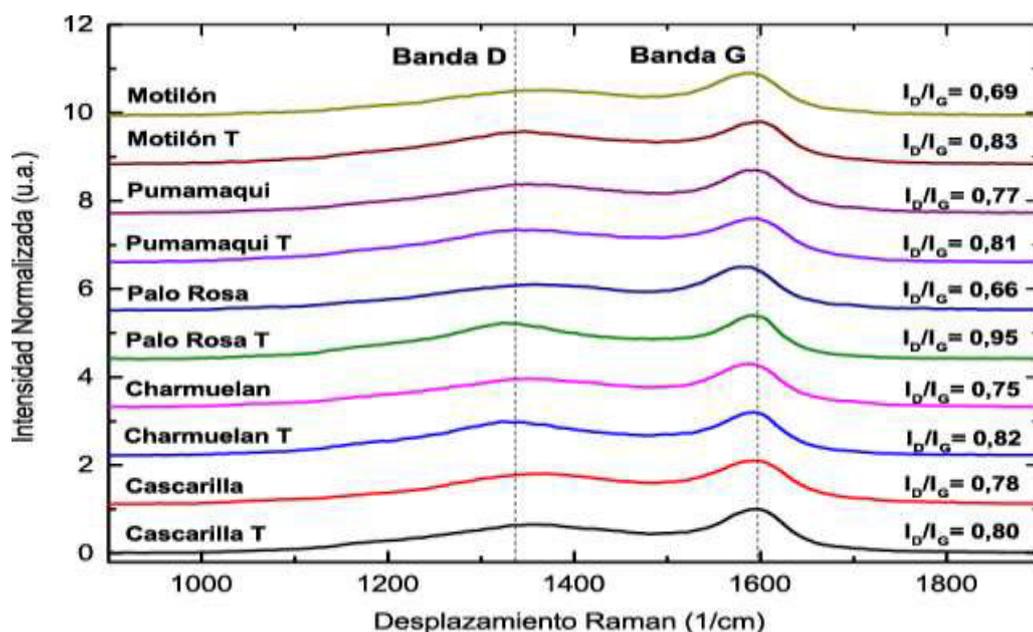


Figura 3.19. Espectros resultantes de las diez muestras de carbón vegetal (cinco muestras obtenidas en el horno y cinco muestras producidas de forma tradicional) analizadas por espectroscopía Raman.
(Fuente: Propia, 2021)

Motilón – Motilón T

La banda D'' en ambas muestras, presenta la misma posición y se mantiene en el máximo valor referencial. Esta banda es más ancha, intensa y refleja un área mayor en la muestra motilón T, que en la muestra motilón. Debido a que la relación de intensidad (I_D/I_G) es mayor en la muestra tradicional, se indica que ésta última es más defectuosa.

La banda D en ambas muestras, presenta diferente posición y no se encuentra dentro de los valores referenciales. Esta banda es más ancha e indica un área mayor en la muestra motilón, pero es más intensa en la muestra motilón T. Debido a que la relación de intensidad (I_D/I_G) es mayor en la muestra tradicional, se indica que ésta presenta más defectos y mayor grado de orden cristalino que la muestra obtenida en el horno.

La banda A en ambas muestras no ocupa la misma posición, pero si se encuentra dentro de los valores referenciales. Esta banda es más ancha y presenta mayor área en la muestra motilón T que en la muestra motilón. Debido a que la relación de intensidad (I_D/I_G) es mayor en la muestra tradicional, se indica que ésta presenta aproximadamente un poco más de carbono amorfo que la muestra obtenida en el horno.

La banda G en las dos muestras no ocupa la misma posición, pero si se encuentra dentro de los valores referenciales. Esta banda es levemente más intensa y presenta mayor

área en la muestra motilón, pero es más ancha en la muestra motilón T. Por lo cual, se indica que la muestra obtenida en el horno se aproxima en gran parte a la red gráfica ideal (grafito).

La posición de la banda D', en ambos casos es igual y se mantiene dentro de los valores referenciales. Esta banda, es levemente más ancha y presenta mayor área en la muestra motilón, pero es levemente más intensa en la muestra motilón T. Por lo tanto, se revela que en la muestra obtenida en el horno se presenta mayor cantidad de grafitos imperfectos y se aproxima más a la red gráfica desordenada.

Esta especie presenta gran cantidad de aceites esenciales, antocianinas y sustancias antioxidantes (tocoferol, retinol, ácido ascórbico, entre otras) que restauran la piel y evitan el cáncer de vías digestivas [98]. Por lo cual, estos aceites y sustancias se degradan parcial o totalmente debido a las reacciones químicas generadas en el proceso de carbonización, alterando así los parámetros espectrales.

Pumamaqui – Pumamaqui T

La banda D'' en ambos casos presenta la misma posición y se mantiene en el máximo valor referencial. Esta banda es más ancha, intensa y refleja mayor área en la muestra pumamaqui T que en la muestra pumamaqui. Debido a que la relación de intensidad (I_D/I_G) es mayor en la muestra tradicional, se indica que ésta última es más defectuosa.

La banda D en ambos casos, presenta diferente posición y no se encuentra dentro de los valores referenciales. Esta banda es más ancha, intensa e indica mayor área en la muestra pumamaqui que en la muestra pumamaqui T. Debido a que la relación de intensidad (I_D/I_G) es mayor para la muestra tradicional, ésta presenta más defectos y mayor grado de orden cristalino que la muestra obtenida en el horno.

La banda A en ambas muestras no ocupa la misma posición, pero si se encuentra dentro de los valores referenciales. Esta banda, en la muestra pumamaqui T es más ancha y presenta mayor área que en la muestra pumamaqui. Debido a que la relación de intensidad (I_D/I_G) es mayor en la muestra tradicional, ésta presenta aproximadamente un poco más de cantidad de carbono amorfo que la muestra obtenida en el horno.

La posición de la banda G, en las dos muestras se mantiene dentro de los valores referenciales y es casi igual. Esta banda, en la muestra pumamaqui T es más ancha y

presenta mayor área, pero es más intensa en la muestra pumamaqui. En base a estos resultados, se puede afirmar que la muestra tradicional se aproxima en gran parte a la red grafitica ideal (grafito).

La posición de la banda D', en ambos casos es igual y se mantiene dentro de los valores referenciales. Esta banda es más ancha, intensa e indica mayor área en la muestra pumamaqui T que en la muestra pumamaqui. Así pues, se refleja que en la muestra tradicional se presenta mayor cantidad de grafitos imperfectos y se aproxima más a la red grafitica desordenada.

Esta especie presenta sapogeninas, aceites esenciales, ácido diterpénico y taninos, los cuales son empleados para fines medicinales como analgésicos y descongestionantes nasales [99]. Por lo cual, estas sustancias se degradan parcial o totalmente debido a las reacciones químicas generadas en el proceso de carbonización, alterando así los parámetros espectrales.

Palo Rosa – Palo Rosa T

La posición de la banda D'', en las dos muestras se mantiene dentro de los valores referenciales y es casi igual. Esta banda es más intensa y presenta mayor área en la muestra palo rosa T, pero es más ancha en la muestra palo rosa. Debido a que la relación de intensidad (I_D/I_G) es mayor para la muestra tradicional, se afirma que ésta última es más defectuosa.

La banda D en ambos casos presenta diferente posición y no se encuentra dentro de los valores referenciales. Esta banda es más ancha e indica mayor área en la muestra palo rosa, en cambio es más intensa en la muestra palo rosa T. Debido a que la relación de intensidad (I_D/I_G) es mayor para ésta última, la muestra tradicional presenta más defectos y mayor grado de orden cristalino que la muestra obtenida en el horno.

La banda A en ambos casos presenta la misma posición y se mantiene en el máximo valor referencial. Esta banda, en la muestra palo rosa T es más ancha y refleja mayor área, en comparación con la muestra palo rosa. Debido a que la relación de intensidad (I_D/I_G) es mayor para la muestra tradicional, se indica que ésta presenta aproximadamente un poco más de cantidad de carbono amorfo que la muestra obtenida en el horno.

La posición de la banda G, en ambos casos se mantiene dentro de los valores referenciales y es casi igual. Dicha banda es más ancha, intensa y refleja mayor área en la muestra palo rosa que en la muestra palo rosa T. Por lo cual, se indica que la muestra obtenida en el horno se aproxima en gran parte a la red grafitica ideal (grafito).

La posición de la banda D', en ambos casos es igual y se mantiene dentro de los valores referenciales. Esta banda, en la muestra palo rosa T es más ancha, intensa e indica mayor área que en la muestra palo rosa. De modo que, se refleja que en la muestra tradicional se presenta mayor cantidad de grafitos imperfectos y se aproxima más a la red grafitica desordenada.

Esta especie presenta sustancias sumamente ricas en mirceno, humuleno, cisoxilinalol, viridiflor limoneno, pineno; por tal motivo es considerada de fuerte beneficio económico. Dichas sustancias son empleadas en la industria de jabones, perfumes y otros cosméticos [100]. Por lo cual, estas sustancias se degradan parcial o totalmente debido a las reacciones químicas generadas en el proceso de carbonización, alterando así los parámetros espectrales.

Charmuelan – Charmuelan T

La banda D'' en ambos casos, presenta la misma posición y se mantiene en el máximo valor referencial. Dicha banda es más ancha, intensa e indica mayor área en la muestra charmuelan T que en la muestra charmuelan. Debido a que la relación de intensidad (I_D/I_G) es mayor en la muestra tradicional, se indica que ésta última es más defectuosa.

La banda D en ambos casos, presenta diferente posición y no se mantiene dentro de los valores referenciales. Esta banda es más ancha y refleja mayor área en la muestra charmuelan, en cambio es levemente más intensa en la muestra charmuelan T. Debido a que la relación de intensidad (I_D/I_G) es mayor para ésta última, la muestra tradicional presenta más defectos y mayor grado de orden cristalino que la muestra obtenida en el horno.

La banda A en ambos casos, no ocupa la misma posición, pero si se encuentra dentro de los valores referenciales. Dicha banda es más ancha y presenta mayor área en la muestra charmuelan T que en la muestra charmuelan. Debido a que la relación de intensidad (I_D/I_G) es mayor en la muestra tradicional, se indica que ésta presenta

aproximadamente un poco más de cantidad de carbono amorfo que la muestra obtenida en el horno.

La banda G en las dos muestras no ocupa la misma posición, pero si se encuentra dentro de los valores referenciales. Esta banda es más ancha, levemente más intensa y revela mayor área en la muestra charmuelan, que en la muestra charmuelan T. Por lo cual, se observa que la muestra obtenida en el horno se aproxima en gran parte a la red gráfica ideal (grafito).

La posición de la banda D' en ambos casos se mantiene dentro de los valores referenciales y es casi igual. Dicha banda, en la muestra charmuelan es más ancha, intensa y refleja mayor área que en la muestra charmuelan T. De tal modo, se revela que en la muestra obtenida en el horno se presenta mayor cantidad de grafitos imperfectos y se aproxima más a la red gráfica desordenada.

Esta especie presenta sustancias antioxidantes (tocoferol, retinol, ácido ascórbico, entre otras) y aromatizantes, las cuales se utilizan con fines terapéuticos y afectaciones de la piel [101]. Por lo cual, estas sustancias y aromatizantes se degradan parcial o totalmente debido a las reacciones químicas generadas en el proceso de carbonización, alterando así los parámetros espectrales.

Cascarilla – Cascarilla T

La banda D'' en ambos casos, presenta la misma posición y se mantiene en el máximo valor referencial. Esta banda es más ancha e indica mayor área en la muestra cascarilla, en cambio es más intensa en la muestra cascarilla T. Debido a que la relación de intensidad (I_D/I_G) es mayor para la muestra tradicional, se indica que ésta última es más defectuosa.

La banda D en ambos casos, presenta diferente posición y no se conserva dentro de los valores referenciales. Esta banda es más ancha, intensa y revela mayor área en la muestra cascarilla que en la muestra cascarilla T. Debido a que la relación de intensidad (I_D/I_G) es mayor para la muestra tradicional, se afirma que ésta presenta más defectos y mayor grado de orden cristalino que la muestra obtenida en el horno.

La banda A en ambas muestras no ocupa la misma posición, pero si se encuentra dentro de los valores referenciales. Esta banda, en la muestra cascarilla T es más ancha y

refleja mayor área que en la muestra cascarilla. Debido a que la relación de intensidad (I_D/I_G) es mayor para la muestra tradicional, se indica que ésta presenta aproximadamente un poco más de cantidad de carbono amorfo que la muestra obtenida en el horno.

La posición de la banda G, en las dos muestras se mantiene dentro de los valores referenciales y es casi igual. Dicha banda, en la muestra cascarilla es más ancha, intensa y presenta mayor área que en la muestra cascarilla T. Por lo cual, se afirma que la muestra del horno se aproxima en gran parte a la red grafitica ideal (grafito).

La posición de la banda D' en ambos casos se mantiene dentro de los valores referenciales y es casi igual. Esta banda es más ancha, intensa y revela mayor área en la muestra cascarilla T que en la muestra cascarilla. Así pues, se refleja que, en la muestra tradicional se presenta mayor cantidad de grafitos imperfectos y se aproxima más a la red grafitica desordenada.

Esta especie presenta gran variedad de sustancias como: *aricine*, *sucirubina*, *ácido cafeico*, *quinovin*, *ácido cinchofulvico*, *ácido quinóvico*, *ácido cincholic*, *quininidina*, *cinchonaina*, *cinconidina*, *cinconina*, *cinchofilamina*, *ácido cinchotanico*, *cinchotina*, *conquinamina*, *cuscamidina*, *quinicina cuscamina*, *ácido quínico*, *cusconidina*, *quinamina*, *cusconina*, *quinacimina*, *proantocianidinas*, *epicatequina*, *paricina*, *javanina*. Estas son utilizadas para tratar el cáncer de mama e hígado, infecciones, problemas del corazón, fiebre, malaria, diarrea, neumonía, paludismo [102][103]. Por lo cual, estos ácidos se degradan parcial o totalmente debido a las reacciones químicas generadas en el proceso de carbonización, alterando así los parámetros espectrales.

De forma general, considerando dicho estudio, se establece que:

Para el carbono amorfo se considera la posición de la banda A, la cual indica que la cantidad de este carbono cambia firmemente, ya que las señales se originan de procedimientos combinados. A su vez, cabe recalcar que esta cantidad es muy pequeña, presentando un impacto insignificante en los espectros [75]. Por lo cual, la banda A en comparación con las otras bandas, está más expuesta a sufrir un error en el ajuste al momento de generar la deconvolución y obtener la curva de ajuste. En las muestras resultantes de carbón vegetal que presentan menor cantidad de carbono amorfo, la forma de los espectros obtenidos indica menos afectaciones en las vibraciones moleculares.

Cabe recalcar que, la banda G es más exacta que la banda D, debido a que ésta banda también logra relacionarse con el carbono amorfo [68].

Independiente del proceso, ya sea tecnológico o tradicional, se observa que existe carbono amorfo reflejado con la presencia de la banda A, pero no se podría determinar tan tajantemente con cuál proceso de obtención existe mayor cantidad de carbono amorfo, ya que se necesitaría realizar un análisis estadístico con muchas más muestras, e inclusive utilizar otro tipo de espectroscopía.

La relación de intensidad I_D/I_G siempre va a existir, y resulta de gran ayuda, ya que revela información relevante acerca del producto final analizado, ver sección 3.1.2.2. Entre este tipo de información aparece que, mientras mayor sea la relación, más defectuoso será el material y, por ende, mayor será el orden cristalino. Esto se debe a que la relación de intensidad permite definir la cantidad de defectos en los materiales grafiticos, en donde se observa que los defectos indicados por la banda D, especialmente los defectos de salto pertenecientes a las muestras palo rosa y charmuelan T, están combinados y recluidos dentro de la imperfección del orden cristalino (generalmente en el límite o en los bordes del cristalito) [82]. Esto provoca su incremento, es decir, a más defectos, mayor desorden de los enlaces y mayor orden cristalino [85].

En todos los procesos con aire y gas argón, la banda D sufre un considerable desplazamiento hacia la izquierda de su posición mínima referencial (1355 cm^{-1}); la banda G un desplazamiento hacia la derecha de su valor más representativo (1580 cm^{-1}), siendo estos desplazamientos mayores con aire, debido a que existe un mayor consumo de carbono. la banda D'' y D' no sufren ningún desplazamiento, ocupando la misma posición de sus valores más representativos de 1200 y 1620 cm^{-1} , respectivamente. Finalmente, la banda A en todos los procesos con gas argón se mantiene a la derecha (en su valor máximo referencial de 1500 cm^{-1}), debido a que no hay oxígeno suficiente para combustionar en gran cantidad; en cambio, en los procesos con aire se mantiene a la izquierda (en su valor mínimo referencial de 1480 cm^{-1}), debido a las varias reacciones que se producen entre el oxígeno y los componentes químicos de la madera, siendo estas reacciones mayores en presencia del aire, provocando que se pierda mayor carbono.

Debido a la atmósfera inerte que se crea con gas argón y a la poca reacción que se genera entre los mismos componentes químicos de la madera, la deconvolución, y por

ende los parámetros de las bandas principales (D y G) en su gran mayoría, indican que el área, la intensidad y la anchura por este método son mayores, en comparación con el método tradicional (aire). En cambio, las bandas D", A y D' en su gran mayoría indican que el área, la intensidad y la anchura por el método con aire son mayores, en comparación con el método tecnológico (gas argón), ver desde la Tabla 3.3., hasta la Tabla 3.7. Por lo tanto, todo esto revela que el método por el cual se obtiene carbón vegetal si influye en las características Raman.

Las posiciones de las bandas G y A de todas las muestras obtenidas en el horno y de forma tradicional presentan desplazamiento, pero si se mantienen dentro de los valores referenciales; en cambio, la única banda que se desplaza fuera de sus valores referenciales (1355 y 1380 cm^{-1}) es la banda D, debido a que el desplazamiento extremo y el ensanchamiento de la misma puede ser dado, en ciertos casos por la oxidación del grafeno a grafeno-óxido; por las impurezas locales, material volátil (ácido acético, ácido fórmico, alcohol metílico y trazas de alquitrán) y gases (monóxido y dióxido de carbono, etileno, metano, dióxido de nitrógeno) que se presentan al reaccionar el oxígeno con los componentes químicos de la madera [104]; o por la cantidad de celulosa, hemicelulosa y lignina que se pierde después del proceso de carbonización, ya sea con gas argón o aire, presentando mayor pérdida con aire.

Así mismo, puede provocarse por la distribución y el tamaño de los cristalitas de carbono, estas razones posiblemente sean correctas también para la banda D [85]. El ancho de la banda D está habitualmente relacionado con el tiempo de vida de decaimiento del fonón implicado. Debido al impacto de confinamiento incitado por la tensión de compresión externa y la disposición de la curva, puede ocasionar que el ancho se incremente [56], y por ende, el pico posiblemente pueda llegar a desplazarse de su valor referencial más significativo (1360 cm^{-1}). A su vez, un desplazamiento de la banda G hacia posiciones más altas, y de la banda D a posiciones considerablemente más bajas, se dan lugar a medida que las láminas de grafeno se apisonan y se transforman con la temperatura [105].

De igual manera, el desplazamiento de las bandas se debe a los efectos de tensión [83], a los enlaces químicos y a la simetría de las moléculas, por lo cual, si la longitud del enlace químico de las moléculas varía gracias a algún efecto externo o interno [84] como la generación de potasio, fósforo, oro, etc., en la ceniza, o el desprendimiento de varios ácidos y alcoholes que conforman la lignina, dan lugar a que se genere el desplazamiento

de estas bandas. Así mismo, el desplazamiento puede variar debido al estado de desorden del material [56].

3.2.2.1. Relaciones de intensidad

- I_D/I_G

El número de defectos de las muestras de carbón vegetal permiten valorarse aprovechando la relación de intensidad I_D/I_G . A raíz que esta relación se reduce, también se reduce el número de defectos estructurales presentes en las muestras [62]. Todas las muestras obtenidas mediante el horno de atmósfera controlada con gas argón tienen un valor de relación I_D/I_G menor al valor de sus respectivas muestras producidas por el método tradicional. La diferencia de relación entre las muestras motilón–motilón T y palo rosa–palo rosa T es notable, ya que presentan una diferencia de 0,13 y 0,29, respectivamente; en cambio la diferencia de relación entre las muestras pumamaqui–pumamaqui T, charmuelan–charmuelan T y cascarilla–cascarilla T es casi insignificante, ya que presentan una diferencia de 0,04, 0,07 y 0,02, respectivamente. Todas estas diferencias corresponden posiblemente a la distinta cantidad de carbono amorfo y gráfico que presenta cada una de las muestras. Las relaciones de intensidad I_D/I_G se indican desde la Tabla 3.3 hasta la Tabla 3.7.

- I_D/I_D'

El tipo de defecto de las muestras de carbón vegetal permiten valorarse aprovechando la relación de intensidad I_D/I_D' . Los defectos de tipo borde les corresponden a las muestras: motilón, motilón T, pumamaqui T y cascarilla T; los defectos de tipo vacancia les corresponden a las muestras: pumamaqui, palo rosa T, charmuelan y cascarilla; los defectos de tipo sp^3 (defectos de salto) les corresponden a las muestras: palo rosa y charmuelan T. Los valores de relación de intensidad I_D/I_D' se indican desde la Tabla 3.3 hasta la Tabla 3.7. Todos estos defectos se pueden originar debido a las alteraciones provocadas por la cantidad de carbono amorfo que contienen las huellas Raman de cada muestra.

3.2.2.2. Relaciones con la banda G

Existen varios tipos de carbono amorfo cuyas características y estructuras se enlazan, pero difieren en gran parte [56]. Entre estos se tiene al grafito nanocristalino (nc-G) [56]; a los llamados sp^2 (a-C y a-C:D), refiriéndose al carbono amorfo y al carbono amorfo desordenado, respectivamente [106]; y a los sp^3 (ta-C; a-C:H y ta-C:H) [56], refiriéndose al carbono amorfo tetraédrico, al carbono amorfo hidrogenado y al carbono amorfo

tetraedral hidrogenado, respectivamente [106]. La resonancia que presentan los carbonos amorfos se debe a la presencia de carbono aromático impregnado en su estructura [56].

Para lograr el reconocimiento del tipo de carbono amorfo, se emplea los datos de la banda G [56], relacionando la posición (σ) y el FWHM (Γ) de esta banda con el tipo de carbono amorfo. Estos parámetros se han demostrado en la Figura 3.20., de acuerdo a la misma, el tipo carbono amorfo a la que pertenecen todas las muestras obtenidas en el horno y producidas tradicionalmente corresponden al grafito nanocrystalino (nc-G) de toda la variedad de carbono amorfo que existe. Para poder cuantificarlas se necesitarían de otras técnicas, como la espectroscopía fotoelectrónica de rayos X, que permitan dar valores de la concentración de este material en la muestra.

Al tomar en cuenta este FWHMG (Γ_G) como guía del desorden local, vinculado con el tamaño de los cristalitos, se emplea este parámetro para definir de alguna forma el lugar de ubicación de la muestra. Considerando que (nc-G) tiene un orden mayor que (a-C:H) y (a-C:D), y estos a su vez son más ordenados que el carbono amorfo tetraedral hidrogenado (ta-C:H) y el carbono amorfo tetraedral (ta-C). La aparición de hidrógeno reduce de manera invariable el desplazamiento de la banda G [56].

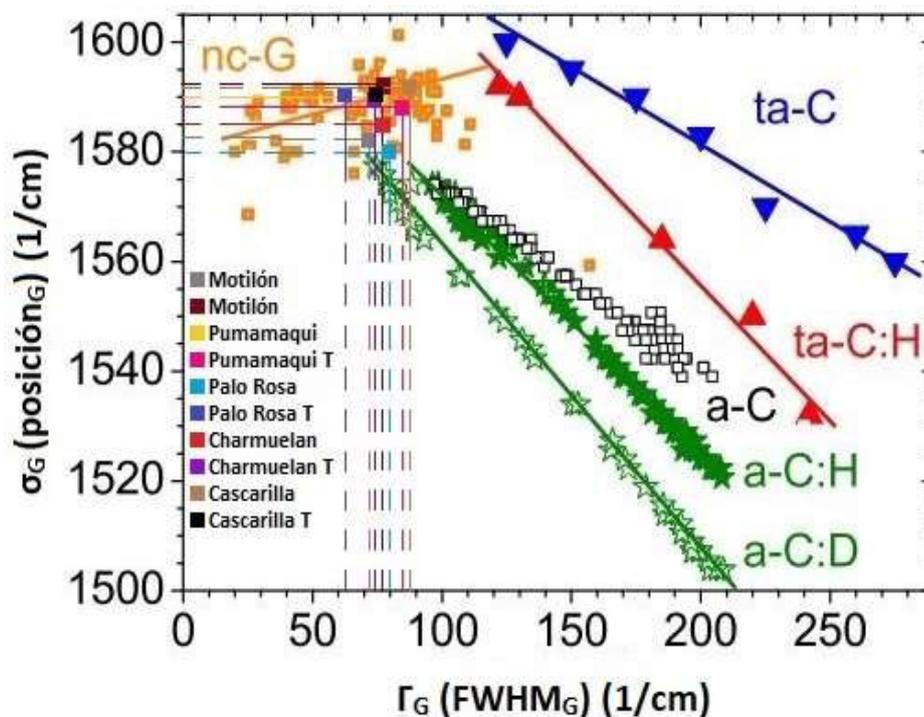


Figura 3.20. Gráfico de σ_G (posición $_G$) frente a Γ_G (FWHM $_G$) para diferentes tipos de carbono amorfo. Los datos se registraron con $\lambda_L = 514\text{nm}$.

(Fuente: Modificado de Merlen et al., 2017)

En la Figura 3.21., se simbolizan los valores del FWHMD (Γ_D) y FWHMG (Γ_G), los cuales indica el grado de desorden de los carbonos aromáticos. En relación del tamaño propio del dominio aromático, los datos se incorporan en tres áreas distintas: el rectángulo de abajo (un poco inclinado) dispone de un L_a mayor a 10 nm; el rectángulo de la mitad (bastante inclinado) establece de un L_a mayor a 1 nm y menor a 10 nm; y finalmente, el rectángulo más alto (incompleto) comprende un L_a muy cercano a 1 nm.

En la Figura 3.21., se aprecia que todas las muestras se encuentran dentro de un L_a muy cercano a 1 nm, excepto la muestra palo rosa T, la misma que se encuentra en el rango de $10 \text{ nm} > L_a > 1 \text{ nm}$. Esto conlleva a que todas las muestras del horno y especialmente las tradicionales, a excepción de la muestra palo rosa T, presentan un mayor grado de desorden (defectos), Por lo tanto, se observa que las estructuras obtenidas tienen un ordenamiento de poco alcance y no de largo alcance, como es el caso del grafeno o nanotubos de carbono, donde estos presentan un tamaño de cristalito mayor a 10 nm.

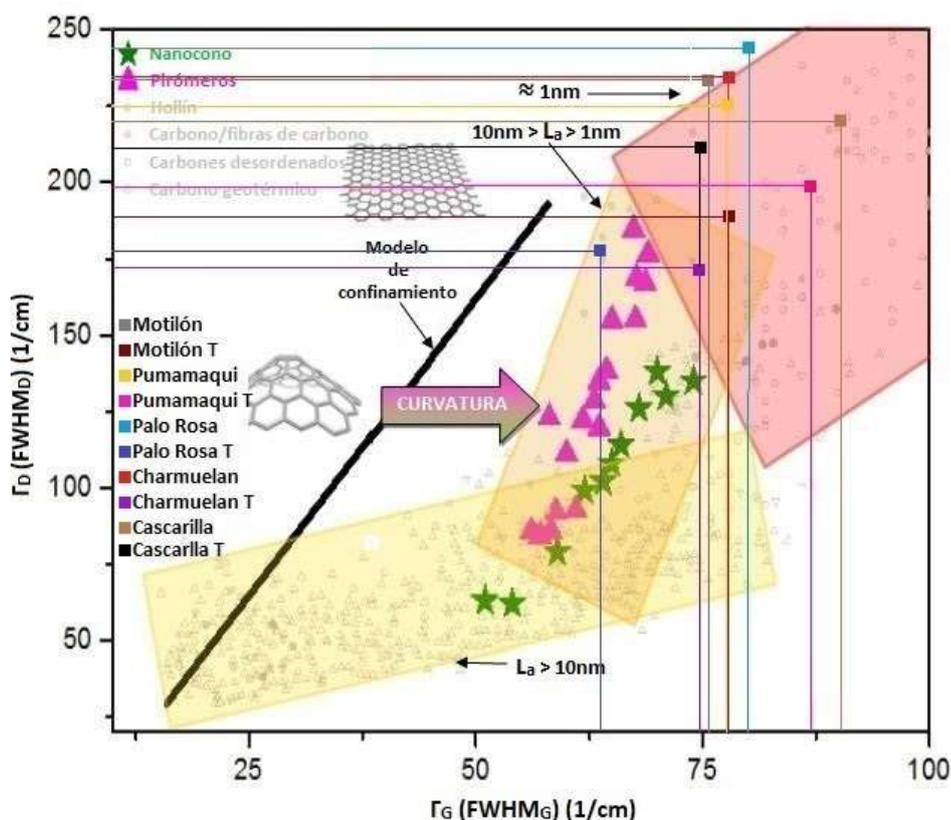


Figura 3.21. Gráfico de Γ_D (FWHMD) frente a Γ_G (FWHM_G) para una gran variedad de carbonos aromáticos desordenados.

(Fuente: Modificado de Merlen et al., 2017)

Cuando una muestra presenta un tamaño de cristal más pequeño, tendrá más cantidad de carbono amorfo, y por ende tendrá más defectos, este es el caso de todas las

muestras analizadas del horno y tradicionales, pero con una mínima excepción en la muestra palo rosa T; ya que, aunque el ancho de sus bandas indique una menor cantidad de defectos, la relación de intensidad comprueba que es una de las muestras con más alto grado de desorden. Esto puede deberse a que el ancho de la banda D está habitualmente relacionado con el tiempo de vida de decaimiento del fonón implicado y al impacto de confinamiento incitado por la tensión de compresión externa y la disposición de la curva de ajuste [56].

Adicionalmente, esto coincide con lo dispuesto por los valores de la relación I_D/I_G , ya que todas las muestras obtenidas presentan un cierto grado de desorden, el cual, al ser mayor, disminuye el tamaño de cristalito, permitiendo la funcionalización de las estructuras. Un incremento brusco en el valor de " L_a " ocasionaría la supresión total de los defectos en el plano, ya que las capas se vuelven sumamente duras e impecables, elevando también el grado de grafitización y dando lugar a una estructura más estable y a un comportamiento menos frágil [56].

Las muestras de carbón vegetal resultantes con aire presentaron en el proceso mayor cantidad de gases y líquido piroleñoso, ya que reaccionó el oxígeno del aire con los componentes químicos de la madera, especialmente con el carbono, dando lugar a que gran parte de la celulosa y lignina del material se pierda, generando una estructura frágil y bastante ceniza, la cual presenta casi pequeñas cantidades de potasio, calcio y magnesio; y cantidades diminutas de fósforo, hierro, níquel, azufre, silicio, plata, cobalto, aluminio, bario, plomo, sodio, titanio, manganeso y oro [22].

Al disminuir la presencia de oxígeno del aire, el carbono con el oxígeno que están presentes en las uniones moleculares de la madera reaccionan, y obviamente, una considerable cantidad de carbono queda presente en la estructura de la muestra resultante; ya que se conserva un porcentaje considerable de lignina, y cierta presencia de carbono, hidrógeno, nitrógeno, ceras, grasas, resinas, azúcar, almidón, compuestos nitrogenados, sustancias fenólicas y varios ácidos que proporcionan a la estructura resultante mayor rigidez y dureza [22], haciéndola más compacta.

3.2.3. Muestras de Carbón Vegetal Recolectadas al Azar

A su vez, se tomó muestras de carbón vegetal recolectadas al azar en diferentes partes de la ciudad, las mismas fueron analizadas por espectroscopía Raman, generando su

espectro característico, la curva de ajuste acumulado y la deconvolución de sus bandas, ver ANEXO V., Y ANEXO VI. Las respectivas características Raman se observan en el ANEXO VIII.

Para definir cuál muestra resultante del horno o tradicional es más semejante a las muestras recolectadas, se consideró la forma el espectro característico, la disposición de la curva de ajuste y la distribución de las bandas después de la deconvolución, es decir, se tomó en cuenta los parámetros de intensidad, área y ancho de las mismas; en donde se observa que la mayoría de coincidencia de estos parámetros son mayores en las muestras tradicionales. En base a esto, se observa que estas muestras recolectadas tienen gran similitud con las analizadas previamente:

- La primera muestra recolectada, ver ANEXO VI.1., en comparación con otras muestras analizadas, es más semejante a la muestra producida de forma tradicional (palo rosa T), ver ANEXO IV.3b. Tanto la curva de ajuste como las bandas en ambas muestras son muy similares en ancho, área y posición, no exactamente las mismas, pero sí muy parecidas más que en otras muestras. Todos los valores de posición en ambas muestras, se encuentran dentro de los valores referenciales, excepto la posición de la banda D. La relación de intensidad I_D/I_G en los dos casos es casi igual, difiriendo solamente en 0,02. La relación de intensidad $I_D/I_{D'}$ en ambas muestras es distinta, difiriendo en 6,53. Considerando las relaciones de intensidad se observa que, en la muestra recolectada la relación $I_D/I_{D'}$ es mayor y la relación I_D/I_G es menor (provocando que la muestra sea menos defectuosa y presente menor cantidad de carbono amorfo), en comparación con la muestra tradicional. Según la sección 3.1.2.3., esta muestra recolectada presenta los defectos de tipo sp^3 (defectos de salto). Tomando en cuenta la Figura 3.22., se aprecia que esta muestra corresponde al (nc-G).
- La segunda muestra recolectada, ver ANEXO VI.2., en comparación con otras muestras analizadas, es más semejante a la muestra producida de forma tradicional (charmuelan T), ver ANEXO IV.4b. Tanto la curva de ajuste como las bandas en ambas muestras son muy similares en ancho, área y posición, no exactamente las mismas, pero sí bastante parecidas más que en otras muestras. Todos los valores de posición en ambas muestras, se encuentran dentro de los valores referenciales, excepto la posición de la banda D. La relación de intensidad I_D/I_G en los dos casos es casi igual, difiriendo solamente en 0,01. La relación de

intensidad $I_D/I_{D'}$ en ambas muestras es diferente, difiriendo en 2,23. Considerando las relaciones de intensidad se observa que, en la muestra recolectada las relaciones I_D/I_D' e I_D/I_G son menores (provocando que la muestra sea menos defectuosa y presente menor cantidad de carbono amorfo), en comparación con la muestra tradicional. Según la sección 3.1.2.3., esta muestra recolectada presenta los defectos de tipo sp^3 (defectos de salto). Tomando en cuenta la Figura 3.22., se aprecia que esta muestra corresponde al (nc-G).

- La tercera muestra recolectada, ver ANEXO VI.3., en comparación con otras muestras analizadas, es más semejante a la muestra producida de forma tradicional (palo rosa T), ver ANEXO IV.3b. Tanto la curva de ajuste como las bandas en ambas muestras tienen cierta similitud en ancho, área y posición, no exactamente las mismas, pero sí parecidas más que en otras muestras. Todos los valores de posición en ambas muestras, se encuentran dentro de los valores referenciales, excepto la posición de la banda D. La relación de intensidad I_D/I_G en los dos casos es casi igual, difiriendo solamente en 0,02. La relación de intensidad $I_D/I_{D'}$ en ambas muestras se aproximan, difiriendo solo en 0,44. Considerando las relaciones de intensidad se observa que, en la muestra recolectada la relación $I_D/I_{D'}$ es mayor y la relación I_D/I_G es menor (provocando que la muestra sea menos defectuosa y presente menor cantidad de carbono amorfo), en comparación con la muestra tradicional. Según la sección 3.1.2.3., esta muestra recolectada presenta los defectos de tipo vacancia. Tomando en cuenta la Figura 3.22., se aprecia que esta muestra corresponde al (nc-G).
- La cuarta muestra recolectada, ver ANEXO VI.4., en comparación con otras muestras analizadas, es más semejante a la muestra obtenida en el horno con gas argón (palo rosa), ver ANEXO IV.3a. Tanto la curva de ajuste como las bandas en ambas muestras tienen cierta similitud en ancho, área y posición, no exactamente las mismas, pero sí parecidas más que en otras muestras. Todos los valores de posición en ambas muestras, se encuentran dentro de los valores referenciales, excepto la posición de la banda D. La relación de intensidad I_D/I_G en los dos casos es diferente, difiriendo en 0,11. La relación de intensidad $I_D/I_{D'}$ en ambas muestras es distante, difiriendo en 2,75. Considerando las relaciones de intensidad se observa que, en la muestra recolectada, las relaciones $I_D/I_{D'}$ e I_D/I_G son menores (provocando que la muestra sea menos defectuosa y presente menor cantidad de carbono amorfo), en comparación con la muestra del horno.

Según la sección 3.1.2.3., esta muestra recolectada presenta los defectos de tipo vacancia. Tomando en cuenta la Figura 3.22., se aprecia que esta muestra corresponde al (a-C:D).

- La quinta muestra recolectada, ver ANEXO VI.5., en comparación con otras muestras analizadas, es más semejante a la muestra obtenida en el horno con gas argón (pumamaqui), ver ANEXO IV.2a. Tanto la curva de ajuste como las bandas en ambas muestras tienen cierta similitud en ancho, área y posición, no exactamente las mismas, pero sí parecidas más que en otras muestras. Todos los valores de posición en ambas muestras, se encuentran dentro de los valores referenciales, excepto la posición de la banda D. La relación de intensidad I_D/I_G en los dos casos es casi igual, difiriendo solo en 0,02. La relación de intensidad I_D/I_D' en ambas muestras es diferente, difiriendo en 4,53. Considerando las relaciones de intensidad se observa que, en la muestra recolectada, las relaciones I_D/I_D' e I_D/I_G son mayores (provocando que la muestra sea más defectuosa y presente mayor cantidad de carbono amorfo), en comparación con la muestra del horno. Según la sección 3.1.2.3., esta muestra recolectada presenta los defectos de tipo sp^3 (defectos de salto). Tomando en cuenta la Figura 3.22., se aprecia que esta muestra corresponde al (nc-G).

Estas semejanzas dependen también de la especie de madera utilizada, del método de obtención de carbón vegetal y de las condiciones del proceso (temperatura, presión, tiempo, etc.).

Sobre todo, el método de obtención es muy importante, ya que la cantidad de material volátil, ceniza y líquido piroleñoso extraído en el proceso con gas argón, es mucho menor que con la presencia de aire, y esto provoca que el carbono, hidrógeno, nitrógeno, ceras, grasas, resinas, azúcares, almidones, compuestos nitrogenados y aceites esenciales que se conservan en las muestras palo rosa y pumamaqui, posiblemente también se conserven en sus semejantes muestras recolectadas 4 y 5, respectivamente, de la comparación realizada en la sección 3.2.3. Se refleja que estas muestras recolectadas probablemente se conservaron en un solo cuerpo y hayan sido obtenidas bajo un proceso donde la presencia del aire no era tan notable, por ejemplo, de forma industrial (horno de ladrillo o metálico).

Por otro lado, las tres primeras muestras recolectadas 1, 2 y 3, presentaron fragmentación, estructura frágil y muy probablemente gran cantidad de ceniza al igual que presentaron sus muestras tradicionales más semejantes como son palo rosa T, charmuelan T y palo rosa T, respectivamente, debido a la cantidad de carbono que se ha consumido al reaccionarse los componentes químicos de la madera (carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno) con el oxígeno del aire. Por lo tanto, es muy probable que estas muestras recolectadas se hayan también obtenido en presencia de aire, por ejemplo, de forma artesanal (fosa, parva, casamance), provocando que la estructura externa e interna del carbón vegetal resultante sufra alteraciones.

Por otro lado, tomando en cuenta las muestras recolectadas y sus muestras más parecidas, se realiza una representación gráfica (ANEXO VII.) de las variaciones de los diferentes parámetros.

Así mismo, como se consideró en la sección 3.2.2.2. (relaciones de la banda G), para estas muestras se realiza un análisis similar explicado a continuación:

En la Figura 3.22., se puede visualizar que cada muestra recolectada, al compararla con la muestra que más se le parece (horno o tradicional), le corresponde el mismo tipo de carbono amorfo (grafito nanocrystalino); excepto la muestra recolectada 4, a la cual le corresponde el carbono amorfo desordenado.

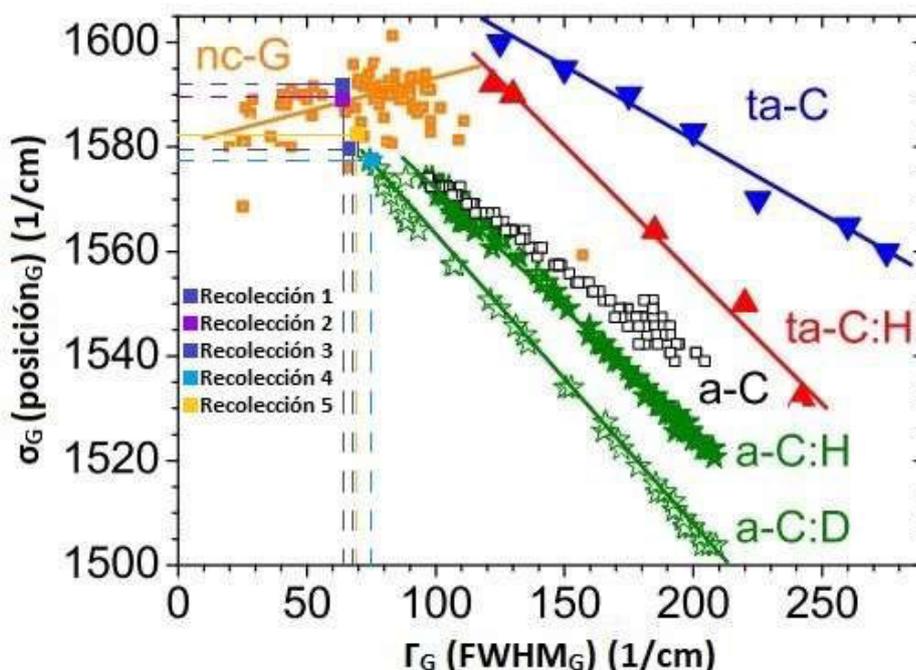


Figura 3.22. Gráfico de σ_G (posición_G) frente a Γ_G (FWHM_G) para diferentes tipos de carbono amorfo. Los datos se registraron con $\lambda_L= 514nm$.
(Fuente: Modificado de Merlen et al., 2017)

Considerando la Figura 3.23., al cotejar la primera y tercera muestra recolectada, con la muestra tradicional que más se le parece, se presenta el mismo tamaño del cristalito ($10 \text{ nm} > L_a > 1 \text{ nm}$). Así mismo, al comparar la cuarta muestra recolectada, con la muestra del horno que más se le parece, se presenta el mismo tamaño del cristalito (L_a cercano a 1). Por otro lado, la segunda y quinta muestra recolectada, comparándolas con su muestra tradicional y del horno, respectivamente, presentan diferente L_a .

Así también, al comparar cada muestra recolectada con la muestra que más se le parece (horno o tradicional), se aprecia que algunos valores de relación I_D/I_G son casi iguales, pero todos los valores de relación I_D/I_D' son distintos. Cabe recalcar que los valores de relación I_D/I_D' de todas las muestras (horno, tradicional y recolectadas) se encuentran dentro del rango de los valores referenciales establecidos por la literatura.

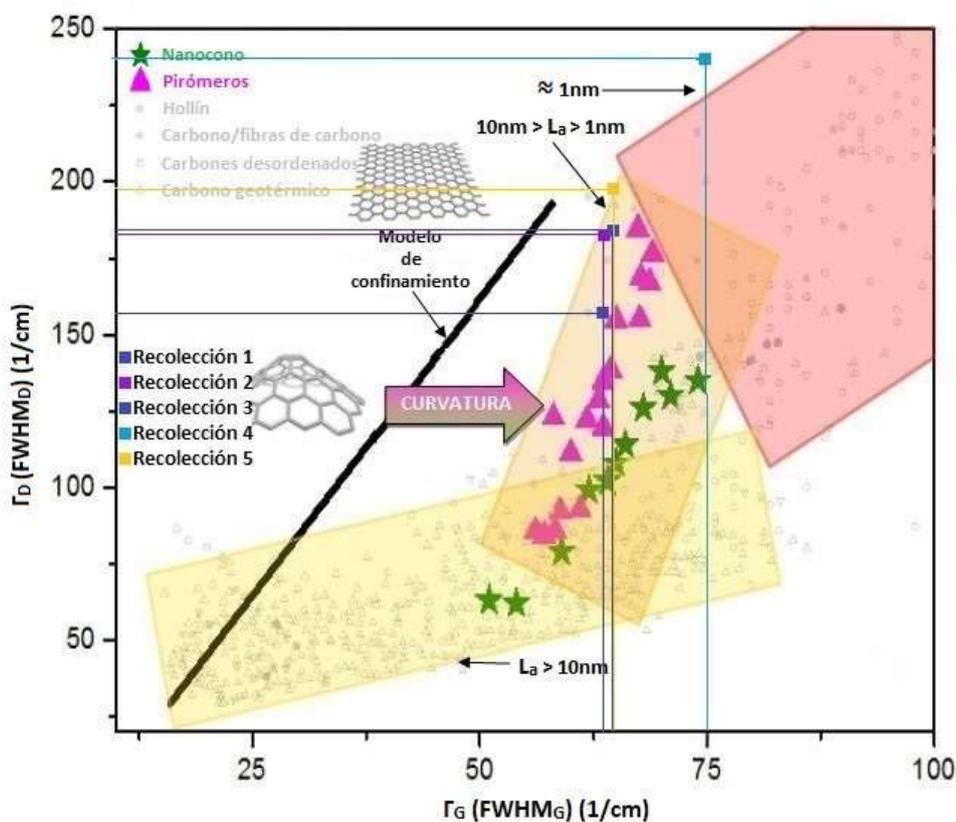


Figura 3.23. Gráfico de Γ_D (FWHM_D) frente a Γ_G (FWHM_G) para una gran variedad de carbonos aromáticos desordenados.

(Fuente: Modificado de Merlen et al., 2017)

3.3. Comparación con otros trabajos

3.3.1. Comparación 1

El trabajo de Francioso et al. [85], emplea espectroscopías FT-IR, Raman normal y SERS para caracterizar estructuralmente cuatro fracciones de carbón vegetal (>2 mm, 2–1 mm, 1–0.5 mm y <0.5 mm) del bosque *Pinus pinea*. Se hace referencia en que los espectros FT-IR del carbón vegetal se caracterizan por presentar bandas anchas y sin marcas, ver Figura 3.24a. Debido a los modos de estiramiento de los anillos aromáticos, estos espectros están controlados por las bandas a 1600 y 1400 cm^{-1} , las mismas que resultan ser muy amplias. Con respecto a la espectroscopía Raman, el estudio señala que los espectros resultantes entre la zona 1800 y 1000 cm^{-1} indican un contorno particular de los materiales carbonizados. Las bandas intensas G y D que controlan estos espectros se encuentran a 1590 y 1360 cm^{-1} , respectivamente, ver Figura 3.24b.

A su vez, se refleja que las muestras <5 mm son más cristalinas, ya que presentan un valor de relación I_D/I_G igual a 0,68, y las muestras >2 mm son menos cristalinas, ya que presenta un valor de relación I_D/I_G igual a 0,5.

Además, explica que los espectros SERS están controlados por varias propiedades pertenecientes a una extensa combinación de materiales sp^2 y sp^3 , empleando las bandas 1550, 1450, y 1380 cm^{-1} , ver Figura 3.24c.

En general, los tres tipos de espectroscopías han aportado información valiosa acerca de la estructura química del carbón vegetal. El FT-IR de la segunda derivada, con respecto a la espectroscopia Raman normal, ha generado datos sobre la naturaleza de los grupos sustituidos en las fracciones de tamaño del carbón vegetal y el tamaño de los anillos aromáticos. A su vez, el IR y el Raman normal no generaron datos extras sobre su carbono orgánico soluble, ya que los espectros eran similares. Adicionalmente, se indica que el SERS es usado como técnica de complemento de la técnica Raman normal [85].

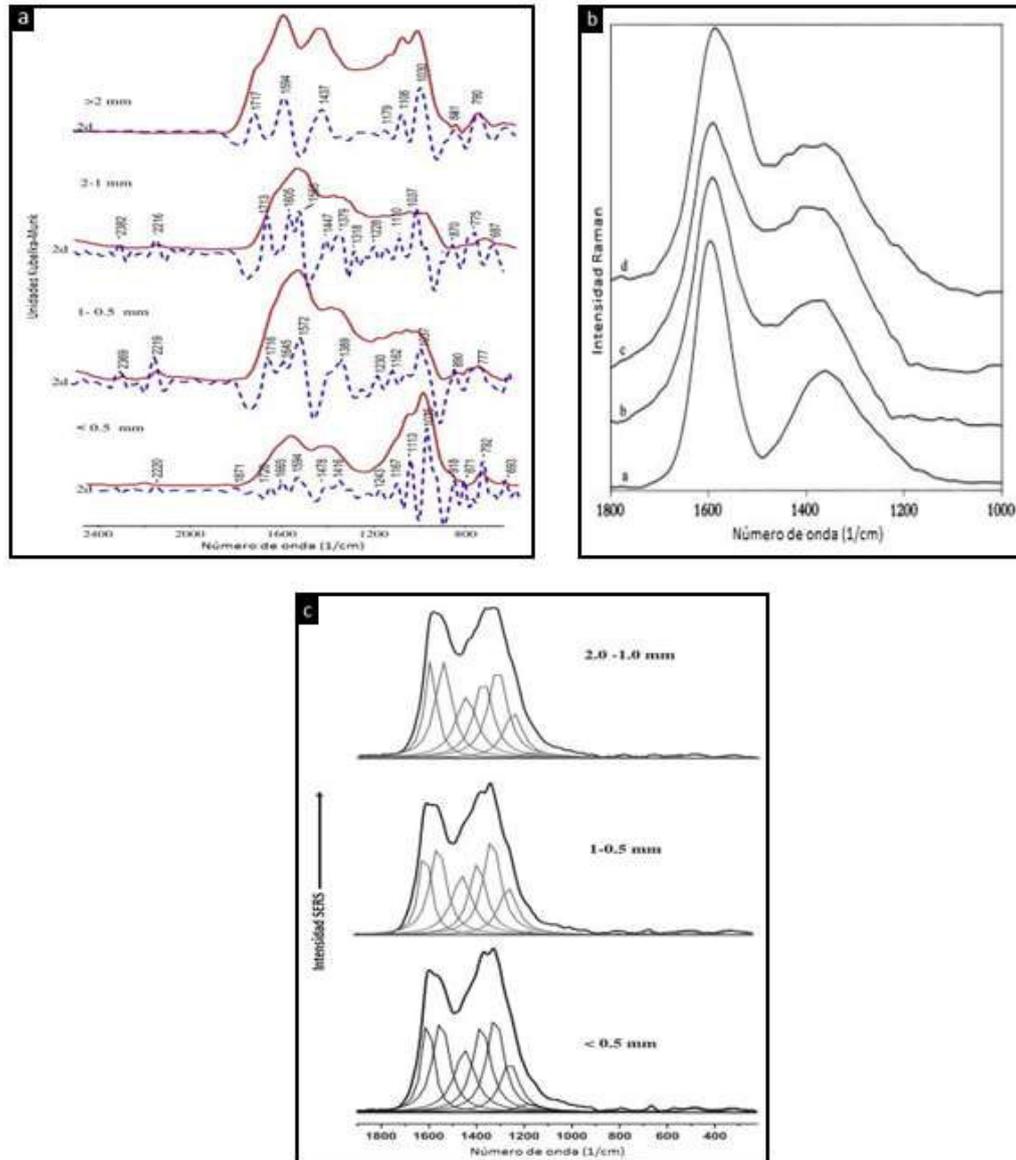


Figura 3.24. a) Espectros resultantes por espectroscopía infrarroja (línea continua) y espectros de segunda derivada (2d) (línea punteada) de diferentes fracciones de carbón vegetal. b) Espectros Raman normales en la región espectral de 1800–1000 cm^{-1} de fracciones de carbón vegetal: [a] >2 mm; [b] 1–0,5 mm; [c] <0,5 mm; [d] carbono orgánico soluble (SOC) extraído de la fracción más fina (<0,5 mm). c) Espectros Raman mejorados en superficie (SERS) y análisis de ajuste de curvas del carbono orgánico soluble (SOC) extraído de tres fracciones de carbón vegetal.

(Fuente: Modificado de Francioso et al., 2011)

Ahora, comparando el presente escrito del proyecto de titulación con el trabajo de Francioso et al. [85], se puede indicar ciertas similitudes entre ambos estudios como:

Se realizó la caracterización de fracciones no muy grandes de carbón vegetal por medio de espectroscopía Raman, por parte de Francioso, se analizaron muestras de <0.5 a >2 mm, y por parte del presente trabajo se analizaron muestras de 4 a 6 mm; la técnica de

espectroscopía Raman utilizada en ambos estudios también se centra en la región de estudio de 1700 y 1000 cm^{-1} .

Con respecto a la relación de intensidad I_D/I_G , en ambos estudios se hace referencia a dicha relación; ya que, en el presente trabajo todas las muestras tradicionales y las tres primeras muestras recolectadas presentan más cantidad de carbono amorfo y más defectos, con respecto a las demás muestras analizadas (muestras obtenidas en el horno y las otras dos tradicionales), debido a que poseen una relación de intensidad igual o mayor a 0,80. En cambio, las muestras que analiza Francioso de <5 mm reflejan que son más cristalinas, ya que tiene un valor de relación I_D/I_G igual a 0,68, mayor a todas las demás muestras analizadas en ese estudio.

Así mismo, se trabajaron con las mismas bandas principales, banda G (relacionada a la red gráfica) y D (relacionada a los defectos), y con los mismos valores referenciales establecidos por la literatura (1580 y 1360 cm^{-1}), respectivamente. Del mismo modo, dichos valores referenciales de las bandas empleadas en el presente trabajo de titulación indican cierta variación con respecto a los valores utilizados en la técnica FT-IR y SERS del estudio de Francioso, pero no existe mayor diferencia, ya que se mantienen dentro de los valores referenciales establecidos por la literatura.

Por otro lado, ambos estudios también presentaron ciertas diferencias como:

Los picos principales del espectro (D y G) por donde se ubica la curva de ajuste presentan diferente intensidad en ambos estudios, ya que en el trabajo por Francioso el pico D tiene igual o mayor intensidad que el pico G, en cambio, en el presente trabajo escrito ocurre que el pico G es más intenso que el pico D en todos los resultados del carbón vegetal analizado. La deconvolución en el estudio de Francioso presenta bandas mucho más intensas que en el presente trabajo.

A su vez, a más de la espectroscopía Raman, en el trabajo de Francioso se emplearon otros métodos de caracterización que complementaron el estudio, esto no ocurrió en el presente trabajo que, aunque se intentó emplear otras técnicas que aporten al análisis, no se logró, por lo tanto, no se consiguió un estudio más profundo de las muestras de carbón vegetal y tampoco alcanzar un análisis más razonable, con mejores comportamientos y características del material.

Con respecto a la posición de las bandas, la banda D sufrió un desplazamiento posterior a la deconvolución, provocando que no se ubique dentro del valor mínimo referencial (1355 cm^{-1}), y de igual forma se dio el desplazamiento de la banda G, pero ésta si se ubica dentro de los valores referenciales.

3.3.2. Comparación 2

El trabajo de Jiménez et al. [52], analizó el producto de la presión en las características estructurales de los residuos de carbón resultantes después del proceso de pirólisis de muestras de carbón vegetal. Los procesos se efectuaron en un reactor de lecho fijo a $800\text{ }^{\circ}\text{C}$, cambiando la presión entre 1 y 20 atm. Las muestras empleadas fueron dos carbones originarios del suroeste Antioqueño (municipios de Venecia y Titiribí), extraídas directamente de las minas, luego de esto, se sujetaron a un proceso de molienda y tamizado.

El análisis estructural de las muestras se desarrolló por medio de espectroscopía Raman, empleando la banda D (1360 cm^{-1}), G (1580 cm^{-1}) y D' (1620 cm^{-1}), con el objetivo de reconocer diferencias micro-estructurales en los carbonizados a causa de los cambios de presión durante la pirolisis, ver Figura 3.25a. A su vez, mediante la técnica MEB, se indica la morfología externa de cortes angulares y superficies planas, además de mínima fragmentación de las partículas, ver Figura 3.25c.

De igual forma, en el estudio se detalla que por medio del análisis termogravimétrico, se logra definir diferencias estructurales en las muestras carbonizadas a través de los perfiles de reacción con oxígeno.

En general, los carbonizados resultantes presentaron características morfológicas considerables en micrografías MEB. El carbón Titiribí, señala partículas porosas con orificios de evacuación de materia volátil, propias de carbones con características plásticas. La espectroscopía Raman presentó cambios en las estructuras carbonosas de todas las muestras a presión alta.

También, el carbón Titiribí indicó un espectro Raman, en el cual sus bandas principales aparecen con amplitudes mayores en la altura media, lo cual señalaría carencia de homogeneidad en las estructuras carbonosas en comparación con el carbón Venecia. La relación I_D/I_G de los carbonizados no se ve afectada por las variaciones estructurales debido a la presión de pirolisis.

Así mismo, la reactividad de los carbonizados en combustión no se perjudica por las diferencias señaladas en la morfología y en los sutiles cambios estructurales indicados por el Raman. La caracterización Raman se complementó con la microscopía electrónica de barrido (MEB) y la técnica de termogravimetría [52].

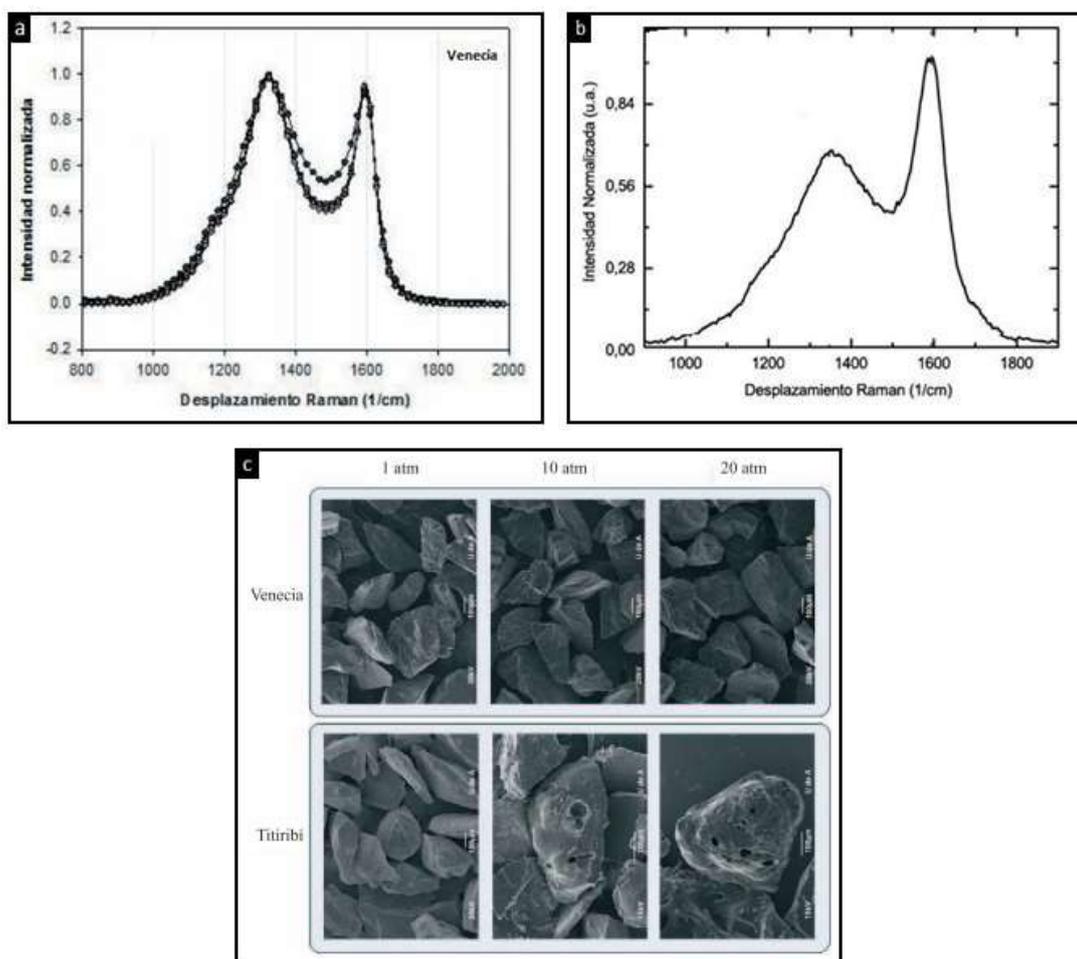


Figura 3.25. a) Espectro Raman del carbón de Venecia obtenido en un reactor de lecho fijo. b) Espectro Raman del carbón vegetal obtenido en el horno de atmósfera controlada de la especie pumamaqui. c) Micrografías MEB de los carbonizados.

(Fuente: Modificado de Jiménez et al., 2012)

Ahora, comparando el presente escrito del proyecto de titulación con el trabajo de Jiménez et al. [52], se menciona que de igual forma se utilizó un equipo tecnológico para ejecutar el proceso de carbonización y obtener muestras de carbón vegetal, pero a una temperatura máxima de 400 °C. De la misma manera, se utilizó la técnica de espectroscopía Raman para efectuar la caracterización y el uso del software Origin 8 para el procesamiento de datos. Se trabajaron con las mismas bandas y valores principales, banda G (1580 cm^{-1}) relacionada a la red gráfica y D (1360 cm^{-1}), aunque estas bandas posteriormente a la deconvolución sufrieron un desplazamiento,

provocando que la banda D no se mantenga dentro de los valores referenciales pero la banda G sí.

A su vez, también se presenta la banda D' con el mismo valor referencial (1620 cm^{-1}), relacionada con grafitos imperfectos y con la red gráfica desordenada. En la Figura 3.25a se demuestra que la banda D del espectro es un poco más intensa que la banda G, en cambio, en la Figura 3.25b se da un caso totalmente opuesto, ya que la banda D es menos intensa que la banda G, demostrando así que, a pesar que las bandas se ubican en similares valores referenciales, los espectros pueden distribuirse de diferente forma, posiblemente debido al ablandamiento del carbón, al material volátil producido por las reacciones, por el equipo y el proceso de obtención.

Cabe recalcar que, la técnica MEB empleada por Jiménez, hubiese permitido en el proyecto de titulación conocer la morfología de todas las partículas de carbón vegetal, así como poros, fisuras, cortes, superficies, etc.

Así mismo, mediante el análisis termogravimétrico hubiese sido posible determinar la reactividad de los carbonizados en combustión para conocer las diferencias estructurales entre el carbón vegetal obtenido en el horno, producido tradicionalmente y recolectado.

3.3.3. Comparación 3

El estudio de Davrieux et al. [107], radica en comprobar la posibilidad de usar la espectroscopia de reflexión en el infrarrojo cercano (NIR) y mediano (MIR) para marginar los carbones nativos con los de plantación (eucaliptos). Para esto se recolectaron especies de madera nativa ipê (*Tabebuiaserratifolia (Vahl) Nichols*) y una de plantación de eucalipto (*Eucalyptusgrandis Hill ex Maiden*), realizando un proceso de carbonización que duró 105 minutos con una temperatura máxima de 400 °C dentro de una mufla.

Luego que las muestras se enfriaron, se las molieron y pasaron por un tamiz. A su vez, se indican los espectros NIR del carbón vegetal, de la madera nativa y de plantación en la Figura 3.26a. Estos espectros revelan las variaciones provocadas por el proceso de degradación térmica.

Así mismo, se presentan los espectros MIR del carbón vegetal, de la madera nativa y de plantación en la Figura 3.26b. Debido a la descomposición de la lignina se produce una disminución de las bandas 1600 , 1513 y 1460 cm^{-1} . En general, este estudio revela que el

análisis de factores discriminantes permite recalcar la relación entre los trazos cualitativos correspondiente a un conjunto y un grupo de propiedades cuantitativas explicativas. Los resultados generados con base a los análisis NIR y MIR lograron adquirir una función discriminante para las dos especies de madera empleadas para producir carbón vegetal.

Adicionalmente, el modelo de validación evidenció que, al ser eliminadas las muestras mal clasificadas, se consigue organizar con una eficacia del 100% el origen del carbón vegetal de acuerdo con sus espectros NIR y MIR, evaluando que la diferenciación es más notable usando MIR[107].

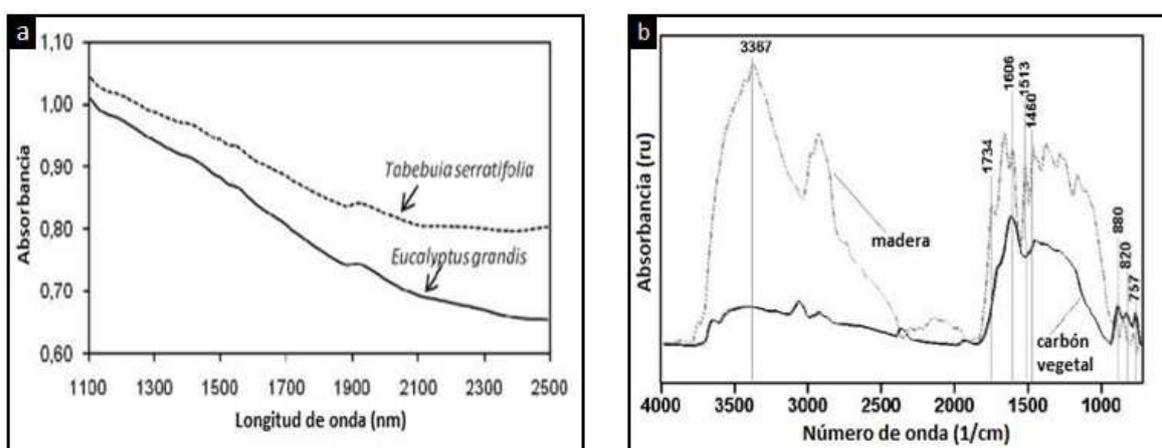


Figura 3.26. a) Espectros NIR medios de las muestras de carbón de *Tabebuia serratifolia* y *Eucalyptus grandis*. b) Espectros del infrarrojo medio de la madera de *Tabebuia serratifolia* y del carbón vegetal.

(Fuente: Modificado de Davrieux et al., 2010)

Ahora, comparando el presente escrito del proyecto de titulación con el trabajo de Davrieux et al. [107], de igual manera se adquirieron especies nativas de madera (motilón, pumamaqui, palo rosa, charmuelan y cascarilla) para obtener muestras de carbón vegetal. Así mismo, se utilizó un equipo de laboratorio para ejecutar por 95 min el proceso de carbonización, a la misma temperatura máxima de 400 °C.

Aunque se utilizaron diferentes técnicas de espectroscopía en ambos trabajos, se establecieron la presencia de las mismas bandas pero con valores referenciales diferentes, la banda D' (1620 cm^{-1}) relacionada con grafitos imperfectos, la banda G (1580 cm^{-1}) relacionada a la red gráfica y la banda A (1480 cm^{-1}) relacionada con la cantidad de carbono amorfo; posterior a la deconvolución, a pesar de que estas dos últimas bandas sufrieron un desplazamiento, se mantuvieron dentro de los valores referenciales.

De igual forma en ambos trabajos, debido a las reacciones entre los componentes químicos de la madera y aire se provocó una reducción de celulosa y lignina en el carbón resultante, alterando su estructura, haciéndola más frágil y porosa. Cabe recalcar que, la técnica MIR y NIR empleada por Davrieux, hubiesen permitido en el proyecto de titulación alcanzar una función discriminante en las cinco especies de madera empleadas para producir carbón vegetal; aunque puede ser realizado para trabajos futuros [107].

A pesar de que la técnica de espectroscopía Raman presenta más ventajas sobre otras técnicas de caracterización, no es posible identificar el tipo de especie solamente con una técnica. Por lo tanto, a más de la espectroscopía utilizada, para complementar este estudio se intentó determinar el análisis térmico de las muestras, mediante la técnica termoanalítica de calorimetría diferencial de barrido (DSC), pero debido a la falta de insumos dentro del laboratorio (cápsulas T0 de aluminio y el gas de nitrógeno) no se pudo efectuar dicha técnica.

Por otro lado, se trató de demostrar las características estructurales morfológicas de las muestras mediante la microscopía electrónica de barrido (SEM), pero de igual forma, no se concretó este análisis, debido a la falta de actualización, mantenimiento y funcionamiento del equipo.

Finalmente, se pretendió utilizar un microscopio óptico metalográfico para determinar defectos como fisuras, poros, inclusiones u otros, pero debido al brillo de luz por ser muestras oscuras, no se logró hacerlo, ya que algún tipo de defecto que hubiese existido se confundía con el reflejo de luz.

3.4. Antecedentes del consumo de carbón vegetal

Además del estudio Raman de las muestras de carbón vegetal, también se decidió complementar el trabajo mediante entrevistas y encuestas para conocer el consumo de carbón vegetal a nivel de nuestra ciudad, por lo cual se realizó lo siguiente:

3.4.1. Investigación cualitativa

Se enfoca en la metodología de investigación exploratoria, de la cual no forma parte una estructura. Se basa en pequeñas muestras mediante las cuales adquieren entendimiento e información del contexto del problema [108].

3.4.1.1. Entrevistas

Las entrevistas con personas al azar es una manera no constituida y directa de conseguir información, en la que un entrevistador interroga a una o varias personas con la finalidad de conocer su punto de vista y experiencia acerca de un tema puntual [108].

- **Metodología**

Antes de comenzar con las entrevistas, se explicó a cada entrevistado que la información sería usada únicamente con fines académicos. También se realizó una pequeña introducción donde se explicó de que se trataba el proyecto y el daño ambiental causado para obtener el carbón vegetal de la manera tradicional. Posteriormente, se formularon las preguntas programadas. Cada entrevista tuvo una duración de aproximadamente 7 minutos.

Las entrevistas se realizaron a inicios del mes de noviembre del 2020 a 20 personas al azar, con edades entre 25 y 55 años (mayor porcentaje de personas que tienden a comprar carbón vegetal), de diferentes estatus. Todo esto se lo llevó a cabo en diferentes puntos de la ciudad como son: centros comerciales y mercados de barrio. En dichos puntos se tuvo todas las facilidades para que los entrevistados se expresen y den sus opiniones acerca del producto.

- **Resultados**

Las entrevistas se realizaron a 20 personas al azar, con edades entre 25 y 55 años (mayor porcentaje de personas que tienden a comprar carbón vegetal), de diferentes estatus.

- Entre los distintos hábitos de consumo de alimentación en lo que respecta para fines de semana y feriados, los participantes mencionaron repetidas veces que preferían salir a comer en algún restaurante, o a su vez reunirse con amigos y/o familia para preparar alimentos en la parrilla.
- Con respecto a la última vez que cocinaron alimentos a la parrilla, 10 personas manifestaron que por la emergencia sanitaria no se reunieron para realizar algún programa en grupo, 6 de los entrevistados lo hicieron 1 mes antes cuando los casos por Covid-19 comenzaron a bajar, y las otras 4 personas lo hicieron hace 2 semanas.
- De los participantes, el 85%, es decir, 17 personas prefieren la parrilla de carbón y solamente 3 entrevistados la parrilla de gas. La principal razón para inclinarse por la parrilla de carbón es por el sabor que le da a los alimentos.

- Las personas entrevistadas expresaron que tienen por costumbre comprar carbón cada mes o cada dos meses.

3.4.2. Investigación cuantitativa

Se enfoca en la metodología de investigación, cuyo objetivo es de cuantificar los datos, generalmente se la aplica a diversos análisis estadísticos [108].

3.4.2.1. Mercado objetivo

Al mercado objetivo pertenecen hombres y mujeres entre 25 y 64 años de diferentes clases sociales: clase media, media alta y alta del cantón Quito. Se escogen estos sectores socioeconómicos para lograr promover el cuidado de árboles con un producto tecnológico no perjudicial para el medio ambiente y así evitar la tala árboles en el Ecuador.

3.4.2.2. Segmentación de Mercado

Es imprescindible segmentar el mercado para conocer a quién va dirigido el producto.

- **Segmentación Geográfica**

Tabla 3.8. Segmentación geográfica del país en el 2010.

Habitantes en Ecuador	14.483.499 de habitantes
Habitantes en la Provincia de Pichincha	2.576.287 de habitantes
Habitantes en el Cantón Quito	2.239.191 de habitantes

(Fuente: INEC, 2010)

En los últimos 10 años, la población del Ecuador ha ido aumentando en 1,56% [109].

Tabla 3.9. Segmentación geográfica aproximada del país en el 2020.

Habitantes en Ecuador	17.527.062 de habitantes
Habitantes en la Provincia de Pichincha	3.117.668 de habitantes
Habitantes en el Cantón Quito	2.709.734 de habitantes

(Fuente: Población de Ecuador 2020, n.d.)

- **Segmentación Demográfica**

Tabla 3.10. Segmentación demográfica del país en el 2010.

Edad	Personas entre 25 y 64 años
Género	Masculino y/o Femenino
Población	1.062.267

(Fuente: INEC, 2010)

Tabla 3.11. Segmentación demográfica aproximada del país en el 2020.

Edad	Personas entre 25 y 64 años
Género	Masculino y/o Femenino
Población	1.078.838

(Fuente: Población de Ecuador 2020, n.d.)

- **Segmentación Psicográfica**

En el 2010, el 35% de la población total de Quito pertenecía a las clases media, media alta y alta, por lo que el valor del tamaño de la población en ese año fue de 371.793 [110]. Para el año 2021 se aproxima un tamaño de la población de 377.593 [109].

3.4.2.3. Encuestas

Obtenida la segmentación de mercado, se elaboró un cuestionario con la finalidad de conocer el consumo de carbón vegetal por parte de la población de 25 y 64 años de edad, así como los gustos y preferencias que tienen. Las encuestas se realizaron a mediados del mes de noviembre del 2020 en diferentes puntos estratégicos de la ciudad como son: Centros comerciales, Supermaxi, Santa María, Mercado La Magdalena y Mercado Central. Así también, en restaurantes de carnes y de comida hecha a la parrilla. Se realizaron un total de 384 encuestas en la ciudad de Quito. El modelo de la encuesta se presenta en el ANEXO X.

- **Formulación de la muestra**

Se usó la fórmula del tamaño óptimo de la muestra para estimar una media poblacional (muestra de investigación) [111].

$$n = \frac{N\sigma^2 Z^2}{(N - 1)e^2 + \sigma^2 Z^2}$$

Ecuación 1.1. Tamaño óptimo de la muestra.
(Fuente: Badii et al., 2011)

$$n = \frac{377.593 * (0,5)^2 * (1,96)^2}{(377.593 - 1)(0,05)^2 + (0,5)^2 * (1,96)^2}$$

$$n = 383,77 \approx 384$$

Donde:

n = Tamaño de la muestra.

N = Tamaño de la población.

σ = Desviación estándar de la población $\cong 0,5$.

Z = Constante tomada en base al 95% de confianza $\cong 1,96$.

e = Límite de error muestral $\cong 0.05$.

Una vez realizadas y finalizadas las encuestas, se procedió a registrar cada una de las respuestas que se realizaron en las mismas. Posteriormente, se procedió con la tabulación de los datos y generación de los resultados. Se desarrollaron un total de 384 encuestas en diferentes puntos de la ciudad de Quito.

- **Resultados**

Algunos de los resultados más relevantes se presentan a continuación:

- Con respecto a la edad de los encuestados que colaboraron con el desarrollo de las preguntas, el 14,62% corresponde a personas entre 25 y 29 años; el 12,15% está entre 30 y 34 años; el 28,85% se encuentra entre 35 y 39 años; el 10,59% pertenece a las edades de 40 a 44 años; el 10,73% corresponde a personas entre 45 y 49 años; el 12,65% está en edades de 50 a 54 años. Finalmente, las personas entre 55 y 59 años de edad pertenecen al 5,31% del total de encuestados y el 5,10% a edades entre 60 y 64.
- En cuanto a los hábitos de consumo de alimentos preparados en la parrilla con carbón durante los fines de semana y feriados, el 62,37% registró que acostumbra a reunirse con amigos y/o familia, el 27,34% manifestaron que en esos días salen a comer en restaurante de comida hecha a la parrilla, mientras que el 10,29% prefiere comer en casa.
- Considerando la funda que se comercializa al público, se consultó la cantidad de carbón que adquieren para realizar un asado o parrillada. El 63,25% de los participantes compra 1,5 kilogramos, el 32,89% compra 2 kilogramos, mientras que solo el 3,86% compra 3 kilogramos.
- Con respecto a la frecuencia de las personas que adquieren carbón vegetal, se tiene que el 40,25% compra una vez al mes. El 24,31% adquiere una vez cada dos meses, el 13,78% lo hace una vez cada dos semanas, el 11,66% una vez cada seis meses, el 7,31% una vez a la semana y el 2,69% una vez al año.

El ANEXO XI., contiene información más detallada acerca de los resultados de las encuestas realizadas.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

- 1) Se caracterizó muestras de carbón vegetal obtenidas a partir de especies arbóreas endémicas del Ecuador. Esto permitió la obtención de los espectros característicos de cada una de las muestras a partir de la espectroscopía Raman.
- 2) Mediante la implementación del horno de atmósfera controlada, se logró el proceso de carbonización de la madera, en donde se establecieron los tiempos y temperaturas adecuadas para lograr la carbonización.
- 3) El uso de un gas inerte como el argón permite un control adecuado del proceso de carbonización de las muestras, dado que se reduce la presencia de oxígeno durante dicho proceso.
- 4) El uso de oxígeno genera una mayor reacción química con el carbono de la madera, generando una mayor cantidad de monóxido de carbono.
- 5) El proceso para obtener el carbón vegetal mediante aire, presentó mayor cantidad de gases y líquido piroleñoso, ya que reaccionó el oxígeno del aire con los componentes químicos de la madera, especialmente con el carbono, dando lugar a que gran parte del material se consuma, generando una estructura más frágil con mayor cantidad de ceniza.
- 6) Aunque se logre establecer una atmósfera completamente inerte, en el proceso de carbonización se quiera o no va a existir un remanente de agua, proveniente de la humedad que presenta la madera.
- 7) La espectroscopía Raman es una herramienta que permite obtener el espectro característico y la deconvolución de sus bandas, para reconocer y cotejar las distintas formas y disposiciones de las mismas.
- 8) La deconvolución es un método gráfico-analítico, ya que a partir del espectro característico se puede obtener la información gráfica de las señales independientes (señales por efectos específicos) y un reporte cuantitativo de las mismas.

- 9) La cantidad de monóxido y dióxido de carbono, metano y etileno que se generan en el proceso de carbonización con aire, es mayor en comparación con el gas argón, lo que ocasiona que se altere e incremente el desorden cristalino, provocando un aumento del ancho de ciertas bandas y el desplazamiento de las bandas D y G.
- 10) Al reaccionar los átomos de oxígeno que presenta el aire con los átomos de carbono de la madera que se carboniza, producen mayor cantidad de monóxido de carbono, incrementando posiblemente la presión dentro del tubo dado por la generación de este compuesto.
- 11) El carbón resultante es más poroso y sufre mayor alteración en su estructura, debido a la cantidad de material volátil que se produce al reaccionar el oxígeno, carbono, hidrógeno y nitrógeno, y a la mayor presión generada probablemente por el monóxido de carbono.
- 12) La relación de intensidad I_D/I_G es directamente proporcional al grado de desorden, a la cantidad de defectos, al grado de cristalinidad y a la cantidad de carbono amorfo. Esto se observó especialmente en el carbón resultante tradicional, ya que presentaron un valor de relación superior a 0,8.
- 13) La reducción de densidad y volumen del carbón obtenido mediante gas argón es menor, dado que las reacciones químicas que se generan durante el proceso de carbonización son más cortas y con presencia de menor cantidad de elementos reaccionantes.
- 14) Los volúmenes y densidades después del proceso de carbonización entre el gas argón y el aire indican una diferencia máxima de 18,54% y 16,07%, respectivamente. Estas diferencias se deben a que las reacciones químicas generadas, especialmente entre el carbono y el oxígeno, afectan en mayor cantidad a las muestras carbonizadas con aire por la pérdida excesiva de carbono.
- 15) Las muestras analizadas presentaron un ordenamiento de poco alcance, en especial las muestras obtenidas en el horno y de forma tradicional, ya que las bandas principales D y G aparecen bien definidas en el espectro.

- 16) Todas las muestras resultantes de carbón vegetal presentan carbono con nanocristales de grafito, debido a que pertenecen al tipo de carbono grafito nanocristalino, excepto la muestra recolectada 4, la misma que corresponde al tipo de carbono amorfo desordenado.
- 17) En todos los procesos con aire y gas argón, la banda D sufre un considerable desplazamiento hacia la izquierda de su posición referencial (1355 cm^{-1}) y la banda G un desplazamiento hacia la derecha de su valor referencial (1580 cm^{-1}), siendo estos desplazamientos mayores con aire, debido a que existe un mayor consumo de carbono.
- 18) No se obtuvo información de la especie o procedencia del carbón vegetal recolectado, por ende, no se tuvo claro el método exacto de obtención del mismo,
- 19) El rango de edad de las personas que contestaron las encuestas fue entre 30 y 34 años; la mayoría de personas que preparan alimentos a la parrilla lo hacen con más frecuencia los fines de semana y feriados; gran porcentaje de los participantes tienen la costumbre de adquirir un paquete de 1,5 kilogramos cada mes. Cabe recalcar que los restaurantes más grandes y populares que preparan asados necesitan aproximadamente 38 toneladas de carbón al mes.

4.2. Recomendaciones

- 1) Debido al carácter complejo de la estructura del carbón vegetal, para trabajos futuros se podrían emplear otras técnicas de caracterización para complementar dicho estudio. Pueden ser consideradas desde técnicas simples como la espectrometría de fluorescencia de rayos X (XRF), la espectrometría de infrarrojos por transformada de Fourier (FT-IR), la difracción de rayos X en polvo (PXRD); hasta técnicas más complejas como la difracción de rayos X a alta temperatura (HT-XRD), la microsonda electrónica (EMPA), la microscopía electrónica de barrido cuantitativa (QEMSCAN), la microscopía electrónica de barrido con detección de rayos X (SEM/EDS), la microscopía electrónica de transmisión (TEM), entre otras. Con esto se alcanzaría un análisis más razonable sobre el carbón vegetal, empleando los distintos parámetros para deducir diferentes comportamientos y características de este material.

- 2) Es recomendable ampliar este estudio con el análisis de relación de celulosa y lignina antes y después de la carbonización, ya que no se pudo realizar en este trabajo debido a la falta del equipamiento. Esto con la finalidad de lograr un mejor entendimiento acerca de la relación de FWHM_D, y cómo afecta a la misma.
- 3) Para futuros estudios es recomendable que se empleen equipos que permitan medir la cantidad de monóxido de carbono y líquido piroleñoso para determinar el porcentaje exacto que se produce con gas argón y aire.
- 4) Al momento de usar el horno de atmósfera controlada para obtener carbón vegetal o cualquier otra actividad, se debe tener presente ciertos riesgos al instante de efectuar el proceso, como son: incendio del carbón durante el proceso, fuga de gas e intoxicación por monóxido de carbono. Estos riesgos pueden ser reducidos por medio del uso de implementos de seguridad personal (guantes, mandil, mascarilla, gafas protectoras), adecuados hábitos de trabajo y una excelente ventilación dentro del espacio ocupado para que el gas se disuelva en la atmósfera.
- 5) Se debería tener una relación más cercana con el Ministerio del Ambiente para poder compartir información y dar varios puntos de vista desde el área de materiales, con el fin de crear una base de datos a la cual se pueda acudir para identificar los tipos de especies endémicas empleadas para distintos fines y generar posibles alternativas que eviten la deforestación de estas especies en peligro de desaparecer, debido al consumo agresivo de la materia prima provocado por el ser humano.

Referencias Bibliográficas

- [1] R. Guillen, "Fabricación de Carbón Vegetal Aprovechando los Raleos en Bosques Energéticos," p. 27, 2008.
- [2] M. Díaz, A. Gonzales, D. Sifuentes, and E. Gonzales, "El carbón vegetal: alternativa de energía y productos químicos," *Xilema*, vol. 23, no. 1, pp. 95–103, 2010.
- [3] K. Orvis, C. Lane, and S. Horn, "Laboratory production of Vouchered reference charcoal from small wood samples and non-woody plant tissues," *Palynology*, vol. 29, no. 1, pp. 1–11, 2005, doi: 10.1080/01916122.2005.9989601.
- [4] J. Schure, V. Ingram, M. Sakho, P. Levang, and F. Wiersum, "Formalisation of charcoal value chains and livelihood outcomes in Central- and West Africa," *Energy for Sustainable Development*, vol. 17, no. 2, pp. 95–105, 2013, doi: 10.1016/j.esd.2012.07.002.
- [5] T. Mwampamba, A. Ghilardi, K. Sander, and K. Chaix, "Dispelling common misconceptions to improve attitudes and policy outlook on charcoal in developing countries," *Energy for Sustainable Development*, vol. 17, no. 2, pp. 75–85, 2013, doi: 10.1016/j.esd.2013.01.001.
- [6] M. Antal and M. Grønli, "The art, science, and technology of charcoal production," *Industrial and Engineering Chemistry Research*, vol. 42, no. 8, pp. 1619–1640, 2003, doi: 10.1021/ie0207919.
- [7] E. Chidumayo and D. Gumbo, "The environmental impacts of charcoal production in tropical ecosystems of the world: A synthesis," *Energy for Sustainable Development*, vol. 17, no. 2, pp. 86–94, 2013, doi: 10.1016/j.esd.2012.07.004.
- [8] S. Nisgoski, F. Ribeiro, T. Naide, N. Clivati, A. Ribas, and B. de M. Graciela, "Discrimination of wood and charcoal from six Caatinga species by near-infrared spectroscopy," *Ciencia y Tecnología*, vol. 20, no. 2, pp. 199–210, 2018, doi: 10.4067/S0718-221X2018005002401.
- [9] R. Bailis, C. Rujanavech, P. Dwivedi, A. de Oliveira Vilela, H. Chang, and R. de Miranda, "Innovation in charcoal production: A comparative life-cycle assessment of two kiln technologies in Brazil," *Energy for Sustainable Development*, vol. 17, no. 2, pp. 189–200, 2013, doi: 10.1016/j.esd.2012.10.008.
- [10] B. Corradi, A. Oliveira, A. Ladeira, A. Oliveira, L. Santos, and B. Rocha, "Quality of Wood and Charcoal from Eucalyptus Clones for Ironmaster Use," *International Journal of Forestry Research*, pp. 1–8, 2012, doi: 10.1155/2012/523025.
- [11] Ministerio del Ambiente del Ecuador, "Leyenda Ecosistemas Ecuador 2," p. 186,

- 2012.
- [12] P. Lozano, "Especies forestales arbóreas y arbustivas de los bosques montanos del Ecuador," p. 174, 2015.
- [13] R. Sierra, "Propuesta Preliminar de un Sistema de Clasificación de Vegetación para el Ecuador Continental. Proyecto INEFAN/GEF-BIRG Ecociencia," no. January 1999, p. 194, 1999, doi: 10.13140/2.1.4520.9287.
- [14] Desarrollo Forestal Campesino, *Manejo de bosques nativos andinos. "Metodología para la planificación participativa,"* no. N°6. Quito; Ecuador, 1997.
- [15] J. Brandbyge, "Programa de reforestación en áreas reforestación de los Andes Ecuatorianos con especies nativas," *Cesa*, p. 79, 1991.
- [16] P. Lozano, "Los tipos de bosque en el sur del Ecuador," *Bótanica Austroecuatorial*, no. 2002, pp. 29–49, 2002.
- [17] Z. Aguirre, "Especies forestales de los bosques secos del Ecuador. Guía dendrológica para su identificación y caracterización. Proyecto Manejo Forestal Sostenible ante el Cambio Climático.," *Mae/Fao*, p. 130, 2012.
- [18] CAMICON and MIDUVI, *Norma Ecuatoriana de la Construcción - NEC-SE-MD - Estructuras de Madera.* 2014.
- [19] J. Aguilar and E. Guzowski, "Materiales y materias primas. Madera," p. 27, 2011.
- [20] J. Zárate, "La Madera Como Combustible," *Revista Forestal del Perú*, vol. 14, no. 2, pp. 1–9, 1986.
- [21] J. Castaño and J. Jaramillo, "Creación de una gama de acabados en madera para exteriores e interiores por medio del quemado y la carbonización.," Universidad de Cuenca, 2017.
- [22] G. Barluenga, "Estructura y Propiedades de las las maderas," 2017.
- [23] C. Alvarez, "Humedad De La Madera En La Construcción," pp. 1–5, 2011.
- [24] S. Viscarra, "Guía Para El Secado De La Madera En Hornos," vol. 1, p. 64, 1998.
- [25] S. Glass and S. Zelinka, "Wood Handbook, Chapter 04: Moisture Relations and Physical Properties of Wood," *Wood handbook: wood as an engineering material*, no. GTR-190, pp. 1–19, 2010.
- [26] R. Muñoz and R. Gete, "Influencia del peso específico de la pared celular en la variabilidad del peso específico aparente de la madera de roble (*Quercus robur* L.)," pp. 1–10, 2017.
- [27] S. Monteoliva, "La madera: propiedades y productos forestales.," *Angewandte Chemie International Edition*, pp. 1–13, 2009.
- [28] C. E. Byrne and D. C. Nagle, "Carbonized wood monoliths-characterization," *Carbon*, vol. 35, no. 2, pp. 267–273, 1997, doi: 10.1016/S0008-6223(96)00135-2.

- [29] F. F. Kollmann and W. A. Côté, *Principles of Wood Science and Technology I*. 1968.
- [30] G. Rosero and E. Cabrera, "Determinación De La Distribucion Horizontal De Las Emisiones Producidas En Los Hornos Artesanales Para Elaboración De Carbón Vegetal En El Cantón Quevedo," Universidad Técnica Estatal de Quevedo, 2011.
- [31] G. R. Gutierrez Tejada, "Caracterización De Los Productos Obtenidos Por Destilación Seca Del Bambú (*Guadua Angustifolia* Kunth.) Procedente del Distrito de la Florida, San Miguel, Cajamarca.," Universidad Nacional Agraria La Molina, 2015.
- [32] E. Creus, "Compuestos fenólicos. Un análisis de sus beneficios para la salud," *Offarm*, vol. 23, pp. 80–84, 2004.
- [33] S. Navas, "Horno de carbonización de laboratorio programable," *Tecnología en Marcha*, vol. 13, no. 4, pp. 53–56, 2001.
- [34] S. Sinha, A. Jhalani, M. Ravi, and A. Ray, "Modelling of Pyrolysis in Wood: A Review," *Matter*, vol. 2, no. 1, pp. 1–17, 2020, doi: 10.1016/j.matt.2019.12.003.
- [35] H. Álvarez, "Secado de la madera al aire," p. 28, 1985.
- [36] S. Hosokai, K. Matsuoka, K. Kuramoto, and Y. Suzuki, "Practical estimation of reaction heat during the pyrolysis of cedar wood," *Fuel Processing Technology*, vol. 154, pp. 156–162, 2016, doi: 10.1016/j.fuproc.2016.08.027.
- [37] R. Aguado, "Combustión y pirólisis de residuos de madera en spouted bed cónico," p. 350, 1999.
- [38] C. D. Elcey and B. Manoj, "Graphitization of coal by biosolubilization: Structure probe by Raman spectroscopy," *Asian Journal of Chemistry*, vol. 28, no. 7, pp. 1557–1560, 2016, doi: 10.14233/ajchem.2016.19750.
- [39] E. Sanabria, M. Cayré, and W. Frank, "Optimización de producción de carbón con *Aspidosperma quebracho blanco* en la provincia del Chaco, Argentina," *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, vol. 13, no. 1, pp. 23–27, 2007.
- [40] P. Pinheiro, "La producción del carbón vegetal," p. 21, 2019.
- [41] E. Rojas, "Calidad de carbón vegetal de *Eucalyptus camadulensis* producido en horno metálico de tambor tipo japonés mejorado.," Universidad Autónoma Chapingo, 2014.
- [42] G. Pacheco, "Evaluación del proceso de carbonización y calidad Del carbón de *Acacia caven* (Mol.) Mol. Producido en hornos de barro," Universidad de Chile, 2005.
- [43] S. de F. de O. Miranda Santos, "Modelo Ambiental E Econômico De Produção De

- Carvão Vegetal,” Universidade Tecnológica Federal Do Paraná, 2017.
- [44] J. Ordaz, “Análisis de la calidad del carbón vegetal de Encino (*Quercus ilex*) producido en horno tipo colmena Brasileño en Huayacocotla, Veracruz,” Universidad Autónoma Chapingo, 2003.
- [45] N. Raffaelli, “Elaboración de Carbón Vegetal en Horno Metálico Transportable.,” pp. 14–15, 2016.
- [46] O. Sala, “Fundamentos de espectroscopía Raman,” *Fundamentos da espectroscopía Raman e no infravermelho*, pp. 10–34, 1996.
- [47] C. Gutierrez and J. Otero, “Espectroscopía Raman : Fundamento y aplicaciones,” p. 16, 2014, doi: 10.13140/RG.2.1.5015.5362.
- [48] J. Ruiz, “Reconocimiento de Picos y Eliminación de Ruidos de Espectros Raman de Muestras Químicas y Biológicas,” Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, 2012.
- [49] M. Samaniego, “Aplicación de la espectroscopía Raman en conservación del patrimonio cultural,” PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR FACULTAD, 2015.
- [50] J. L. Pérez, R. Murillo, and R. Gómez, “Espectroscopías Infrarroja y Raman,” p. 24, 2011.
- [51] ALCALA, “Espectroscopía vibracional,” *Química y física molecular*, vol. 2, pp. 12–25, 2015.
- [52] F. Jiménez, F. Mondragón, and D. López, “Raman characterization of coal chars obtained in a pressurized bed reactor,” *Ingeniería y Competitividad*, vol. 14, no. 2, pp. 111–118, 2012.
- [53] G. Soler, J. Losada, and C. Vargas, “Caracterización vibracional por espectroscopia Raman del grano de Café tipo comercial,” *Scientia et technica*, vol. 18, no. 1, pp. 275–279, 2013, doi: 10.22517/23447214.8313.
- [54] A. Rygula, K. Majzner, K. Marzec, A. Kaczor, M. Pilarczyk, and M. Baranska, “Raman spectroscopy of proteins: A review,” *Journal of Raman Spectroscopy*, vol. 44, no. 8, pp. 1061–1076, 2013, doi: 10.1002/jrs.4335.
- [55] C. Galleguillos, “Medición de la densidad básica de madera usando técnicas espectroscópicas,” Pontificia Universidad Universidad Católica De Chile, 2010.
- [56] A. Merlen, J. Buijnsters, and C. Pardanaud, *A guide to and review of the use of multiwavelength Raman spectroscopy for characterizing defective aromatic carbon solids: From graphene to amorphous carbons*, vol. 7, no. 10. 2017.
- [57] S. Potgieter-Vermaak, N. Maledi, N. Wagner, J. Van Heerden, R. Van Grieken, and J. Potgieter, “Raman spectroscopy for the analysis of coal: A review,” *Journal of*

- Raman Spectroscopy*, vol. 42, no. 2, pp. 123–129, 2011, doi: 10.1002/jrs.2636.
- [58] L. Gómez, “Aplicación de la espectroscopia Raman al estudio analítico de fármacos,” Universidad Politécnica de Cataluña, 2011.
- [59] J. Ramos, A. Villanueva, and C. Ortiz, “Raman spectroscopy and its applications,” *Optica Pura y Aplicada*, vol. 46, no. 1, pp. 83–95, 2013, doi: 10.7149/OPA.46.1.83.
- [60] A. Jorio and A. Souza, “Raman Studies of Carbon Nanostructures,” *Annual Review of Materials Research*, vol. 46, pp. 357–382, 2016, doi: 10.1146/annurev-matsci-070115-032140.
- [61] S. Massip, “Application of Raman spectroscopy to mixtures of pigments by temperature,” Universidad Politécnica de Cataluña, 2016.
- [62] S. Hussain, “Carbon Nanotubes Deposited by Hot Wire Plasma CVD and water assisted CVD for Energetic and Environmental Applications,” Universidad de Barcelona, 2014.
- [63] M. Vázquez, “Materiales Carbonosos Derivados del POB,” Universidad de Santiago de Compostela, 2012.
- [64] J. Tascón, “Carbon materials: their structures and types,” *Pure and Applied Optics*, vol. 40, no. 2, pp. 149–159, 2007.
- [65] F. Rosalind, “Crystallite growth in graphitizing and non-graphitizing carbons,” *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, vol. 209, no. 1097, pp. 196–218, 1951, doi: 10.1098/rspa.1951.0197.
- [66] E. Fitzer, K. H. Köchling, H. P. Boehm, and H. Marsh, “Recommended terminology for the description of carbon as a solid,” *Pure and Applied Chemistry*, vol. 67, no. 3, pp. 473–506, 1995, doi: 10.1351/pac199567030473.
- [67] A. C. Ferrari *et al.*, “Raman spectrum of graphene and graphene layers,” *Physical Review Letters*, vol. 97, no. 18, pp. 1–4, 2006, doi: 10.1103/PhysRevLett.97.187401.
- [68] R. Saito, M. Hofmann, G. Dresselhaus, A. Jorio, and M. Dresselhaus, “Resonance Raman Spectroscopy of Graphene and Carbon Nanotubes,” *World Scientific Series on Carbon Nanoscience*, vol. 9–10, no. July, pp. 113–142, 2011, doi: 10.1142/9789813235465_0011.
- [69] S. Reich and C. Thomsen, “Raman spectroscopy of graphite,” *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 362, no. 1824, pp. 2271–2288, 2004, doi: 10.1098/rsta.2004.1454.
- [70] P. Poncharal, A. Ayari, T. Michel, and J.-L. Sauvajol, “Raman spectra of misoriented bilayer graphene,” *Physical Review B*, vol. 78, no. 11, pp. 1–8, 2008, doi: 10.1103/physrevb.78.113407.

- [71] F. García, A. Olivares, and I. Fuentes, "Conceptos y bibliografía sobre la fotoluminiscencia y procesos similares," *Scielo*, vol. 2, no. 0, p. 41, 2004.
- [72] M. Cubells, "Pigment analysis with Raman spectroscopy: Theoretical and experimental assessment of laser induced temperature," Universidad Politécnica de Cataluña, 2013.
- [73] R. Cullerell, "Metodología teórico-experimental para la medida indirecta del índice de refracción complejo de pigmentos," Universidad Politécnica de Cataluña, 2009.
- [74] Carbone Stainless Steel, "Ficha Técnica de los Aceros Inoxidables AISI 304 y AISI 316," *Empresas Carbone*, no. X, pp. 1–6, 2016.
- [75] P. Dungen, M. Prenzel, C. Van Stappen, N. Pfänder, S. Heumann, and R. Schlögl, "Investigation of Different Pre-Treated Multi-Walled Carbon Nanotubes by Raman Spectroscopy," *Materials Sciences and Applications*, vol. 08, no. 08, pp. 628–641, 2017, doi: 10.4236/msa.2017.88044.
- [76] S. Kore, "Re: What is the physical meaning for the D-band (1350 cm⁻¹), G-band (1580 cm⁻¹) and G*-band (2700 cm⁻¹) peaks for graphene in Raman analysis?," 2014. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/post/What_is_the_physical_meaning_for_the_D-band_1350_cm-1_G-band_1580_cm-1_and_G-band_2700_cm-1_peaks_for_graphene_in_Raman_analysis/541d2ebdd3df3e2e2e8b456b/citation/download.
- [77] G. Korneva, "Functionalization of carbon nanotubes," Drexel Universidad, 2008.
- [78] M. Couzi, J. L. Bruneel, D. Talaga, and L. Bokobza, "A multi wavelength Raman scattering study of defective graphitic carbon materials: The first order Raman spectra revisited," *Carbon*, vol. 107, pp. 388–394, 2016, doi: 10.1016/j.carbon.2016.06.017.
- [79] J. Lehman, M. Terrones, E. Mansfield, K. Hurst, and V. Meunier, "Evaluating the characteristics of multiwall carbon nanotubes," *Carbon*, vol. 49, no. 8, pp. 2581–2602, 2011, doi: 10.1016/j.carbon.2011.03.028.
- [80] L. G. Cançado, A. Jorio, and M. A. Pimenta, "Measuring the absolute Raman cross section of nanographites as a function of laser energy and crystallite size," *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, vol. 76, no. 6, pp. 1–7, 2007, doi: 10.1103/PhysRevB.76.064304.
- [81] P. Venezuela, M. Lazzeri, and F. Mauri, "Theory of double-resonant Raman spectra in graphene: Intensity and line shape of defect-induced and two-phonon bands," *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, vol. 84, no. 3, pp. 1–28, 2011, doi: 10.1103/PhysRevB.84.035433.

- [82] A. N. Mohan, B. Manoj, and A. V. Ramya, "Probing the nature of defects of graphene like nano-carbon from amorphous materials by Raman spectroscopy," *Asian Journal of Chemistry*, vol. 28, no. 7, pp. 1501–1504, 2016, doi: 10.14233/ajchem.2016.19739.
- [83] B. C. Ghos *et al.*, "Influence of the Substrate, Process Conditions, and Postannealing Temperature on the Properties of ZnO Thin Films Grown by the Successive Ionic Layer Adsorption and Reaction Method," *ACS Omega*, vol. 6, no. 4, pp. 2665–2674, 2021, doi: 10.1021/acsomega.0c04837.
- [84] M. Elbagerma, "Re: In raman spectra, We observed the shifting of peaks towards lower & higher wavenumbers, why?," 2014. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/post/In_raman_spectra_We_observed_the_shifting_of_peaks_towards_lower_higher_wavenumbers_why/54398e5bd11b8b66148b4650/citation/download.
- [85] O. Francioso, S. Sanchez-Cortes, S. Bonora, M. Roldán, and G. Certini, "Structural characterization of charcoal size-fractions from a burnt Pinus pinea forest by FT-IR, Raman and surface-enhanced Raman spectroscopies," *Journal of Molecular Structure*, vol. 994, no. 1–3, pp. 155–162, 2011, doi: 10.1016/j.molstruc.2011.03.011.
- [86] J. Fernández, "Espectroscopía Raman en chorros de gases," *Laboratorio de Fluidodinámica Molecular Instituto de Estructura de la Materia, CSIC*, vol. 1, p. 20, 2006.
- [87] A. Eckmann, A. Felten, I. Verzhbitskiy, R. Davey, and C. Casiraghi, "Probing the nature of defects in graphene by Raman spectroscopy," *Submitted*, pp. 1–14, 2012.
- [88] G. Gawlik, P. Ciepielewski, J. Jagielski, and J. Baranowski, "Modification of graphene by ion beam," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, vol. 406, pp. 683–688, 2017, doi: 10.1016/j.nimb.2017.04.054.
- [89] F. Tuinstra and J. L. Koenig, "Raman Spectrum of Graphite," *Journal of Chemical Physics*, vol. 53, no. 3, pp. 1126–1130, 1970, doi: 10.1063/1.1674108.
- [90] P. Lespade, R. Al-Jishi, and M. S. Dresselhaus, "Model for Raman scattering from incompletely graphitized carbons," *Carbon*, vol. 20, no. 5, pp. 427–431, 1982, doi: 10.1016/0008-6223(82)90043-4.
- [91] O. Paris, C. Zollfrank, and G. A. Zickler, "Decomposition and carbonisation of wood biopolymers - A microstructural study of softwood pyrolysis," *Carbon*, vol. 43, no. 1, pp. 53–66, 2005, doi: 10.1016/j.carbon.2004.08.034.
- [92] K. Ishimaru, T. Hata, P. Bronsveld, D. Meier, and Y. Imamura, "Spectroscopic

- analysis of carbonization behavior of wood, cellulose and lignin,” *Journal of Materials Science*, vol. 42, no. 1, pp. 122–129, 2007, doi: 10.1007/s10853-006-1042-3.
- [93] A. C. Ferrari and J. Robertson, “Interpretation of Raman spectra of disordered and amorphous carbon,” *Schweizerische Zeitschrift für Hydrologie*, vol. 31, no. 2, pp. 632–645, 2000, doi: 10.1007/BF02543692.
- [94] A. Schito, C. Romano, S. Corrado, D. Grigo, and B. Poe, “Diagenetic thermal evolution of organic matter by Raman spectroscopy,” *Organic Geochemistry*, vol. 106, pp. 57–67, 2017, doi: 10.1016/j.orggeochem.2016.12.006.
- [95] S. Yamauchi, Y. Kikuchi, and Y. Kurimoto, “Raman spectral changes of sugi bark during thermal degradation and carbonization,” *Materials Science Research International*, vol. 6, no. 3, pp. 227–228, 2000, doi: 10.2472/jsms.49.9appendix_227.
- [96] S. Yamauchi and Y. Kurimoto, “Raman spectroscopic study on pyrolyzed wood and bark of Japanese cedar: Temperature dependence of Raman parameters,” *Journal of Wood Science*, vol. 49, no. 3, pp. 235–240, 2003, doi: 10.1007/s10086-002-0462-1.
- [97] P. L. Ascough *et al.*, “Charcoal reflectance measurements: Implications for structural characterization and assessment of diagenetic alteration,” *Journal of Archaeological Science*, vol. 37, no. 7, pp. 1590–1599, 2010, doi: 10.1016/j.jas.2010.01.020.
- [98] G. Iglesias, “Evaluación de la Propagación de *Hyeronima macrocarpa* Schltr. (Motilón) en tres tipos de sustratos, en la parroquia ULBA, Cantón Baños de Agua Santa, Provincia de Tungurahua,” Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, 2016.
- [99] A. González, “Evaluación antibacteriana de extracto y aceite esencial de Pumamaqui (*Oreopanax ecuadorense* Seeman.) frente a: (*Staphylococcus aureus* ATCC: 25923, *Streptococcus pyogenes* ATCC: 19615, *Streptococcus pneumoniae* ATCC: 49619 y *Streptococcus mutans* ATCC: 25175,” Universidad Politécnica Salesiana Sede Quito, 2016.
- [100] R. Arévalo and A. Alva, “Prospección y producción de aceite esencial de *Aniba rosaeodora* Ducke. Lauraceae (Palo de rosa),” pp. 1–10.
- [101] R. Espinosa and A. López, *Árboles nativos importantes*. 2019.
- [102] A. Barukcic and M. Sola, “Desarrollo de formulaciones fito-cosméticas antioxidantes empleando como sustancia activa el extracto seco de *Cinchona pubescens* Vahl, Rubiaceae (Cascaquilla)”. Trabajo de Grado presentado como

- requisito parcial para optar al título de Magister en ciencias,” Universidad Politécnica Salesiana, 2015.
- [103] V. H. Eras Guamán, J. E. Minchala Patiño, J. A. Moreno Serrano, M. Yaguana Arévalo, M. G. Sinche Freire, and C. O. Valarezo Ortega, *Estructura, composición florística y fisiología reproductiva de Cinchona officinalis L. en la provincia de Loja*. 2019.
- [104] J. Kraack, “Re: Why does G band in graphene raman shifts to lower frequencies some time?.,” 2015. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/post/Why_does_G_band_in_graphene_raman_shifts_to_lower_frequencies_some_time/558784185f7f714a388b4598/citation/download.
- [105] J. McDonald-Wharry, M. Manley-Harris, and K. Pickering, “Carbonisation of biomass-derived chars and the thermal reduction of a graphene oxide sample studied using Raman spectroscopy,” *Carbon*, vol. 59, pp. 383–405, 2013, doi: 10.1016/j.carbon.2013.03.033.
- [106] B. Rebollo, “Síntesis y caracterización de películas delgadas de carbono amorfo nitrurado, depositadas por ablación laser.,” Autónoma de Puebla, 2001.
- [107] F. Davrieux, P. Rousset, T. Monteiro, L. De Macedo, and W. Ferreira, “Discrimination of native wood charcoal by infrared spectroscopy,” *Química Nova*, vol. 33, no. 5, pp. 1093–1097, 2010, doi: 10.1590/S0100-40422010000500016.
- [108] N. Malhotra, *Investigación de Mercados*, 5th ed., vol. 3, no. 6. 2015.
- [109] “Población de Ecuador 2020,” *Countrysmeters*. [Online]. Available: <https://countrysmeters.info/es/Ecuador>.
- [110] INEC, “Resultados del Censo 2010 de población y vivienda en el Ecuador,” pp. 0–7, 2010.
- [111] M. Badii, A. Guillen, E. Cerna, and J. Valenzuela, “Nociones Introductorias de Muestreo Estadístico,” *Daena: International Journal of Good Conscience*, vol. 6, no. 1, pp. 89–105, 2011.

ANEXOS

ANEXO I.

DESCRIPCIÓN DE LAS ESPECIES DE MADERA UTILIZADAS PARA LA PARTE PRÁCTICA

ANEXO I.1. MOTILÓN

Taxonomía

Taxonomía de la especie motilón.

Clase	Magnoliopsida
Orden	Euphorbiales
Familia	Euphorbiaceae
Género	Hyeronima
Sinónimos	Hieronyma sararita Cuatrec.
Especie	Hyeronima Macrocarpa Schltr
Nombre Común	Motilón - Mote

(Fuente: Iglesias, 2016)

Descripción Botánica

Su raíz es axonomorfa. Es un árbol cuya altura va desde los 15 a 20 metros y su diámetro de 300 a 0 milímetros. Es muy común dentro de bosques desarrollados o separados en potreros [99].

- Tronco: Su tronco es cilíndrico y un poco rugoso. Su copa es extensa con ramificaciones densas.
- Corteza: La corteza interna es un tanto rosada y la corteza externa es parda grisácea. Su madera es roja y de considerable durabilidad [99].
- Hojas: Son densas y elípticas cuya longitud van desde los 40 hasta los 90 milímetros y su ancho de 25 a 40 milímetros. La longitud de los pecíolos está entre los 20 a 25 milímetros. Dispone del haz de color verde oliva con nervios impresos, del envés con indumento más grueso nervios notorios. El follaje varía de verde a obscuro o claro, después a un suave amarillo, y finalmente con un rojo amarillento antes de llegar a la superficie del suelo.
- Flores: Son de color amarillo, diminutas y nada atractivas; están asociadas en inflorescencias paniculadas axiales [99]. Las flores masculinas poseen cáliz con 5 lóbulos y libres glándulas del disco. Sus flores femeninas poseen cáliz similar a las masculinas, desapercibidas glándulas del disco y ovario bilocular [12].
- Fruto: Tiene una forma casi esférica, es carnoso y su color cambia de rojo a morado cuando madura. El fruto dispone de una sola semilla pequeña con la forma de globo, tiene cabeza dura de color café oscuro. En relación con el volumen de la semilla, el embrión es más grande [99].

Distribución Geográfica

Se encuentra entre 1.500 a 3.500 msnm en las provincias de Carchi, Napo, Cotopaxi Bolívar, Imbabura, Chimborazo y Pichincha [12]. En la sierra se localiza en el bosque montano (neblina), en la derivación occidental y oriental de la cordillera de los Andes [99].

Tipo de Bosque

- Bosque siempre verde montano de la Cordillera Oriental de los Andes.
- Bosque siempre verde montano bajo de la Cordillera Oriental de los Andes.
- Bosque siempre verde montano alto del Norte de la Cordillera Oriental de los Andes, bajo y bosque montano.

Fenología

La producción de flores ocurre en el mes de noviembre.

Categoría

Nativa de Ecuador [12].



Especie motilón.
(Fuente: MAE-FAO, 2015)

ANEXO I.2. PUMAMAQUI

Taxonomía

Taxonomía de la especie pumamaqui.

Clase	Equisetopsida C. Agardh
Subclase	Magnoliidae Novák ex Takht.
Superorden	Asteranae Takht.
Orden	Apiales Nakai
Familia	Araliaceae Juss.
Género	Oreopanax Decne. & Planch.
Sinónimos	Oreopanax sprucei Seem. Oreopanax serra André Oreopanax mucronulatus Harms Oreopanax schimpffii Harms Oreopanax puma-maqui Benoist
Especie	Oreopanax Ecuadorensis Seem.
Nombre Común	Pumamaqui

(Fuente: Carrillo, 2016; MAE-FAO, 2015)

Descripción Botánica

Árbol cuya altura oscila entre 5 y 15 metros de altura, con un diámetro a la altura del pecho (DAP) de 250 a 350 milímetros. Varía con relación a la morfología de sus hojas [113].

- Tronco: Tiene forma cilíndrica con copa desigual y extendida.
- Corteza: La corteza interna es de color verde crema y la corteza externa es de color gris verdosa, mínimamente cuarteada. [113]
- Ramas: Presenta lisas y estrelladas ramas con estípulas lineares y adheridas al peciolo.
- Hojas: Dispone de sencillas hojas alternadas que van desde los 250 a 350 milímetros, helicoidalmente arregladas. Peciolo de color pardo grisáceo que va desde 50 a 180 milímetros. Sus láminas van de 200 a 250 milímetros x 120 a 10 milímetros. Sus hojas poseen buena rigidez con una redonda superficie. Posee un haz y un envés glabro [114].
- Flores: Son polígamas dioicas y pentámeras, se localizan en racimos terminales de 150 a 250 milímetros [12].
- Fruto: Tiene la forma de una curva cerrada en donde sus tres secciones ortogonales son elípticas [113].

Distribución Geográfica

Se localiza en la reserva ecológica El Ángel, entre los 2.500 msnm y 4.000 msnm. En las reservas ecológicas de Cayambe-Coca y Cotacachi-Cayapas, y en algunas áreas cerca

del Parque Nacional Sangay, También en las provincias de Azuay, Bolívar, Carchi, Chimborazo, Cotopaxi, Imbabura, Napo, Pichincha y Tungurahua.

Tipo de Bosque

- Bosque siempre verde montano de la Cordillera Oriental y Occidental de los Andes.
- Bosque siempre verde montano bajo de la Cordillera Oriental y Occidental de los Andes.
- Bosque siempre verde montano alto del Norte de la Cordillera Oriental de los Andes.

Fenología

Árbol siempre verde.

Categoría

Especie endémica con alto riesgo de desaparecer [12].



Especie pumamaqui
(Fuente: MAE-FAO, 2015)

ANEXO I.3. PALO ROSA

Taxonomía

Taxonomía de la especie palo rosa.

Clase	<u>Magnoliopsida</u>
Orden	<u>Lurales</u>
Familia	Elaeocarpaceae
Género	Aniba Rosaeodora Ducke
Sinónimos	Vallea cordifolia Ruiz & Pav. Vallea pubescens Kunth Vallea cernua Turcz. Vallea macrophylla Turcz. Vallea ovata Turcz. Vallea pyrifolia Turcz. Vallea glabra Miers Vallea schlimii Turcz.
Especie	Vallea stipularis
Nombre Común	Palo Rosa - Caléndula

(Fuente: Kometter, 2019; MAE-FAO, 2015)

Descripción Botánica

Árbol con una altura de 18 a 35 metros y un diámetro de 300 a 800 milímetros, posee un recto fuste y las ramificaciones aparecen desde el segundo tercio [115].

- Tronco: Es leñoso y curvo, con una tonalidad café cuya ramificación inicia a los 2 metros [12].
- Corteza: La corteza interna presenta una tonalidad rosada viva y es homogénea, la corteza externa es lenticelada con una tonalidad marrón claro.
- Ramas: Presenta ramas terminales de 2 a 4 milímetros de corte anguloso [115].
- Hojas: Dispone de sencillas hojas alternadas y helicoidales, van de 30 a 60 milímetros de ancho y de 80 a 120 milímetros de largo; el peciolo va de 4 a 6 milímetros de longitud [115]. Por el haz un color verde brillante y por el envés un color blanco con peciolos extensos [12].
- Flores: Son actinomorfas y hermafroditas, van de 1,5 a 1,8 milímetros de longitud [115]. Presentan pétalos rosados [12].
- Fruto: Es de color blanco verdoso [12], tiene apariencia globosa de 35 milímetros de longitud y su semilla es única [115].

Distribución Geográfica

Localizado en Ecuador entre los 2.200 msnm y 4.000 msnm, en las provincias de Napo, Pichincha, Azuay, Carchi, Tungurahua, Cotopaxi, Morona, Bolívar, Cañar, Loja, Sucumbíos y Chimborazo.

Tipo de Bosque

- Bosque siempre verde montano de la Cordillera Occidental y Oriental de los Andes.
- Bosque siempre verde montano bajo de la Cordillera Occidental y Oriental de los Andes.
- Bosque siempre verde montano alto del Norte de la Cordillera Oriental de los Andes.

Fenología

Cambia de follaje al menos una vez al año. Se mantiene con pocas hojas mostrando una apariencia otoñal. Luego de que aparecen las hojas nuevas, se generan flores rosadas, las cuales recubren el árbol una vez al año, desde abril hasta junio [12].

Categoría

Nativa de los Andes



Especie palo rosa.
(Fuente: MAE-FAO, 2015)

ANEXO I.4. CHARMUELAN

Taxonomía

Taxonomía de la especie charmuelan.

Clase	<u>Magnoliopsida</u>
Orden	<u>Primulales</u>
Familia	Myrsinaceae
Género	<u>Myrsine</u>
Sinónimos	Rapanea guianensis
Especie	Myrsine guianensis
Nombre Común	Charmuelan - Cucharó

(Fuente: Mahecha, 2010)

Descripción Botánica

Árbol cuya altura oscila entre 5 y 10 metros, crece en zonas degradadas o pobres.

- Tronco: Es lenticelado y grisáceo.
- Ramas: Son largas y vidriosas, contienen frutos pequeños.
- Hojas: Dispone de hojas alternas y sencillas, presenta ciertas puntuaciones de color marrón en el envés, son de forma elíptica y helicoidales.
- Flores: Son de color morado, diminutas y agrupadas encima de las ramas.
- Fruto: Engloba una semilla lenticelada [116].

Distribución Geográfica

En Ecuador se las localiza entre los 2.500 msnm y 4.000 msnm, en las provincias de Imbabura, Zamora, Pichincha, Loja, Napo y Azuay.

Tipo de Bosque

- Bosque siempre verde montano de la Cordillera Oriental y Occidental de los Andes.
- Bosque siempre verde montano bajo de la Cordillera Oriental y Occidental de los Andes.
- Bosque siempre verde montano alto del Norte de la Cordillera Oriental de los Andes.

Fenología

La producción de flores ocurre de noviembre a marzo

Categoría

Endémica del Ecuador [12].



Especie charmuelan.
(Fuente: Mahecha, 2010)

ANEXO I.5. CASCARILLA

Taxonomía

Taxonomía de la especie cascarilla.

Clase	Euasterids
Orden	Gentianales
Familia	Rubiaceae
Género	Cinchona
Sinónimos	Cinchona condaminea Bonpl. Cinchona lucumaefolia Pav. ex DC. Cinchona uritusingaPav. ex Howard
Especie	Cinchona officinalis L.
Nombre Común	Cascarilla - Cinchona

(Fuente: Álvarez, 2014; MAE-FAO, 2015)

Descripción Botánica

Árbol cuya altura se presenta entre 11 y 15 metros, y su diámetro entre 300 y 400 milímetros.

- Tronco: Posee tronco principal y en ocasiones se originan troncos secundarios a un costado del mismo.

- Corteza: La corteza externa separa pequeñas placas de manera discontinua, es de tonalidad marrón opaco y levemente agrietado.
- Ramas: Las ramas secundarias son excluidas constantemente, las ramas principales se originan en el tronco a 6 metros de altura [117].
- Hojas: Son ovaladas y sencillas de 70 a 180 milímetros de ancho y de 80 a 270 milímetros de largo; es de color verde oscuro. Los peciolo presentan extensos nervios.
- Flores: Son hermafroditas, actinomorfas y aromáticas; se desarrollan de un mismo tallo, son de color rojo, blanco o rosado.
- Fruto: Tienen la forma ovalada de color marrón oscuro. Las semillas son fusiformes, ovaladas por un alero membranoso [12].

Distribución Geográfica

En Ecuador se las encuentra por encima de los 2.100 msnm, en las provincias de Cañar, Bolívar, Zamora, Azuay, El Oro, Loja, Morona y Chimborazo.

Tipo de Bosque

Bosque siempre verde montano bajo de la Cordillera Occidental y Oriental de los Andes.

Fenología

Después de la polinización se forman envolturas que abarcan semillas aladas.

Categoría

Nativa del Ecuador [12].



Especie cascarilla.
(Fuente: MAE-FAO, 2015)

ANEXO II.

REGISTRO DE PRUEBAS REALIZADAS

ANEXO II.1.

REGISTRO DE PRUEBAS REALIZADAS CON AIRE PARA LA PARTE EXPERIMENTAL DEL TRABAJO DE TITULACIÓN												
Prueba	Muestra	Fecha	Masa inicial [g]	Volumen inicial [cm ³]	Densidad inicial [g/cm ³]	Temperatura de carbonización (fin de proceso) [°C]	Duración del proceso sin tomar en cuenta el tiempo de vaciado inicial y final [min]	Tiempo de enfriamiento [horas]	Masa final [g]	Volumen final [cm ³]	Densidad final [g/cm ³]	Diferencia de densidad [g/cm ³]
A	Muestra 4 (Charmuelan)	09/06/2021	40,82	67,20	0,61	446	60	6	10,07	46,62	0,22	0,39
B ^I	Muestra 4 (Charmuelan)	10/06/2021	6,08	7,98	0,76	442	60	2	0,00	0,00	0,00	-
B ^{II}	Muestra 4 (Charmuelan)		9,40	16,38	0,57				0,00	0,00	0,00	-
B ^{III}	Muestra 4 (Charmuelan)		16,11	24,00	0,67				0,90	10,79	0,08	-
C ^I	Muestra 4 (Charmuelan)	11/06/2021	6,06	8,41	0,72	445	60	6	0,21	1,39	0,15	0,57
C ^{II}	Muestra 4 (Charmuelan)		9,37	16,40	0,57				1,05	5,76	0,18	0,39
C ^{III}	Muestra 4 (Charmuelan)		16,14	24,60	0,66				2,80	14,87	0,19	0,47
D	Muestra 1 (Motilón)	17/06/2021	39,82	68,80	0,58	467	120	6	4,42	27,59	0,16	0,42
E	Muestra 2 (Pumamaqui)	18/06/2021	45,03	70,52	0,64	500	180	6	0,84	6,48	0,13	0,51
F	Muestra 2.1 (Pumamaqui)	21/06/2021	38,76	67,24	0,58	504	140	6	2,27	14,30	0,16	0,42
G	Muestra 3 (Palo Rosa)	22/06/2021	43,91	70,52	0,62	500	110	6	2,46	22,75	0,11	0,51
H	Muestra 3.1 (Palo Rosa)	23/06/2021	42,09	65,60	0,64	503	130	6	2,86	9,00	0,32	0,32
I	Muestra 3.2 (Palo Rosa)	24/06/2021	42,04	70,56	0,60	450	130	6	2,75	12,60	0,22	0,38
J	Muestra 3.3 (Palo Rosa)	28/06/2021	43,36	70,56	0,61	400	120	5	1,71	15,97	0,11	0,51
K	Muestra 3.4 (Palo Rosa)	29/06/2021	44,28	68,88	0,64	400	110	5	4,79	26,60	0,18	0,46
L	Muestra 4 (Charmuelan)	30/06/2021	45,47	65,60	0,69	401	105	5	6,85	23,20	0,30	0,40
M	Muestra 5 (Cascarilla)	01/07/2021	46,98	68,88	0,68	400	105	5	5,83	25,98	0,22	0,46

Registro de pruebas realizadas con aire en el horno de atmósfera controlada.
(Fuente: Propia, 2021)

ANEXO II.2.

REGISTRO DE PRUEBAS REALIZADAS CON GAS PARA LA PARTE EXPERIMENTAL DEL TRABAJO DE TITULACIÓN												
Prueba	Muestra	Fecha	Masa inicial [g]	Volumen inicial [cm ³]	Densidad inicial [g/cm ³]	Temperatura de carbonización (fin de proceso) [°C]	Duración del proceso sin tomar en cuenta el tiempo de vaciado inicial y final [min]	Tiempo de enfriamiento [horas]	Masa final [g]	Volumen final [cm ³]	Densidad final [g/cm ³]	Diferencia de densidad [g/cm ³]
N	Muestra 5 (Cascarilla)	08/07/2021	49,76	68,88	0,72	400	100	5	7,10	30,60	0,23	0,49
Ñ	Muestra 1 (Motilón)	09/07/2021	39,94	72,32	0,55	350	95	5	6,33	24,27	0,26	0,29
O	Muestra 2 (Pumamaqui)	12/07/2021	42,52	68,88	0,62	350	100	5	3,80	20,93	0,18	0,44
P	Muestra 3 (Palo Rosa)	13/07/2021	39,69	70,60	0,56	400	95	5	9,81	45,33	0,22	0,35
Q	Muestra 4 (Charmuelan)	14/07/2021	44,02	70,52	0,62	400	95	5	8,15	31,68	0,26	0,37
R	Muestra 5 (Cascarilla)	15/07/2021	47,61	75,85	0,63	400	95	5	9,95	39,17	0,25	0,37
S	Muestra 1 (Motilón)	16/07/2021	38,67	68,88	0,56	400	95	5	8,26	33,48	0,25	0,31
T	Muestra 2 (Pumamaqui)	19/07/2021	38,15	68,80	0,55	400	95	5	6,38	27,44	0,23	0,32

Registro de pruebas realizadas con gas argón en el horno de atmósfera controlada.
(Fuente: Propia, 2021)

ANEXO II.3.

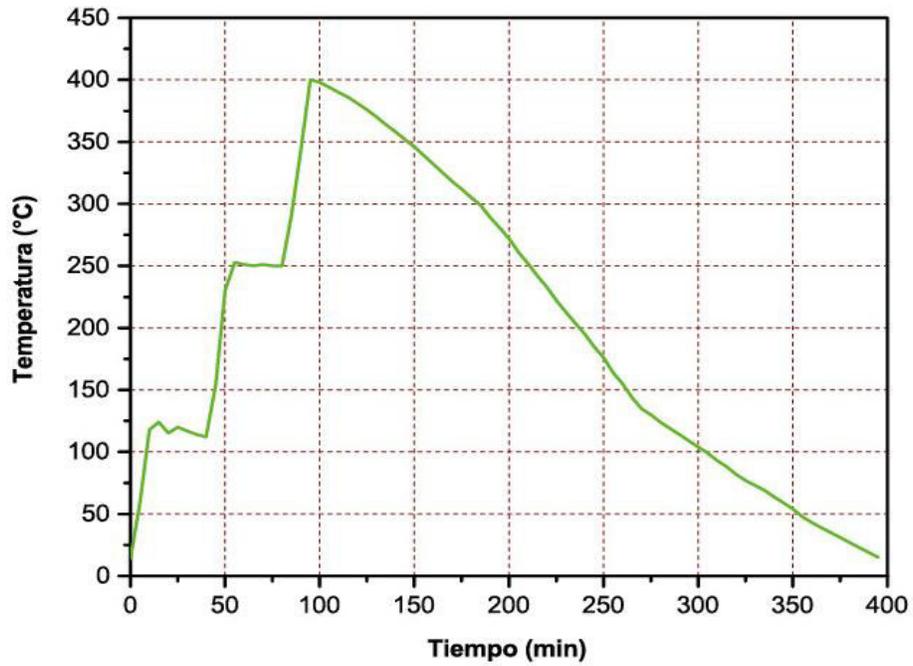
REGISTRO DE PRUEBAS REALIZADAS SIN GAS PARA LA PARTE EXPERIMENTAL DEL TRABAJO DE TITULACIÓN												
Prueba	Muestra	Fecha	Masa inicial [g]	Volumen inicial [cm ³]	Densidad inicial [g/cm ³]	Temperatura de carbonización (fin de proceso) [°C]	Duración del proceso sin tomar en cuenta el tiempo de vaciado inicial y final [min]	Tiempo de enfriamiento [horas]	Masa final [g]	Volumen final [cm ³]	Densidad final [g/cm ³]	Diferencia de densidad [g/cm ³]
U	Muestra 1 (Motilón)	20/07/2021	38,69	70,60	0,55	400	95	5	6,04	28,59	0,21	0,34
V	Muestra 2 (Pumamaqui)	21/07/2021	38,12	67,16	0,57	400	95	5	6,20	18,90	0,33	0,24
W	Muestra 3 (Palo Rosa)	22/07/2021	39,71	77,49	0,51	400	95	5	8,09	44,64	0,18	0,33
X	Muestra 4 (Charmuelan)	23/07/2021	44,07	75,85	0,58	400	95	5	6,18	20,01	0,31	0,27
Y	Muestra 5 (Casquilla)	26/07/2021	47,70	72,28	0,66	400	95	5	8,36	38,57	0,22	0,44

Registro de pruebas realizadas sin gas en el horno de atmósfera controlada.
(Fuente: Propia, 2021)

ANEXO III.

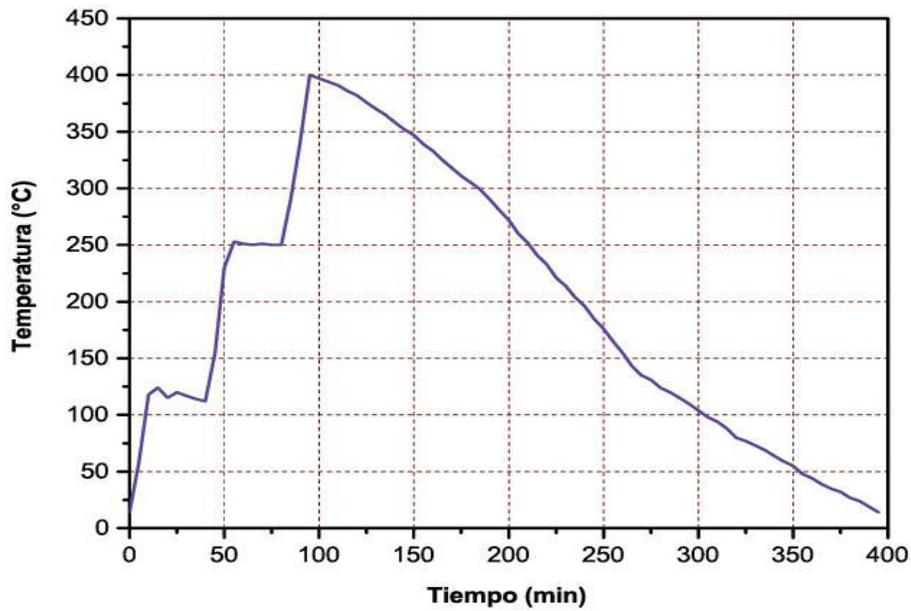
PROCESOS DE CARBONIZACIÓN DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS EN EL HORNO

ANEXO III.1.



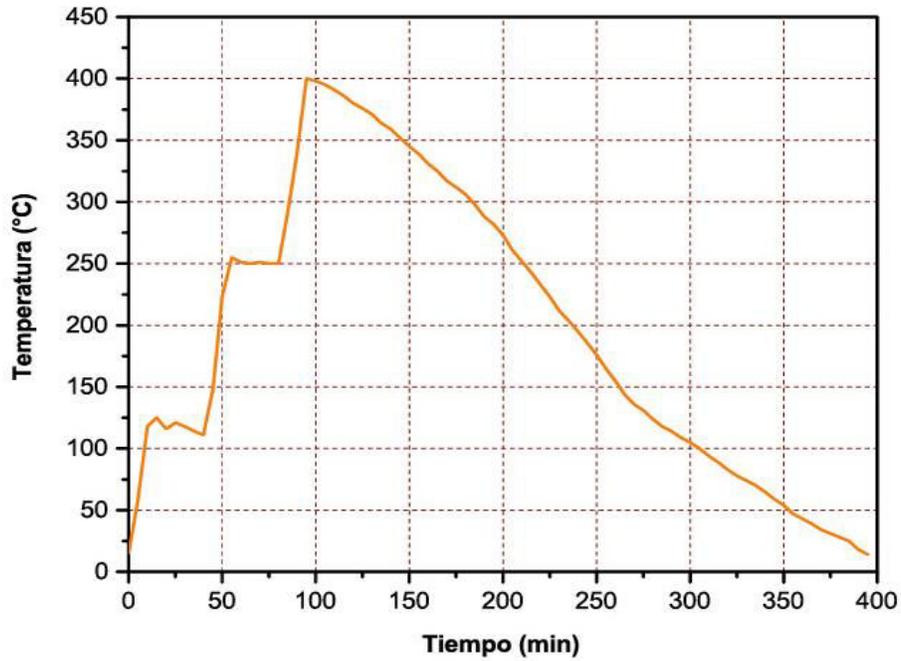
Proceso de carbonización de la prueba P (muestra palo rosa) realizada dentro del horno de atmósfera controlada con gas argón.
(Fuente: Propia, 2021)

ANEXO III.2.



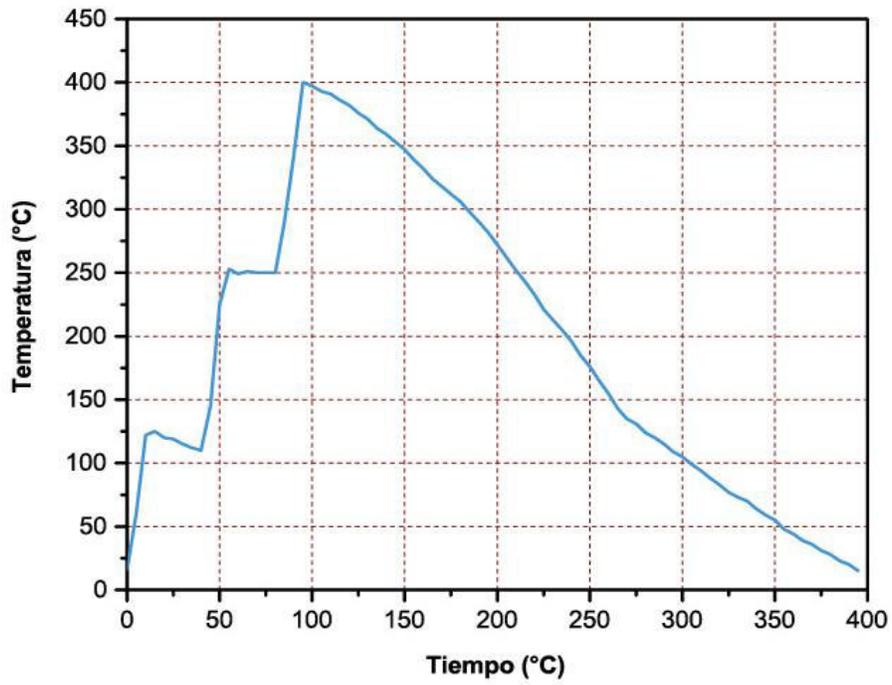
Proceso de carbonización de la prueba Q (muestra charmuelan) realizada dentro del horno de atmósfera controlada con gas argón.
(Fuente: Propia, 2021)

ANEXO III.3.



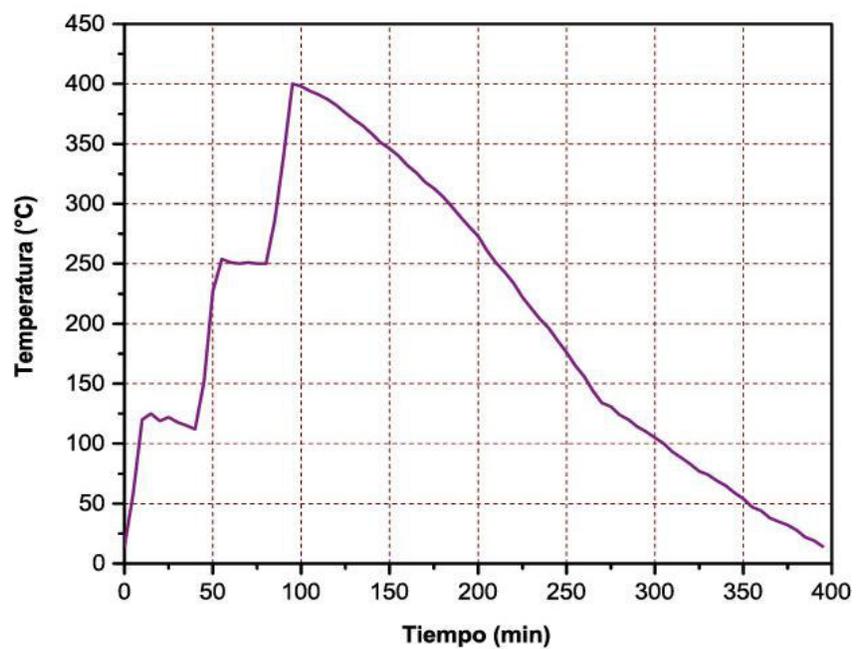
Proceso de carbonización de la prueba R (muestra cascarilla) realizada dentro del horno de atmósfera controlada con gas argón.
(Fuente: Propia, 2021)

ANEXO III.4.



Proceso de carbonización de la prueba S (muestra motilón) realizada dentro del horno de atmósfera controlada con gas argón.
(Fuente: Propia, 2021)

ANEXO III.5.

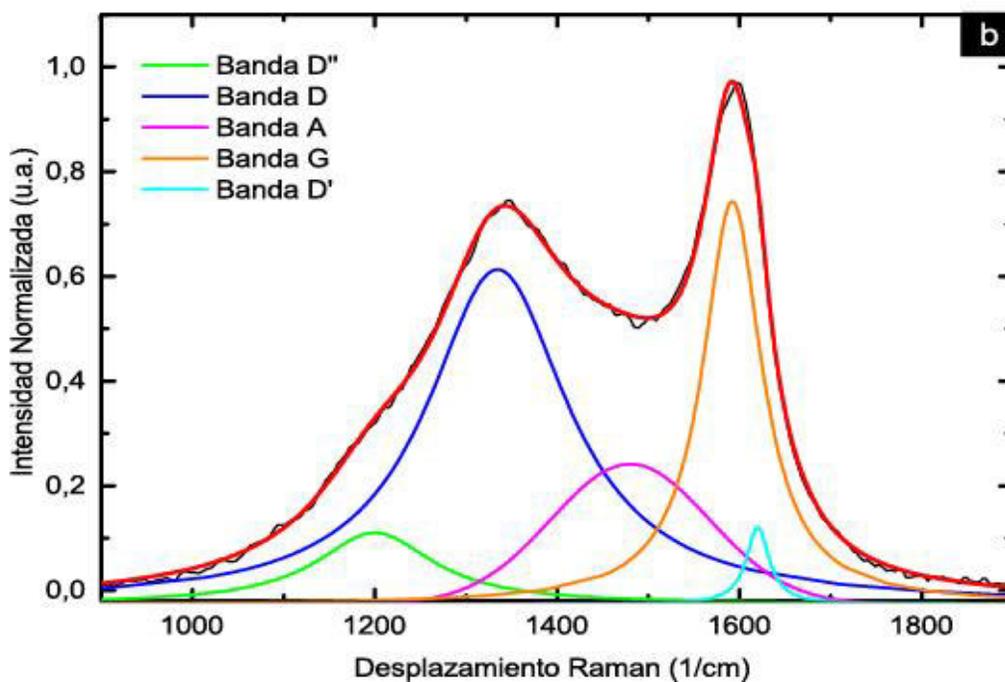
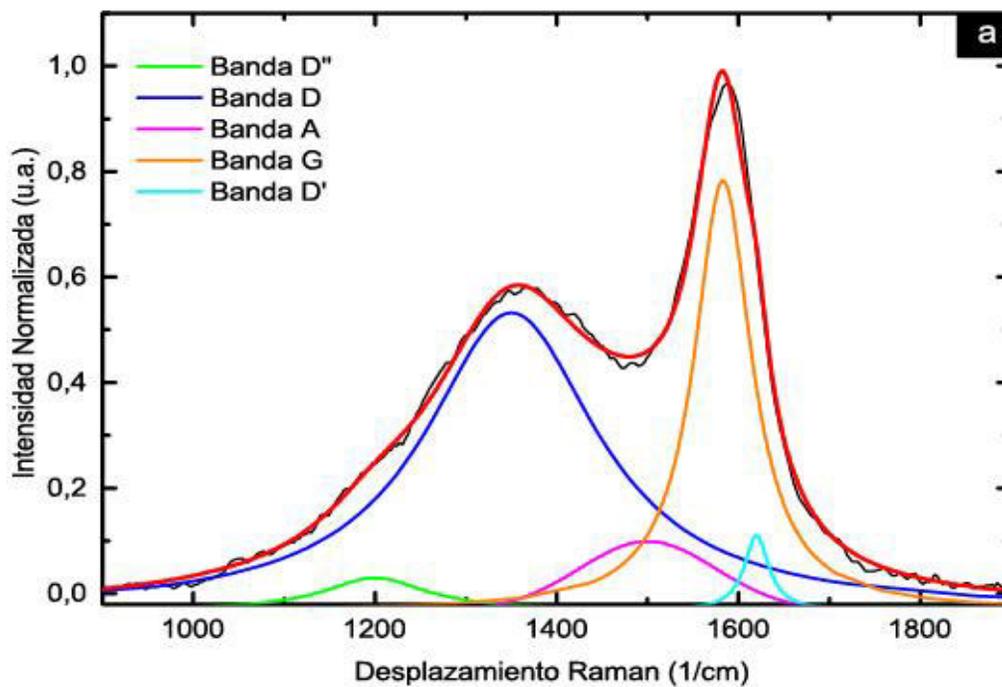


Proceso de carbonización de la prueba T (muestra pumamaqui) realizada dentro del horno de atmósfera controlada con gas argón.
(Fuente: Propia, 2021)

ANEXO IV.

ESPECTROS, CURVAS DE AJUSTE Y DECONVOLUCIÓN DE BANDAS DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS EN EL HORNO Y DE FORMA TRADICIONAL

ANEXO IV.1.

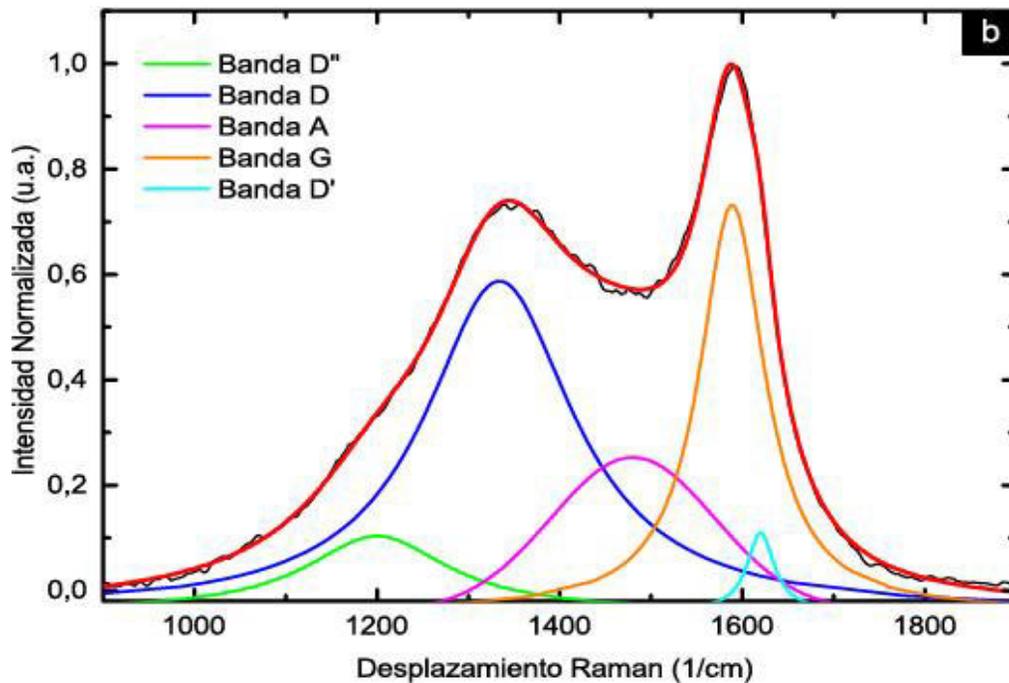
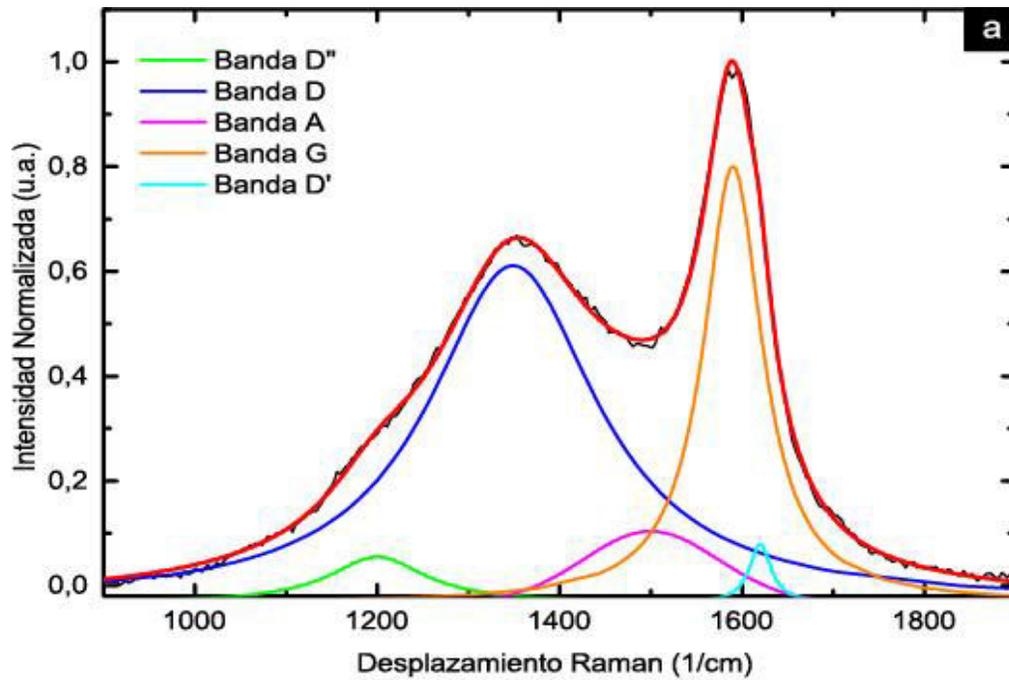


(a) Espectro resultante, curva de ajuste y deconvolución de bandas de la muestra de carbón vegetal (motilón) obtenida en el horno de atmósfera controlada con gas argón.

(b) Espectro resultante, curva de ajuste y deconvolución de bandas de la muestra de carbón vegetal (motilón T) producida de forma tradicional.

(Fuente: Propia, 2021)

ANEXO IV.2.

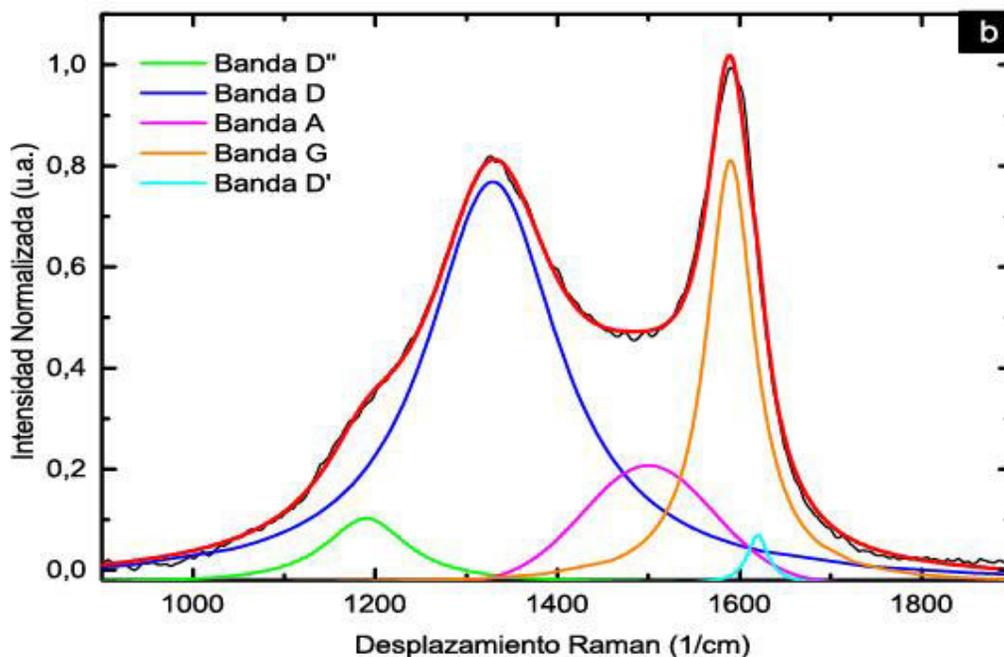
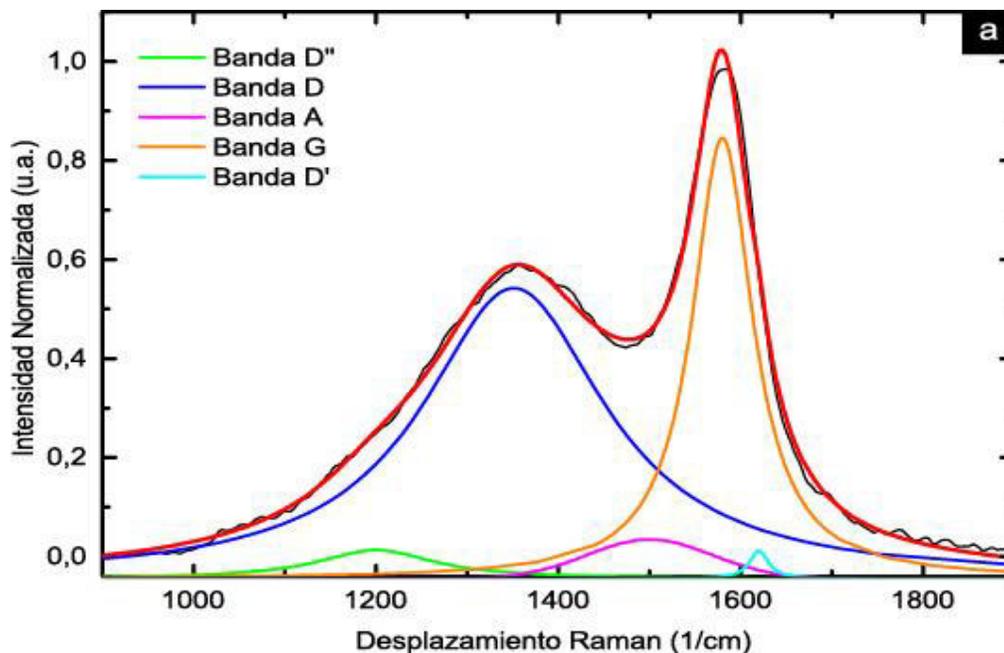


(a) Espectro resultante, curva de ajuste y deconvolución de bandas de la muestra de carbón vegetal (pumamaqui) obtenida en el horno de atmósfera controlada con gas argón.

(b) Espectro resultante, curva de ajuste y deconvolución de bandas de la muestra de carbón vegetal (pumamaqui T) producida de forma tradicional.

(Fuente: Propia, 2021)

ANEXO IV.3.

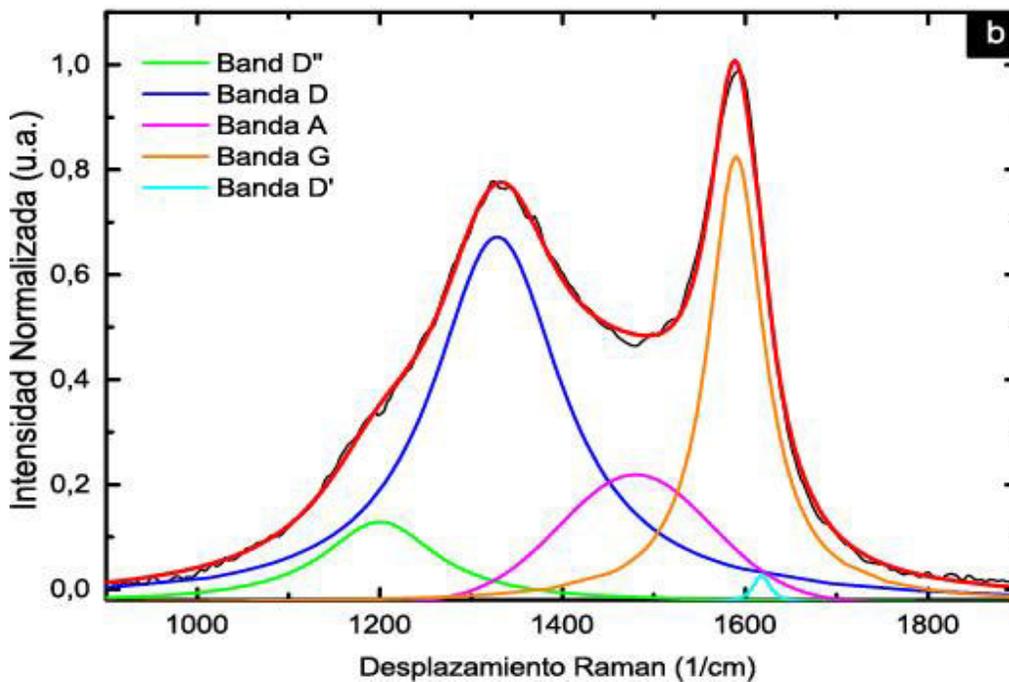
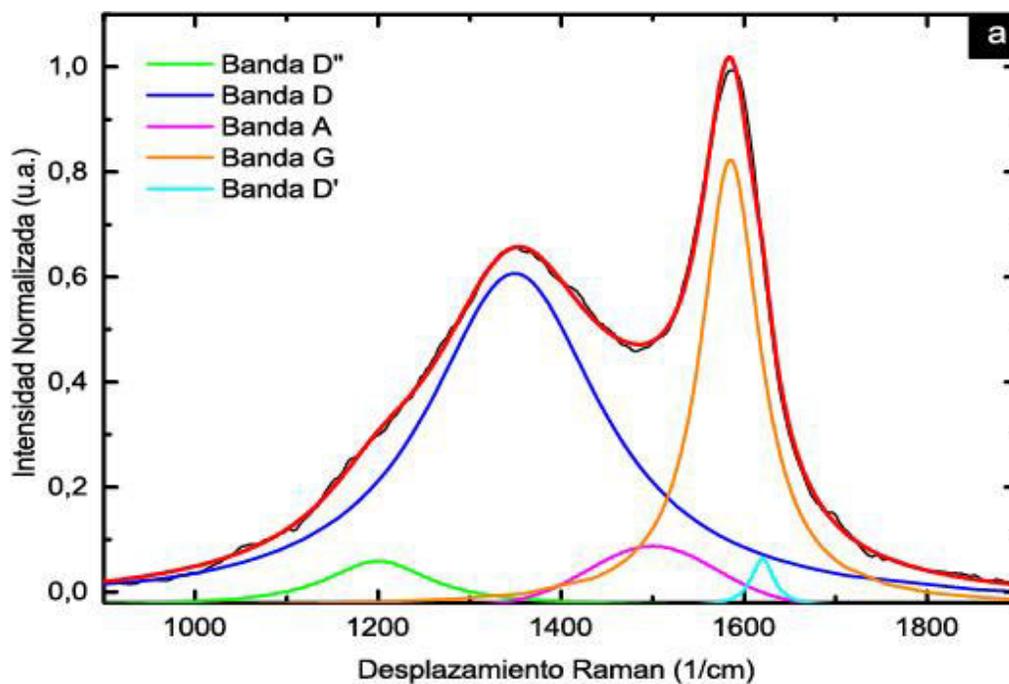


(a) Espectro resultante, curva de ajuste y deconvolución de bandas de la muestra de carbón vegetal (palo rosa) obtenida en el horno de atmósfera controlada con gas argón.

(b) Espectro resultante, curva de ajuste y deconvolución de bandas de la muestra de carbón vegetal (palo rosa T) producida de forma tradicional.

(Fuente: Propia, 2021)

ANEXO IV.4.

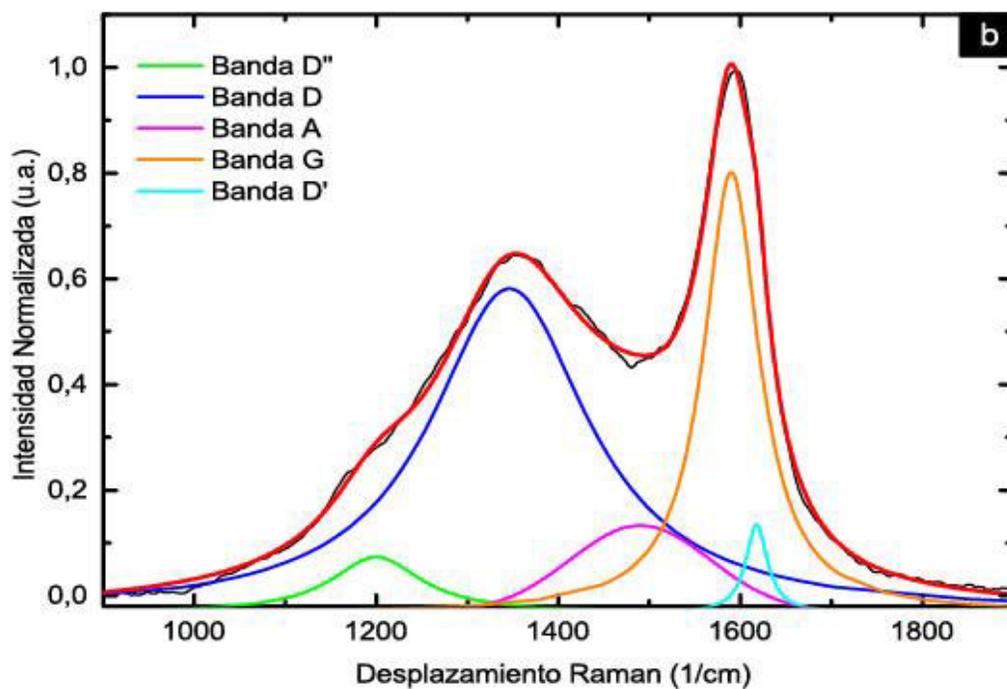
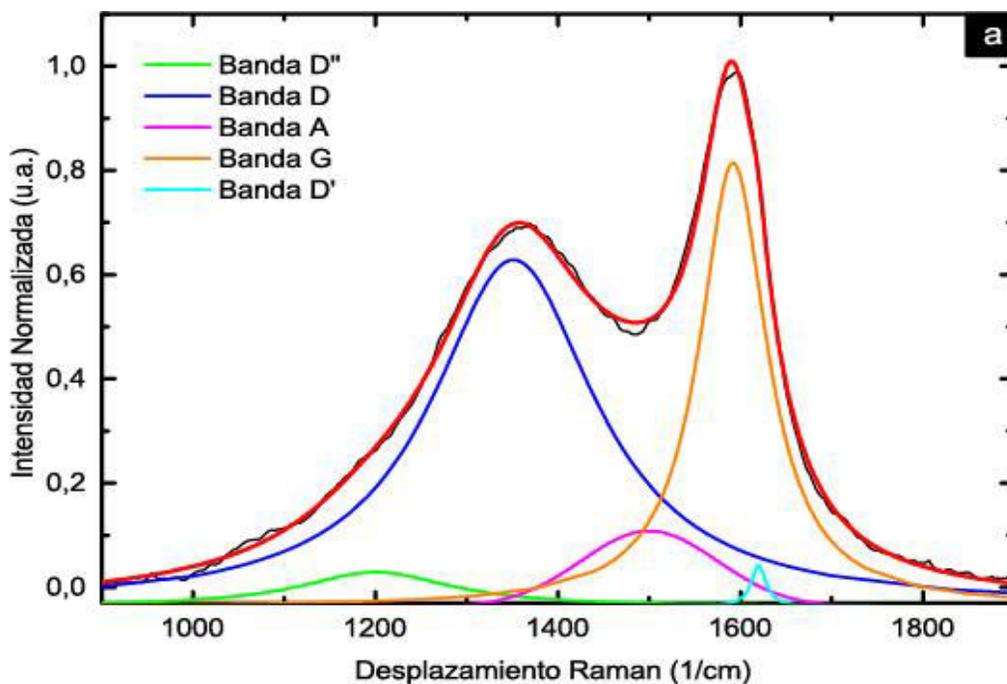


(a) Espectro resultante, curva de ajuste y deconvolución de bandas de la muestra de carbón vegetal (charmuelan) obtenida en el horno de atmósfera controlada con gas argón.

(b) Espectro resultante, curva de ajuste y deconvolución de bandas de la muestra de carbón vegetal (charmuelan T) producida de forma tradicional.

(Fuente: Propia, 2021)

ANEXO IV.5.



(a) Espectro resultante, curva de ajuste y deconvolución de bandas de la muestra de carbón vegetal (cascarilla) obtenida en el horno de atmósfera controlada con gas argón.

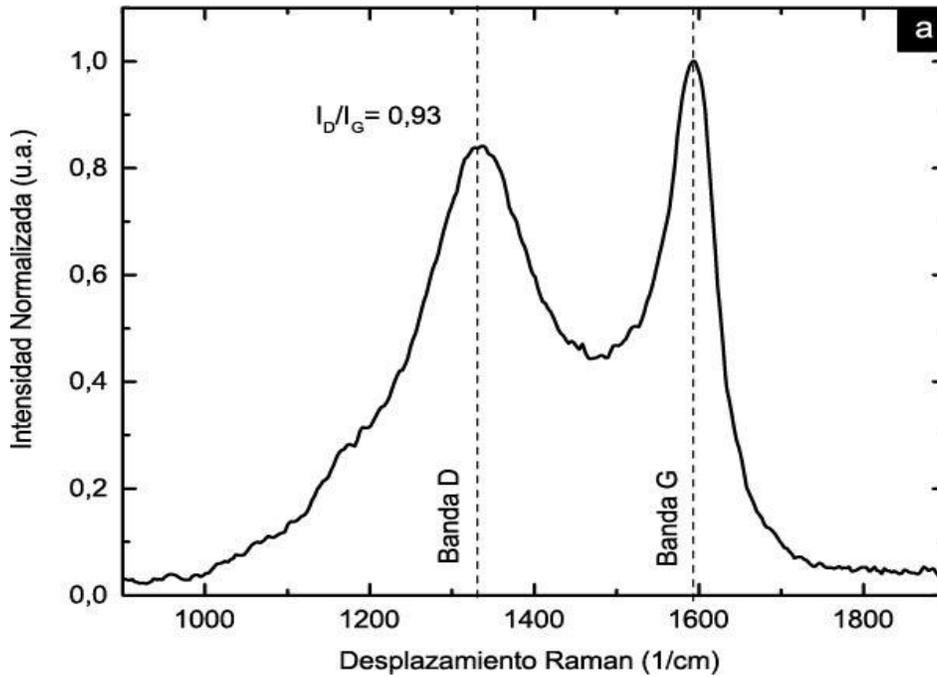
(b) Espectro resultante, curva de ajuste y deconvolución de bandas de la muestra de carbón vegetal (cascarilla T) producida de forma tradicional.

(Fuente: Propia, 2021)

ANEXO V.

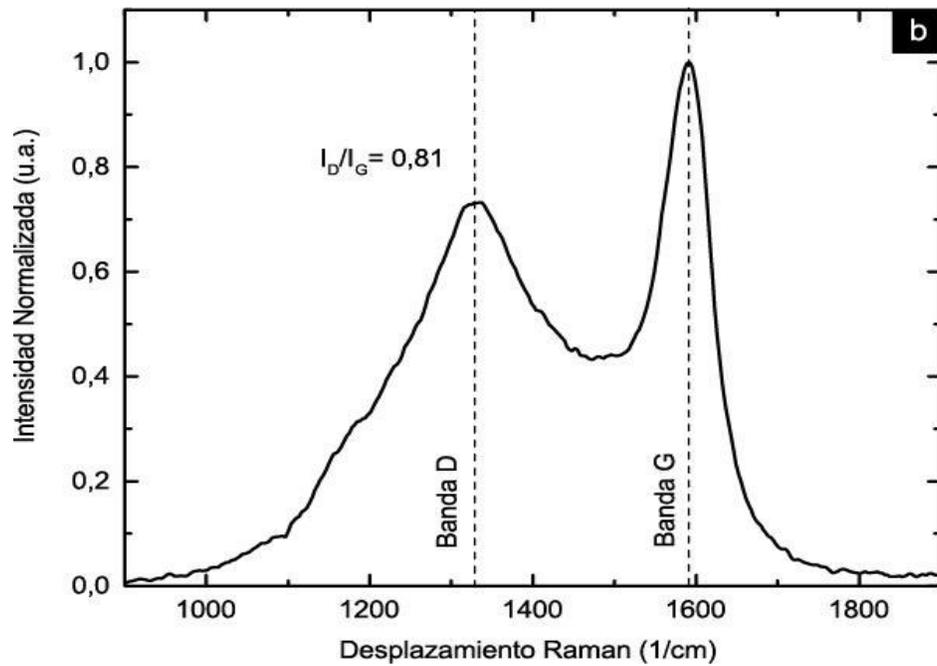
ESPECTROS RESULTANTES DE LAS MUESTRAS DE CARBÓN VEGETAL RECOLECTADAS

ANEXO V.1.



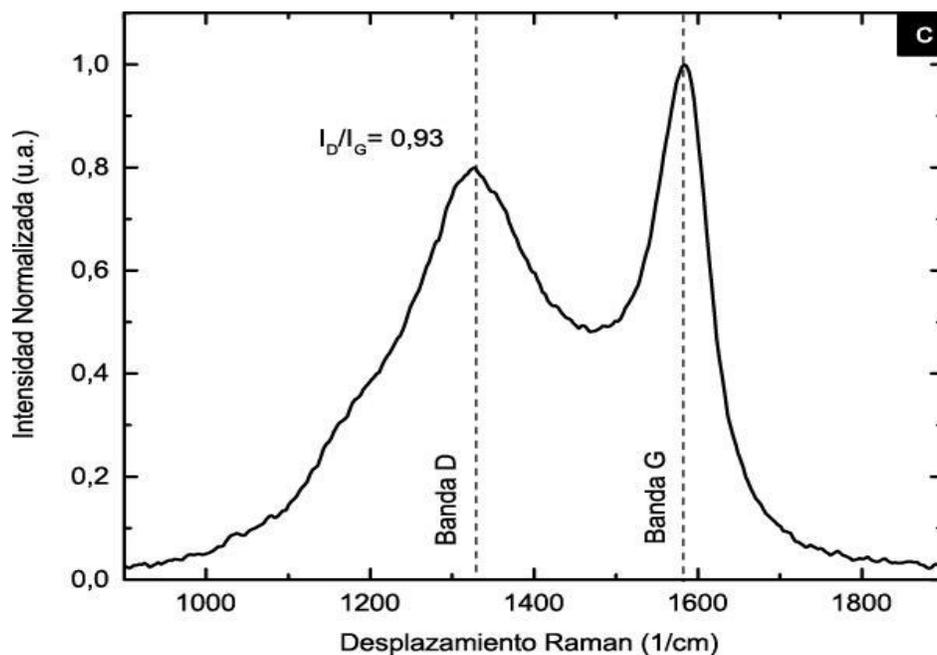
Espectro resultante de la primera muestra de carbón vegetal recolectada al azar en un diferente punto de la ciudad de Quito.
(Fuente: Propia, 2021)

ANEXO V.2.



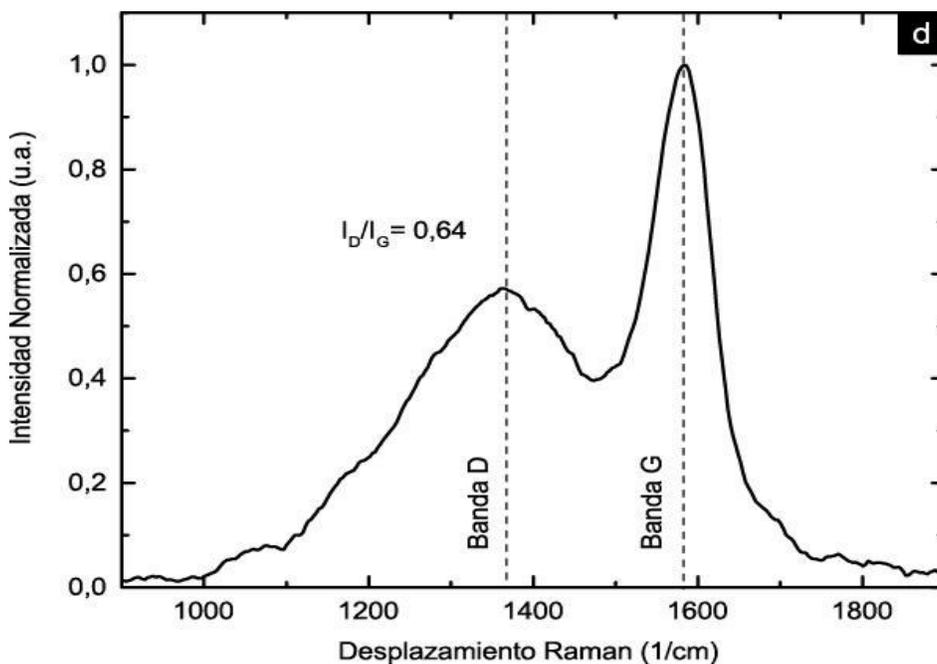
Espectro resultante de la segunda muestra de carbón vegetal recolectada al azar en un diferente punto de la ciudad de Quito.
(Fuente: Propia, 2021)

ANEXO V.3.



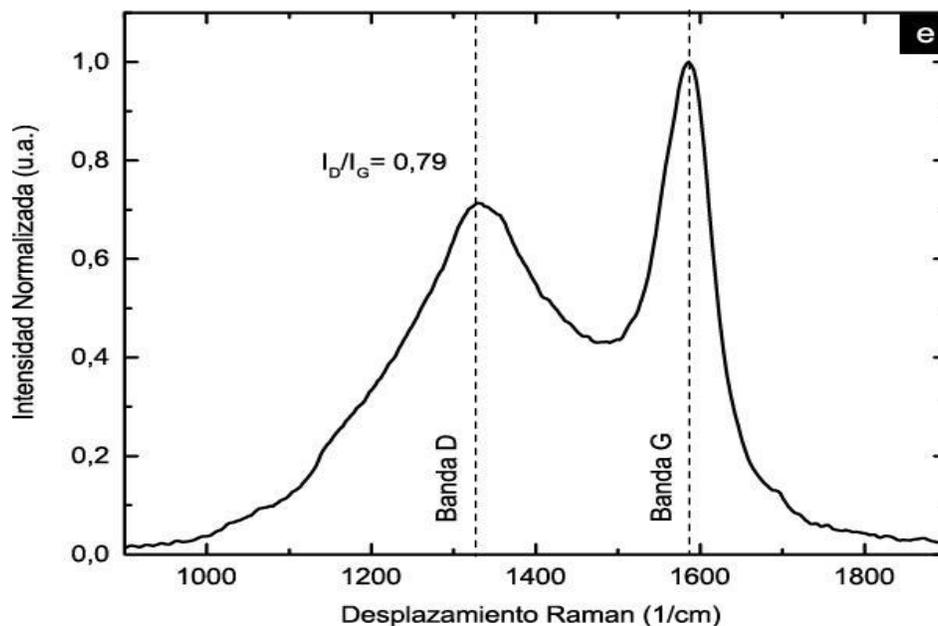
Espectro resultante de la tercera muestra de carbón vegetal recolectada al azar en un diferente punto de la ciudad de Quito.
(Fuente: Propia, 2021)

ANEXO V.4.



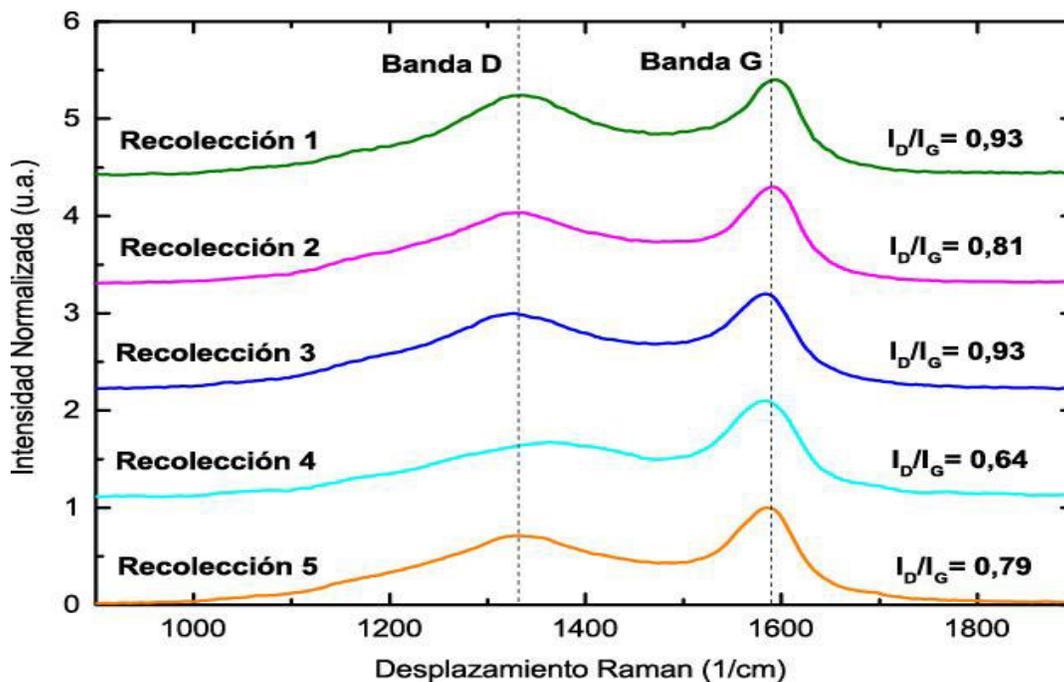
Espectro resultante de la cuarta muestra de carbón vegetal recolectada al azar en un diferente punto de la ciudad de Quito.
(Fuente: Propia, 2021)

ANEXO V.5.



Espectro resultante de la quinta muestra de carbón vegetal recolectada al azar en un diferente punto de la ciudad de Quito.
(Fuente: Propia, 2021)

ANEXO V.6.

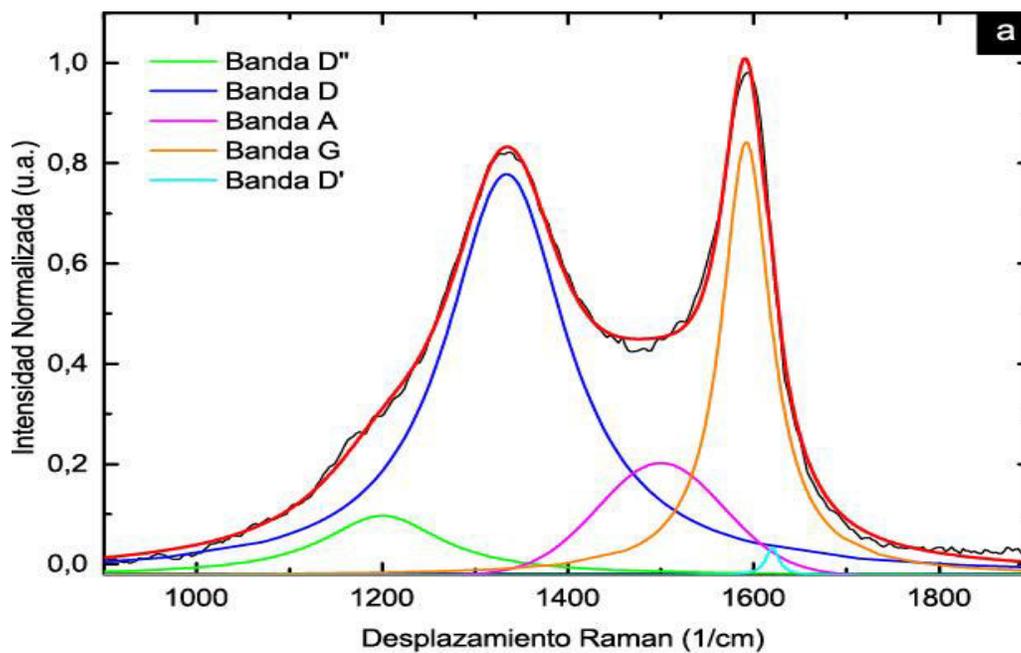


Espectros resultantes por espectroscopía Raman de las cinco muestras de carbón vegetal recolectadas en diferentes puntos de la ciudad de Quito
(Fuente: Propia, 2021)

ANEXO VI.

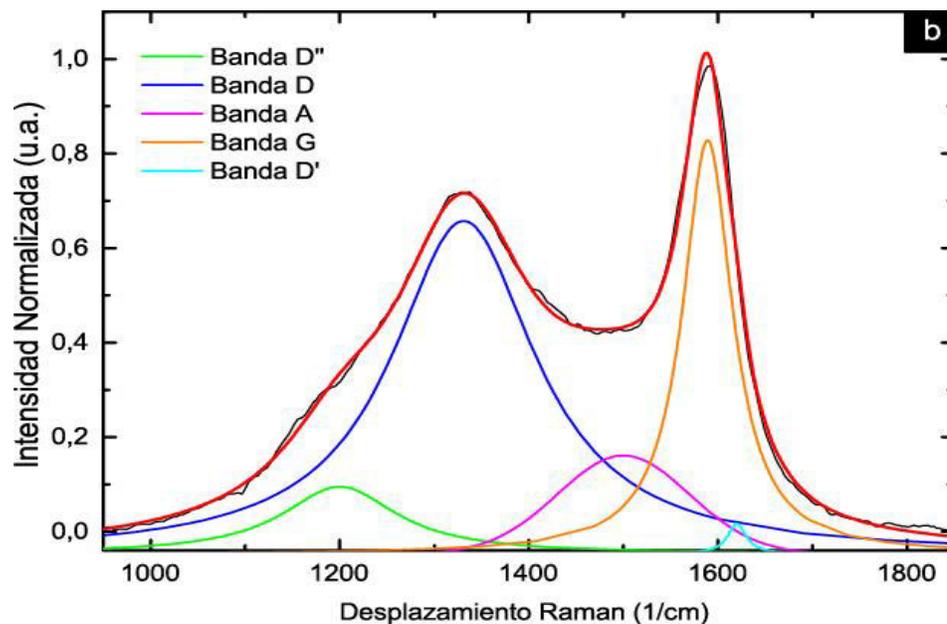
ESPECTROS, CURVAS DE AJUSTE Y DECONVOLUCIÓN DE BANDAS DE LAS MUESTRAS DE CARBÓN VEGETAL RECOLECTADAS

ANEXO VI.1.



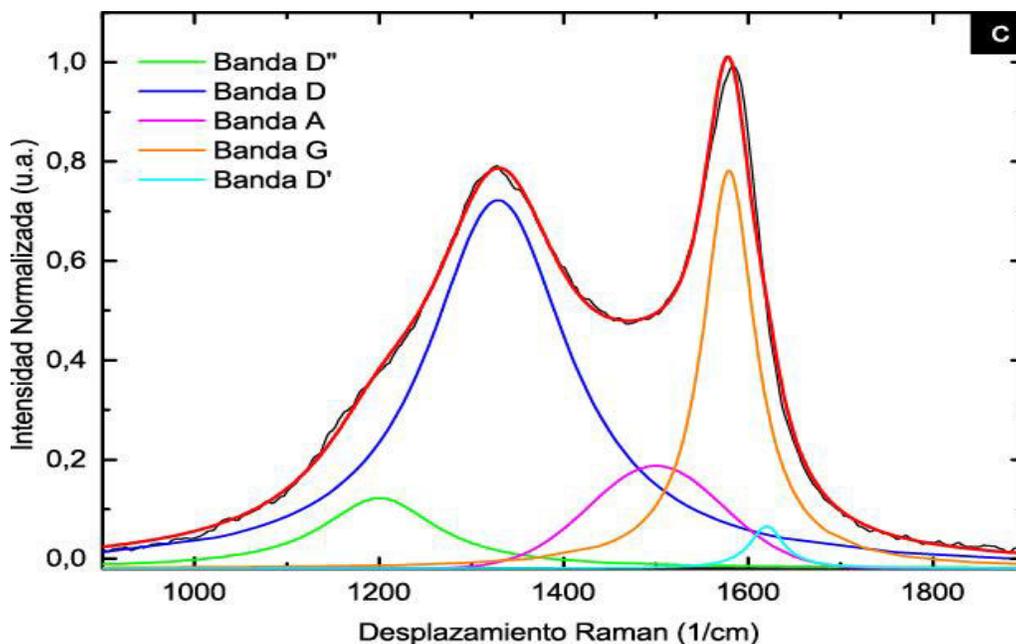
Espectro, curva de ajuste y deconvolución de bandas de la primera muestra de carbón vegetal recolectada al azar en un diferente punto de la ciudad de Quito.
(Fuente: Propia, 2021)

ANEXO VI.2.



Espectro, curva de ajuste y deconvolución de bandas de la segunda muestra de carbón vegetal recolectada al azar en un diferente punto de la ciudad de Quito.
(Fuente: Propia, 2021)

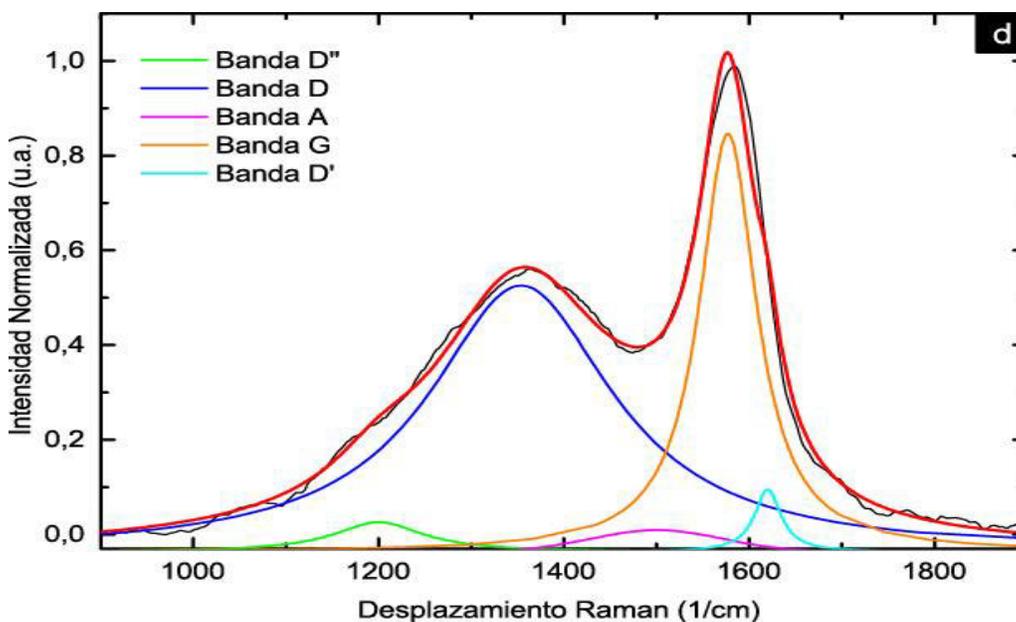
ANEXO VI.3.



Espectro, curva de ajuste y deconvolución de bandas de la tercera muestra de carbón vegetal recolectada al azar en un diferente punto de la ciudad de Quito.

(Fuente: Propia, 2021)

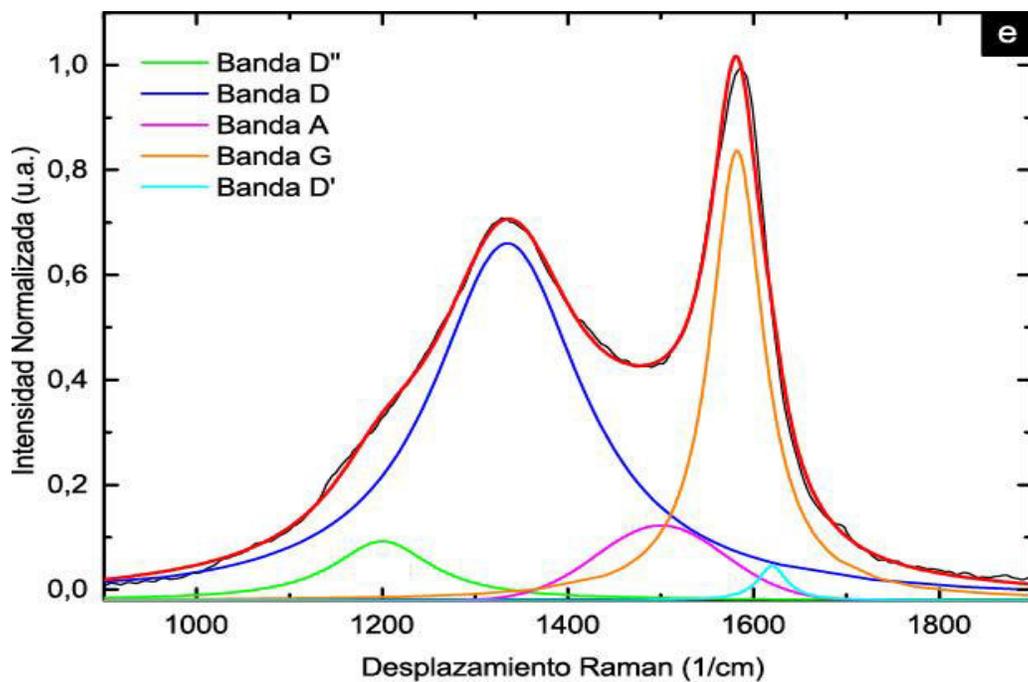
ANEXO VI.4.



Espectro, curva de ajuste y deconvolución de bandas de la cuarta muestra de carbón vegetal recolectada al azar en un diferente punto de la ciudad de Quito.

(Fuente: Propia, 2021)

ANEXO VI.5.

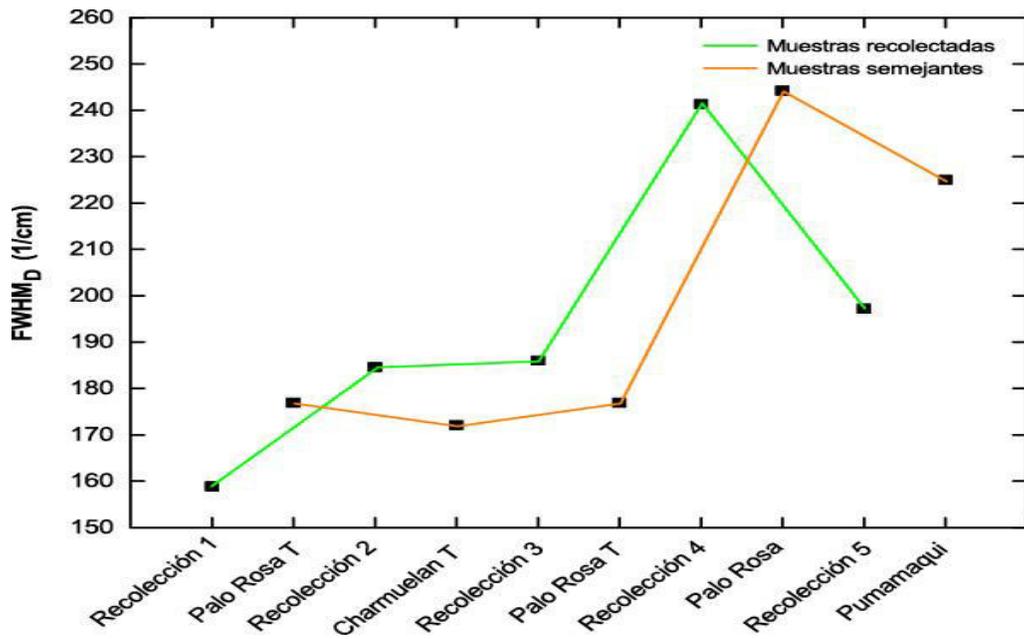


Espectro, curva de ajuste y deconvolución de bandas de la quinta muestra de carbón vegetal recolectada al azar en un diferente punto de la ciudad de Quito.
(Fuente: Propia, 2021)

ANEXO VII.

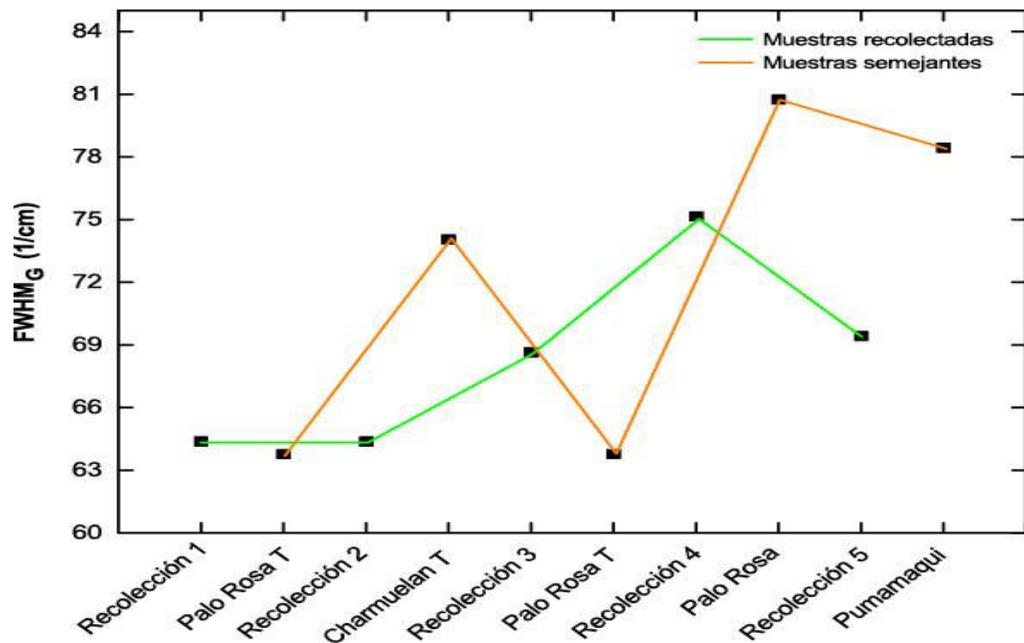
VARIACIÓN DE PARÁMETROS DE LAS MUESTRAS RECOLECTADAS Y DE SUS MUESTRAS MÁS SEMEJANTES

ANEXO VII.1.



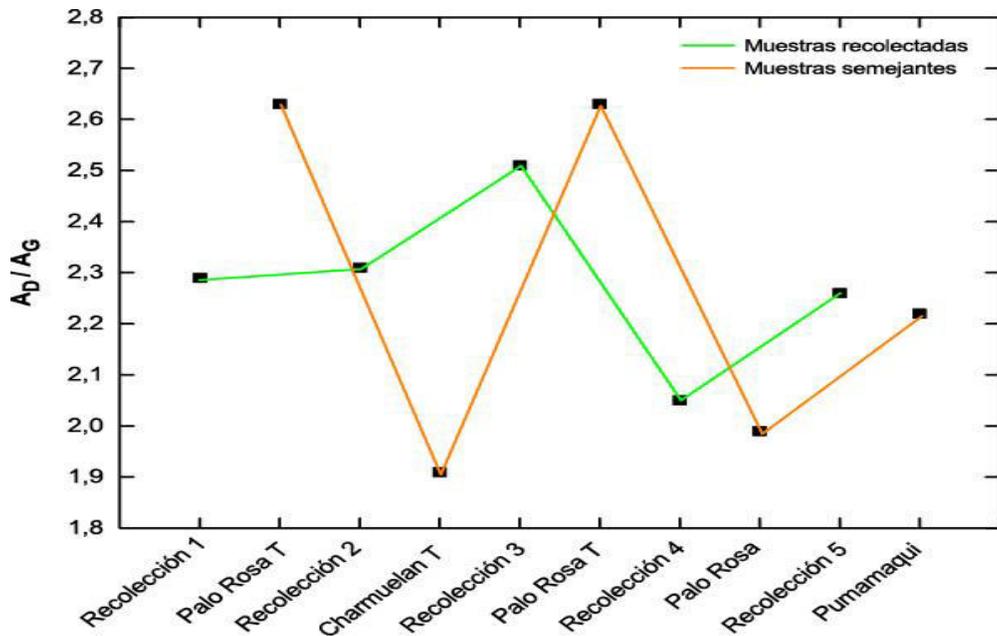
Variación del FWHM_D de las muestras recolectadas y de sus muestras más semejantes.
(Fuente: Propia, 2022)

ANEXO VII.2.



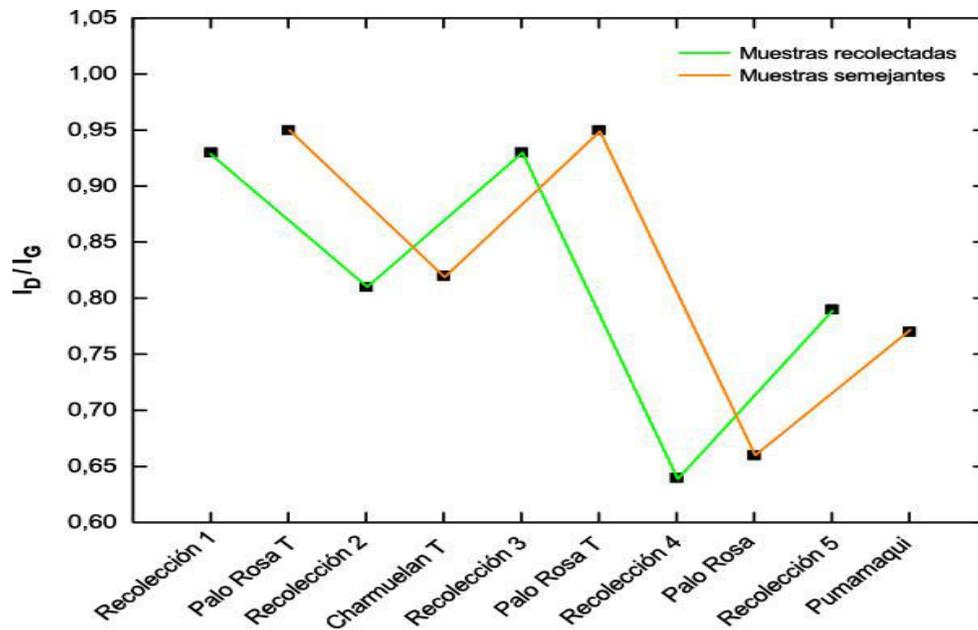
Variación del FWHM_G de las muestras recolectadas y de sus muestras más semejantes.
(Fuente: Propia, 2022)

ANEXO VII.3.



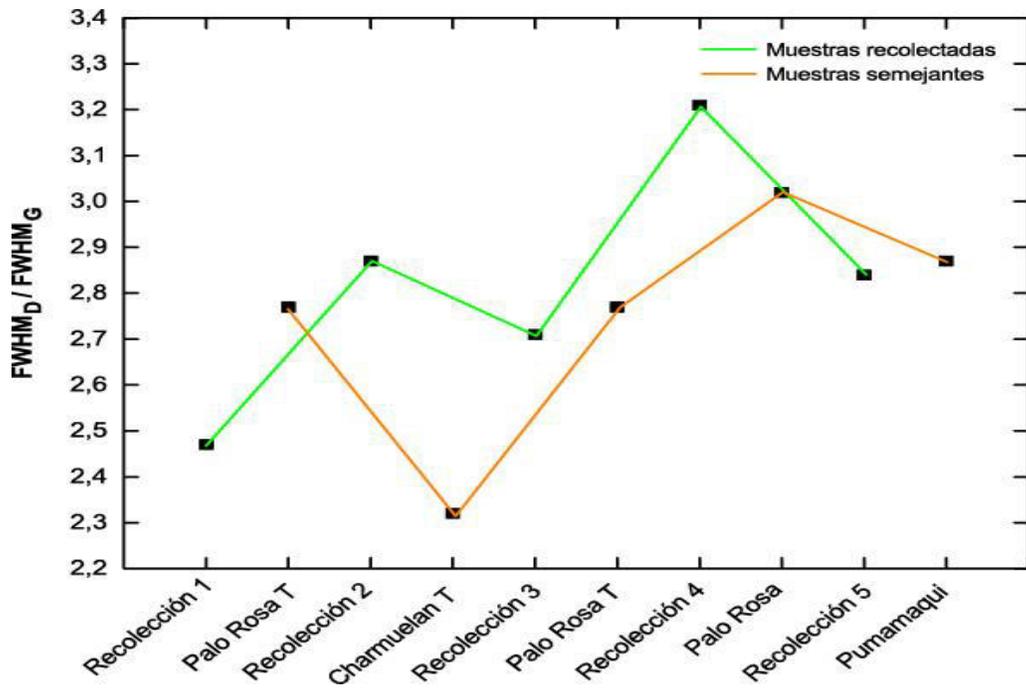
Variación de la relación AD/AG de las muestras recolectadas y de sus muestras más semejantes.
(Fuente: Propia, 2022)

ANEXO VII.4.



Variación de la relación ID/IG de las muestras recolectadas y de sus muestras más semejantes.
(Fuente: Propia, 2022)

ANEXO VII.5.



Variación de la relación del $FWHM_D / FWHM_G$ de las muestras obtenidas en el horno y de las muestras tradicionales.
(Fuente: Propia, 2022)

ANEXO VIII.

CARACTERÍSTICAS RAMAN DE LAS MUESTRAS DE CARBÓN VEGETAL RECOLECTADAS

Tabla de las características Raman de las cinco muestras de carbón vegetal recolectadas al azar en diferentes puntos de la ciudad.

Muestra	Parámetro	D''	D	A	G	D'	I _D /I _G	I _D /I _{D'}
Recolección 1	Posición (cm ⁻¹)	1200	1333,79	1500	1592	1620		
	FWHM (cm ⁻¹)	157,29	158,88	159,17	64,37	17,40		
	Área (u.a.)	29,41	199,75	37,97	87,38	1,48		
	Intensidad (u.a.)	0,119	0,800	---	0,864	0,054	0,93	14,81
Recolección 2	Posición (cm ⁻¹)	1200	1331,11	1500	1589	1620		
	FWHM (cm ⁻¹)	147,68	184,68	164,58	64,37	23,78		
	Área (u.a.)	32,94	204,25	36,40	88,45	2,37		
	Intensidad (u.a.)	0,142	0,704	---	0,874	0,063	0,81	11,17
Recolección 3	Posición (cm ⁻¹)	1200	1328,82	1500	1579	1620		
	FWHM (cm ⁻¹)	151,86	186,06	171,32	68,64	44,50		
	Área (u.a.)	33,85	216,82	37,75	86,40	5,96		
	Intensidad (u.a.)	0,141	0,741	---	0,801	0,085	0,93	8,72
Recolección 4	Posición (cm ⁻¹)	1200	1353,79	1500	1577	1620		
	FWHM (cm ⁻¹)	118,30	241,33	167,29	75,15	34,47		
	Área (u.a.)	11,59	213,06	8,15	104,16	7,13		
	Intensidad (u.a.)	0,062	0,562	---	0,882	0,131	0,64	4,29
Recolección 5	Posición (cm ⁻¹)	1200	1334,67	1500	1582	1620		
	FWHM (cm ⁻¹)	129,94	197,26	162,71	69,42	37,87		
	Área (u.a.)	23,12	211,08	24,83	93,53	3,94		
	Intensidad (u.a.)	0,113	0,681	---	0,857	0,066	0,79	10,32

(Fuente: Propia, 2021)

ANEXO IX.

COSTO DE LOS ELEMENTOS UTILIZADOS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL EQUIPO DE TRABAJO

Tabla de costos de los componentes empleados para la implementación del equipo de trabajo.

Parámetro	Cantidad	Costo
Carcasas metálicas externas	1	\$ 550,00
Estructura interna del horno	1	\$ 450,00
Bridas internas y externas	4	\$ 500,00
Zona de calentamiento	1	\$ 250,00
Tubo de cuarzo	1	\$ 328,00
Bomba de vacío	1	\$ 164,00
Suministro de gas	1	\$ 120,00
Válvula de aguja	2	\$ 110,00
O-rings	6	\$ 76,00
Caja del controlador de temperatura	1	\$ 30,00
Cerraduras	3	\$ 30,00
Regulador	1	\$ 20,00
Termocupla tipo K	1	\$ 15,00
Pernos	6	\$ 3,00
Arandelas	12	
Tuercas	6	
Mangueras	2	\$ 40,00
Acoples roscados	4	\$ 30,00
Cables para 220v	2	
Total		\$ 2.716,00

(Fuente: Propia, 2021)

ANEXO X.

ENCUESTA ACERCA DEL CONSUMO DE CARBÓN VEGETAL EN LA CIUDAD DE QUITO

ENCUESTA

Estimado usuario/a, la presente encuesta trata de una investigación sobre los antecedentes de consumo de carbón vegetal en la ciudad de Quito y su opinión acerca de una diferente manera de obtención del mismo. Estaría muy agradecido en contar con su amable atención por unos cuantos minutos de su tiempo llenando dicho documento. La información es confidencial y solo se utilizará con fines académicos. Gracias por su colaboración.

INSTRUCCIONES:

- Se debe encerrar en un círculo el literal de su respuesta.
- De ser el caso de su respuesta el literal donde la opción es "Otro", especifique de acuerdo a su criterio sobre los puntos suspensivos.

Sexo:

- a) Masculino
- b) Femenino

Edad:

PREGUNTAS:

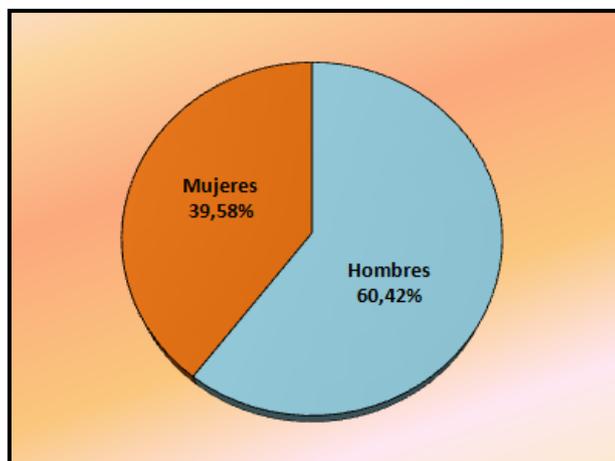
- 1) ¿Qué hábitos de consumo de alimentación tienen para los fines de semana y feriados?
 - a) Reunirse con familiares y/o amigos
 - b) Salir a comer en algún restaurante
 - c) Preparar comida en casa
 - d) Otro
(especifique).....
.....
- 2) ¿Le gustan los alimentos elaborados en parrilla? (si su respuesta es negativa, ya no hay necesidad de que siga contestando la encuesta. Gracias por su colaboración)
 - a) Si
 - b) No
- 3) ¿Usted en los últimos 6 meses ha preparado alimentos en la parrilla?
 - a) Si
 - b) No

- 4) ¿Utiliza carbón vegetal para encender su parrilla y preparar alimentos en la misma? (si su respuesta es negativa, ya no hay necesidad de que siga contestando la encuesta. Gracias por su colaboración)
- a) Si
 - b) No
- 5) ¿Qué cantidad de carbón vegetal compra para una parrillada con familia, amigos o uso personal?
- a) 1 kg
 - b) 1,5 kg
 - c) 2 kg
 - d) 3 kg
- 6) ¿En qué lugar logra conseguir con más frecuencia carbón vegetal?
- a) Centros comerciales, Supermaxi, Santa María
 - b) Mercados
 - c) Tiendas de barrio
 - d) Otro
(especifique).....
.....
- 7) ¿Con qué frecuencia compra carbón vegetal?
- a) 1 vez a la semana
 - b) 2 veces a la semana
 - c) 3 veces a la semana
 - d) 1 vez cada 2 semanas
 - e) 1 vez cada 3 semanas
 - f) 1 vez al mes
 - g) 2 veces al mes
 - h) 3 veces al mes
 - i) 1 vez cada 2 meses
 - j) 1 vez cada 3 meses
 - k) 1 vez cada 6 meses
 - l) 1 vez al año
 - m) Otro
(especifique).....
.....
- 8) ¿Le gustaría contar en el mercado con un carbón artificial con las mismas características y propiedades que el carbón tradicional, con la diferencia que no afectaría al medio ambiente?
- a) Si les gustaría
 - b) Posiblemente les gustaría
 - c) Probablemente no les gustaría
 - d) No les gustaría

ANEXO XI.

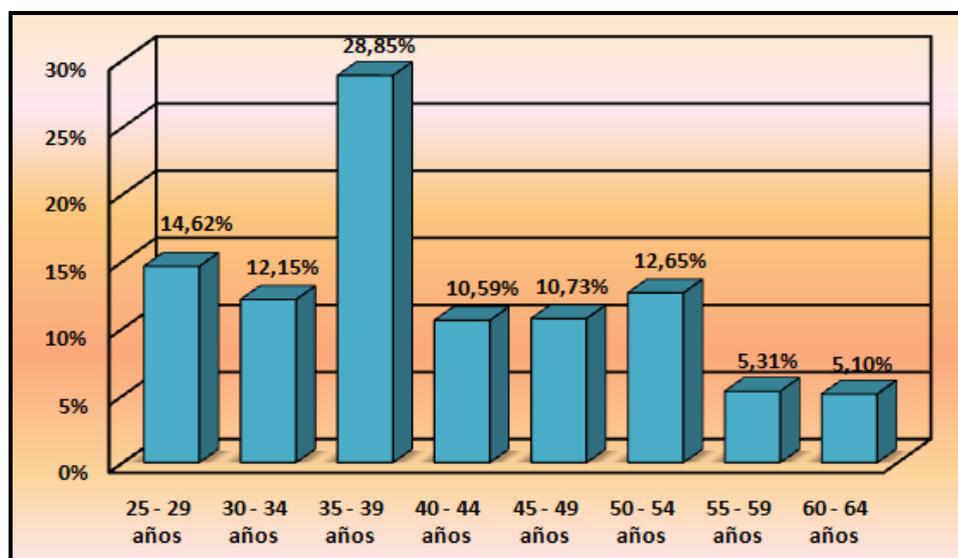
RESULTADOS DE LAS ENCUESTAS REALIZADAS

Se desarrollaron un total de 384 encuestas a mediados del mes de noviembre del 2020 en diferentes puntos de la ciudad de Quito, de las cuales 232 la respondieron hombres, equivalente al 60,42%, mientras que los 152 restantes equivalen al 39,58% que fueron respondidas por mujeres.



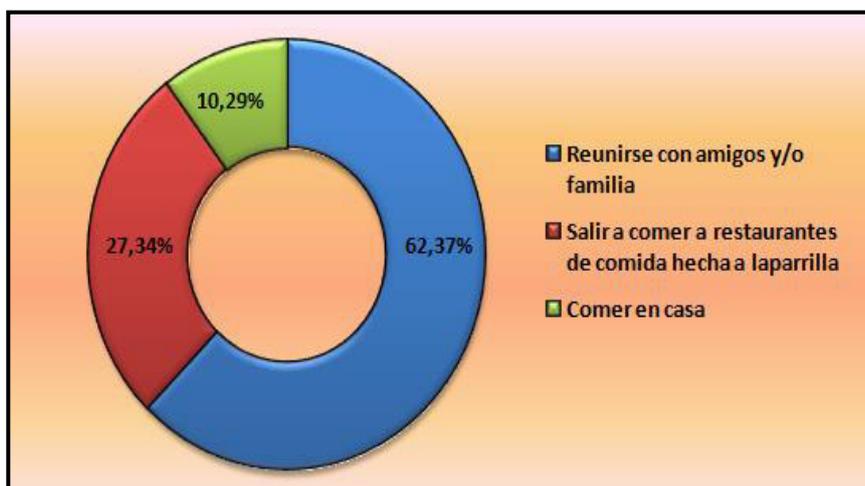
Porcentaje de género de personas que contestaron la encuesta.
(Fuente: Propia, 2020)

- Con respecto a la edad de los encuestados que colaboraron con el desarrollo de las preguntas, el 14,62% corresponde a personas entre 25 y 29 años; el 12,15% está entre 30 y 34 años; el 28,85% se encuentra entre 35 y 39 años; el 10,59% pertenece a las edades de 40 a 44 años; el 10,73% corresponde a personas entre 45 y 49 años; el 12,65% está en edades de 50 a 54 años. Finalmente, las personas entre 55 y 59 años de edad pertenecen al 5,31% del total de encuestados y el 5,10% a edades entre 60 y 64.



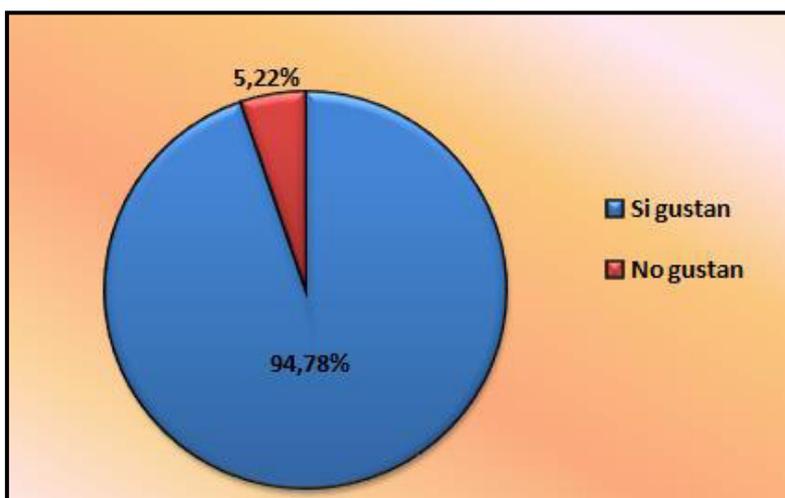
Rango de edades de las personas en contestar la encuesta.
(Fuente: Propia, 2020)

En cuanto a los hábitos de consumo de alimentación preparados en la parrilla con carbón durante los fines de semana y feriados, el 62,37% pronunció que acostumbra a reunirse con amigos y/o familia, el 27,34% manifestaron que en esos días salen a comer en restaurante de comida hecha a la parrilla, mientras que el 10,29% prefiere comer en casa.



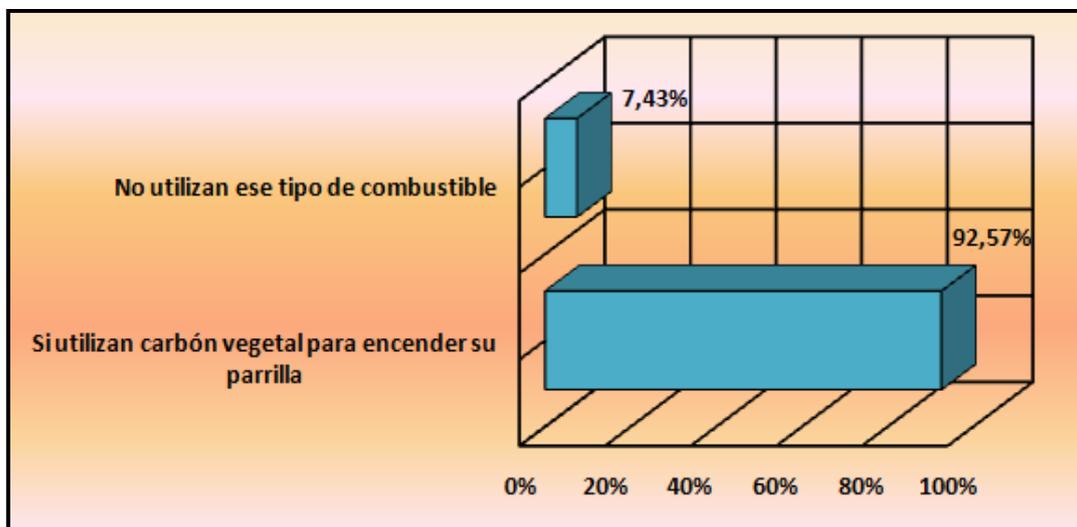
Hábitos de consumo de alimentación durante los fines de semana y feriados.
(Fuente: Propia, 2020)

El 94,78% de las encuestas tuvieron una acogida positiva en que si les gustan los alimentos cocinados en parrilla y solamente el 5,22% manifestaron que no les gusta ese tipo de alimentos.



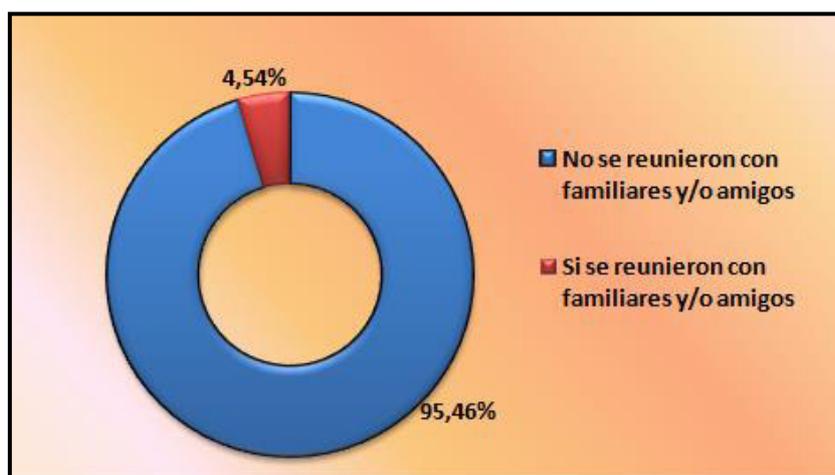
Gusto de las personas por alimentos hechos a la parrilla.
(Fuente: Propia, 2020)

El 92,57% de los encuestados dio una respuesta favorable a que utilizan carbón vegetal para encender su parrilla y el 7,43% respondieron que no utilizan este combustible.



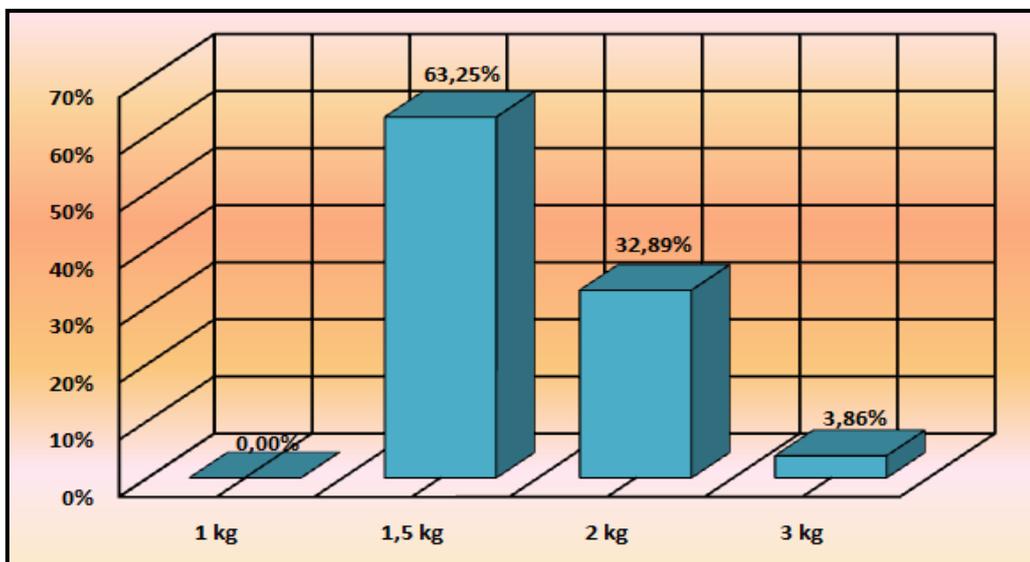
Utilización de carbón vegetal para encender la parrilla.
(Fuente: Propia, 2020)

El 95,46% de los encuestados manifestaron que por tema de emergencia sanitaria no se reunieron en los últimos 6 meses con familiares y/o amigos para preparar alimentos en la parrilla, pero que en otros tiempos si lo hacían con bastante frecuencia. Mientras que el 4,54% si realizó algún tipo de asado o parrillada en los últimos meses.



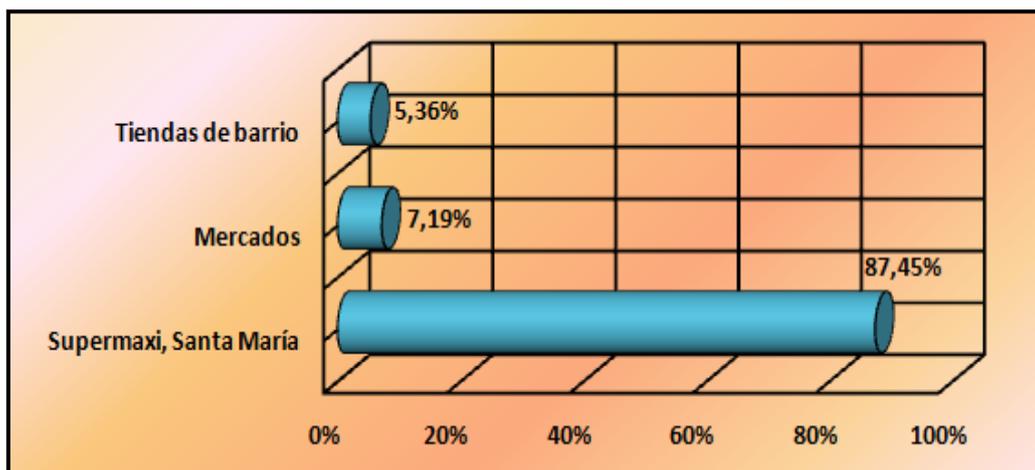
Preparación de alimentos a la parrilla en los últimos 6 meses.
(Fuente: Propia, 2020)

Considerando la funda que se comercializa al público, se consultó la cantidad de carbón que adquieren para realizar un asado o parrillada. El 63,25% de los participantes compra 1,5 kilogramos, el 32,89% compra 2 kilogramos, mientras que solo el 3,86% compra 3 kilogramos.



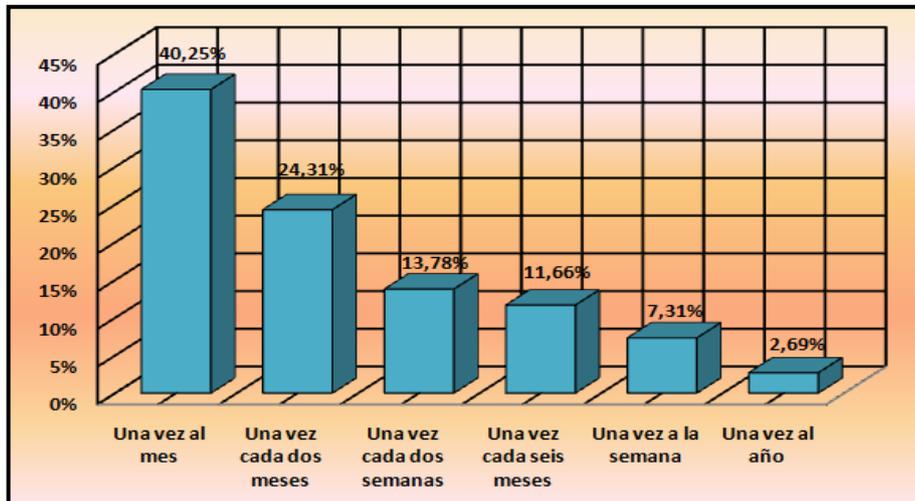
Cantidad de carbón que adquieren para realizar un asado.
(Fuente: Propia, 2020)

Teniendo en cuenta al lugar donde las personas logran conseguir carbón vegetal, el 87,45% lo hacen en centros comerciales, Supermaxi o Santa María, el 7,19% en mercados y el 5,36% en tiendas de barrio.



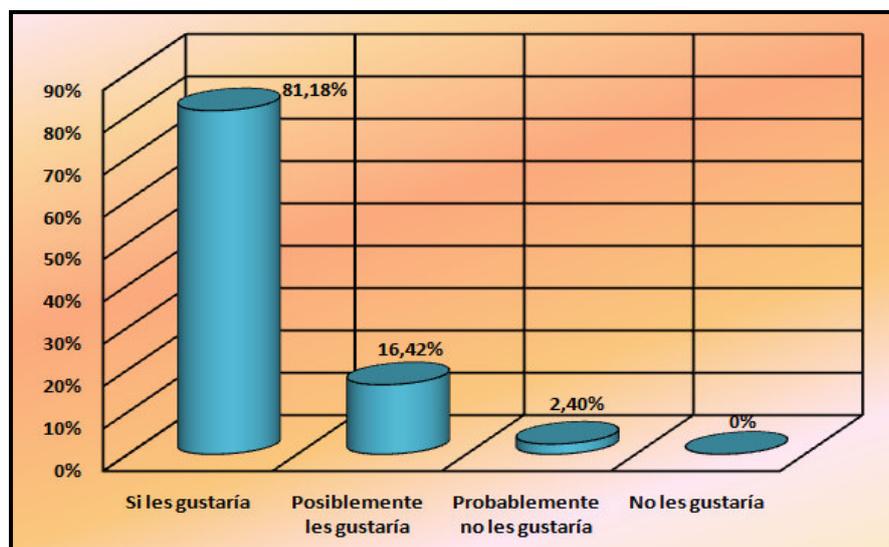
Lugares donde se adquiere carbón vegetal.
(Fuente: Propia, 2020)

Con respecto a la frecuencia de las personas que compran carbón vegetal, se tiene que el 40,25% compra una vez al mes. El 24,31% adquiere una vez cada dos meses, el 13,78% lo hace una vez cada dos semanas, el 11,66% una vez cada seis meses, el 7,31% una vez a la semana y el 2,69% una vez al año.



Frecuencia con la que las personas compran carbón vegetal.
(Fuente: Propia, 2020)

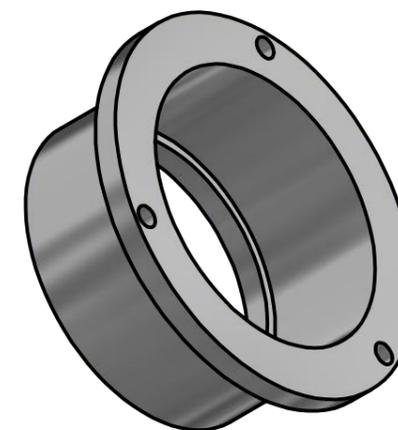
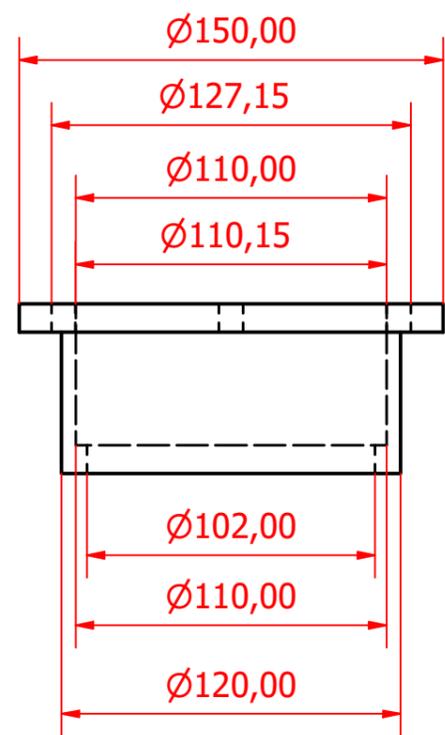
Finalmente, se tocó el punto de qué tan beneficioso ven los compradores al obtener un carbón artificial con las mismas características y propiedades que el carbón tradicional. El nivel de aceptación por parte de los encuestados sobre un carbón artificial fue de 81,18% si les gustaría, el 16,42% respondieron que posiblemente les gustaría, y al 2,40% probablemente no les gustaría. Ningún encuestado manifestó que no le gustaría en lo absoluto.



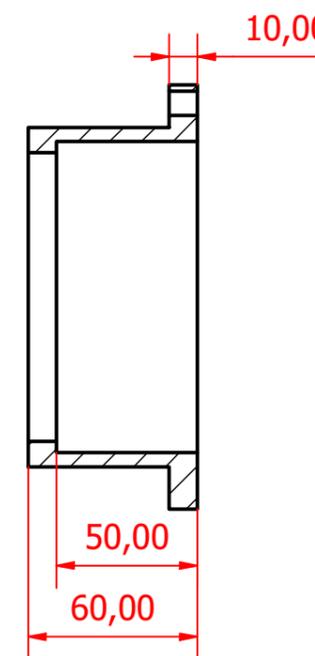
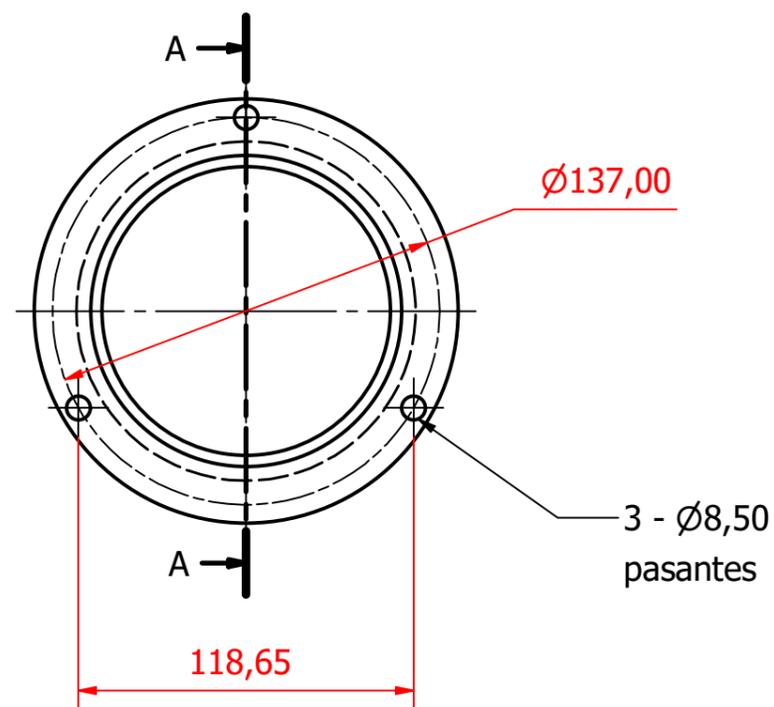
Nivel de aceptación de un carbón artificial.
(Fuente: Propia, 2020)

ANEXO XII.

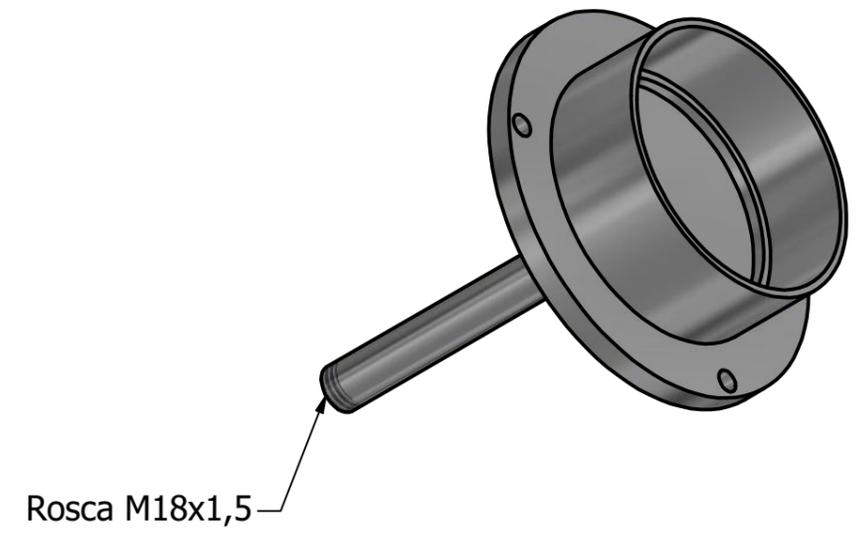
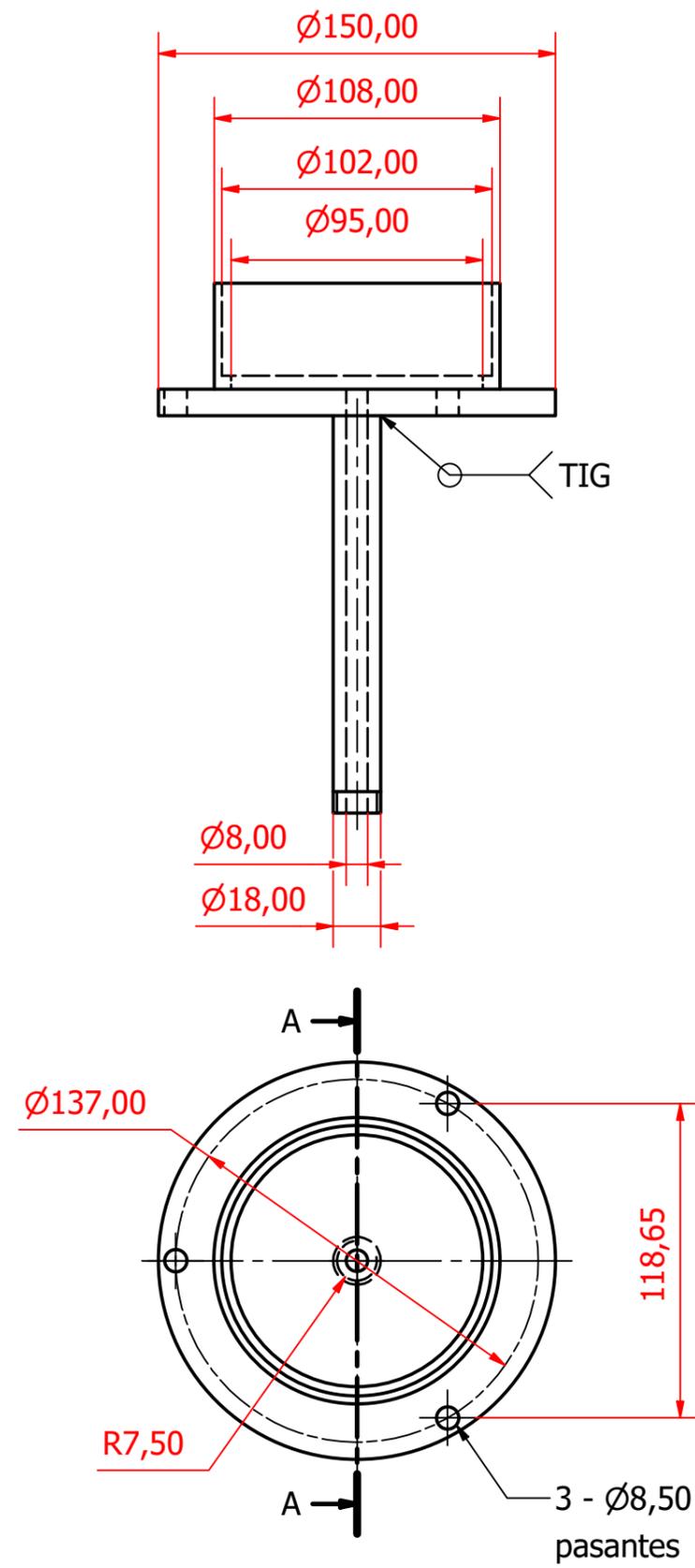
PLANOS DEL HORNO Y COMPONENTES



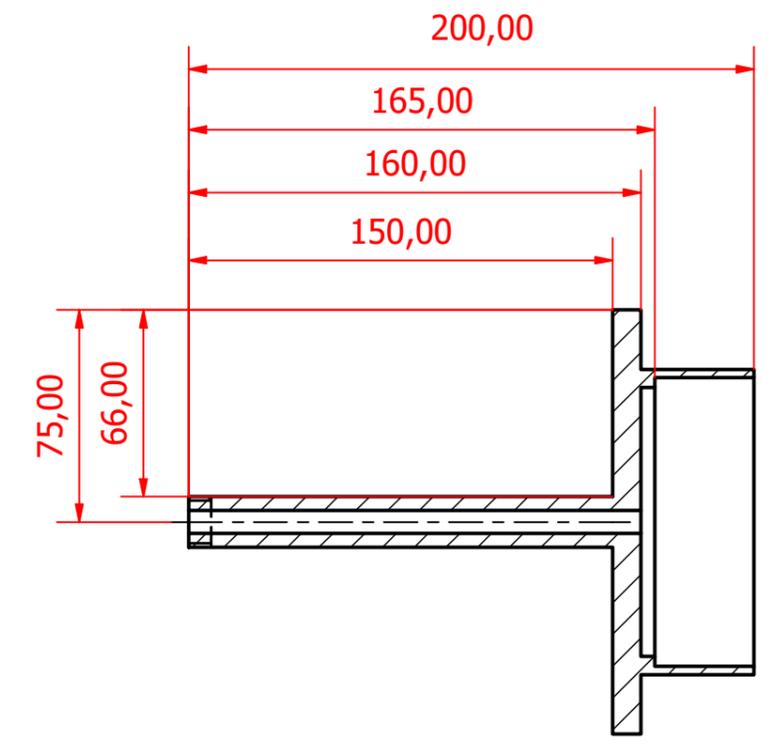
CORTE A-A



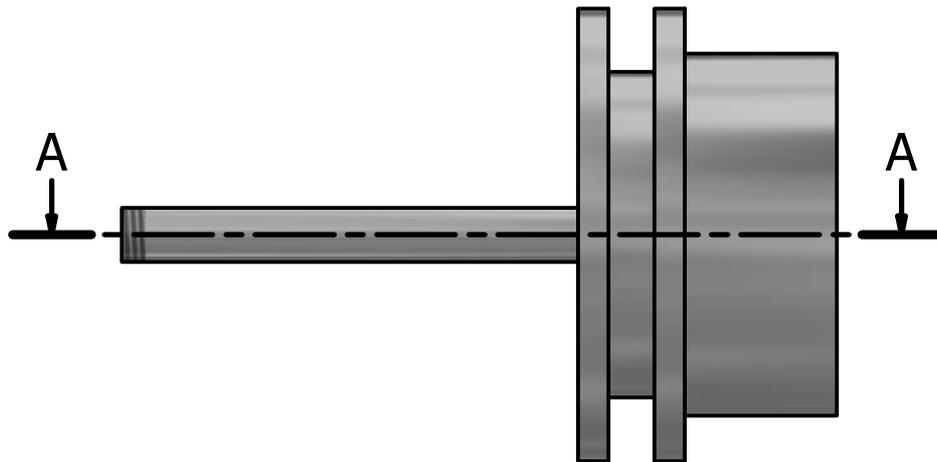
Trat. Térmico	Ninguno	EPN	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA		
Recubrimiento	Ninguno		Dib.	Kevin Andrade	
MATERIAL:		Escala: 1:2.5	Dis.	Kevin Andrade	
ACERO INOXIDABLE 304			Tol. Gral. ± 0.0005	Rev.	Dr. Fernando Pantoja
BRIDA INTERNA			FIM-KAAM-100-101		FECHA: 12/11/2021



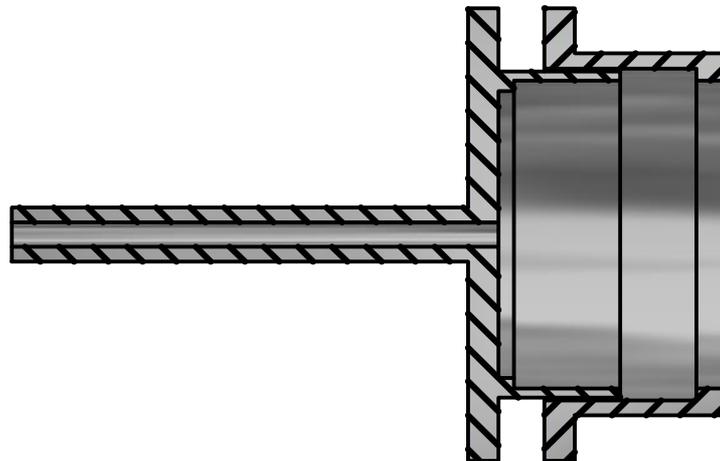
CORTE A-A



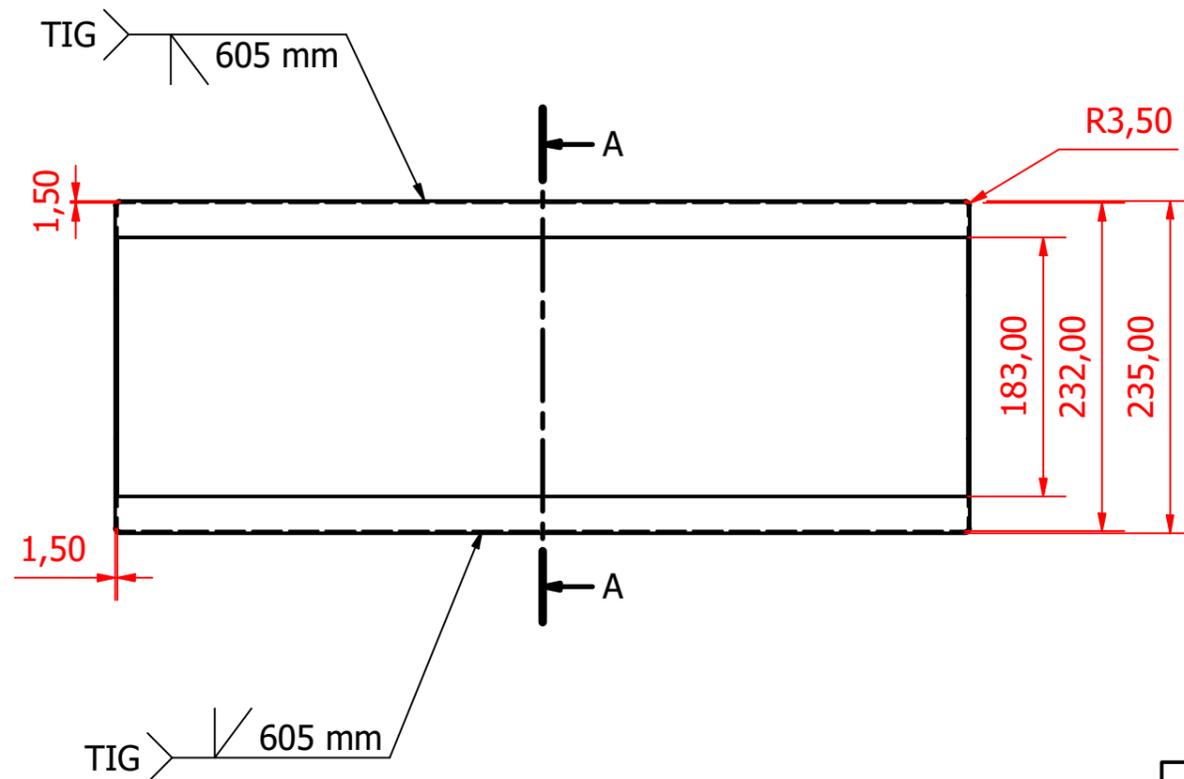
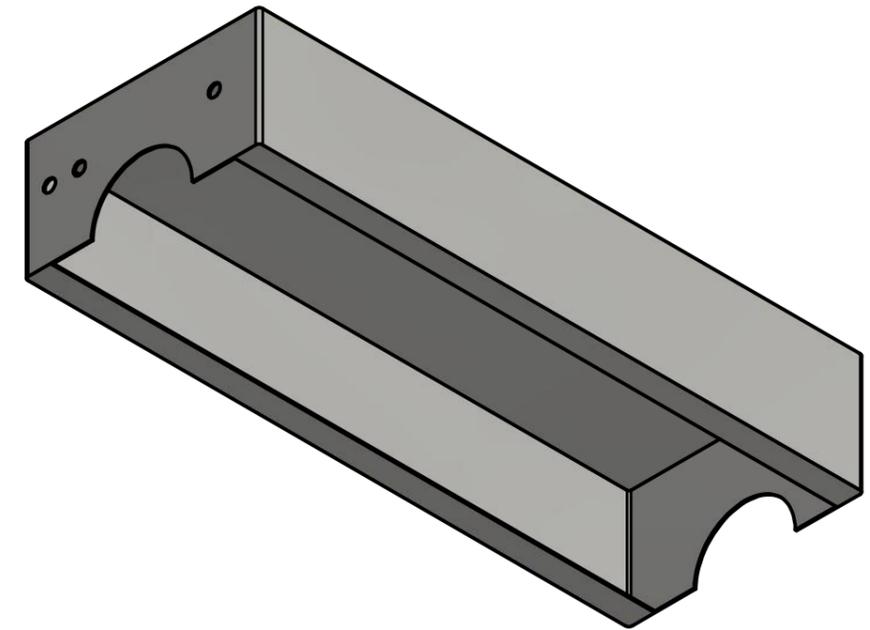
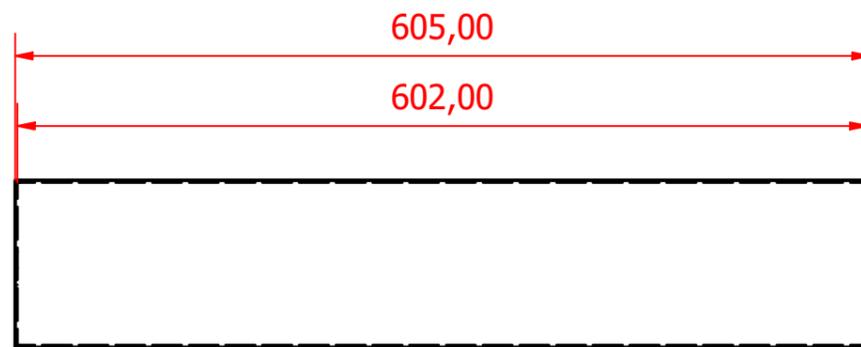
Trat. Térmico	Ninguno	EPN	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA		
Recubrimiento	Ninguno		Dib.	Kevin Andrade	
MATERIAL:		Tol. Gral. ± 0.02	Escala:	Dis.	Kevin Andrade
ACERO INOXIDABLE 304			1:2.5	Rev.	Dr. Fernando Pantoja
BRIDA EXTERNA			FIM-KAAM-100-102		FECHA: 12/11/2021



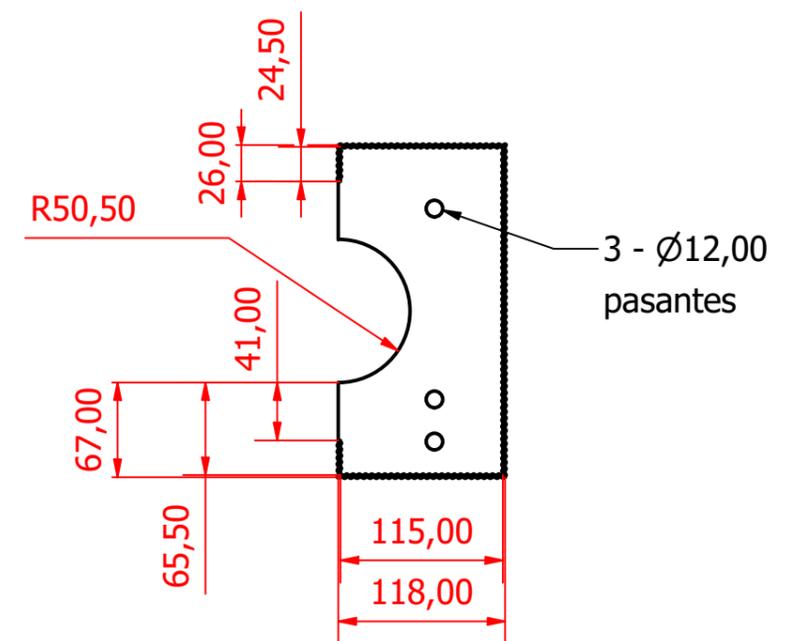
CORTE A-A



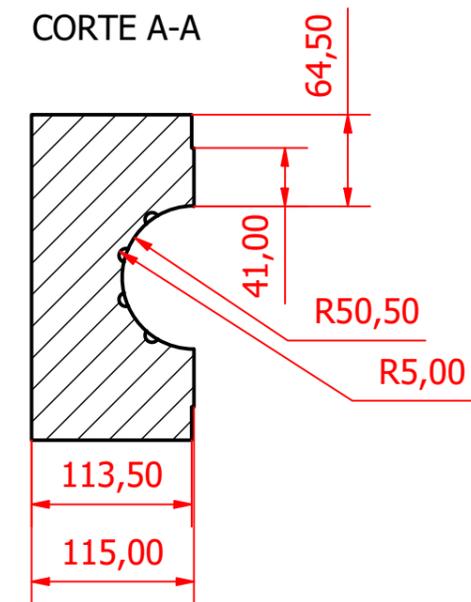
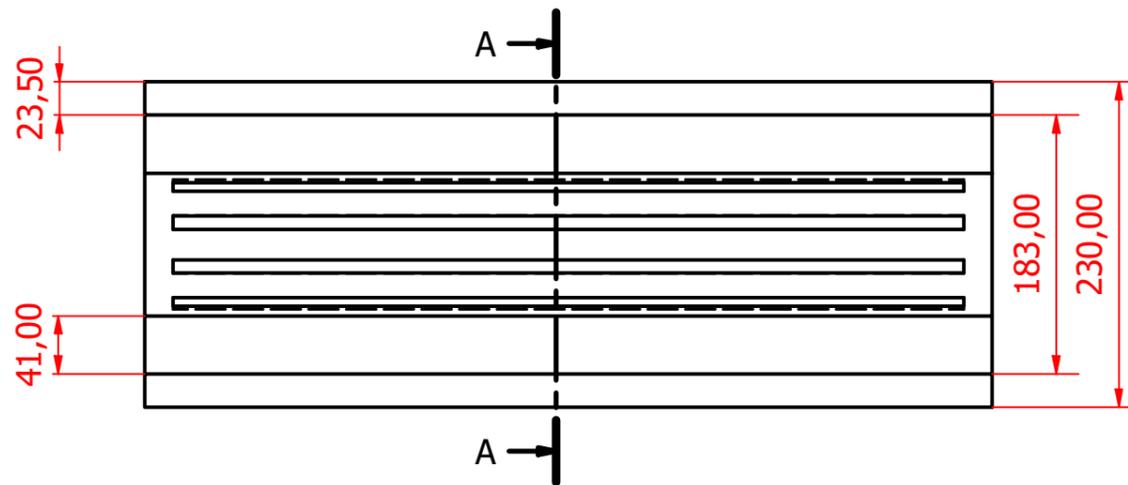
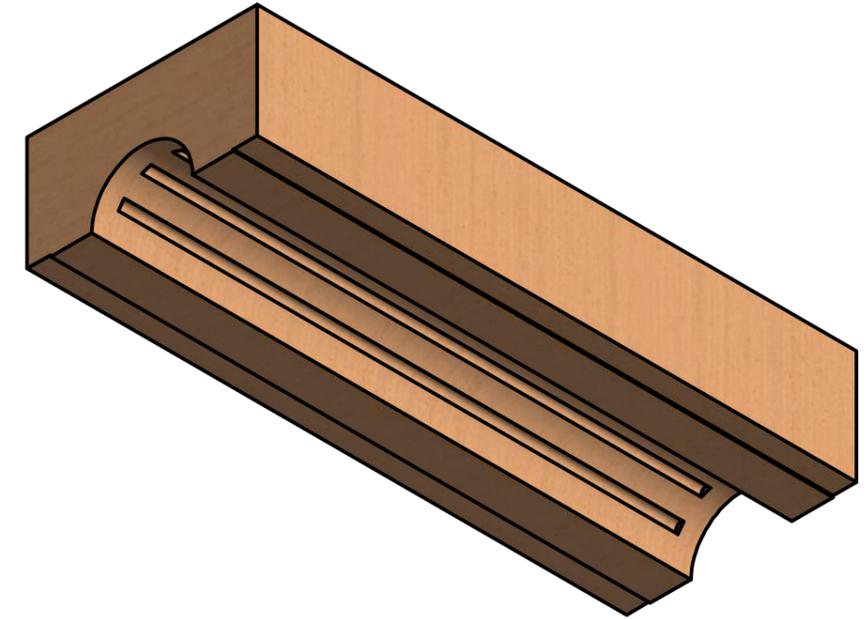
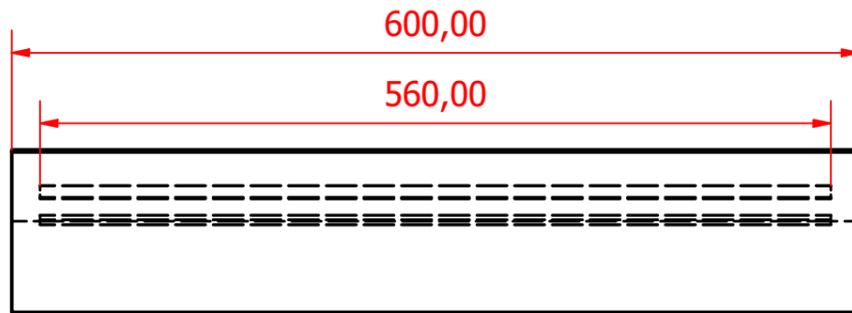
Trat. Térmico	Ninguno	EPN	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA		
Recubrimiento	Ninguno		Dib.	Kevin Andrade	
MATERIAL: ACERO INOXIDABLE 304		Tol. Gral. ± 0.02	Escala: 1:2.5	Dis.	Kevin Andrade
				Rev.	Dr. Fernando Pantoja
ENSAMBLAJE BRIDAS		FIM-KAAM-001		FECHA: 12/11/2021	



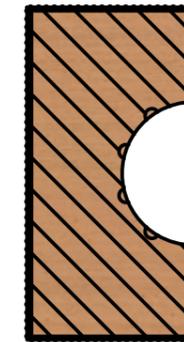
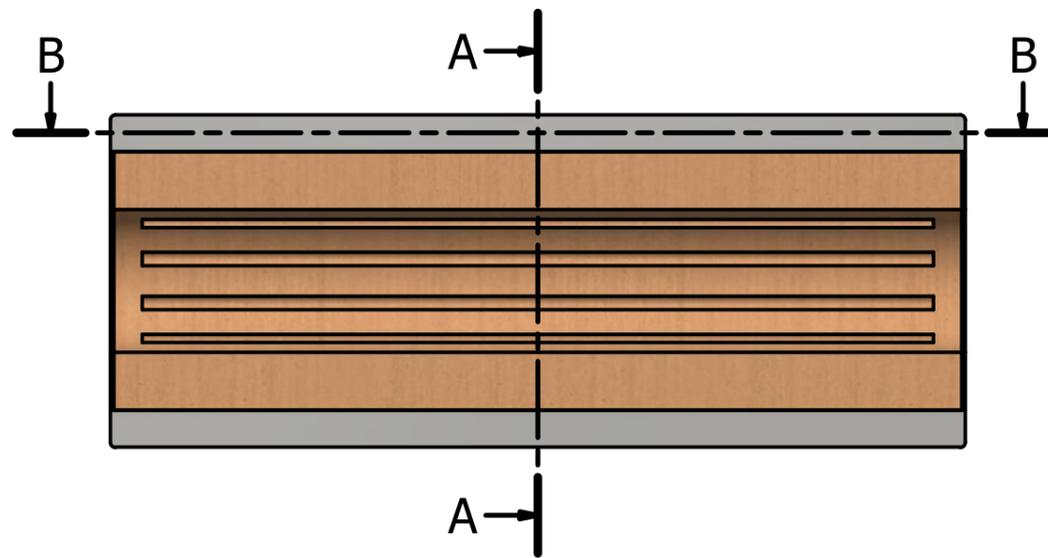
CORTE A-A



Trat. Térmico	Ninguno	EPN	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA		
Recubrimiento	Ninguno		Dib.	Kevin Andrade	
MATERIAL:		Escala: 1:5	Dis.	Kevin Andrade	
ACERO INOXIDABLE 304			Tol. Gral. ± 0.02	Rev.	Dr. Fernando Pantoja
CARCASA METÁLICA SUPERIOR			FIM-KAAM-100-103	FECHA: 13/11/2021	

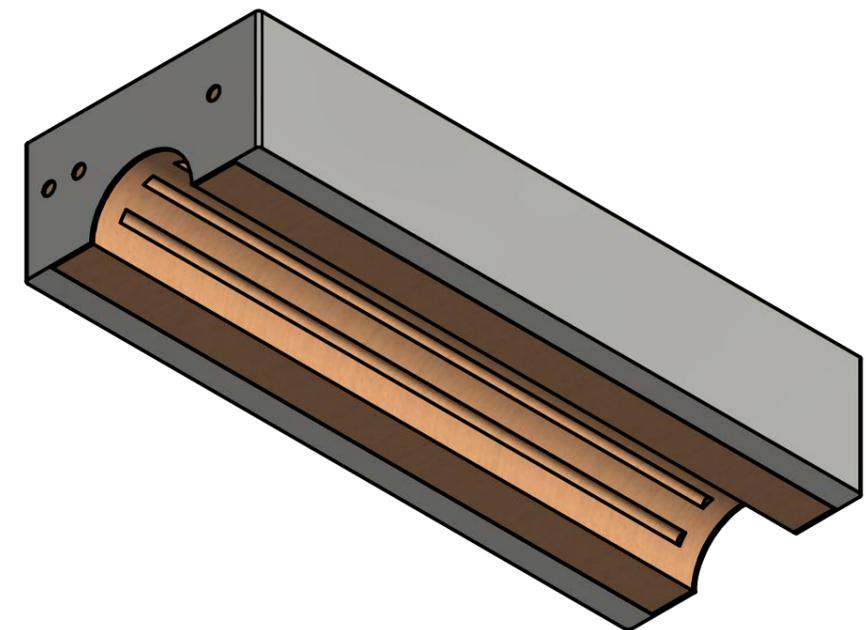
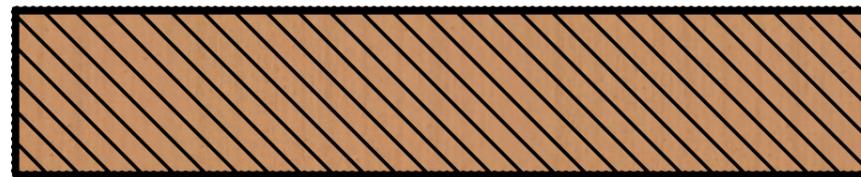


Trat. Térmico	Ninguno	EPN	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA		
Recubrimiento	Ninguno		Dib.	Kevin Andrade	
MATERIAL:	CERÁMICO	Tol. Gral. ± 0.02	Dis.	Kevin Andrade	
			Escala:	Rev.	Dr. Fernando Pantoja
			1:5		
ESTRUCTURA INTERNA SUPERIOR		FIM-KAAM-100-104		FECHA: 13/11/2021	

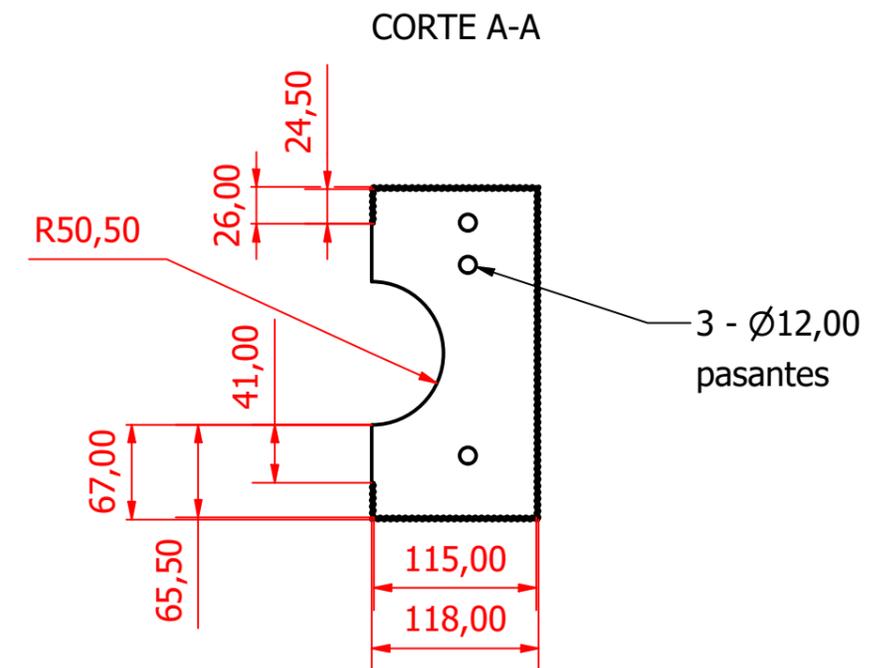
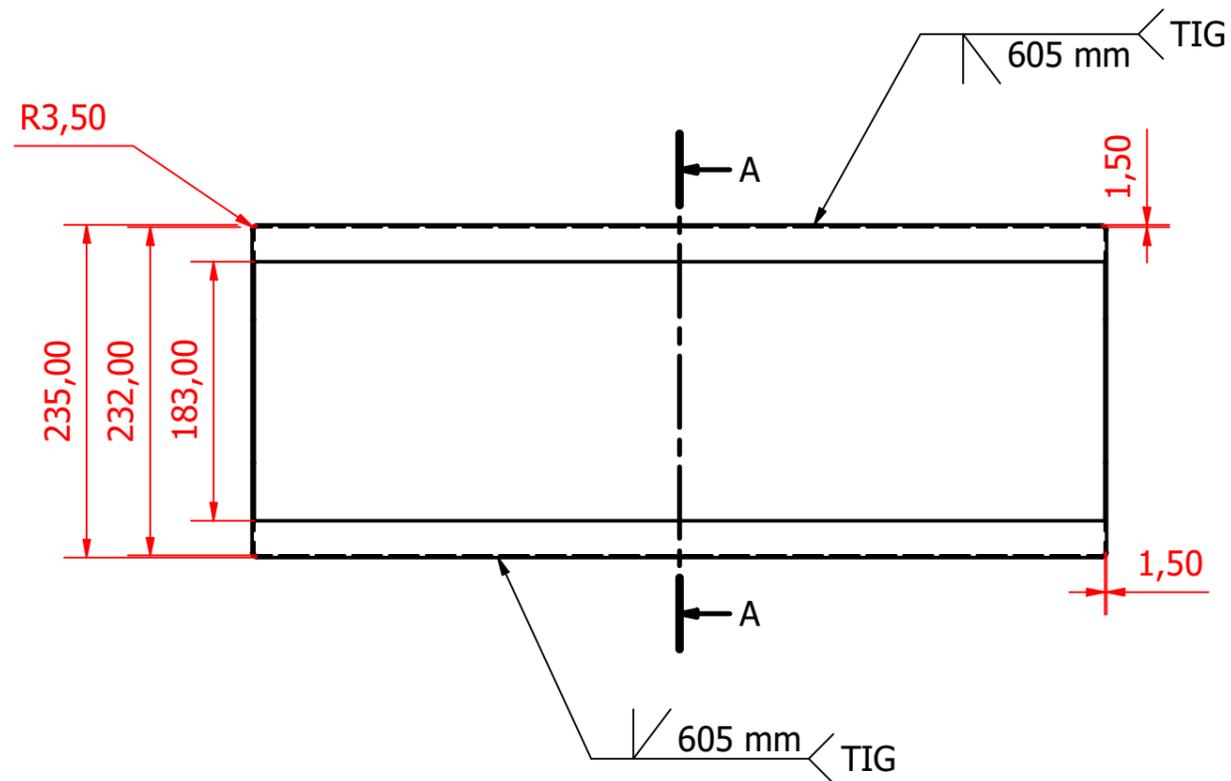
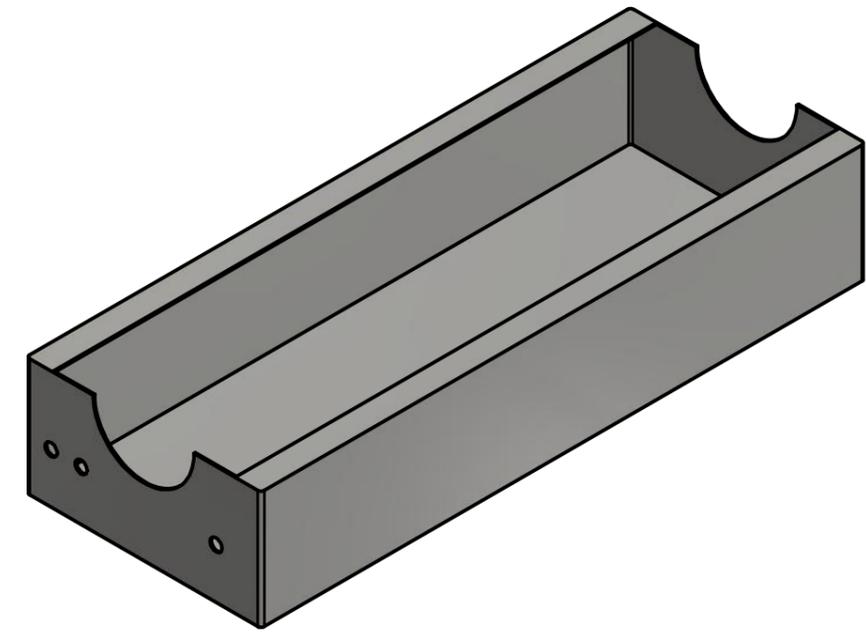
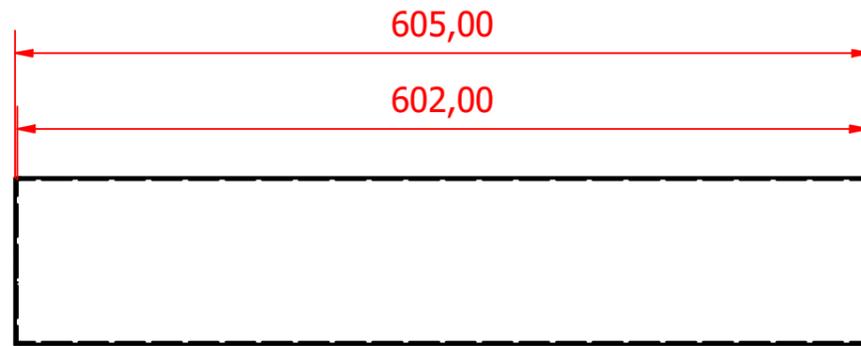


CORTE A-A

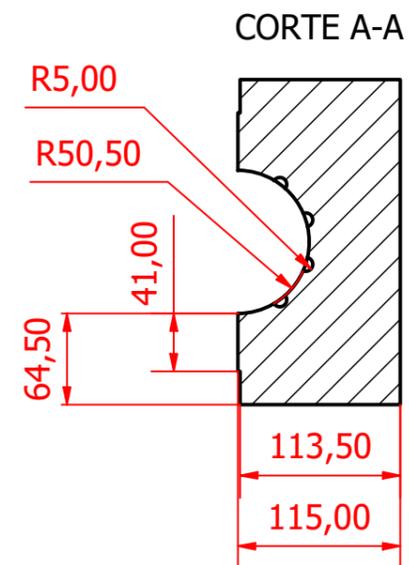
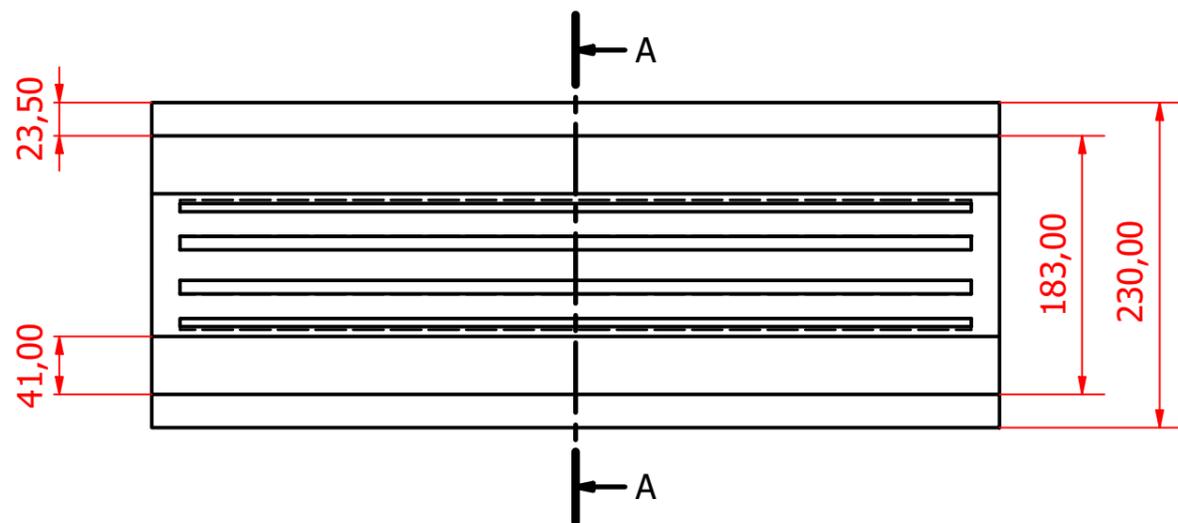
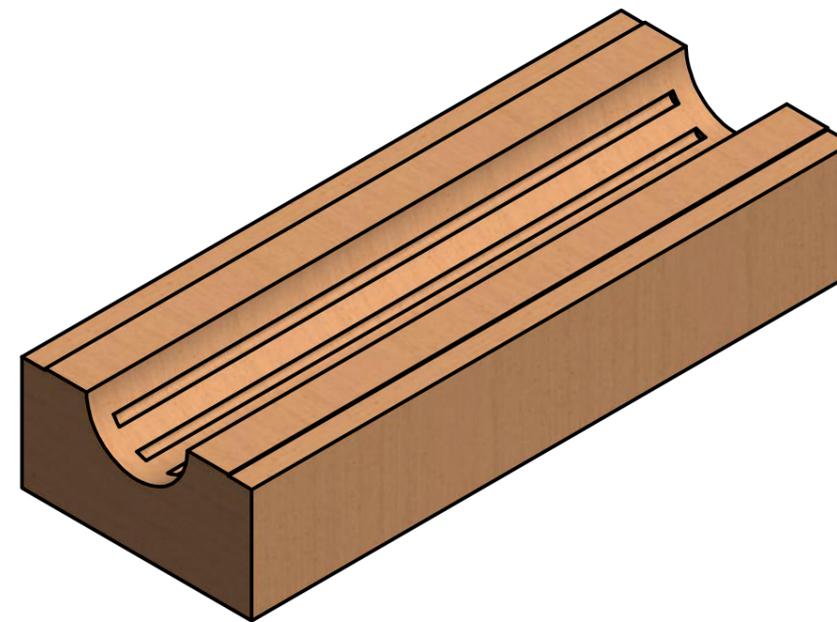
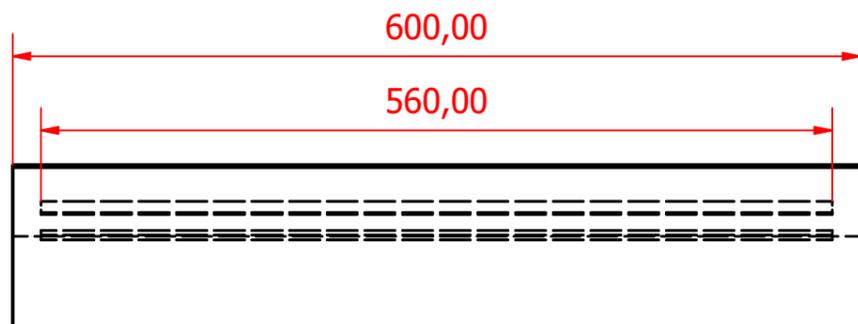
CORTE B-B



Trat. Térmico	Ninguno	EPN	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA	
Recubrimiento	Ninguno		Dib.	Kevin Andrade
MATERIAL: ACERO INOX. 304 - CERÁMICO	Tol. Gral. ± 0.02	Escala: 1:5	Dis.	Kevin Andrade
			Rev.	Dr. Fernando Pantoja
			ENSAMBLAJE CARCASA Y ESTRUCTURA INTERNA SUPERIOR	

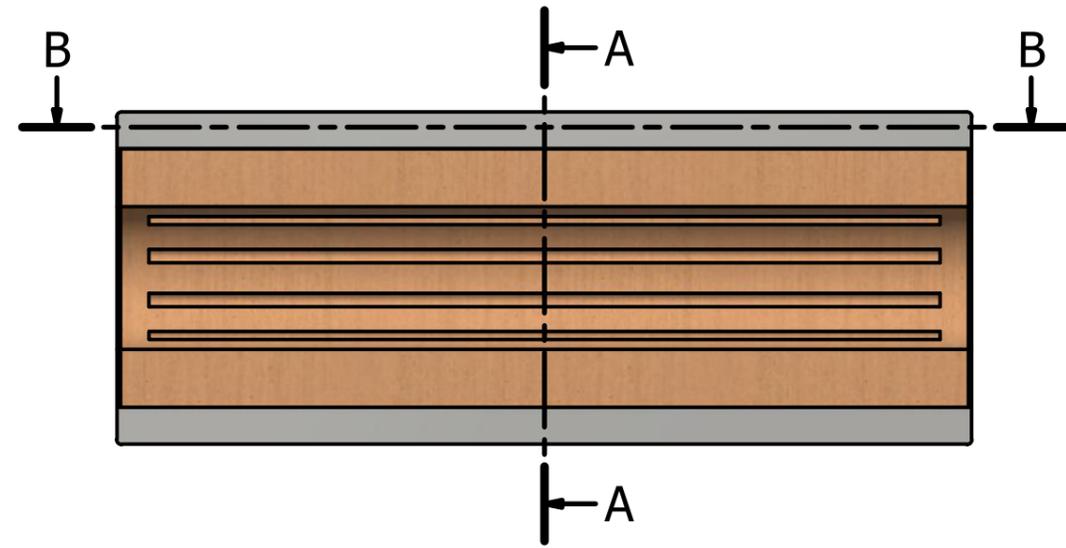
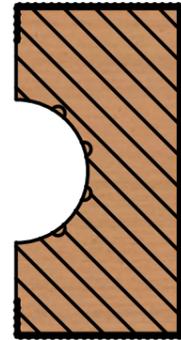


Trat. Térmico	Ninguno	EPN	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA		
Recubrimiento	Ninguno		Dib.	Kevin Andrade	
MATERIAL:		Escala: 1:5	Dis.	Kevin Andrade	
ACERO INOXIDABLE 304			Tol. Gral. ± 0.02	Rev.	Dr. Fernando Pantoja
CARCASA METÁLICA INFERIOR			FIM-KAAM-100-105	FECHA: 13/11/2021	

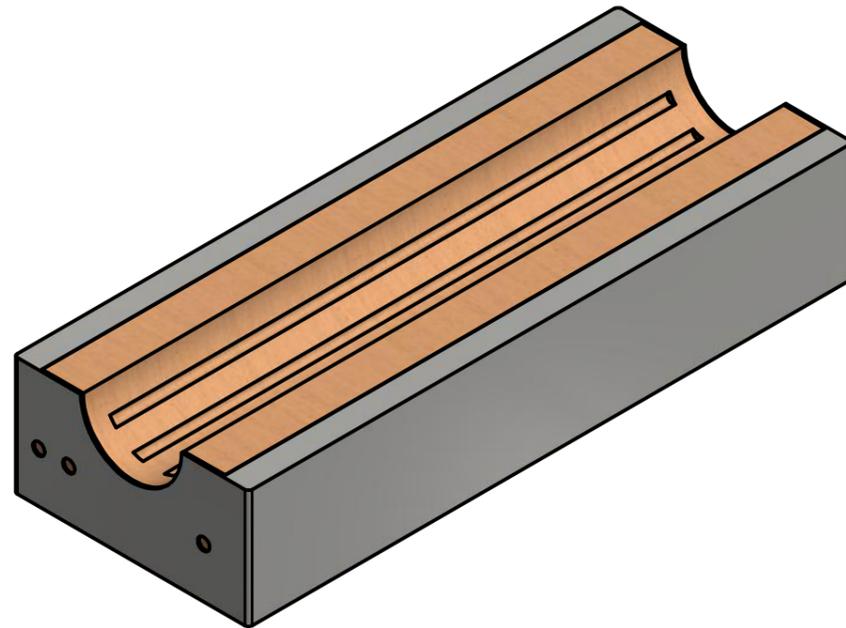
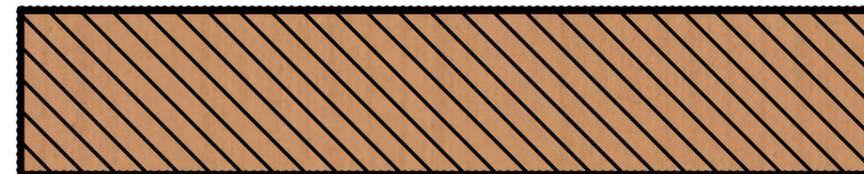


Trat. Térmico	Ninguno	EPN	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA	
Recubrimiento	Ninguno		Dib.	Kevin Andrade
MATERIAL:	CERÁMICO	Tol. Gral. ± 0.02	Dis.	Kevin Andrade
			Rev.	Dr. Fernando Pantoja
ESTRUCTURA INTERNA INFERIOR		Escala: 1:5	FIM-KAAM-100-106	
			FECHA: 13/11/2021	

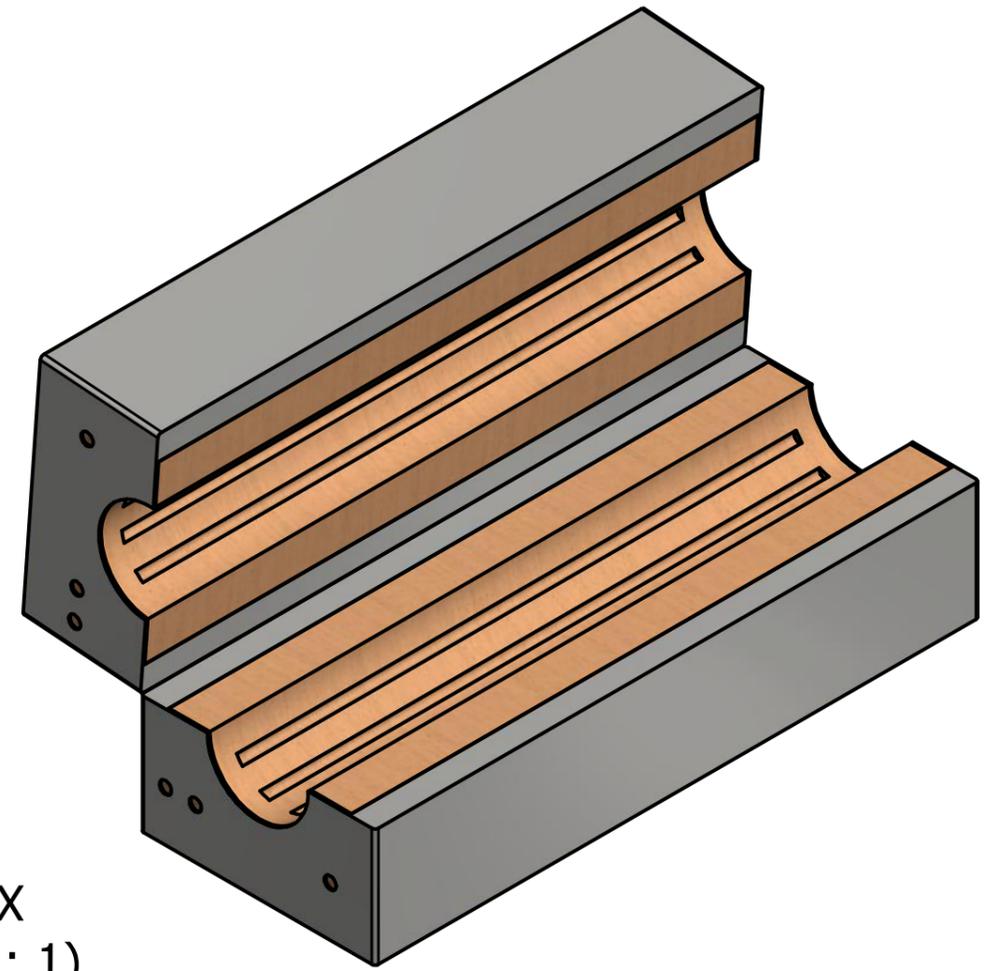
CORTE A-A



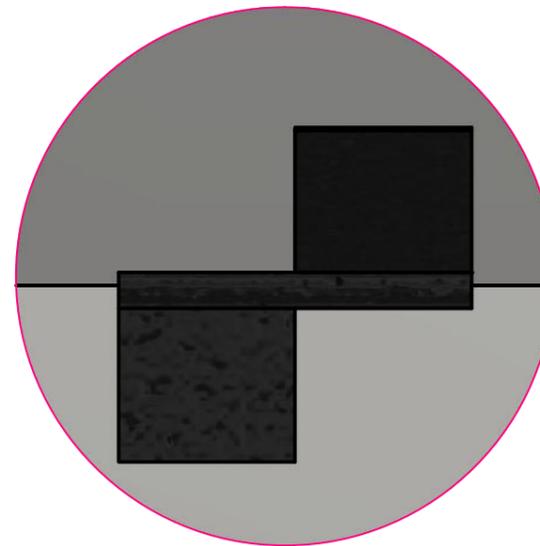
CORTE B-B



Trat. Térmico	Ninguno	EPN	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA	
Recubrimiento	Ninguno		Dib.	Kevin Andrade
MATERIAL: ACERO INOX. 304 - CERÁMICO	Tol. Gral. ± 0.02	Escala: 1:5	Dis.	Kevin Andrade
			Rev.	Dr. Fernando Pantoja
			ENSAMBLAJE CARCASA Y ESTRUCTURA INTERNA INFERIOR	

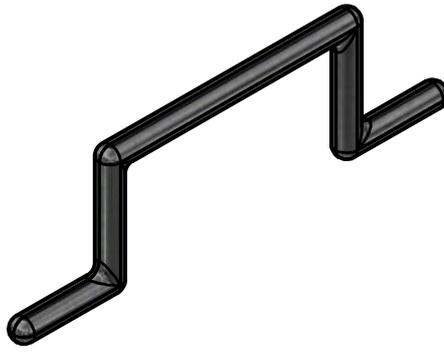


DETALLE X
ESCALA: (1 : 1)

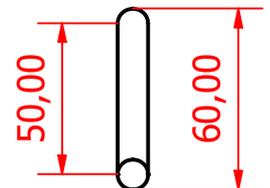
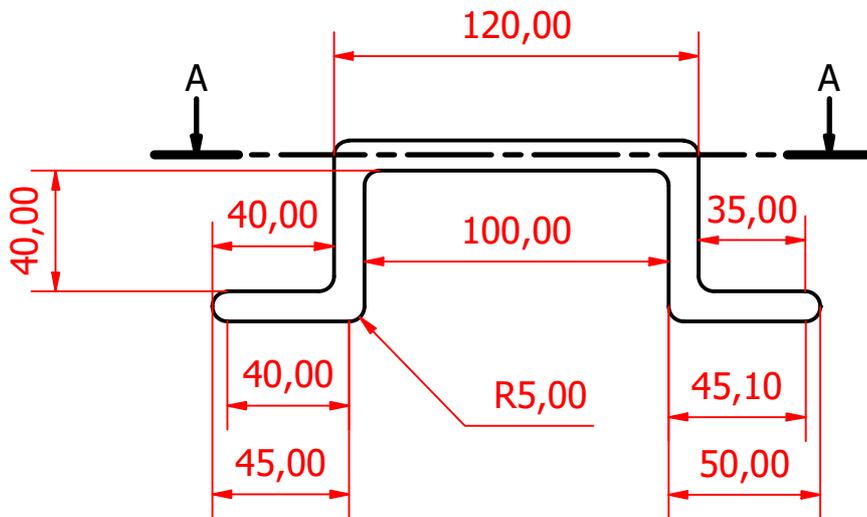
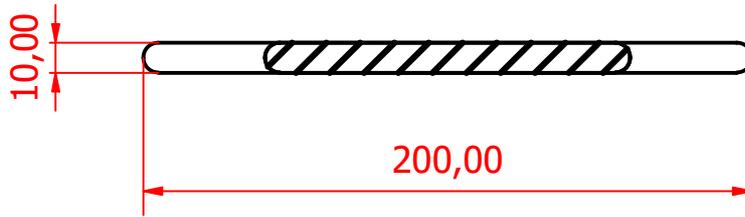


Carcasas metálicas unidas mediante dos cordones de soldadura TIG entre cuatro uniones ubicadas en la parte posterior de las carcasas.

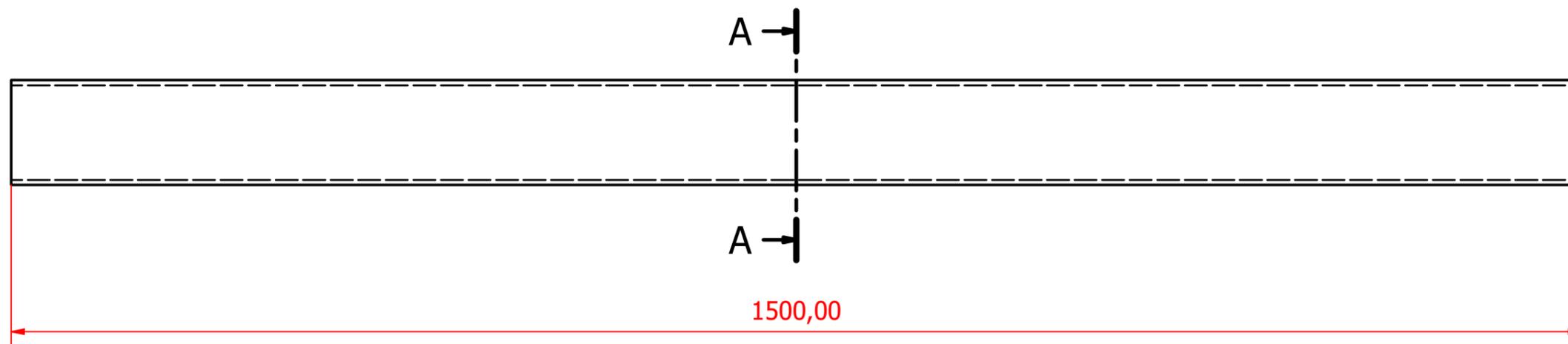
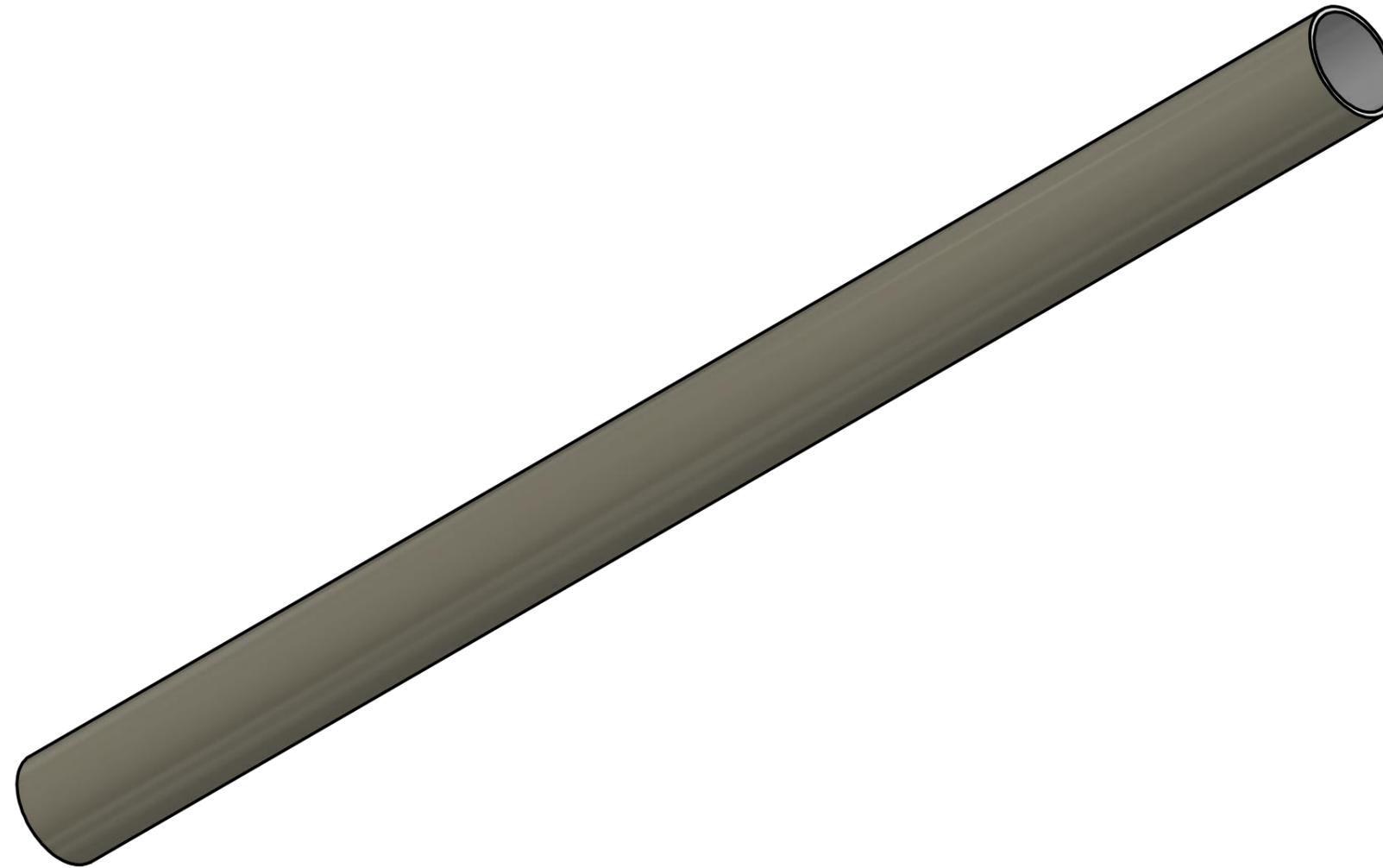
Trat. Térmico	Ninguno	EPN	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA		
Recubrimiento	Ninguno		Dib.	Kevin Andrade	
MATERIAL:	ACERO INOX. 304 - CERÁMICO	Tol. Gral. ± 0.02	Escala:	Dis.	Kevin Andrade
			1:5	Rev.	Dr. Fernando Pantoja
ENSAMBLAJE CARCASAS Y ESTRUCTURAS			FIM-KAAM-004		FECHA: 16/11/2021



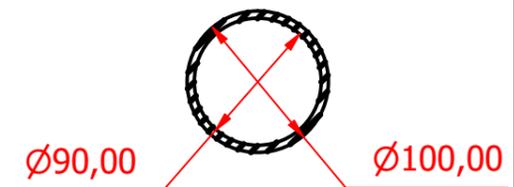
CORTE A-A



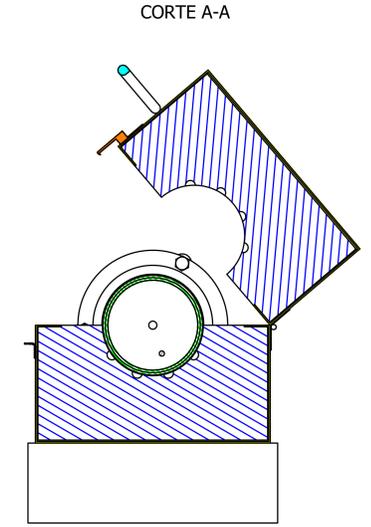
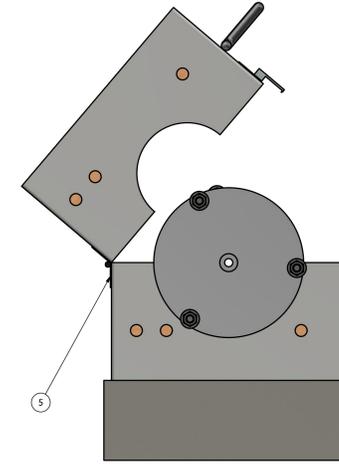
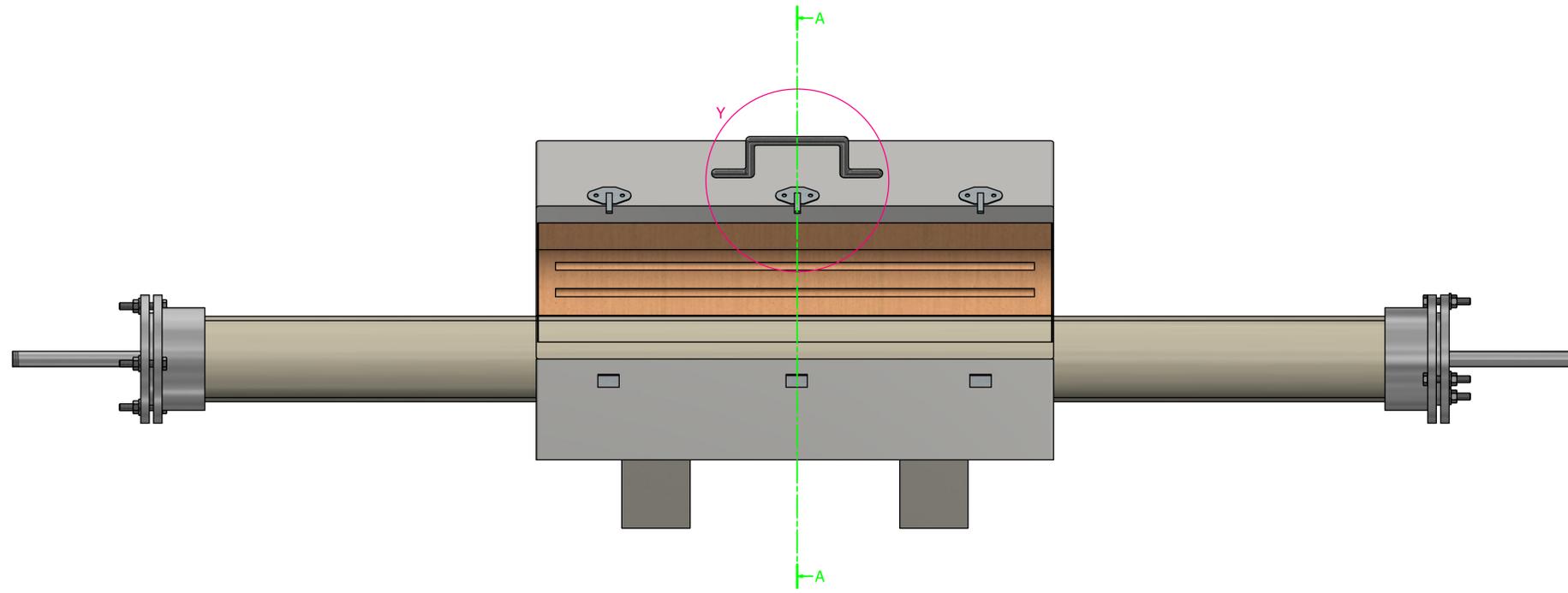
Trat. Térmico	Ninguno	EPN	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA		
Recubrimiento	Ninguno		Dib.	Kevin Andrade	
MATERIAL:		Escala: 1:2.5	Dis.	Kevin Andrade	
ACERO			Tol. Gral. ± 0.02	Rev.	Dr. Fernando Pantoja
SUJETADOR			FIM-KAAM-100-107		FECHA: 19/11/2021



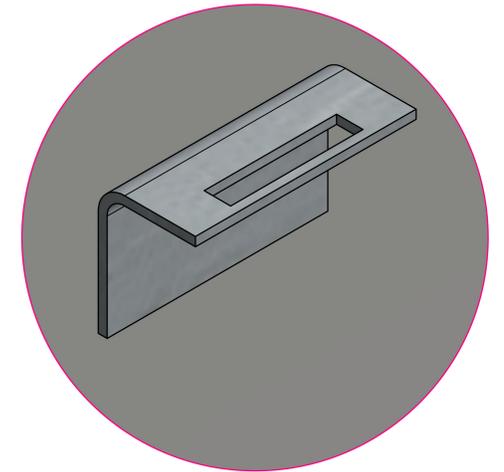
CORTE A-A



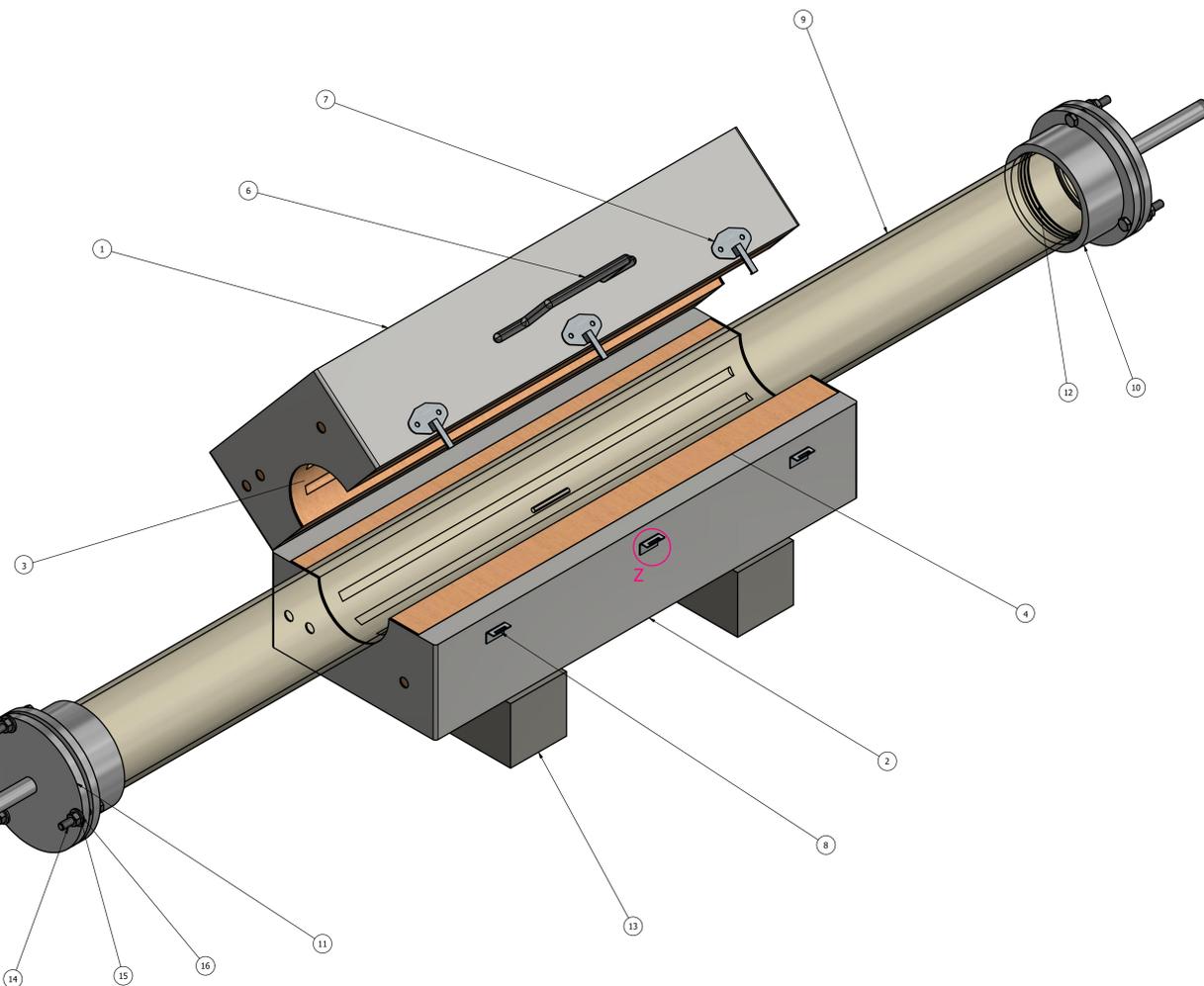
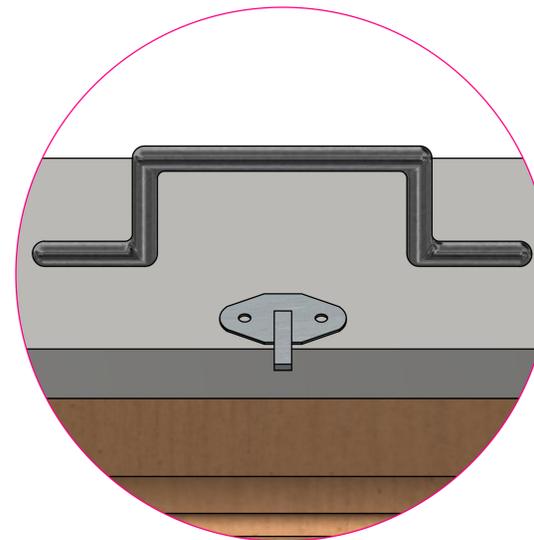
Trat. Térmico	Ninguno	EPN	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA		
Recubrimiento	Ninguno		Dib.	Kevin Andrade	
MATERIAL:		Escala: 1:5	Dis.	Kevin Andrade	
SÍLICE FUNDIDO			Tol. Gral. ± 0.02	Rev.	Dr. Fernando Pantoja
TUBO DE CUARZO			FIM-KAAM-100-108	FECHA: 19/11/2021	



DETALLE Z
ESCALA: (5 : 1)



DETALLE Y
ESCALA: (1 : 1)



Nº	ZONA	DENOMINACIÓN	PLANO/NORMA	CANT	MATERIAL	OBSERVACIÓN
16	H-2	ANSI B18.22M - 8 N	FIM-KAAM-100	6	Acero, suave	Arandelas métricas planas
15	H-2	AS 1112 - M8 Tipo 5	FIM-KAAM-100	6	Acero, suave	Tuercas hexagonales métricas M8
14	H-2	Perno M8 x 50	FIM-KAAM-100	6	Acero inoxidable	Pernos métricos M8 de precisión de cabeza hexagonal
13	H-4	Soporte del horno	FIM-KAAM-100	2	Acero fundido	Rectángulos de soporte ubicado debajo del horno
12	F-6	O ring	FIM-KAAM-100	6	Caucho de silicona	Ubicado entre el tubo de cuarzo y la brida interna
11	H-3	Brida externa	FIM-KAAM-100-102	2	Acero inoxidable 304	Versión 1
10	F-6	Brida interna	FIM-KAAM-100-101	2	Acero inoxidable 304	Versión 1
9	D-5	Tubo de cuarzo	FIM-KAAM-100-108	1	Slice fundido	Transparente
8	G-5	Broche inferior	FIM-KAAM-100	3	Acero	Soldado en la parte inferior de la cara frontal de la carcasa metálica inferior
7	D-3	Broche superior	FIM-KAAM-100	3	Acero	Soldado en la parte inferior de la cara frontal de la carcasa metálica superior
6	E-3	Sujetador	FIM-KAAM-100-107	1	Acero	Soldado en la mitad de la cara frontal de la carcasa metálica superior
5	C-9	Unión	FIM-KAAM-004	4	Acero	Soldado en el extremo posterior de las dos carcasas metálicas
4	F-6	Estructura interna inferior	FIM-KAAM-100-106	1	Cerámico	Versión 1
3	F-2	Estructura interna superior	FIM-KAAM-100-104	1	Cerámico	Versión 1
2	G-5	Carcasa metálica inferior	FIM-KAAM-100-105	1	Acero inoxidable 304	Versión 1
1	E-2	Carcasa metálica superior	FIM-KAAM-100-103	1	Acero inoxidable 304	Versión 1

Nº	ZONA	DENOMINACIÓN	PLANO/NORMA	CANT	MATERIAL	OBSERVACIÓN
		EPN	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA	Dib. Kevin Andrade	Escala: 1:2.5	
				Dis. Kevin Andrade		
				Rev. Dr. Fernando Parroja		
HORNO DE ATMÓSFERA CONTROLADA				FIM-KAAM-100		Fecha: 16/11/2021

ANEXO XIII.

FICHA TÉCNICA DEL HORNO DE ATMÓSFERA CONTROLADA

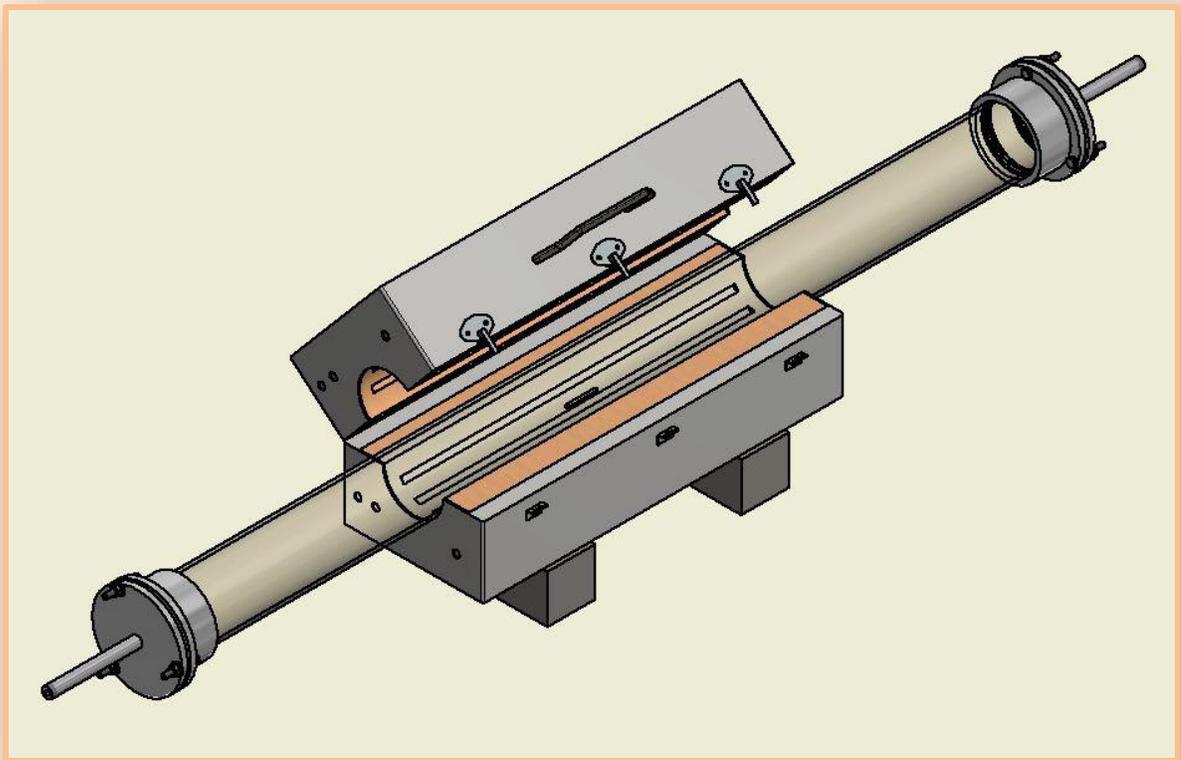
FICHA TÉCNICA

***HORNO LMH
DE ATMÓSFERA
CONTROLADA***

Descripción

El horno de atmósfera controlada está conformado por dos partes que se acoplan entre sí, facilitando la carga del tubo de trabajo o de una pieza de trabajo más pequeña. El diseño permite la comodidad de ubicar el horno en torno a un elemento fijo como un tubo con bridas, o alrededor de algún elemento que se mantenga estable.

Este horno se compone de dos secciones rectangulares, la sección rectangular externa consta de dos carcasas metálicas (superior e inferior) que se abren y cierran mediante uniones de soldadura realizadas en la parte posterior de las carcasas. La sección rectangular interna se conforma de ladrillos refractarios, los mismos que se encuentran ensamblados dentro de cada una de las carcasas metálicas.



Datos Técnicos

* **Sección Rectangular Externa: Da lugar a la protección de la sección rectangular interna**

- Material: Acero inoxidable 304
 - Dimensiones de cada carcasa:
 - Largo: 605 mm
 - Alto: 118 mm
 - Ancho: 235 mm
 - Espesor: 1,5 mm
- Abertura para tubo de cuarzo:
- Radio: 51 mm



* **Tensión y Potencia**

- Monofásica
- Frecuencia: 50/60 Hz
- Tensión: 220 VAC
- Potencia de trabajo: 2 kW

* **Temperatura de calentamiento**

- Temperatura máxima de calentamiento: 650 °C
- Temperatura mínima de calentamiento: 14 °C
- Velocidad de calentamiento: 12 °C/min

* **Sección Rectangular Interna: Fabricada de ladrillo refractario, formando la estructura interna del horno**

- Dimensiones de cada estructura interna:
 - Largo: 600 mm
 - Alto: 115 mm
 - Ancho: 230 mm

Ladrillo refractario:

- Composición: Arcilla de sílice, alúmina y refractarios de arcilla.
- Dimensiones:
 - Largo: 230 mm
 - Alto: 65 mm
 - Ancho: 115 mm

* **Zona de calentamiento**

- Área: 1696,46 cm²
- Longitud: 600 mm
 - Zona de temperatura constante: 560 mm
- Resistencias: Alambre Kanthal
 - Soporta temperaturas de hasta 1400 °C
 - Aleación: 80% cromo y 20% níquel.



Accesorios

* Caja de control de temperatura:

- Controlador de temperatura PID CAL serie 9300
 - Tensión de alimentación: 100 VAC, 240 VAC
 - Temperatura de funcionamiento mínima: 0 °C
 - Temperatura de funcionamiento máxima: +50 °C
- Acoplamiento térmico tipo K con vaina de cerámica.
 - Físicamente rígida
 - Rango de temperaturas (-180 a 1370 °C).
 - Longitud: 250 mm
- Relé en estado sólido CWA2425



* Tubo de cuarzo transparente:

- Dimensiones: OD= 100 mm, ID= 90 mm, L= 1500 mm
- Temperatura máxima de trabajo: 1300 °C



* Bomba de vacío:

- Voltaje: 110 V
- Frecuencia: 60 HZ
- Tasa de flujo: 3.5 CFM (Pies cúbicos por minuto)
- Último vacío: 5 Pa
- Potencia: 1/4 HP
- Puerto de entrada: 1/4"
- Capacidad de aceite: 320 ml



* Kit de vacío:

- Dos bridas externas y dos bridas internas de acero inoxidable 304.
- Material: Acero inoxidable 304
- Masa:
 - Brida externa: 1,815 kg
 - Brida interna: 1,450 kg



Para cada brida externa:

- Un conducto de 1/4"
- Una válvula de aguja de acero inoxidable roscada de 1/4":
 - Hembra-Hembra

- Vástago regulador
- Temperatura máxima y una capacidad de presión: 450 °F @ 3435 PSI.
- Capacidad de presión a temperatura ambiente: 6000 PSI @ 100°F
- Acoples para manguera



* **Suministro de gas:**

- Un cilindro de gas Argón de 1 m³
- Regulador



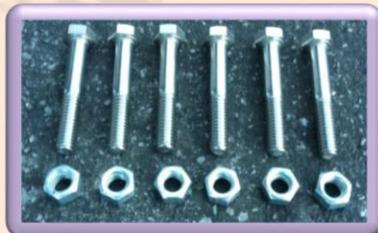
Para cada brida interna:

- Tres O-rings de caucho de silicona resistentes a temperaturas mayores a los 200 °C:
 - Diámetro interno: 95 mm
 - Espesor: 5 mm
- Tres pernos de acero inoxidable de cabeza hexagonal: M8 x 50mm
- Tres tuercas de acero inoxidable
- Seis arandelas



* **Conexiones:**

- Conexión para gas de entrada:
 - Llegada del gas hasta 2 m desde la válvula de entrada
 - Acoples roscados
- Conexión para vapores de salida:
 - Extracción de gases y/o vapores sobrantes hasta 1,5 m desde la válvula de salida
 - Acoples roscados



- Conexiones eléctricas:
 - Llegada de electricidad hasta 4 m desde el enchufe
 - Salida de electricidad hasta 3,5 m desde el horno
- Cerámicas
- Polímeros
- Reactivos orgánicos
- Reactivos inorgánicos



Alcances

* Utilizable para:

- Tratamientos térmicos
- Aleaciones de bajo punto de fusión
- Procesos de pirolización
- Procesos de secado
- Calentamiento en aire
- Atmósfera de gas inerte
- Vacío

* Tipo de Gas a emplear:

- Argón
- Etano
- Propano
- Nitrógeno
- Butano
- Helio
- Oxígeno

* Muestras de trabajo:

- Metálicas
- Aluminios
- Madera

Observaciones

Al equipo se lo puede mejorar en varios aspectos, por ejemplo, la extracción de vapores y líquidos mediante el uso de una bomba con mayor capacidad.

A su vez, con ciertas renovaciones, este equipo puede ser considerado para distintas aplicaciones, tales como la implementación de un sistema con plasma de acoplamiento inductivo (ICP).

FICHA TÉCNICA

***HORNO LMH
DE ATMÓSFERA
CONTROLADA***

ANEXO XIV.

REGISTRO DE PRUEBAS

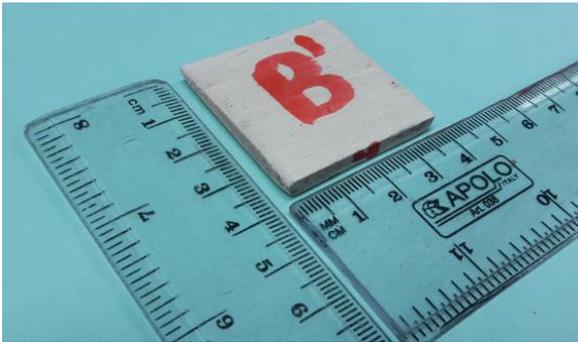
CUBOS DE MADERA UTILIZADOS PARA REALIZAR EL PROCESO DE CARBONIZACIÓN EN EL HORNO DE ATMÓSFERA CONTROLADA

Prueba A

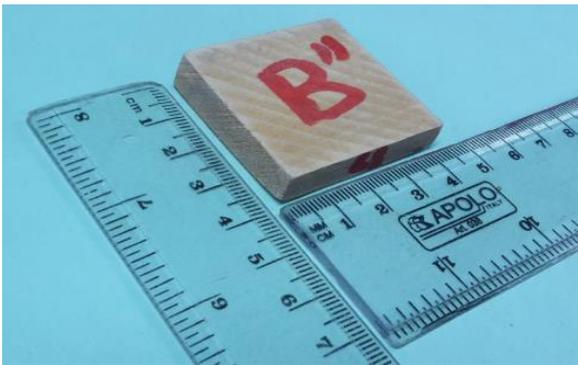


Pruebas B

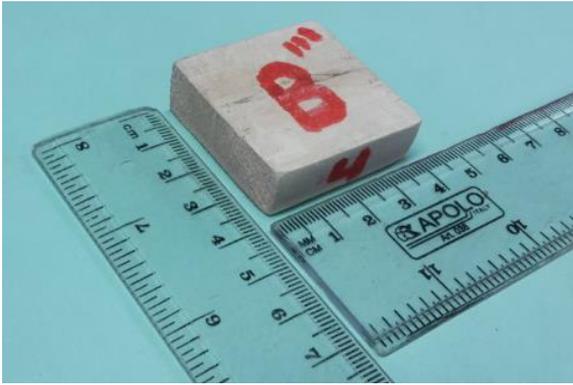
B'



B''

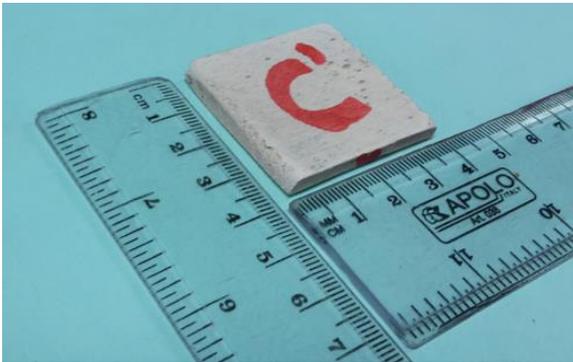


B'''

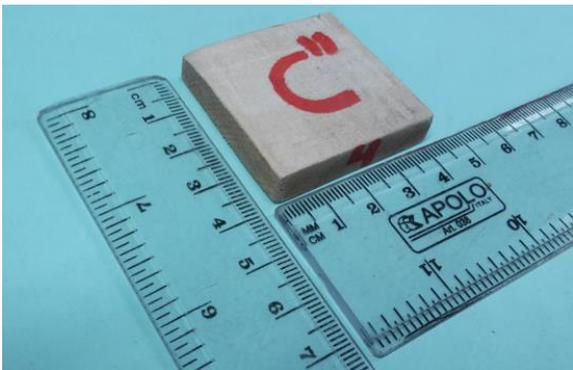


Pruebas C

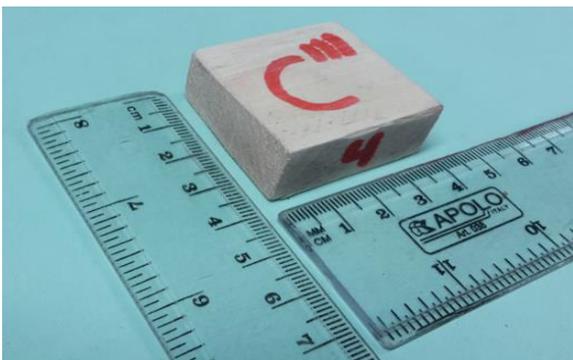
C'



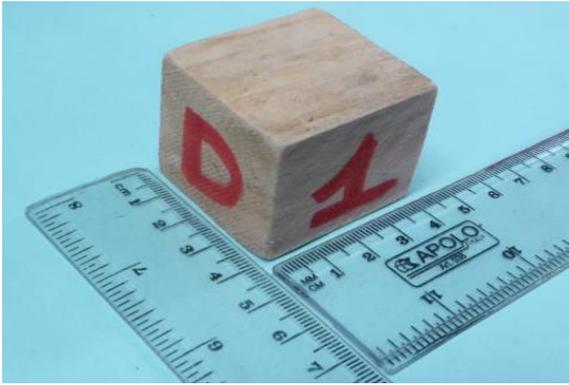
C''



C'''



Prueba D



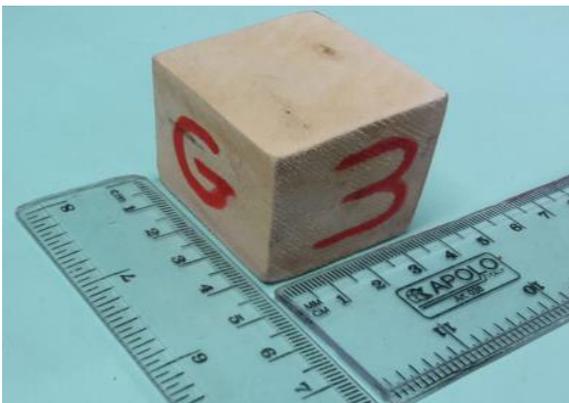
Prueba E



Prueba F



Prueba G



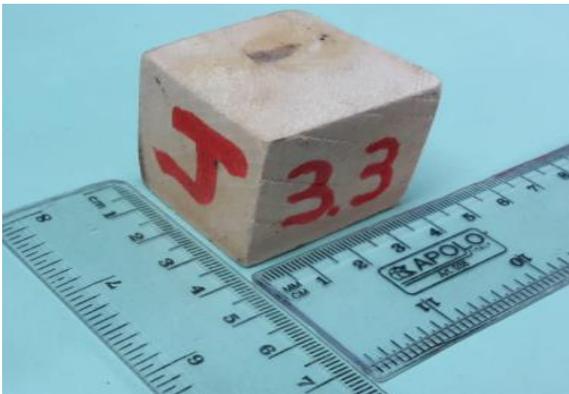
Prueba H



Prueba I



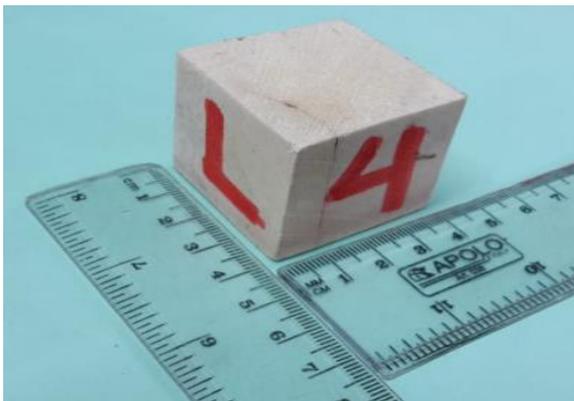
Prueba J



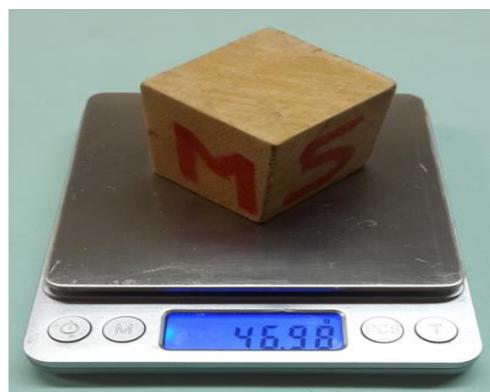
Prueba K



Prueba L



Prueba M



Prueba N



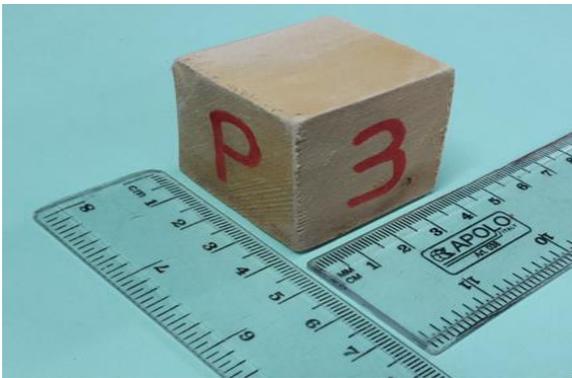
Prueba Ñ



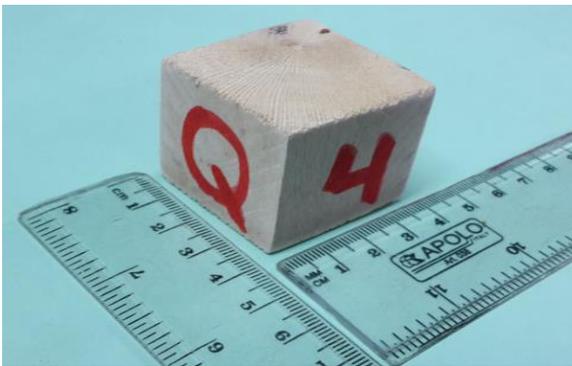
Prueba O



Prueba P



Prueba Q



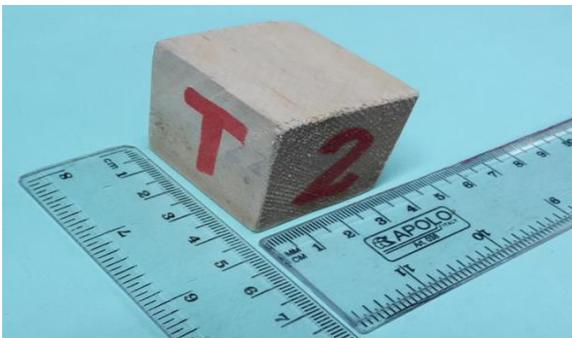
Prueba R



Prueba S



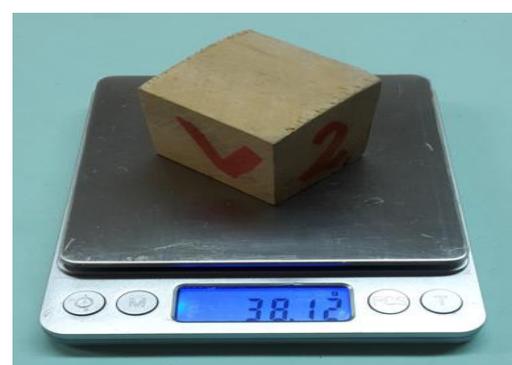
Prueba T



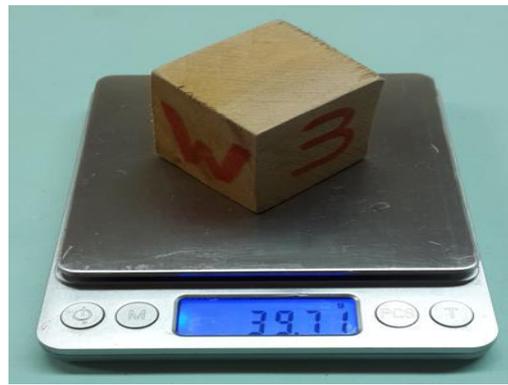
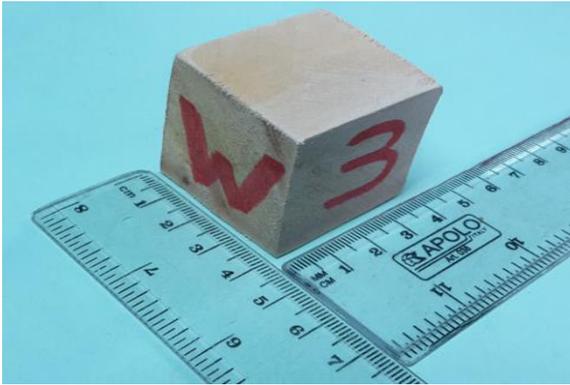
Prueba U



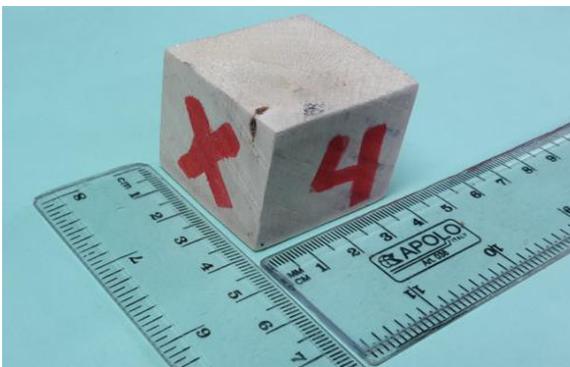
Prueba V



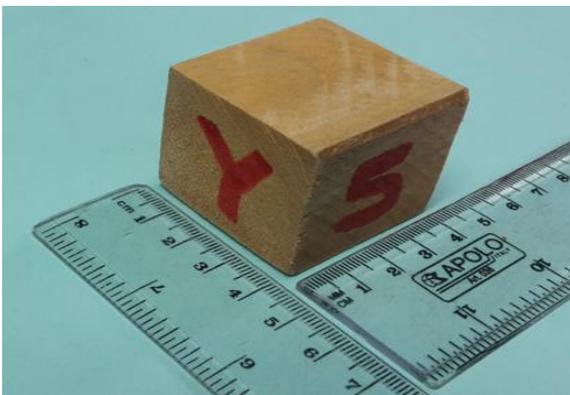
Prueba W



Prueba X

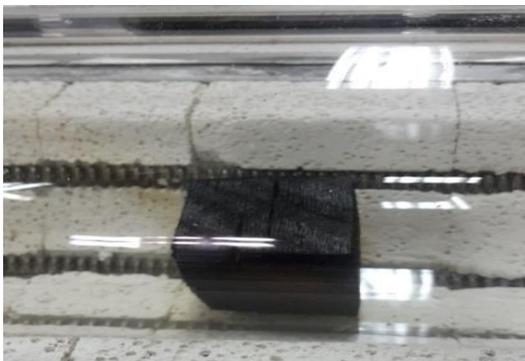


Prueba Y



RESULTADOS DE LAS MUESTRAS CARBONIZADAS

Resultado Prueba A



Resultado Pruebas B

B'



B''



B'''



Resultados Pruebas C

C'



C''



C'''



Resultado Prueba D



Resultado Prueba E



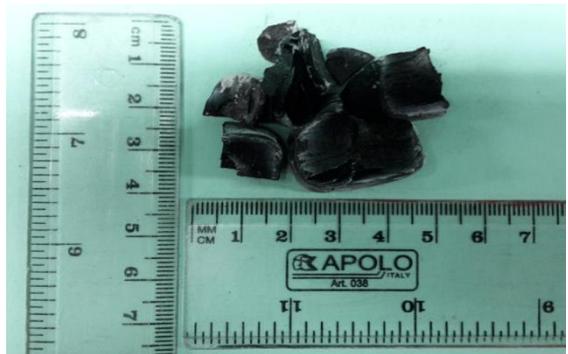
Resultado Prueba F



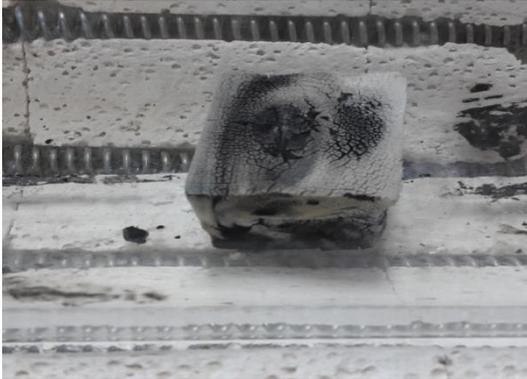
Resultado Prueba G



Resultado Prueba H



Resultado Prueba I



Resultado Prueba J



Resultado Prueba K



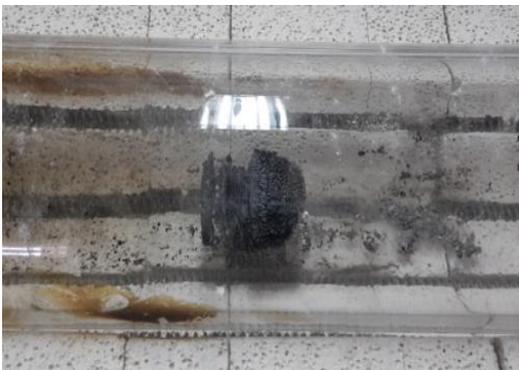
Resultado Prueba L



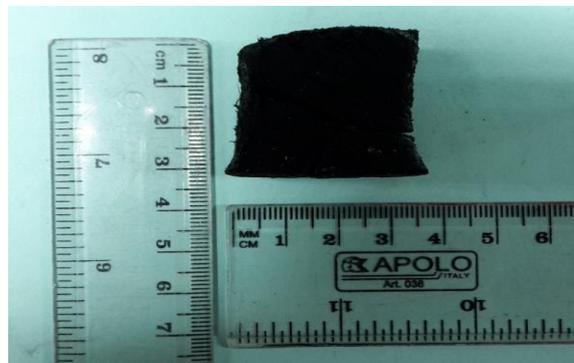
Resultado Prueba M



Resultado Prueba N



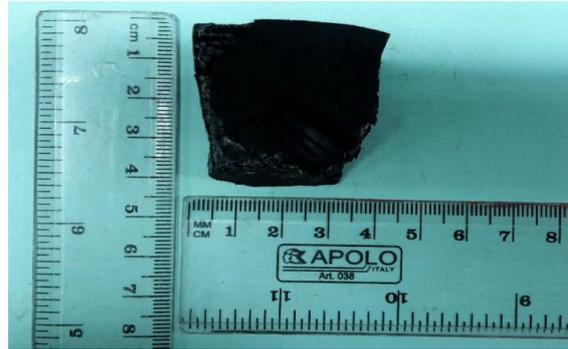
Resultado Prueba Ñ



Resultado Prueba O



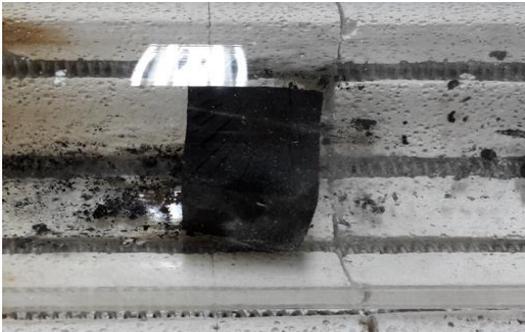
Resultado Prueba P



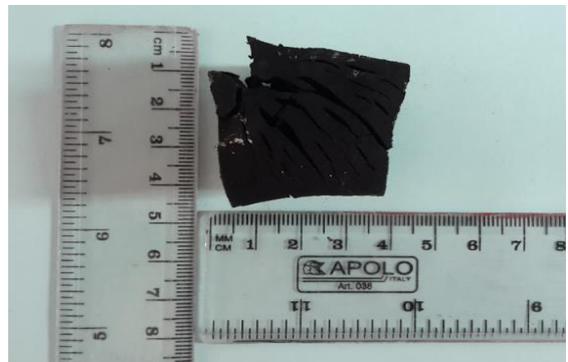
Resultado Prueba Q



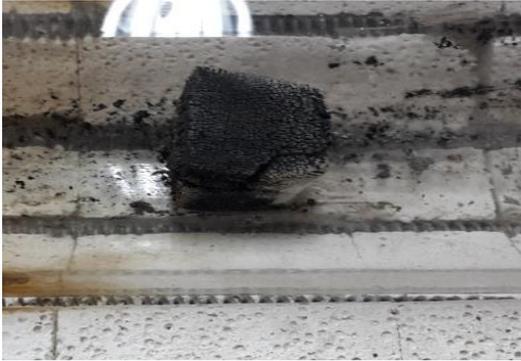
Resultado Prueba R



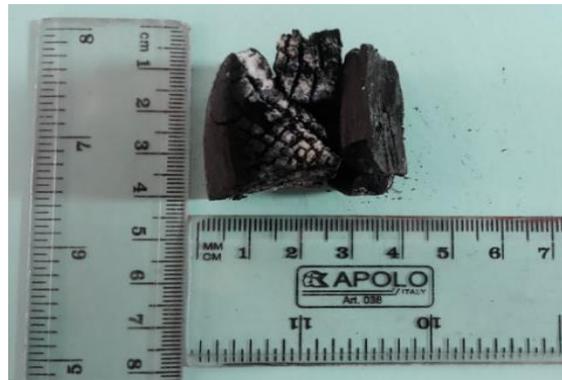
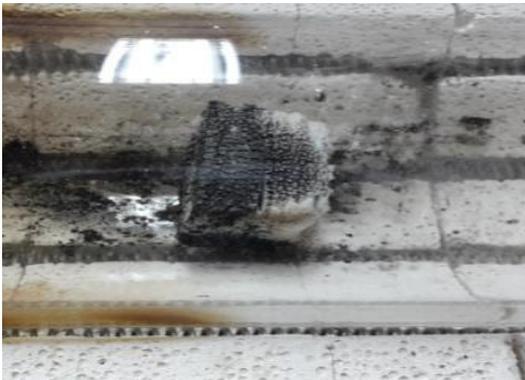
Resultado Prueba S



Resultado Prueba T



Resultado Prueba U



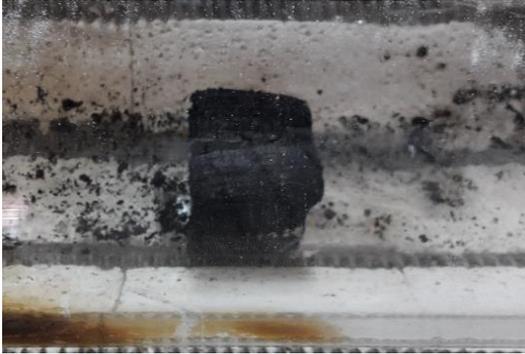
Resultado Prueba V



Resultado Prueba W



Resultado Prueba X



Resultado Prueba Y



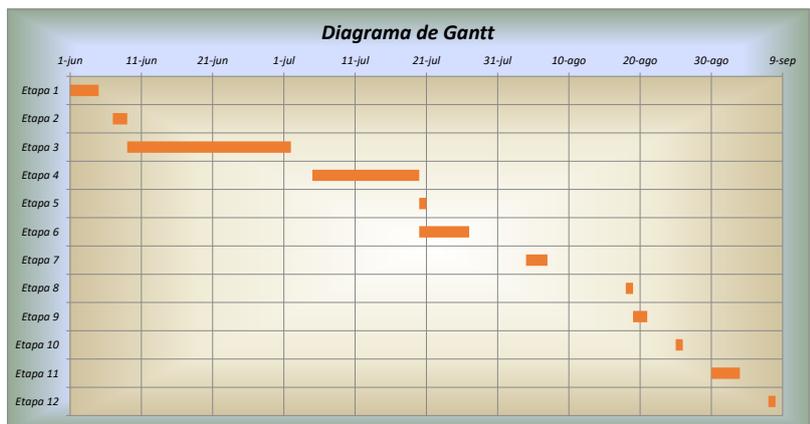
ANEXO XV.

REPORTE DE ACTIVIDADES

ACTIVIDADES REALIZADAS PARA LA PARTE EXPERIMENTAL			
Actividades	Fecha Inicio	Duración (días)	Fecha Fin
Etapa 1: Acceso al Laboratorio de Fundición (La Universal)			
Limpieza y organización del espacio de trabajo	1/6/2021	2	2/6/2021
Entrega de los leños de madera por parte del Dr. Fernando	3/6/2021	2	4/6/2021
Cortes en cubos de los leños de madera de 4 x 4 x 4 cm			
Etapa 2: Instalación del equipo			
Instalación de todo el equipo de trabajo	7/6/2021	1	7/6/2021
Encendido del horno	8/6/2021	1	8/6/2021
Verificación del controlador de temperatura			
Etapa 3: Pruebas para determinar el funcionamiento del horno sin presencia de gas Argón			
Reunión presencial en el laboratorio con el Dr. Fernando	9/6/2021	1	9/6/2021
Prueba A			
Cortes de diferente espesor (0,5, 1 y 1,5 cm) de los cubos	10/6/2021	1	10/6/2021
Prueba B', B'' y B'''			
Prueba C', C'' y C'''	11/6/2021	1	11/6/2021
Prueba D	17/6/2021	1	17/6/2021
Prueba E	18/6/2021	1	18/6/2021
Prueba F	21/6/2021	1	21/6/2021
Prueba G	22/6/2021	1	22/6/2021
Prueba H	23/6/2021	1	23/6/2021
Prueba I	24/6/2021	1	24/6/2021
Prueba J	28/6/2021	1	28/6/2021
Prueba K	29/6/2021	1	29/6/2021
Prueba L	30/6/2021	1	30/6/2021
Prueba M	1/7/2021	1	1/7/2021
Etapa 4: Pruebas con presencia de gas Argón			
Determinación del flujo de gas mediante experimento con pipeta	5/7/2021	1	5/7/2021
Prueba N	8/7/2021	1	8/7/2021
Prueba Ñ	9/7/2021	1	9/7/2021
Prueba O	12/7/2021	1	12/7/2021
Prueba P	13/7/2021	1	13/7/2021
Prueba Q	14/7/2021	1	14/7/2021
Prueba R	15/7/2021	1	15/7/2021
Prueba S	16/7/2021	1	16/7/2021
Prueba T	19/7/2021	1	19/7/2021
Etapa 5: Entrega de muestras en el Laboratorio de Nuevos Materiales			
Entrega de muestra obtenidas con presencia de gas argón en el Laboratorio de Nuevos Materiales	20/7/2021	1	20/7/2021
Etapa 6: Pruebas con presencia de aire			
Prueba U	20/7/2021	1	20/7/2021
Prueba V	21/7/2021	1	21/7/2021
Prueba W	22/7/2021	1	22/7/2021
Prueba X	23/7/2021	1	23/7/2021
Prueba Y	26/7/2021	1	26/7/2021
Etapa 7: Recolección de carbón vegetal			
Recolección de muestras de carbón vegetal que se comercializan en diferentes puntos de la ciudad de Quito	4/8/2021	3	6/8/2021
Etapa 8: Recepción de resultados			
Recepción de los resultados de espectroscopia Raman de las muestras obtenidas con gas Argón por parte del Laboratorio de Nuevos Materiales	18/8/2021	1	18/8/2021
Etapa 9: Carbón vegetal tradicional			
Obtención de muestras de carbón vegetal por el método tradicional	19/8/2021	2	20/8/2021
Etapa 10: Entrega de muestras en el Laboratorio de Nuevos Materiales			
Entrega de muestras obtenidas de forma tradicional y de muestras recolectadas en diferentes puntos de la ciudad, en el Laboratorio de Nuevos Materiales	25/8/2021	1	25/8/2021
Etapa 11: Morfología de muestras en el Laboratorio de Metalografía			
Pruebas para verificar el análisis de la morfología de las muestras obtenidas y recolectadas	30/8/2021	4	2/9/2021
Etapa 12: Recepción de resultados			
Recepción de los resultados de espectroscopia Raman de las muestras obtenidas de forma tradicional y de muestras recolectadas en diferentes puntos de la ciudad, por parte del Laboratorio de Nuevos Materiales	7/9/2021	1	7/9/2021

Actividad	Fecha Inicio	Duración (días)	Fecha Fin
Etapa 1	1-jun	4	4-jun
Etapa 2	7-jun	2	8-jun
Etapa 3	9-jun	23	1-jul
Etapa 4	5-jul	15	19-jul
Etapa 5	20-jul	1	20-jul
Etapa 6	20-jul	7	26-jul
Etapa 7	4-ago	3	6-ago
Etapa 8	18-ago	1	18-ago
Etapa 9	19-ago	2	20-ago
Etapa 10	25-ago	1	25-ago
Etapa 11	30-ago	4	2-sep
Etapa 12	7-sep	1	7-sep

Fecha Inicio 44348
Fecha Final 44446



REGISTRO DE PRUEBAS REALIZADAS CON AIRE PARA LA PARTE EXPERIMENTAL DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Prueba	Muestra	Fecha	Masa inicial [g]	Volumen inicial [cm ³]	Densidad inicial [g/cm ³]	Temperatura de carbonización (fin de proceso) [°C]	Duración del proceso sin tomar en cuenta el tiempo de vaciado inicial y final [min]	Tiempo de enfriamiento [horas]	Masa final [g]	Volumen final [cm ³]	Densidad final [g/cm ³]	Diferencia de densidad [g/cm ³]
A	Muestra 4 (Charmuelan)	9/6/2021	40,82	67,20	0,61	446	60	6	10,07	46,62	0,22	0,39
B'	Muestra 4 (Charmuelan)	10/6/2021	6,08	7,98	0,76	442	60	2	0,00	0,00	0,00	-
B''	Muestra 4 (Charmuelan)		9,40	16,38	0,57				0,00	0,00	0,00	-
B'''	Muestra 4 (Charmuelan)		16,11	24,00	0,67				0,90	10,79	0,08	-
C'	Muestra 4 (Charmuelan)		6,06	8,41	0,72				0,21	1,39	0,15	0,57
C''	Muestra 4 (Charmuelan)	11/6/2021	9,37	16,40	0,57	445	60	6	1,05	5,76	0,18	0,39
C'''	Muestra 4 (Charmuelan)		16,14	24,60	0,66				2,80	14,87	0,19	0,47
D	Muestra 1 (Motilón)	17/6/2021	39,82	68,80	0,58	467	120	6	4,42	27,59	0,16	0,42
E	Muestra 2 (Pumamaqui)	18/6/2021	45,03	70,52	0,64	500	180	6	0,84	6,48	0,13	0,51
F	Muestra 2.1 (Pumamaqui)	21/6/2021	38,76	67,24	0,58	504	140	6	2,27	14,30	0,16	0,42
G	Muestra 3 (Palo Rosa)	22/6/2021	43,91	70,52	0,62	500	110	6	2,46	22,75	0,11	0,51
H	Muestra 3.1 (Palo Rosa)	23/6/2021	42,09	65,60	0,64	503	130	6	2,86	9,00	0,32	0,32
I	Muestra 3.2 (Palo Rosa)	24/6/2021	42,04	70,56	0,60	450	130	6	2,75	12,60	0,22	0,38
J	Muestra 3.3 (Palo Rosa)	28/6/2021	43,36	70,56	0,61	400	120	5	1,71	15,97	0,11	0,51
K	Muestra 3.4 (Palo Rosa)	29/6/2021	44,28	68,88	0,64	400	110	5	4,79	26,60	0,18	0,46
L	Muestra 4 (Charmuelan)	30/6/2021	45,47	65,60	0,69	401	105	5	6,85	23,20	0,30	0,40
M	Muestra 5 (Casquilla)	1/7/2021	46,98	68,88	0,68	400	105	5	5,83	25,98	0,22	0,46

PRUEBA A	
Muestra 4 (Charmuelan)	
Hora	Condiciones
11:15	Empieza el vacío por 10 min.
11:25	Se enciende el horno y se programa el PID para que alcance (100 ± 10) °C.
11:45	Se programa el PID para que alcance (250 ± 5) °C.
12:05	Se programa el PID para que alcance (500 ± 5) °C.
12:25	Se concluye el proceso y se apaga el horno.
12:35	Se apaga el vacío.

Nota	<i>Esta prueba se realizó con presencia de aire de entrada desde el inicio del vacío, durante todo el proceso y hasta el apagado del vacío.</i>
-------------	---

Observaciones	<i>Se alcanzó la temperatura requerida de (500 ± 5) °C. No se registraron valores de temperatura, dado que fue una prueba para determinar el funcionamiento del horno y definir los espesores de las muestras con las que se va a trabajar.</i>
----------------------	--

Resultado	<i>Se produjo poca cantidad de ceniza en la muestra obtenida. Al momento de extraer la muestra, esta no se redujo, conservando su volumen final. Se logró recuperar una gran cantidad de la muestra carbonizada, ya que se conservó en un solo cuerpo. Se produjo varias grietas a simple vista.</i>
------------------	--

PRUEBA B	
PRUEBA B', B'' y B'''	
Muestra 4 (Charmuelan)	
Hora	Condiciones
14:00	Empieza el vacío por 10 min.
14:10	Se enciende el horno y se programa el PID para que alcance (100 ± 10) °C.
14:30	Se programa el PID para que alcance (250 ± 5) °C.
14:50	Se programa el PID para que alcance (500 ± 5) °C.
15:10	Se concluye el proceso y se apaga el horno.
15:20	Se apaga el vacío.

Nota	<i>Esta prueba se realizó con presencia de aire de entrada desde el inicio del vacío, durante todo el proceso y hasta el apagado del vacío.</i>
-------------	---

Observaciones	<i>Se alcanzó la temperatura requerida de (500 ± 5) °C. No se registraron valores de temperatura, dado que fue una prueba para determinar el funcionamiento del horno y definir los espesores de las muestras con las que se va a trabajar.</i>
----------------------	--

Resultado B'	<i>Se produjo gran cantidad de ceniza alrededor de toda la muestra obtenida. Al momento de extraer la muestra, esta se pulverizó por completo. No se logró recuperar ningún tipo de residuo de la muestra carbonizada.</i>
---------------------	--

Resultado B''	<i>Se produjo gran cantidad de ceniza alrededor de toda la muestra obtenida. Al momento de extraer la muestra, esta se pulverizó por completo. No se logró recuperar ningún tipo de residuo de la muestra carbonizada.</i>
----------------------	--

Resultado B'''	<i>Se presentó bastante cantidad de ceniza, la cual se presentó alrededor de toda la muestra obtenida. Al momento de extraer la muestra, esta se redujo en un pequeño porcentaje, reduciendo un poco su volumen. Se logró recuperar pequeños residuos de la muestra carbonizada, ya que se fragmentó en diez partes. Se produjo pocas fisuras a simple vista.</i>
-----------------------	---

PRUEBA C	
PRUEBA C', C'' y C'''	
Muestra 4 (Charmuelan)	
Hora	Condiciones
10:45	Empieza el vacío por 10 min.
10:50	Se enciende el horno y se programa el PID para que alcance (100 ± 10) °C.
11:10	Se programa el PID para que alcance (250 ± 5) °C.
11:30	Se programa el PID para que alcance (500 ± 5) °C.
11:50	Se concluye el proceso y se apaga el horno.
12:00	Se apaga el vacío.

Nota	<i>Esta prueba se realizó con presencia de aire de entrada desde el inicio del vacío, durante todo el proceso y hasta el apagado del vacío.</i>
-------------	---

Observaciones	<i>Se alcanzó la temperatura requerida de (500 ± 5) °C. No se registraron valores de temperatura, dado que fue una prueba para determinar el funcionamiento del horno y definir los espesores de las muestras con las que se va a trabajar.</i>
----------------------	--

Resultado C'	<i>Se produjo gran cantidad de ceniza alrededor de toda la muestra obtenida. Al momento de extraer la muestra, esta se redujo en un pequeño porcentaje, reduciendo un poco su volumen. Se logró recuperar un pequeño residuo de la muestra carbonizada, ya que se conservó en un solo cuerpo. Presenta pocas fisuras a simple vista.</i>
---------------------	--

Resultado C''	<i>Se presentó gran cantidad de ceniza alrededor de toda la muestra obtenida. Al momento de extraer la muestra, esta se redujo en un pequeño porcentaje, reduciendo un poco su volumen. Se logró recuperar un residuo grande de la muestra carbonizada, ya que se fragmentó pero pudo conservarse en un solo cuerpo. Se produjo varias grietas y fisuras a simple vista.</i>
----------------------	--

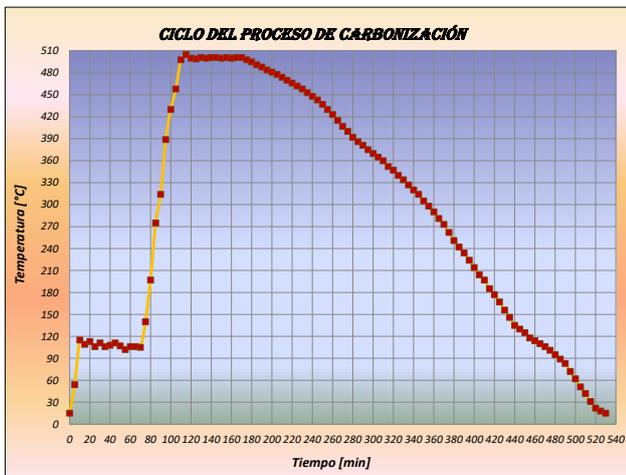
Resultado C'''	<i>Se produjo bastante cantidad de ceniza, la cual se presentó alrededor de toda la muestra obtenida. Al momento de extraer la muestra, esta se redujo en un pequeño porcentaje, reduciendo un poco su volumen. Se logró recuperar medianos residuos de la muestra carbonizada, ya que se fragmentó en 4 partes. Se produjo pocas fisuras a simple vista.</i>
-----------------------	---

PRUEBA D	
Muestra 1 (Motilón)	
Hora	Condiciones
9:45	Empieza el vacío por 20 min.
10:05	Se enciende el horno hasta que alcance (105 ± 10) °C.
10:15	Alcanza la temperatura de (105 ± 10) °C y se la mantiene por 1 hora.
11:15	Se sube la temperatura en el PID hasta (500 ± 5) °C como límite.
11:50	Se concluye incompleto el proceso y se apaga el horno.
12:10	Empieza el enfriamiento con una duración aproximada de 6 horas.
12:10	Se apaga el vacío.
Nota	Esta prueba se realizó sin presencia de aire de entrada durante los 20 minutos de vacío, al instante de encender el horno se permite la entrada de aire hasta concluir el proceso y el vacío.
Observaciones	La muestra se encendió dentro del tubo de cuarzo durante el proceso y no alcanzó la temperatura de 500 °C que se requería.
Resultado	Se produjo gran cantidad de ceniza, la cual se presentó alrededor de toda la muestra obtenida. Al momento de extraer la muestra, esta se redujo en un pequeño porcentaje, reduciendo poco su volumen. Se logró recuperar una considerable cantidad de la muestra carbonizada, ya que se fragmentó en dos partes grandes. Se produjo varias grietas y fisuras a simple vista.



Registro de valores		
Hora	Tiempo [min]	Temperatura [°C]
10:05	0	14
10:10	5	53
10:15	10	115
10:20	15	109
10:25	20	112
10:30	25	106
10:35	30	110
10:40	35	107
10:45	40	103
10:50	45	105
10:55	50	107
11:00	55	104
11:05	60	105
11:10	65	113
11:15	70	110
11:20	75	151
11:25	80	204
11:30	85	270
11:35	90	317
11:40	95	369
11:45	100	412
11:50	105	467
11:55	110	464
12:00	115	461
12:05	120	458
12:10	125	454
12:15	130	450
12:20	135	445
12:25	140	441
12:30	145	436
12:35	150	430
12:40	155	425
12:45	160	419
12:50	165	415
12:55	170	409
13:00	175	403
13:05	180	397
13:10	185	391
13:15	190	385
13:20	195	378
13:25	200	371
13:30	205	364
13:35	210	359
13:40	215	353
13:45	220	347
13:50	225	339
13:55	230	332
14:00	235	324
14:05	240	318
14:10	245	312
14:15	250	306
14:20	255	298
14:25	260	290
14:30	265	282
14:35	270	272
14:40	275	262
14:45	280	252
14:50	285	243
14:55	290	233
15:00	295	221
15:05	300	213
15:10	305	205
15:15	310	196
15:20	315	185
15:25	320	176
15:30	325	165
15:35	330	155
15:40	335	143
15:45	340	135
15:50	345	131
15:55	350	124
16:00	355	120
16:05	360	115
16:10	365	109
16:15	370	105
16:20	375	99
16:25	380	94
16:30	385	88
16:35	390	83
16:40	395	77
16:45	400	73
16:50	405	70
16:55	410	64
17:00	415	59
17:05	420	55
17:10	425	48
17:15	430	44
17:20	435	39
17:25	440	36
17:30	445	31
17:35	450	28
17:40	455	23
17:45	460	20
17:50	465	15

PRUEBA E	
Muestra 2 (Pumamaqui)	
Hora	Condiciones
10:45	Empieza el vacío por 20 min.
11:05	Se enciende el horno hasta que alcance (105 ± 10) °C.
11:15	Alcanza la temperatura de (105 ± 10) °C y se la mantiene por 1 hora.
12:15	Se sube la temperatura en el PID hasta (500 ± 5) °C como límite.
12:55	Alcanza la temperatura de (500 ± 5) °C y se la mantiene por 1 hora.
13:55	Se apaga el horno y se concluye el proceso.
14:15	Empieza el enfriamiento con una duración aproximada de 6 horas.
	Se apaga el vacío.
Nota	Esta prueba se realizó sin presencia de aire de entrada durante los 20 minutos de vacío, al instante de encender el horno se permite la entrada de aire hasta concluir el proceso y el vacío.
Observaciones	Se alcanzó la temperatura requerida de (500 ± 5) °C y se la mantuvo por una hora.
Resultado	La ceniza resultante se presentó alrededor de la muestra obtenida. Al instante de extraer la muestra, esta se pulverizó casi en su totalidad, reduciendo casi por completo su volumen. Se logró recuperar pequeños residuos de la muestra carbonizada, ya que se fragmentó en cuatro partes. Se produjo varias fisuras simple vista.



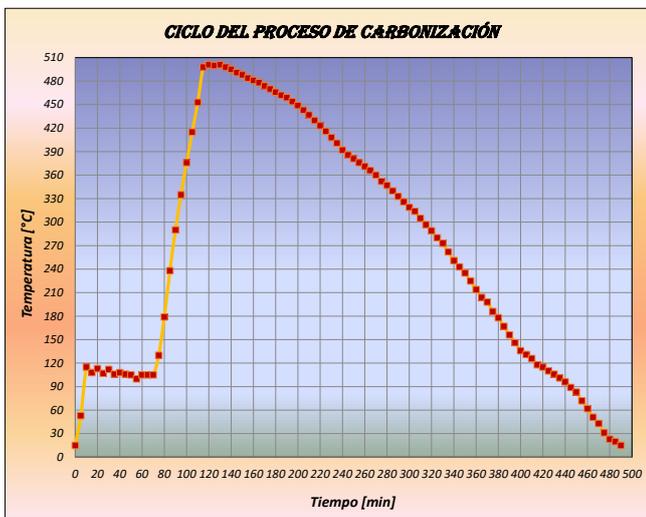
Registro de valores		
Hora	Tiempo [min]	Temperatura [°C]
	0	15
	5	54
	10	115
	15	109
	20	113
	25	106
	30	111
	35	106
	40	108
	45	111
	50	107
	55	102
	60	106
	65	106
	70	105
	75	140
	80	197
	85	275
	90	314
	95	389
	100	430
	105	458
	110	498
	115	505
	120	500
	125	499
	130	501
	135	500
	140	501
	145	501
	150	500
	155	501
	160	500
	165	501
	170	501
	175	498
	180	495
	185	491
	190	488
	195	484
	200	481
	205	478
	210	474
	215	470
	220	466
	225	462
	230	458
	235	453
	240	448
	245	443
	250	437
	255	430
	260	423
	265	415
	270	407
	275	400
	280	392
	285	386
	290	381
	295	375
	300	370
	305	365
	310	360
	315	352
	320	347
	325	340
	330	334
	335	327
	340	320
	345	314
	350	305
	355	298
	360	290
	365	281
	370	273
	375	262
	380	251
	385	242
	390	234
	395	224
	400	214
	405	204
	410	197
	415	185
	420	177
	425	167
	430	156
	435	146
	440	135
	445	130
	450	125
	455	118
	460	114
	465	110
	470	106
	475	101
	480	95
	485	89
	490	83
	495	72
	500	62
	505	51
	510	42
	515	31
	520	22
	525	18
	530	15

PRUEBA F	
Muestra 2.1 (Pumamaqui)	
Hora	Condiciones
10:05	Empieza el vacío por 20 min.
10:25	Se enciende el horno hasta que alcance (105 ± 10) °C.
10:35	Alcanza la temperatura de (105 ± 10) °C y se la mantiene por 1 hora.
11:35	Se sube la temperatura en el PID hasta (500 ± 5) °C como límite.
12:15	Alcanza la temperatura de (500 ± 5) °C y se la mantiene por 20 min.
12:35	Se apaga el horno y se concluye el proceso.
12:55	Empieza el enfriamiento con una duración aproximada de 6 horas.
12:55	Se apaga el vacío.

Nota	Esta prueba se realizó sin presencia de aire de entrada durante los 20 minutos de vacío, al instante de encender el horno se permite la entrada de aire hasta concluir el proceso y el vacío.
-------------	---

Observaciones	Se alcanzó la temperatura deseada de (500 ± 5) °C, y se la mantuvo por 20 min.
----------------------	--

Resultado	Se produjo gran cantidad de ceniza, la cual se presentó alrededor de toda la muestra obtenida. Al momento de extraer la muestra, esta se pulverizó en gran porcentaje, reduciendo notablemente su volumen. Se logró recuperar una cierta cantidad de residuos de la muestra carbonizada, ya que se fragmentó en cuatro partes. Se produjo varias grietas y fisuras a simple vista.
------------------	--



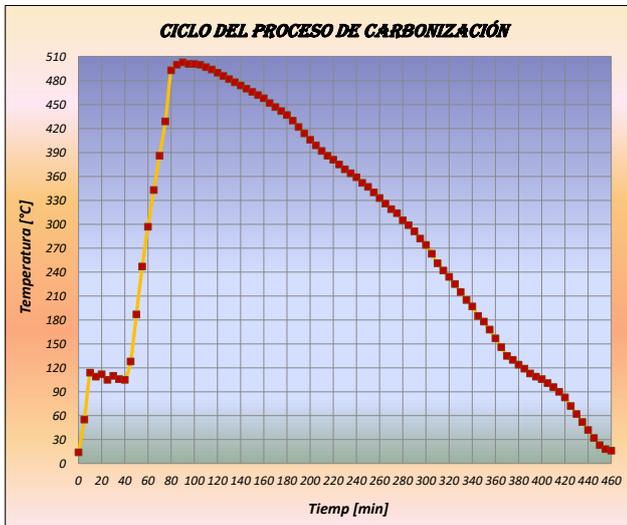
Registro de valores		
Hora	Tiempo [min]	Temperatura [°C]
10:25	0	15
10:30	5	53
10:35	10	115
10:40	15	108
10:45	20	113
10:50	25	107
10:55	30	112
11:00	35	106
11:05	40	108
11:10	45	106
11:15	50	105
11:20	55	100
11:25	60	105
11:30	65	105
11:35	70	105
11:40	75	130
11:45	80	179
11:50	85	238
11:55	90	290
12:00	95	335
12:05	100	376
12:10	105	415
12:15	110	453
12:20	115	498
12:25	120	501
12:30	125	500
12:35	130	501
12:40	135	498
12:45	140	495
12:50	145	491
12:55	150	488
13:00	155	484
13:05	160	481
13:10	165	478
13:15	170	474
13:20	175	470
13:25	180	466
13:30	185	462
13:35	190	459
13:40	195	454
13:45	200	449
13:50	205	443
13:55	210	437
14:00	215	430
14:05	220	423
14:10	225	416
14:15	230	408
14:20	235	401
14:25	240	392
14:30	245	386
14:35	250	381
14:40	255	376
14:45	260	371
14:50	265	366
14:55	270	360
15:00	275	352
15:05	280	347
15:10	285	340
15:15	290	333
15:20	295	326
15:25	300	319
15:30	305	314
15:35	310	305
15:40	315	297
15:45	320	289
15:50	325	280
15:55	330	273
16:00	335	262
16:05	340	251
16:10	345	243
16:15	350	235
16:20	355	225
16:25	360	214
16:30	365	204
16:35	370	198
16:40	375	186
16:45	380	178
16:50	385	167
16:55	390	156
17:00	395	146
17:05	400	136
17:10	405	131
17:15	410	126
17:20	415	118
17:25	420	115
17:30	425	110
17:35	430	106
17:40	435	101
17:45	440	96
17:50	445	89
17:55	450	83
18:00	455	72
18:05	460	62
18:10	465	51
18:15	470	43
18:20	475	31
18:25	480	23
18:30	485	20
18:35	490	15

PRUEBA G	
Muestra 3 (Palo Rosa)	
Hora	Condiciones
11:05	Empieza el vacío por 20 min.
11:25	Se enciende el horno hasta que alcance (105 ± 10) °C.
11:35	Alcanza la temperatura de (105 ± 10) °C y se la mantiene por 30 min.
12:05	Se sube la temperatura en el PID hasta (500 ± 5) °C como límite.
12:45	Alcanza la temperatura de (500 ± 5) °C y se la mantiene por 20 min.
13:05	Se apaga el horno y se concluye el proceso.
	Empieza el enfriamiento con una duración aproximada de 6 horas.
13:25	Se apaga el vacío.

Nota	Esta prueba se realizó sin presencia de aire de entrada durante los 20 minutos de vacío, al instante de encender el horno se permite la entrada de aire hasta concluir el proceso y el vacío.
-------------	---

Observaciones	Se alcanzó la temperatura de requerida de (500 ± 5) °C, y se la mantuvo por 20 min.
----------------------	---

Resultado	Se produjo gran cantidad de ceniza, la cual se presentó alrededor de toda la muestra obtenida. Al momento de extraer la muestra, esta se pulverizó en gran porcentaje, reduciendo notablemente su volumen. Se logró recuperar una considerable cantidad de residuos de la muestra carbonizada, ya que se fragmentó en tres partes. Se produjo varias grietas y fisuras a simple vista.
------------------	--



Registro de valores		
Hora	Tiempo [min]	Temperatura [°C]
11:25	0	14
11:30	5	55
11:35	10	114
11:40	15	109
11:45	20	112
11:50	25	105
11:55	30	110
12:00	35	106
12:05	40	105
12:10	45	128
12:15	50	187
12:20	55	247
12:25	60	297
12:30	65	343
12:35	70	386
12:40	75	429
12:45	80	493
12:50	85	500
12:55	90	503
13:00	95	501
13:05	100	501
13:10	105	500
13:15	110	497
13:20	115	494
13:25	120	490
13:30	125	486
13:35	130	482
13:40	135	478
13:45	140	474
13:50	145	470
13:55	150	466
14:00	155	462
14:05	160	458
14:10	165	452
14:15	170	447
14:20	175	442
14:25	180	437
14:30	185	430
14:35	190	422
14:40	195	414
14:45	200	406
14:50	205	399
14:55	210	392
15:00	215	386
15:05	220	381
15:10	225	375
15:15	230	369
15:20	235	364
15:25	240	359
15:30	245	352
15:35	250	347
15:40	255	340
15:45	260	333
15:50	265	326
15:55	270	319
16:00	275	314
16:05	280	305
16:10	285	299
16:15	290	291
16:20	295	282
16:25	300	274
16:30	305	263
16:35	310	251
16:40	315	242
16:45	320	234
16:50	325	225
16:55	330	215
17:00	335	205
17:05	340	197
17:10	345	185
17:15	350	178
17:20	355	168
17:25	360	157
17:30	365	146
17:35	370	135
17:40	375	130
17:45	380	124
17:50	385	119
17:55	390	113
18:00	395	109
18:05	400	106
18:10	405	101
18:15	410	96
18:20	415	90
18:25	420	83
18:30	425	72
18:35	430	62
18:40	435	52
18:45	440	42
18:50	445	32
18:55	450	23
19:00	455	18
19:05	460	16
19:10	465	14

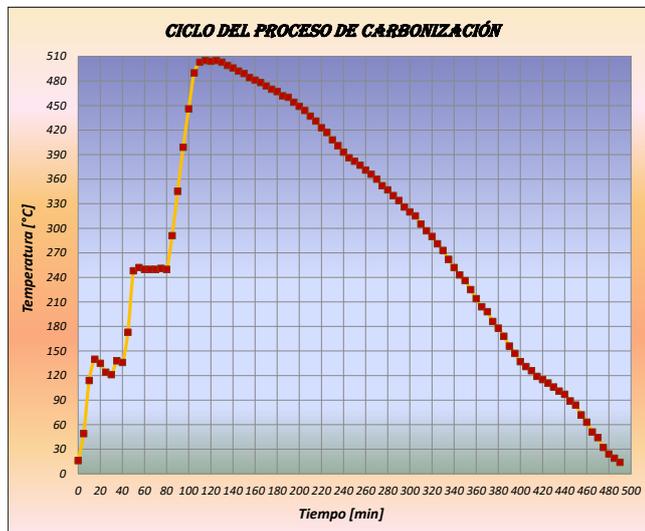
PRUEBA H	
Muestra 3.1 (Palo Rosa)	
Hora	Condiciones
9:50	Empieza el vacío por 20 min.
10:10	Se enciende el horno hasta que alcance (115 ± 10) °C.
10:20	Alcanza la temperatura de (130 ± 10) °C y se la mantiene por 30 min.
10:50	Se sube la temperatura en el PID hasta (250 ± 5) °C como límite.
11:00	Alcanza la temperatura de (250 ± 5) °C y se la mantiene por 30 min.
11:30	Se sube la temperatura en el PID hasta (500 ± 5) °C como límite.
12:00	Alcanza la temperatura de (500 ± 5) °C y se la mantiene por 20 min.
12:20	Se apaga el horno y se concluye el proceso.
12:40	Empieza el enfriamiento con una duración aproximada de 6 horas.
12:40	Se apaga el vacío.

Nota	Esta prueba se realizó sin presencia de aire de entrada durante los 20 minutos de vacío, al instante de encender el horno se permite la entrada de aire hasta concluir el proceso y el vacío.
-------------	---

Observaciones	Se alcanzó la temperatura de requerida de (500 ± 5) °C, y se la mantuvo por 20 min.
----------------------	---

Resultado	La ceniza resultante se presentó alrededor de toda la muestra obtenida. Al momento de extraer la muestra, esta se pulverizó en un pequeño porcentaje, reduciendo su volumen. Se logró recuperar una considerable cantidad de residuos de la muestra carbonizada, ya que se fragmentó en ocho partes. Se produjo varias fisuras a simple vista.
------------------	--

Registro de valores		
Hora	Tiempo [min]	Temperatura [°C]
10:10	0	16
10:15	5	49
10:20	10	114
10:25	15	140
10:30	20	135
10:35	25	124
10:40	30	121
10:45	35	138
10:50	40	136
10:55	45	173
11:00	50	248
11:05	55	252
11:10	60	250
11:15	65	250
11:20	70	250
11:25	75	251
11:30	80	250
11:35	85	291
11:40	90	345
11:45	95	399
11:50	100	446
11:55	105	490
12:00	110	503
12:05	115	505
12:10	120	504
12:15	125	505
12:20	130	503
12:25	135	499
12:30	140	496
12:35	145	492
12:40	150	489
12:45	155	484
12:50	160	481
12:55	165	478
13:00	170	474
13:05	175	470
13:10	180	467
13:15	185	462
13:20	190	460
13:25	195	454
13:30	200	449
13:35	205	444
13:40	210	437
13:45	215	431
13:50	220	423
13:55	225	417
14:00	230	408
14:05	235	401
14:10	240	393
14:15	245	386
14:20	250	382
14:25	255	377
14:30	260	371
14:35	265	366
14:40	270	360
14:45	275	352
14:50	280	347
14:55	285	340
15:00	290	334
15:05	295	326
15:10	300	320
15:15	305	315
15:20	310	305
15:25	315	297
15:30	320	290
15:35	325	281
15:40	330	273
15:45	335	262
15:50	340	252
15:55	345	243
16:00	350	236
16:05	355	225
16:10	360	214
16:15	365	204
16:20	370	198
16:25	375	186
16:30	380	178
16:35	385	168
16:40	390	156
16:45	395	147
16:50	400	137
16:55	405	131
17:00	410	126
17:05	415	119
17:10	420	115
17:15	425	111
17:20	430	106
17:25	435	101
17:30	440	97
17:35	445	89
17:40	450	84
17:45	455	72
17:50	460	63
17:55	465	51
18:00	470	44
18:05	475	32
18:10	480	24
18:15	485	19
18:20	490	14

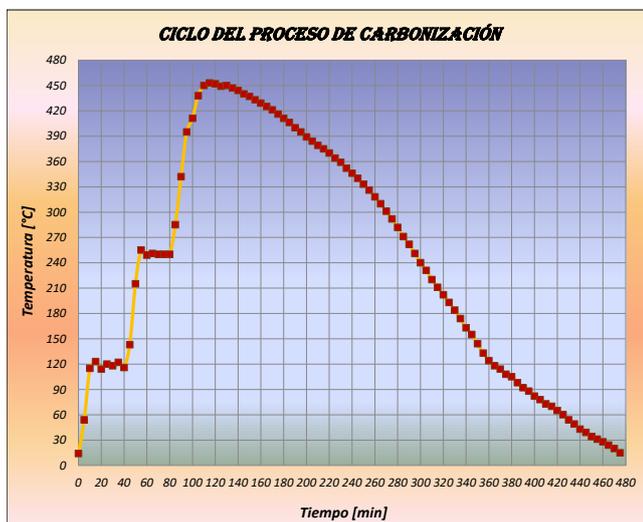


PRUEBA I	
Muestra 3.2 (Palo Rosa)	
Hora	Condiciones
10:30	Empieza el vacío por 20 min.
10:50	Se enciende el horno hasta que alcance (115 ± 10) °C.
11:00	Alcanza la temperatura de (115 ± 10) °C y se mantiene por 30 min.
11:30	Se sube la temperatura en el PID hasta (250 ± 5) °C como límite.
11:45	Alcanza la temperatura de (250 ± 5) °C y se la mantiene por 30 min.
12:15	Se sube la temperatura en el PID hasta (450 ± 5) °C como límite.
12:40	Alcanza la temperatura de (450 ± 5) °C y se la mantiene por 20 min.
13:00	Se apaga el horno y se concluye el proceso.
13:20	Empieza el enfriamiento con una duración aproximada de 6 horas.
	Se apaga el vacío.

Nota	Esta prueba se realizó sin presencia de aire de entrada desde que comienza el vacío y durante los primeros 20 min de encender el horno, luego se realizó la entrada de aire hasta concluir el proceso y el vacío.
-------------	---

Observaciones	Se alcanzó la temperatura deseada de (450 ± 5) °C, y se la mantuvo por 20 min.
----------------------	--

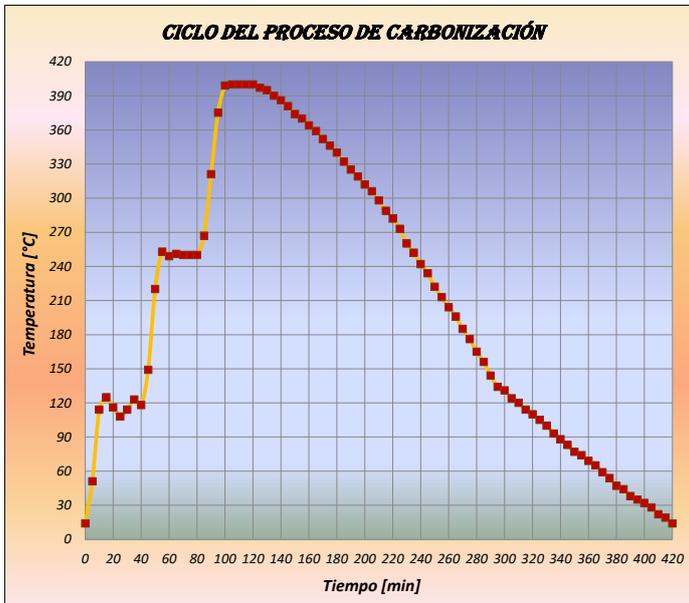
Resultado	Se produjo gran cantidad de ceniza, la cual se presentó alrededor de toda la muestra obtenida. Al momento de extraer la muestra, esta se pulverizó en un pequeño porcentaje, reduciendo su volumen. Se logró recuperar una considerable cantidad de residuos de la muestra carbonizada, ya que se fragmentó en ocho partes. Se produjo varias fisuras a simple vista.
------------------	---



Registro de valores		
Hora	Tiempo [min]	Temperatura [°C]
10:50	0	14
10:55	5	54
11:00	10	115
11:05	15	123
11:10	20	114
11:15	25	120
11:20	30	118
11:25	35	122
11:30	40	116
11:35	45	143
11:40	50	215
11:45	55	255
11:50	60	249
11:55	65	251
12:00	70	250
12:05	75	250
12:10	80	250
12:15	85	285
12:20	90	342
12:25	95	395
12:30	100	411
12:35	105	438
12:40	110	450
12:45	115	453
12:50	120	452
12:55	125	449
13:00	130	450
13:05	135	447
13:10	140	444
13:15	145	440
13:20	150	437
13:25	155	433
13:30	160	429
13:35	165	425
13:40	170	421
13:45	175	416
13:50	180	411
13:55	185	406
14:00	190	400
14:05	195	395
14:10	200	389
14:15	205	384
14:20	210	379
14:25	215	375
14:30	220	370
14:35	225	364
14:40	230	359
14:45	235	352
14:50	240	346
14:55	245	340
15:00	250	333
15:05	255	326
15:10	260	318
15:15	265	310
15:20	270	301
15:25	275	292
15:30	280	282
15:35	285	271
15:40	290	262
15:45	295	251
15:50	300	240
15:55	305	231
16:00	310	220
16:05	315	211
16:10	320	202
16:15	325	193
16:20	330	184
16:25	335	174
16:30	340	163
16:35	345	155
16:40	350	144
16:45	355	133
16:50	360	124
16:55	365	118
17:00	370	114
17:05	375	108
17:10	380	105
17:15	385	98
17:20	390	92
17:25	395	88
17:30	400	82
17:35	405	78
17:40	410	73
17:45	415	70
17:50	420	65
17:55	425	60
18:00	430	54
18:05	435	49
18:10	440	43
18:15	445	39
18:20	450	34
18:25	455	31
18:30	460	28
18:35	465	24
18:40	470	20
18:45	475	15

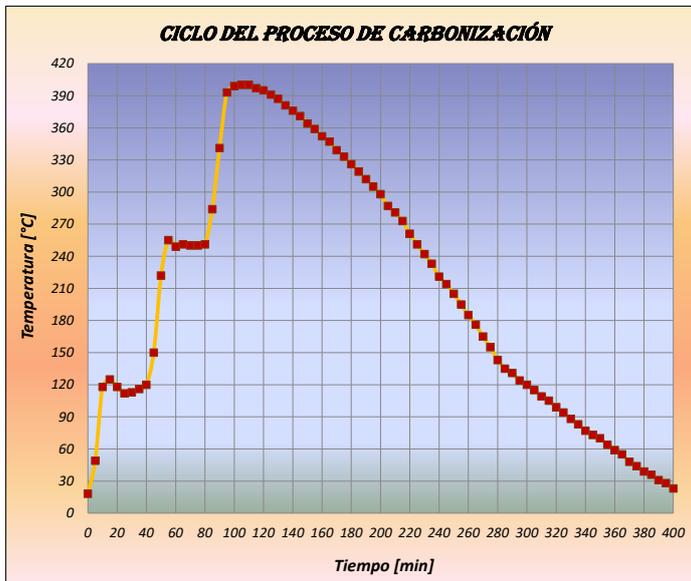
PRUEBA J	
Muestra 3.3 (Palo Rosa)	
Hora	Condiciones
9:45	Empieza el vacío por 20 min.
10:05	Se enciende el horno hasta que alcance (115 ± 10) °C.
10:15	Alcanza la temperatura de (115 ± 10) °C y se mantiene por 30 min.
10:45	Se sube la temperatura en el PID hasta (250 ± 5) °C como límite.
11:00	Alcanza la temperatura de (250 ± 5) °C y se la mantiene por 25 min.
11:25	Se sube la temperatura en el PID hasta (400 ± 5) °C como límite.
11:45	Alcanza la temperatura de (400 ± 5) °C y se la mantiene por 20 min.
12:05	Se apaga el horno y se concluye el proceso. Empieza el enfriamiento con una duración aproximada de 5 horas.
12:25	Se apaga el vacío.
Nota	Esta prueba se realizó sin presencia de aire de entrada desde que inicia el vacío hasta que finaliza.
Observaciones	Se alcanzó la temperatura deseada de (400 ± 5) °C, y se la mantuvo por 20 min.
Resultado	La ceniza resultante se presentó alrededor a la muestra obtenida. Al momento de extraer la muestra, esta se redujo en un pequeño porcentaje, reduciendo poco su volumen. Se logró recuperar una considerable cantidad de residuos de la muestra carbonizada, ya que se fragmentó en cuatro partes. Se produjo varias fisuras a simple vista.

Registro de valores		
Hora	Tiempo [min]	Temperatura [°C]
10:05	0	14
10:10	5	51
10:15	10	114
10:20	15	125
10:25	20	116
10:30	25	108
10:35	30	114
10:40	35	123
10:45	40	118
10:50	45	149
10:55	50	220
11:00	55	253
11:05	60	249
11:10	65	251
11:15	70	250
11:20	75	250
11:25	80	250
11:30	85	267
11:35	90	321
11:40	95	375
11:45	100	399
11:50	105	400
11:55	110	400
12:00	115	400
12:05	120	400
12:10	125	397
12:15	130	395
12:20	135	390
12:25	140	386
12:30	145	381
12:35	150	374
12:40	155	370
12:45	160	364
12:50	165	359
12:55	170	352
13:00	175	346
13:05	180	340
13:10	185	332
13:15	190	325
13:20	195	319
13:25	200	312
13:30	205	306
13:35	210	298
13:40	215	289
13:45	220	282
13:50	225	273
13:55	230	260
14:00	235	252
14:05	240	242
14:10	245	234
14:15	250	222
14:20	255	213
14:25	260	204
14:30	265	196
14:35	270	185
14:40	275	176
14:45	280	165
14:50	285	156
14:55	290	144
15:00	295	134
15:05	300	131
15:10	305	124
15:15	310	120
15:20	315	114
15:25	320	110
15:30	325	105
15:35	330	100
15:40	335	93
15:45	340	88
15:50	345	83
15:55	350	77
16:00	355	74
16:05	360	69
16:10	365	65
16:15	370	59
16:20	375	54
16:25	380	47
16:30	385	44
16:35	390	38
16:40	395	35
16:45	400	32
16:50	405	28
16:55	410	22
17:00	415	19
17:05	420	14



PRUEBA K	
Muestra 3.4 (Palo Rosa)	
Hora	Condiciones
8:50	Empieza el vacío por 20 min.
9:10	Se enciende el horno hasta que alcance (115 ± 10) °C.
9:20	Alcanza la temperatura de (115 ± 10) °C y se mantiene por 30 min.
9:50	Se sube la temperatura en el PID hasta (250 ± 5) °C como límite.
10:05	Alcanza la temperatura de (250 ± 5) °C y se la mantiene por 25 min.
10:30	Se sube la temperatura en el PID hasta (400 ± 5) °C como límite.
10:50	Alcanza la temperatura de (400 ± 5) °C y se la mantiene por 10 min.
11:00	Se apaga el horno y se concluye el proceso.
	Empieza el enfriamiento con una duración aproximada de 5 horas.
11:20	Se apaga el vacío.
Nota	Esta prueba se realizó con presencia de aire de entrada durante todo el proceso y el vacío.
Observaciones	Se alcanzó la temperatura deseada de (400 ± 5) °C, y se la mantuvo por 10 min.
Resultado	Se produjo poca cantidad de ceniza, la cual se presentó alrededor de toda la muestra obtenida. Al momento de extraer la muestra, esta se redujo en un pequeño porcentaje, reduciendo poco su volumen. Se logró recuperar una considerable cantidad de la muestra carbonizada, ya que se fragmentó en dos partes grandes. Se produjo varias grietas y fisuras a simple vista.

Registro de valores		
Hora	Tiempo [min]	Temperatura [°C]
9:10	0	18
9:15	5	49
9:20	10	118
9:25	15	125
9:30	20	118
9:35	25	112
9:40	30	113
9:45	35	116
9:50	40	120
9:55	45	150
10:00	50	222
10:05	55	255
10:10	60	249
10:15	65	251
10:20	70	250
10:25	75	250
10:30	80	251
10:35	85	284
10:40	90	341
10:45	95	393
10:50	100	399
10:55	105	400
11:00	110	400
11:05	115	397
11:10	120	395
11:15	125	391
11:20	130	387
11:25	135	381
11:30	140	376
11:35	145	371
11:40	150	364
11:45	155	359
11:50	160	352
11:55	165	347
12:00	170	339
12:05	175	333
12:10	180	326
12:15	185	319
12:20	190	312
12:25	195	305
12:30	200	298
12:35	205	287
12:40	210	281
12:45	215	273
12:50	220	261
12:55	225	251
13:00	230	242
13:05	235	233
13:10	240	221
13:15	245	214
13:20	250	205
13:25	255	195
13:30	260	185
13:35	265	176
13:40	270	165
13:45	275	155
13:50	280	143
13:55	285	135
14:00	290	131
14:05	295	124
14:10	300	120
14:15	305	115
14:20	310	109
14:25	315	105
14:30	320	99
14:35	325	94
14:40	330	88
14:45	335	83
14:50	340	77
14:55	345	73
15:00	350	70
15:05	355	64
15:10	360	59
15:15	365	55
15:20	370	48
15:25	375	44
15:30	380	39
15:35	385	36
15:40	390	31
15:45	395	28
15:50	400	23
15:55	405	20
16:00	410	15



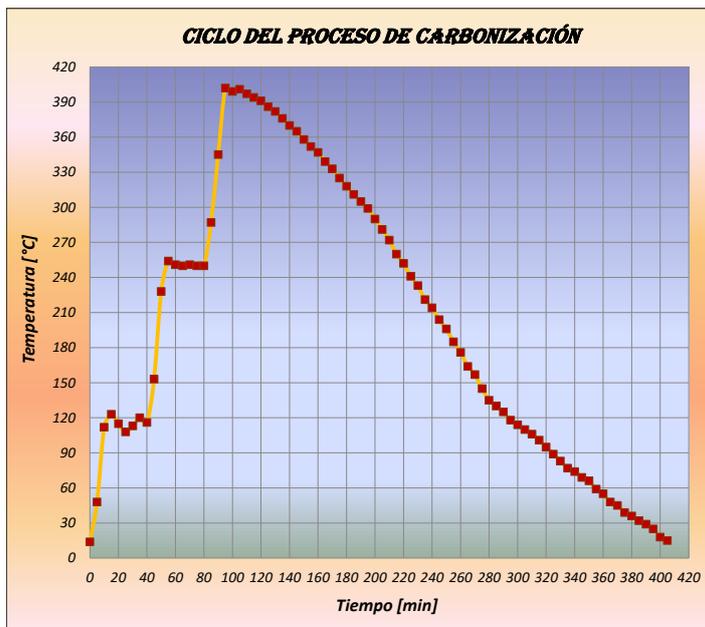
PRUEBA L	
Muestra 4 (Charmuelan)	
Hora	Condiciones
10:45	Empieza el vacío por 20 min.
11:05	Se enciende el horno hasta que alcance (115 ± 10) °C.
11:15	Alcanza la temperatura de (115 ± 10) °C y se mantiene por 30 min.
11:45	Se sube la temperatura en el PID hasta (250 ± 5) °C como límite.
12:00	Alcanza la temperatura de (250 ± 5) °C y se la mantiene por 25 min.
12:25	Se sube la temperatura en el PID hasta (400 ± 5) °C como límite.
12:40	Alcanza la temperatura de (400 ± 5) °C y se la mantiene por 10 min.
12:50	Se apaga el horno y se concluye el proceso.
13:10	Empieza el enfriamiento con una duración aproximada de 5 horas.
13:10	Se apaga el vacío.

Nota	Esta prueba se realizó con presencia de aire de entrada durante todo el proceso y el vacío.
-------------	---

Observaciones	Se alcanzó la temperatura deseada de (400 ± 5) °C, y se la mantuvo por 10 min.
----------------------	--

Resultado	Se produjo bastante cantidad de ceniza, la cual se presentó alrededor de toda la muestra obtenida. Al momento de extraer la muestra, esta se redujo en un pequeño porcentaje, reduciendo poco su volumen. Se logró recuperar una considerable cantidad de la muestra carbonizada, ya que se conservó en un solo cuerpo. Se produjo varias grietas a simple vista.
------------------	---

Registro de valores		
Hora	Tiempo [min]	Temperatura [°C]
11:05	0	14
11:10	5	48
11:15	10	112
11:20	15	123
11:25	20	115
11:30	25	108
11:35	30	113
11:40	35	120
11:45	40	116
11:50	45	153
11:55	50	228
12:00	55	254
12:05	60	251
12:10	65	250
12:15	70	251
12:20	75	250
12:25	80	250
12:30	85	287
12:35	90	345
12:40	95	402
12:45	100	399
12:50	105	401
12:55	110	397
13:00	115	394
13:05	120	391
13:10	125	386
13:15	130	382
13:20	135	376
13:25	140	370
13:30	145	365
13:35	150	358
13:40	155	352
13:45	160	347
13:50	165	339
13:55	170	333
14:00	175	325
14:05	180	318
14:10	185	311
14:15	190	305
14:20	195	299
14:25	200	290
14:30	205	281
14:35	210	272
14:40	215	260
14:45	220	252
14:50	225	241
14:55	230	233
15:00	235	221
15:05	240	214
15:10	245	204
15:15	250	196
15:20	255	185
15:25	260	176
15:30	265	164
15:35	270	157
15:40	275	145
15:45	280	135
15:50	285	130
15:55	290	125
16:00	295	118
16:05	300	114
16:10	305	110
16:15	310	106
16:20	315	101
16:25	320	95
16:30	325	89
16:35	330	83
16:40	335	77
16:45	340	74
16:50	345	69
16:55	350	66
17:00	355	59
17:05	360	55
17:10	365	48
17:15	370	45
17:20	375	39
17:25	380	36
17:30	385	32
17:35	390	29
17:40	395	25
17:45	400	18
17:50	405	15



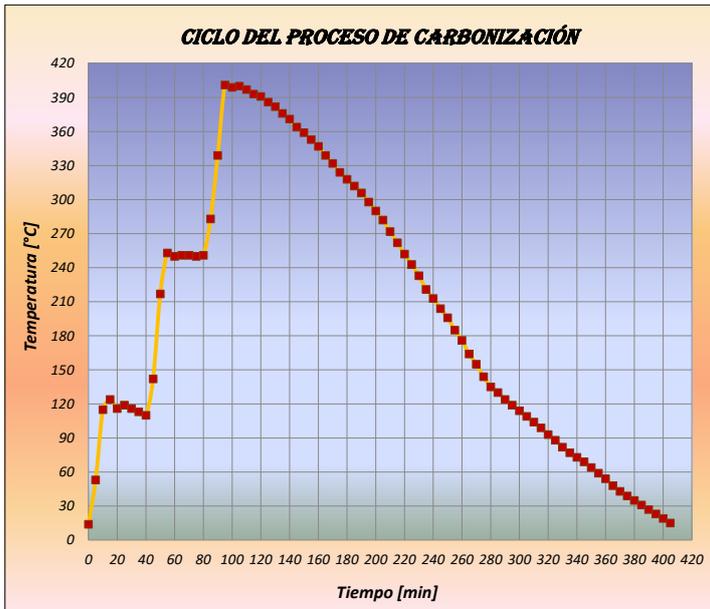
PRUEBA M	
Muestra 5 (Casquilla)	
Hora	Condiciones
10:55	Empieza el vacío por 20 min.
11:15	Se enciende el horno hasta que alcance (115 ± 10) °C.
11:25	Alcanza la temperatura de (115 ± 10) °C y se mantiene por 30 min.
11:55	Se sube la temperatura en el PID hasta (250 ± 5) °C como límite.
12:10	Alcanza la temperatura de (250 ± 5) °C y se la mantiene por 25 min.
12:35	Se sube la temperatura en el PID hasta (400 ± 5) °C como límite.
12:50	Alcanza la temperatura de (400 ± 5) °C y se la mantiene por 10 min.
13:00	Se apaga el horno y se concluye el proceso. Empieza el enfriamiento con una duración aproximada de 5 horas.
13:20	Se apaga el vacío.

Nota	Esta prueba se realizó con presencia de aire de entrada durante todo el proceso y el vacío.
-------------	---

Observaciones	Se alcanzó la temperatura requerida de (400 ± 5) °C, y se la mantuvo por 10 min.
----------------------	--

Resultado	Se produjo poca cantidad de ceniza, la cual se presentó en ciertas esquinas de la muestra obtenida. Al momento de extraer la muestra, esta no se redujo, conservando su volumen final. Se logró recuperar una gran cantidad de la muestra carbonizada, ya que se conservó en un solo cuerpo. Se produjo varias fisuras a simple vista.
------------------	--

Registro de valores		
Hora	Tiempo [min]	Temperatura [°C]
11:15	0	14
11:20	5	53
11:25	10	115
11:30	15	124
11:35	20	116
11:40	25	119
11:45	30	116
11:50	35	113
11:55	40	110
12:00	45	142
12:05	50	217
12:10	55	253
12:15	60	250
12:20	65	251
12:25	70	251
12:30	75	250
12:35	80	251
12:40	85	283
12:45	90	339
12:50	95	401
12:55	100	399
13:00	105	400
13:05	110	397
13:10	115	393
13:15	120	391
13:20	125	386
13:25	130	382
13:30	135	376
13:35	140	371
13:40	145	364
13:45	150	359
13:50	155	353
13:55	160	347
14:00	165	339
14:05	170	332
14:10	175	324
14:15	180	318
14:20	185	312
14:25	190	306
14:30	195	298
14:35	200	290
14:40	205	282
14:45	210	272
14:50	215	262
14:55	220	252
15:00	225	243
15:05	230	233
15:10	235	221
15:15	240	213
15:20	245	204
15:25	250	196
15:30	255	185
15:35	260	176
15:40	265	164
15:45	270	155
15:50	275	144
15:55	280	135
16:00	285	130
16:05	290	124
16:10	295	119
16:15	300	114
16:20	305	109
16:25	310	104
16:30	315	99
16:35	320	93
16:40	325	88
16:45	330	82
16:50	335	77
16:55	340	73
17:00	345	69
17:05	350	64
17:10	355	59
17:15	360	54
17:20	365	48
17:25	370	43
17:30	375	39
17:35	380	35
17:40	385	31
17:45	390	27
17:50	395	23
17:55	400	19
18:00	405	15



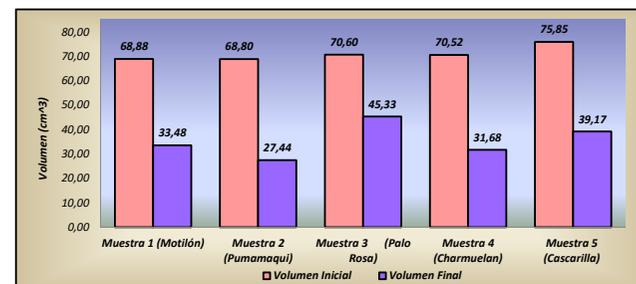
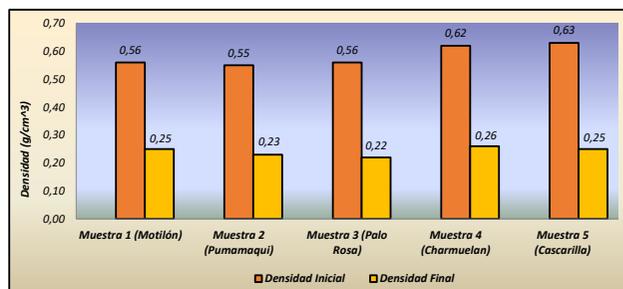
REGISTRO DE PRUEBAS REALIZADAS CON GAS PARA LA PARTE EXPERIMENTAL DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Prueba	Muestra	Fecha	Masa inicial [g]	Volumen inicial [cm ³]	Densidad inicial [g/cm ³]	Temperatura de carbonización [fin de proceso] [°C]	Duración del proceso sin tomar en cuenta el tiempo de vaciado inicial y final [min]	Tiempo de enfriamiento [horas]	Masa final [g]	Volumen final [cm ³]	Densidad final [g/cm ³]	Diferencia de densidad [g/cm ³]
N	Muestra 5 (Cascarilla)	8/7/2021	49,76	68,88	0,72	400	100	5	7,10	30,60	0,23	0,49
Ñ	Muestra 1 (Motilón)	9/7/2021	39,94	72,32	0,55	350	95	5	6,33	24,27	0,26	0,29
O	Muestra 2 (Pumamaqui)	12/7/2021	42,52	68,88	0,62	350	100	5	3,80	20,93	0,18	0,44
P	Muestra 3 (Palo Rosa)	13/7/2021	39,69	70,60	0,56	400	95	5	9,81	45,33	0,22	0,35
Q	Muestra 4 (Charmuelan)	14/7/2021	44,02	70,52	0,62	400	95	5	8,15	31,68	0,26	0,37
R	Muestra 5 (Cascarilla)	15/7/2021	47,61	75,85	0,63	400	95	5	9,95	39,17	0,25	0,37
S	Muestra 1 (Motilón)	16/7/2021	38,67	68,88	0,56	400	95	5	8,26	33,48	0,25	0,31
T	Muestra 2 (Pumamaqui)	19/7/2021	38,15	68,80	0,55	400	95	5	6,38	27,44	0,23	0,32

Pruebas entregadas para caracterización

Muestra	Densidad inicial [g/cm ³]	Densidad final [g/cm ³]
Muestra 1 (Motilón)	0,56	0,25
Muestra 2 (Pumamaqui)	0,55	0,23
Muestra 3 (Palo Rosa)	0,56	0,22
Muestra 4 (Charmuelan)	0,62	0,26
Muestra 5 (Cascarilla)	0,63	0,25
Promedio	0,58	0,24

Muestra	Volumen inicial [cm ³]	Volumen final [cm ³]
Muestra 1 (Motilón)	68,88	33,48
Muestra 2 (Pumamaqui)	68,80	27,44
Muestra 3 (Palo Rosa)	70,60	45,33
Muestra 4 (Charmuelan)	70,52	31,68
Muestra 5 (Cascarilla)	75,85	39,17
Promedio	70,93	35,42



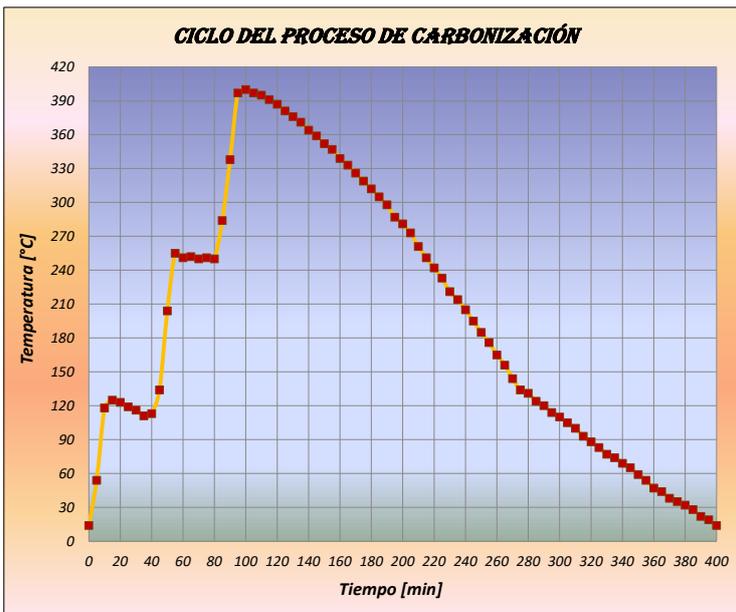
PRUEBA N	
Muestra 5 (Cascarilla)	
Hora	Condiciones
11:25	Empieza el vacío por 20 min.
11:45	Se enciende el horno hasta que alcance (115 ± 10) °C.
11:55	Alcanza la temperatura de (115 ± 10) °C y se mantiene por 30 min.
12:25	Se sube la temperatura en el PID hasta (250 ± 5) °C como límite.
12:40	Alcanza la temperatura de (250 ± 5) °C y se la mantiene por 25 min.
13:05	Se sube la temperatura en el PID hasta (400 ± 5) °C como límite.
13:20	Alcanza la temperatura de (400 ± 5) °C y se la mantiene por 5 min.
13:25	Se apaga el horno y se concluye el proceso.
13:45	Empieza el enfriamiento con una duración aproximada de 5 horas.
13:45	Se apaga el vacío.

Nota	Esta prueba se realizó con presencia del gas Argón como entrada, desde el encendido del horno hasta finalizar el proceso. No se tomó en cuenta la presencia del gas al momento del encendido y apagado del vacío.
-------------	---

Observaciones	Se alcanzó la temperatura requerida de (400 ± 5) °C, y se la mantuvo por 5 min.
----------------------	---

Resultado	Se presentó una mínima cantidad de ceniza en la muestra obtenida. Al momento de extraer la muestra, esta no se rompió, pero sufrió una fragmentación en una de sus esquinas. Se logró recuperar una gran cantidad de la muestra carbonizada, ya que se conservó en un solo cuerpo. Se produjo varias grietas y fisuras a simple vista.
------------------	--

Registro de valores		
Hora	Tiempo [min]	Temperatura [°C]
11:45	0	14
11:50	5	54
11:55	10	118
12:00	15	125
12:05	20	123
12:10	25	119
12:15	30	116
12:20	35	111
12:25	40	113
12:30	45	134
12:35	50	204
12:40	55	255
12:45	60	251
12:50	65	252
12:55	70	250
13:00	75	251
13:05	80	250
13:10	85	284
13:15	90	338
13:20	95	397
13:25	100	400
13:30	105	397
13:35	110	395
13:40	115	391
13:45	120	387
13:50	125	381
13:55	130	376
14:00	135	371
14:05	140	364
14:10	145	359
14:15	150	352
14:20	155	347
14:25	160	339
14:30	165	333
14:35	170	326
14:40	175	319
14:45	180	312
14:50	185	305
14:55	190	298
15:00	195	287
15:05	200	281
15:10	205	273
15:15	210	261
15:20	215	251
15:25	220	242
15:30	225	233
15:35	230	221
15:40	235	214
15:45	240	205
15:50	245	195
15:55	250	185
16:00	255	176
16:05	260	165
16:10	265	156
16:15	270	144
16:20	275	134
16:25	280	131
16:30	285	124
16:35	290	120
16:40	295	114
16:45	300	110
16:50	305	105
16:55	310	100
17:00	315	93
17:05	320	88
17:10	325	83
17:15	330	77
17:20	335	74
17:25	340	69
17:30	345	65
17:35	350	59
17:40	355	54
17:45	360	47
17:50	365	44
17:55	370	38
18:00	375	35
18:05	380	32
18:10	385	28
18:15	390	22
18:20	395	19
18:25	400	14



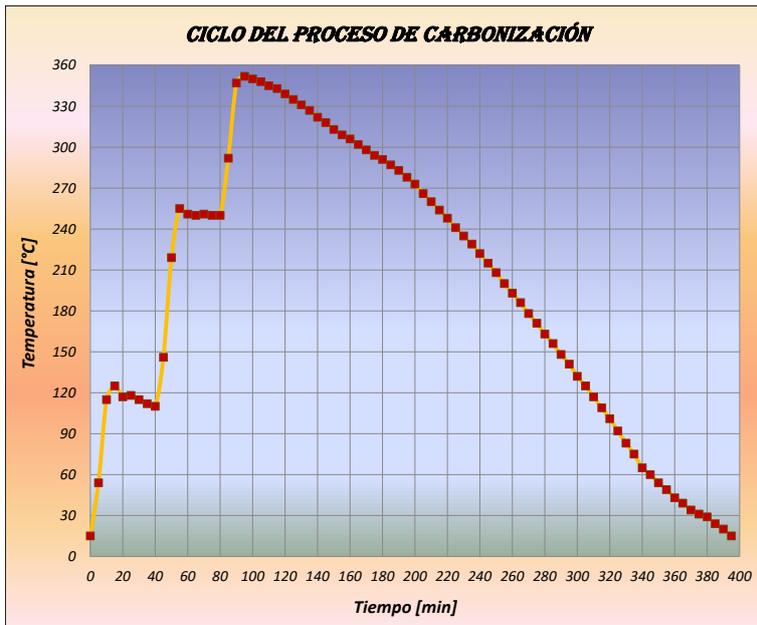
PRUEBA N°	
Muestra 1 (Motilón)	
Hora	Condiciones
10:50	Empieza el vacío por 20 min.
11:10	Se enciende el horno hasta que alcance (115 ± 10) °C.
11:20	Alcanza la temperatura de (115 ± 10) °C y se mantiene por 30 min.
11:50	Se sube la temperatura en el PID hasta (250 ± 5) °C como límite.
12:05	Alcanza la temperatura de (250 ± 5) °C y se la mantiene por 25 min.
12:30	Se sube la temperatura en el PID hasta (350 ± 5) °C como límite.
12:40	Alcanza la temperatura de (350 ± 5) °C y se la mantiene por 5 min.
12:45	Se apaga el horno y se concluye el proceso.
	Empieza el enfriamiento con una duración aproximada de 5 horas.
13:05	Se apaga el vacío.

Nota	Esta prueba se realizó con presencia del gas Argón como entrada, desde el encendido del horno hasta finalizar el proceso. No se tomó en cuenta la presencia del gas al momento del encendido y apagado del vacío.
-------------	---

Observaciones	Se alcanzó la temperatura requerida de (350 ± 5) °C, y se la mantuvo por 5 min.
----------------------	---

Resultado	Se produjo poca cantidad de ceniza en la muestra obtenida. Al momento de extraer la muestra, esta no se fragmentó. Se logró recuperar una gran cantidad de la muestra carbonizada, ya que se conservó en un solo cuerpo. Se produjo varias fisuras a simple vista.
------------------	--

Registro de valores		
Hora	Tiempo [min]	Temperatura [°C]
11:10	0	15
11:15	5	54
11:20	10	115
11:25	15	125
11:30	20	117
11:35	25	118
11:40	30	115
11:45	35	112
11:50	40	110
11:55	45	146
12:00	50	219
12:05	55	255
12:10	60	251
12:15	65	250
12:20	70	251
12:25	75	250
12:30	80	250
12:35	85	292
12:40	90	347
12:45	95	352
12:50	100	350
12:55	105	348
13:00	110	345
13:05	115	343
13:10	120	339
13:15	125	335
13:20	130	331
13:25	135	327
13:30	140	322
13:35	145	318
13:40	150	313
13:45	155	309
13:50	160	306
13:55	165	302
14:00	170	298
14:05	175	294
14:10	180	291
14:15	185	287
14:20	190	283
14:25	195	278
14:30	200	273
14:35	205	266
14:40	210	260
14:45	215	254
14:50	220	248
14:55	225	241
15:00	230	235
15:05	235	229
15:10	240	222
15:15	245	215
15:20	250	208
15:25	255	200
15:30	260	193
15:35	265	186
15:40	270	178
15:45	275	171
15:50	280	163
15:55	285	156
16:00	290	148
16:05	295	141
16:10	300	132
16:15	305	125
16:20	310	117
16:25	315	109
16:30	320	101
16:35	325	92
16:40	330	83
16:45	335	75
16:50	340	65
16:55	345	60
17:00	350	54
17:05	355	49
17:10	360	43
17:15	365	39
17:20	370	34
17:25	375	31
17:30	380	29
17:35	385	24
17:40	390	20
17:45	395	15



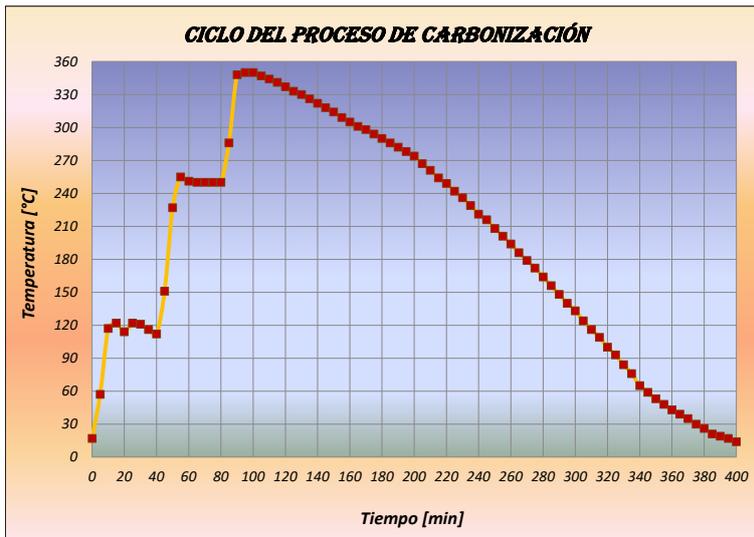
PRUEBA O	
Muestra 2 (Pumamaqui)	
Hora	Condiciones
11:50	Empieza el vacío por 20 min.
12:10	Se enciende el horno hasta que alcance (115 ± 10) °C.
12:20	Alcanza la temperatura de (115 ± 10) °C y se mantiene por 30 min.
12:50	Se sube la temperatura en el PID hasta (250 ± 5) °C como límite.
13:05	Alcanza la temperatura de (250 ± 5) °C y se la mantiene por 25 min.
13:30	Se sube la temperatura en el PID hasta (350 ± 5) °C como límite.
13:40	Alcanza la temperatura de (350 ± 5) °C y se la mantiene por 10 min.
13:50	Se apaga el horno y se concluye el proceso.
	Empieza el enfriamiento con una duración aproximada de 5 horas.
14:10	Se apaga el vacío.

Nota:	Esta prueba se realizó con presencia del gas Argón como entrada, desde el encendido del horno hasta finalizar el proceso. No se tomó en cuenta la presencia del gas al momento del encendido y apagado del vacío.
-------	---

Observaciones	Se alcanzó la temperatura requerida de (350 ± 5) °C, y se la mantuvo por 10 min.
---------------	--

Resultado	Se produjo poca cantidad de ceniza en la muestra obtenida. Al momento de extraer la muestra, esta no se fragmentó. Se logró recuperar una gran cantidad de la muestra carbonizada, ya que se conservó en un solo cuerpo. Se produjo varias grietas y fisuras a simple vista. Al momento de manipularla para la toma de medidas se fragmentó en dos grandes partes.
-----------	--

Registro de valores		
Hora	Tiempo [min]	Temperatura [°C]
12:10	0	17
12:15	5	57
12:20	10	117
12:25	15	122
12:30	20	114
12:35	25	122
12:40	30	121
12:45	35	116
12:50	40	112
12:55	45	151
13:00	50	227
13:05	55	255
13:10	60	251
13:15	65	250
13:20	70	250
13:25	75	250
13:30	80	250
13:35	85	286
13:40	90	348
13:45	95	350
13:50	100	350
13:55	105	347
14:00	110	344
14:05	115	341
14:10	120	337
14:15	125	333
14:20	130	330
14:25	135	326
14:30	140	322
14:35	145	318
14:40	150	314
14:45	155	309
14:50	160	305
14:55	165	301
15:00	170	298
15:05	175	294
15:10	180	290
15:15	185	286
15:20	190	282
15:25	195	278
15:30	200	274
15:35	205	267
15:40	210	261
15:45	215	254
15:50	220	249
15:55	225	242
16:00	230	236
16:05	235	229
16:10	240	221
16:15	245	216
16:20	250	208
16:25	255	201
16:30	260	194
16:35	265	186
16:40	270	179
16:45	275	172
16:50	280	164
16:55	285	156
17:00	290	148
17:05	295	140
17:10	300	133
17:15	305	124
17:20	310	116
17:25	315	109
17:30	320	100
17:35	325	93
17:40	330	84
17:45	335	76
17:50	340	65
17:55	345	59
18:00	350	53
18:05	355	48
18:10	360	43
18:15	365	39
18:20	370	35
18:25	375	30
18:30	380	26
18:35	385	21
18:40	390	19
18:45	395	17
18:50	400	14



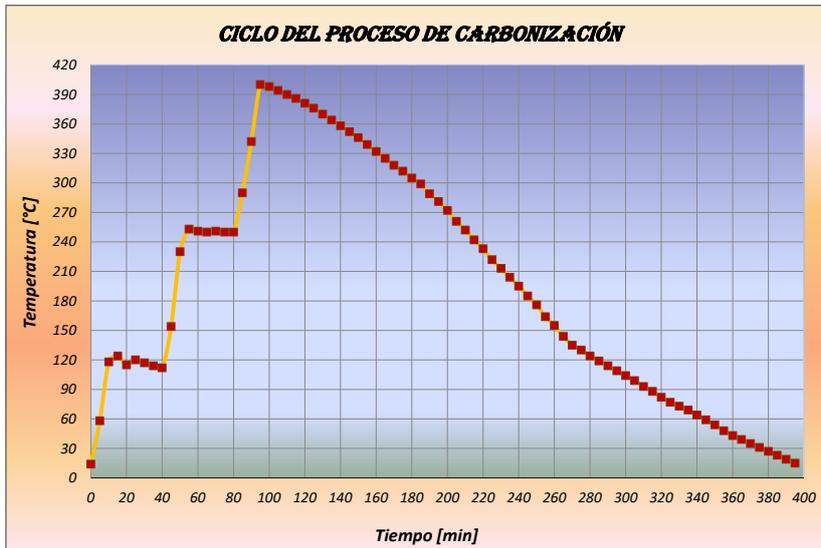
PRUEBA P	
Muestra 3 (Palo Rosa)	
Hora	Condiciones
8:50	Empieza el vacío por 20 min.
9:10	Se enciende el horno hasta que alcance (115 ± 10) °C.
9:20	Alcanza la temperatura de (115 ± 10) °C y se mantiene por 30 min.
9:50	Se sube la temperatura en el PID hasta (250 ± 5) °C como límite.
10:05	Alcanza la temperatura de (250 ± 5) °C y se la mantiene por 25 min.
10:30	Se sube la temperatura en el PID hasta 400 °C como límite.
10:45	Alcanza la temperatura de 400 °C, se apaga el horno y se concluye el proceso. Empieza el enfriamiento con una duración aproximada de 5 horas.
11:05	Se apaga el vacío.

Nota	Esta prueba se realizó con presencia del gas Argón como entrada, desde el encendido del horno hasta finalizar el proceso. No se tomó en cuenta la presencia del gas al momento del encendido y apagado del vacío.
-------------	---

Observaciones	Se alcanzó la temperatura de carbonización requerida de 400 °C.
----------------------	---

Resultado	Se presentó una mínima cantidad de ceniza en las esquinas de la muestra obtenida. Al momento de extraer la muestra, esta no se fragmentó. Se logró recuperar una gran cantidad de la muestra carbonizada, ya que se conservó en un solo cuerpo. Se produjo varias grietas y fisuras a simple vista.
------------------	---

Registro de valores		
Hora	Tiempo [min]	Temperatura [°C]
9:10	0	14
9:15	5	58
9:20	10	118
9:25	15	124
9:30	20	115
9:35	25	120
9:40	30	117
9:45	35	114
9:50	40	112
9:55	45	154
10:00	50	230
10:05	55	253
10:10	60	251
10:15	65	250
10:20	70	251
10:25	75	250
10:30	80	250
10:35	85	290
10:40	90	342
10:45	95	400
10:50	100	398
10:55	105	394
11:00	110	390
11:05	115	386
11:10	120	381
11:15	125	376
11:20	130	370
11:25	135	364
11:30	140	358
11:35	145	352
11:40	150	346
11:45	155	339
11:50	160	332
11:55	165	325
12:00	170	318
12:05	175	312
12:10	180	305
12:15	185	299
12:20	190	289
12:25	195	281
12:30	200	272
12:35	205	261
12:40	210	252
12:45	215	242
12:50	220	233
12:55	225	222
13:00	230	213
13:05	235	204
13:10	240	195
13:15	245	185
13:20	250	176
13:25	255	164
13:30	260	155
13:35	265	144
13:40	270	135
13:45	275	130
13:50	280	124
13:55	285	119
14:00	290	114
14:05	295	109
14:10	300	104
14:15	305	99
14:20	310	93
14:25	315	88
14:30	320	82
14:35	325	77
14:40	330	73
14:45	335	69
14:50	340	64
14:55	345	59
15:00	350	54
15:05	355	48
15:10	360	43
15:15	365	39
15:20	370	35
15:25	375	31
15:30	380	27
15:35	385	23
15:40	390	19
15:45	395	15



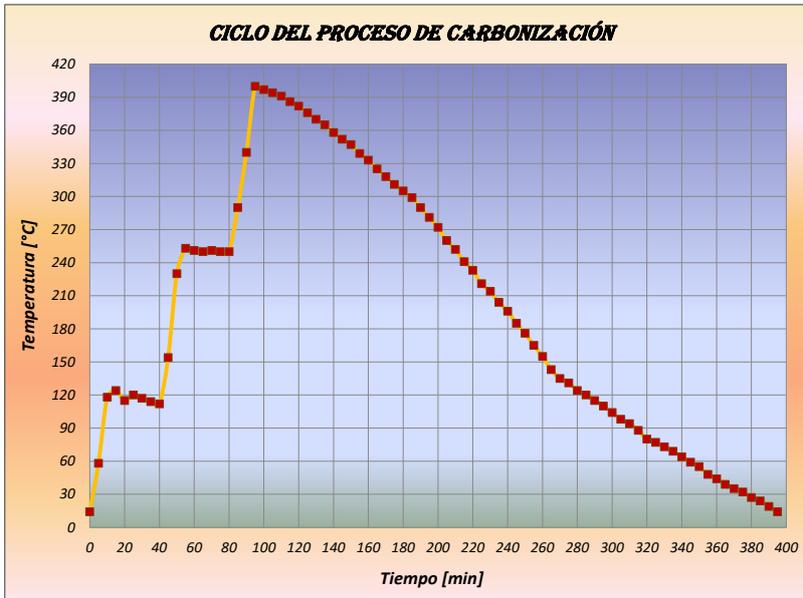
PRUEBA Q	
Muestra 4 (Charmuelan)	
Hora	Condiciones
9:20	Empieza el vacío por 20 min.
9:40	Se enciende el horno hasta que alcance (115 ± 10) °C.
9:50	Alcanza la temperatura de (115 ± 10) °C y se mantiene por 30 min.
10:20	Se sube la temperatura en el PID hasta (250 ± 5) °C como límite.
10:35	Alcanza la temperatura de (250 ± 5) °C y se la mantiene por 25 min.
11:00	Se sube la temperatura en el PID hasta 400 °C como límite.
11:15	Alcanza la temperatura de 400 °C, se apaga el horno y se concluye el proceso.
11:25	Empieza el enfriamiento con una duración aproximada de 5 horas.
11:25	Se apaga el vacío.

Nota	Esta prueba se realizó con presencia del gas Argón como entrada, desde el encendido del horno hasta finalizar el proceso. No se tomó en cuenta la presencia del gas al momento del encendido y apagado del vacío.
-------------	---

Observaciones	Se alcanzó la temperatura de carbonización requerida de 400 °C.
----------------------	---

Resultado	Se presentó muy poca cantidad de ceniza en la muestra obtenida. Al momento de extraer la muestra, esta no se fragmentó. Se logró recuperar una gran cantidad de la muestra carbonizada, ya que se conservó en un solo cuerpo. Se produjo varias grietas y fisuras a simple vista.
------------------	---

Registro de valores		
Hora	Tiempo [min]	Temperatura [°C]
9:40	0	14
9:45	5	58
9:50	10	118
9:55	15	124
10:00	20	115
10:05	25	120
10:10	30	117
10:15	35	114
10:20	40	112
10:25	45	154
10:30	50	230
10:35	55	253
10:40	60	251
10:45	65	250
10:50	70	251
10:55	75	250
11:00	80	250
11:05	85	290
11:10	90	340
11:15	95	400
11:20	100	397
11:25	105	394
11:30	110	391
11:35	115	386
11:40	120	382
11:45	125	376
11:50	130	370
11:55	135	365
12:00	140	358
12:05	145	352
12:10	150	347
12:15	155	339
12:20	160	333
12:25	165	325
12:30	170	318
12:35	175	311
12:40	180	305
12:45	185	299
12:50	190	290
12:55	195	281
13:00	200	272
13:05	205	260
13:10	210	252
13:15	215	241
13:20	220	233
13:25	225	221
13:30	230	214
13:35	235	204
13:40	240	196
13:45	245	185
13:50	250	176
13:55	255	165
14:00	260	155
14:05	265	143
14:10	270	135
14:15	275	131
14:20	280	124
14:25	285	120
14:30	290	115
14:35	295	110
14:40	300	104
14:45	305	98
14:50	310	94
14:55	315	88
15:00	320	80
15:05	325	77
15:10	330	73
15:15	335	69
15:20	340	64
15:25	345	59
15:30	350	55
15:35	355	48
15:40	360	44
15:45	365	39
15:50	370	35
15:55	375	32
16:00	380	27
16:05	385	24
16:10	390	19
16:15	395	14



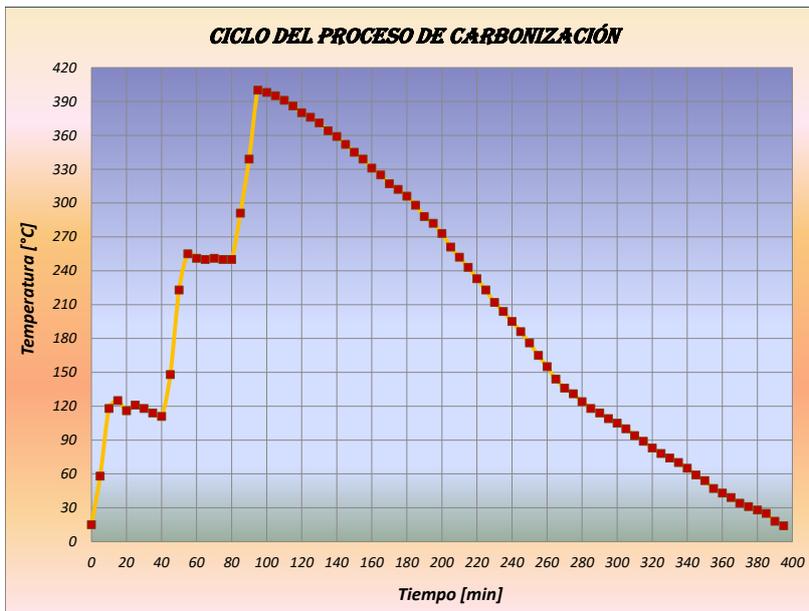
PRUEBA R	
Muestra 5 (Cascarilla)	
Hora	Condiciones
8:55	Empieza el vacío por 20 min.
9:15	Se enciende el horno hasta que alcance (115 ± 10) °C.
9:25	Alcanza la temperatura de (115 ± 10) °C y se mantiene por 30 min.
9:55	Se sube la temperatura en el PID hasta (250 ± 5) °C como límite.
10:10	Alcanza la temperatura de (250 ± 5) °C y se la mantiene por 25 min.
10:35	Se sube la temperatura en el PID hasta 400 °C como límite.
10:50	Alcanza la temperatura de 400 °C, se apaga el horno y se concluye el proceso.
	Empieza el enfriamiento con una duración aproximada de 5 horas.
11:10	Se apaga el vacío.

Nota	Esta prueba se realizó con presencia del gas Argón como entrada, desde el encendido del horno hasta finalizar el proceso. No se tomó en cuenta la presencia del gas al momento del encendido y apagado del vacío.
-------------	---

Observaciones	Se alcanzó la temperatura de carbonización requerida de 400 °C.
----------------------	---

Resultado	Se produjo una mínima cantidad de ceniza en la muestra obtenida. Al momento de extraer la muestra, esta no se fragmentó. Se logró recuperar una gran cantidad de la muestra carbonizada, ya que se conservó en un solo cuerpo. Se produjo varias grietas y fisuras a simple vista.
------------------	--

Registro de valores		
Hora	Tiempo [min]	Temperatura [°C]
9:15	0	15
9:20	5	58
9:25	10	118
9:30	15	125
9:35	20	116
9:40	25	121
9:45	30	118
9:50	35	114
9:55	40	111
10:00	45	148
10:05	50	223
10:10	55	255
10:15	60	251
10:20	65	250
10:25	70	251
10:30	75	250
10:35	80	250
10:40	85	291
10:45	90	339
10:50	95	400
10:55	100	398
11:00	105	395
11:05	110	391
11:10	115	386
11:15	120	380
11:20	125	376
11:25	130	371
11:30	135	364
11:35	140	359
11:40	145	352
11:45	150	345
11:50	155	339
11:55	160	331
12:00	165	325
12:05	170	317
12:10	175	312
12:15	180	306
12:20	185	298
12:25	190	288
12:30	195	282
12:35	200	273
12:40	205	261
12:45	210	252
12:50	215	243
12:55	220	233
13:00	225	223
13:05	230	212
13:10	235	204
13:15	240	195
13:20	245	186
13:25	250	176
13:30	255	165
13:35	260	155
13:40	265	144
13:45	270	136
13:50	275	131
13:55	280	124
14:00	285	118
14:05	290	114
14:10	295	109
14:15	300	105
14:20	305	100
14:25	310	94
14:30	315	89
14:35	320	83
14:40	325	78
14:45	330	74
14:50	335	70
14:55	340	65
15:00	345	59
15:05	350	54
15:10	355	47
15:15	360	43
15:20	365	39
15:25	370	34
15:30	375	31
15:35	380	28
15:40	385	25
15:45	390	18
15:50	395	14



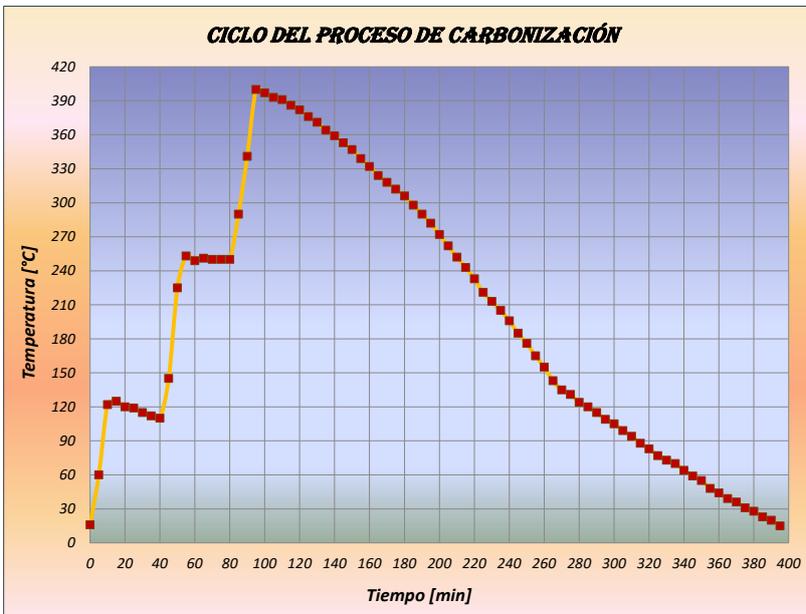
PRUEBA 5	
Muestra 1 (Motilón)	
Hora	Condiciones
11:00	Empieza el vacío por 20 min.
11:20	Se enciende el horno hasta que alcance (115 ± 10) °C.
11:30	Alcanza la temperatura de (115 ± 10) °C y se mantiene por 30 min.
12:00	Se sube la temperatura en el PID hasta (250 ± 5) °C como límite.
12:15	Alcanza la temperatura de (250 ± 5) °C y se la mantiene por 25 min.
12:40	Se sube la temperatura en el PID hasta 400 °C como límite.
12:55	Alcanza la temperatura de 400 °C, se apaga el horno y se concluye el proceso.
	Empieza el enfriamiento con una duración aproximada de 5 horas.
13:15	Se apaga el vacío.

Nota	Esta prueba se realizó con presencia del gas Argón como entrada, desde el encendido del horno hasta finalizar el proceso. No se tomó en cuenta la presencia del gas al momento del encendido y apagado del vacío.
-------------	---

Observaciones	Se alcanzó la temperatura de carbonización requerida de 400 °C.
----------------------	---

Resultado	Se presentó una mínima cantidad de ceniza en las esquinas de la muestra obtenida. Al momento de extraer la muestra, esta no se rompió, pero sufrió una pequeña fragmentación en una de sus esquinas. Se logró recuperar una gran cantidad de la muestra carbonizada, ya que se conservó en un solo cuerpo. Se produjo varias grietas y fisuras a simple vista.
------------------	--

Registro de valores		
Hora	Tiempo [min]	Temperatura [°C]
11:20	0	16
11:25	5	60
11:30	10	122
11:35	15	125
11:40	20	120
11:45	25	119
11:50	30	115
11:55	35	112
12:00	40	110
12:05	45	145
12:10	50	225
12:15	55	253
12:20	60	249
12:25	65	251
12:30	70	250
12:35	75	250
12:40	80	250
12:45	85	290
12:50	90	341
12:55	95	400
13:00	100	397
13:05	105	393
13:10	110	391
13:15	115	386
13:20	120	382
13:25	125	376
13:30	130	371
13:35	135	364
13:40	140	359
13:45	145	353
13:50	150	347
13:55	155	339
14:00	160	332
14:05	165	324
14:10	170	318
14:15	175	312
14:20	180	306
14:25	185	298
14:30	190	290
14:35	195	282
14:40	200	272
14:45	205	262
14:50	210	252
14:55	215	243
15:00	220	233
15:05	225	221
15:10	230	213
15:15	235	205
15:20	240	196
15:25	245	185
15:30	250	176
15:35	255	165
15:40	260	155
15:45	265	143
15:50	270	135
15:55	275	131
16:00	280	124
16:05	285	120
16:10	290	115
16:15	295	109
16:20	300	105
16:25	305	99
16:30	310	94
16:35	315	88
16:40	320	83
16:45	325	77
16:50	330	73
16:55	335	70
17:00	340	64
17:05	345	59
17:10	350	55
17:15	355	48
17:20	360	44
17:25	365	39
17:30	370	36
17:35	375	31
17:40	380	28
17:45	385	23
17:50	390	20
17:55	395	15



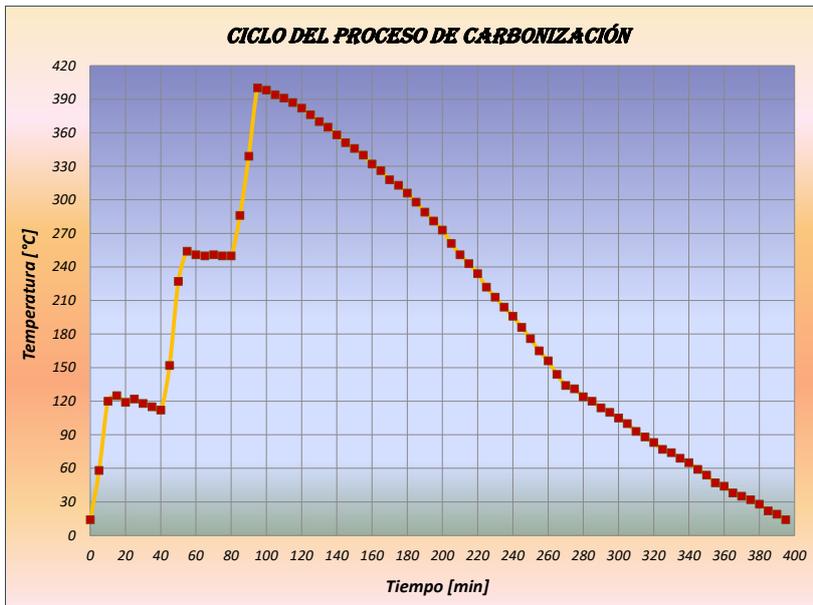
PRUEBA T	
Muestra 2 (Pumamaqui)	
Hora	Condiciones
9:40	Empieza el vacío por 20 min.
10:00	Se enciende el horno hasta que alcance (115 ± 10) °C.
10:10	Alcanza la temperatura de (115 ± 10) °C y se mantiene por 30 min.
10:40	Se sube la temperatura en el PID hasta (250 ± 5) °C como límite.
10:55	Alcanza la temperatura de (250 ± 5) °C y se la mantiene por 25 min.
11:20	Se sube la temperatura en el PID hasta 400 °C como límite.
11:35	Alcanza la temperatura de 400 °C, se apaga el horno y se concluye el proceso. Empieza el enfriamiento con una duración aproximada de 5 horas.
11:55	Se apaga el vacío.

Nota	Esta prueba se realizó con presencia del gas Argón como entrada, desde el encendido del horno hasta finalizar el proceso. No se tomó en cuenta la presencia del gas al momento del encendido y apagado del vacío.
-------------	---

Observaciones	Se alcanzó la temperatura de carbonización requerida de 400 °C.
----------------------	---

Resultado	Se presentó muy poca cantidad de ceniza en la muestra obtenida. Al momento de extraer la muestra, esta no se fragmentó. Se logró recuperar una gran cantidad de la muestra carbonizada, ya que se conservó en un solo cuerpo. Se produjo varias fisuras a simple vista.
------------------	---

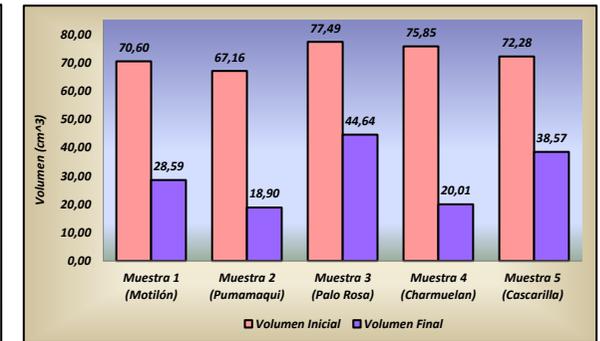
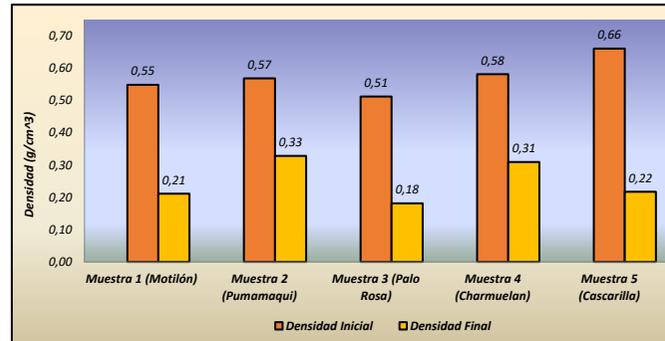
Registro de valores		
Hora	Tiempo [min]	Temperatura [°C]
10:00	0	14
10:05	5	58
10:10	10	120
10:15	15	125
10:20	20	119
10:25	25	122
10:30	30	118
10:35	35	115
10:40	40	112
10:45	45	152
10:50	50	227
10:55	55	254
11:00	60	251
11:05	65	250
11:10	70	251
11:15	75	250
11:20	80	250
11:25	85	286
11:30	90	339
11:35	95	400
11:40	100	398
11:45	105	394
11:50	110	391
11:55	115	387
12:00	120	382
12:05	125	376
12:10	130	370
12:15	135	365
12:20	140	358
12:25	145	351
12:30	150	346
12:35	155	340
12:40	160	332
12:45	165	326
12:50	170	318
12:55	175	313
13:00	180	306
13:05	185	298
13:10	190	289
13:15	195	281
13:20	200	273
13:25	205	261
13:30	210	251
13:35	215	243
13:40	220	234
13:45	225	222
13:50	230	213
13:55	235	204
14:00	240	196
14:05	245	186
14:10	250	176
14:15	255	165
14:20	260	156
14:25	265	144
14:30	270	134
14:35	275	131
14:40	280	124
14:45	285	120
14:50	290	114
14:55	295	110
15:00	300	105
15:05	305	100
15:10	310	93
15:15	315	88
15:20	320	83
15:25	325	77
15:30	330	74
15:35	335	69
15:40	340	65
15:45	345	59
15:50	350	54
15:55	355	47
16:00	360	44
16:05	365	38
16:10	370	35
16:15	375	32
16:20	380	28
16:25	385	22
16:30	390	19
16:35	395	14



REGISTRO DE PRUEBAS REALIZADAS SIN GAS PARA LA PARTE EXPERIMENTAL DEL TRABAJO DE TITULACIÓN												
Prueba	Muestra	Fecha	Masa inicial [g]	Volumen inicial [cm ³]	Densidad inicial [g/cm ³]	Temperatura de carbonización (fin de proceso) [°C]	Duración del proceso sin tomar en cuenta el tiempo de vaciado inicial y final [min]	Tiempo de enfriamiento [horas]	Masa final [g]	Volumen final [cm ³]	Densidad final [g/cm ³]	Diferencia de densidad [g/cm ³]
U	Muestra 1 (Motilón)	20/7/2021	38,69	70,60	0,55	400	95	5	6,04	28,59	0,21	0,34
V	Muestra 2 (Pumamaqui)	21/7/2021	38,12	67,16	0,57	400	95	5	6,20	18,90	0,33	0,24
W	Muestra 3 (Palo Rosa)	22/7/2021	39,71	77,49	0,51	400	95	5	8,09	44,64	0,18	0,33
X	Muestra 4 (Charmuelan)	23/7/2021	44,07	75,85	0,58	400	95	5	6,18	20,01	0,31	0,27
Y	Muestra 5 (Casarilla)	26/7/2021	47,70	72,28	0,66	400	95	5	8,36	38,57	0,22	0,44

Muestra	Densidad inicial [g/cm ³]	Densidad final [g/cm ³]
Muestra 1 (Motilón)	0,55	0,21
Muestra 2 (Pumamaqui)	0,57	0,33
Muestra 3 (Palo Rosa)	0,51	0,18
Muestra 4 (Charmuelan)	0,58	0,31
Muestra 5 (Casarilla)	0,66	0,22
Promedio	0,57	0,25

Muestra	Volumen inicial [cm ³]	Volumen final [cm ³]
Muestra 1 (Motilón)	70,60	28,59
Muestra 2 (Pumamaqui)	67,16	18,90
Muestra 3 (Palo Rosa)	77,49	44,64
Muestra 4 (Charmuelan)	75,85	20,01
Muestra 5 (Casarilla)	72,28	38,57
Promedio	72,68	30,14



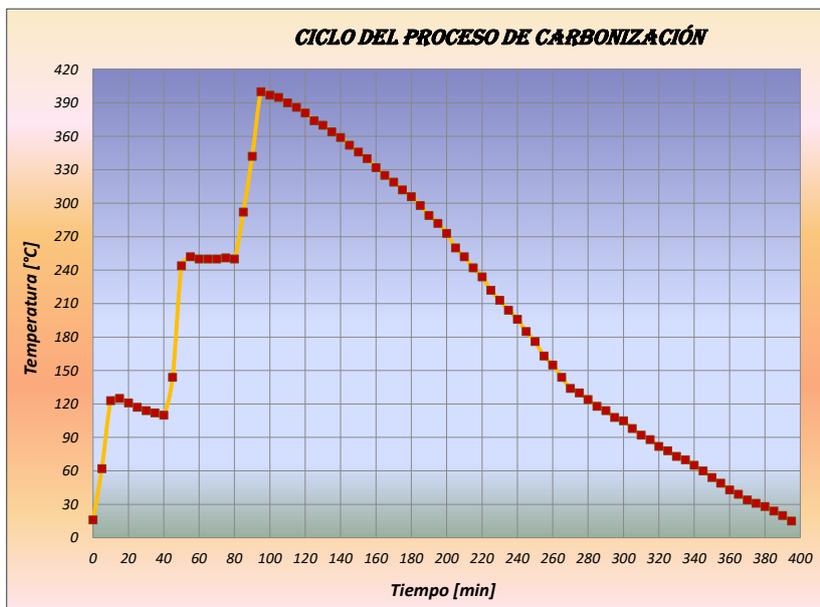
PRUEBA U	
Muestra 1 (Motilón)	
Hora	Condiciones
9:50	Empieza el vacío por 20 min.
10:10	Se enciende el horno hasta que alcance (115 ± 10) °C.
10:20	Alcanza la temperatura de (115 ± 10) °C y se mantiene por 30 min.
10:50	Se sube la temperatura en el PID hasta (250 ± 5) °C como límite.
11:05	Alcanza la temperatura de (250 ± 5) °C y se la mantiene por 25 min.
11:30	Se sube la temperatura en el PID hasta 400 °C como límite.
11:45	Alcanza la temperatura de 400 °C, se apaga el horno y se concluye el proceso. Empieza el enfriamiento con una duración aproximada de 5 horas.
12:05	Se apaga el vacío.

Nota	Esta prueba se realizó sin presencia de aire de entrada durante los 20 minutos de vacío, al instante de encender el horno se permite la entrada de aire hasta concluir el proceso, pero no durante el vacío final.
-------------	--

Observaciones	Se alcanzó la temperatura de carbonización requerida de 400 °C.
----------------------	---

Resultado	En gran parte de la muestra obtenida se presentó una cierta cantidad de ceniza. Al momento de extraer la muestra, esta se pulverizó en un pequeño porcentaje, reduciendo un poco su volumen. Se logró recuperar una considerable cantidad de la muestra carbonizada, ya que se fragmentó en tres medianas partes. Se produjo varias grietas y fisuras a simple vista.
------------------	---

Registro de valores		
Hora	Tiempo [min]	Temperatura [°C]
10:10	0	16
10:15	5	62
10:20	10	123
10:25	15	125
10:30	20	121
10:35	25	117
10:40	30	114
10:45	35	112
10:50	40	110
10:55	45	144
11:00	50	244
11:05	55	252
11:10	60	250
11:15	65	250
11:20	70	250
11:25	75	251
11:30	80	250
11:35	85	292
11:40	90	342
11:45	95	400
11:50	100	397
11:55	105	395
12:00	110	390
12:05	115	386
12:10	120	381
12:15	125	374
12:20	130	370
12:25	135	364
12:30	140	359
12:35	145	352
12:40	150	346
12:45	155	340
12:50	160	332
12:55	165	325
13:00	170	319
13:05	175	312
13:10	180	306
13:15	185	298
13:20	190	289
13:25	195	282
13:30	200	273
13:35	205	260
13:40	210	252
13:45	215	242
13:50	220	234
13:55	225	222
14:00	230	213
14:05	235	204
14:10	240	196
14:15	245	185
14:20	250	176
14:25	255	163
14:30	260	155
14:35	265	144
14:40	270	134
14:45	275	130
14:50	280	124
14:55	285	118
15:00	290	114
15:05	295	108
15:10	300	105
15:15	305	98
15:20	310	92
15:25	315	88
15:30	320	82
15:35	325	78
15:40	330	73
15:45	335	70
15:50	340	65
15:55	345	60
16:00	350	54
16:05	355	49
16:10	360	43
16:15	365	39
16:20	370	34
16:25	375	31
16:30	380	28
16:35	385	24
16:40	390	20
16:45	395	15



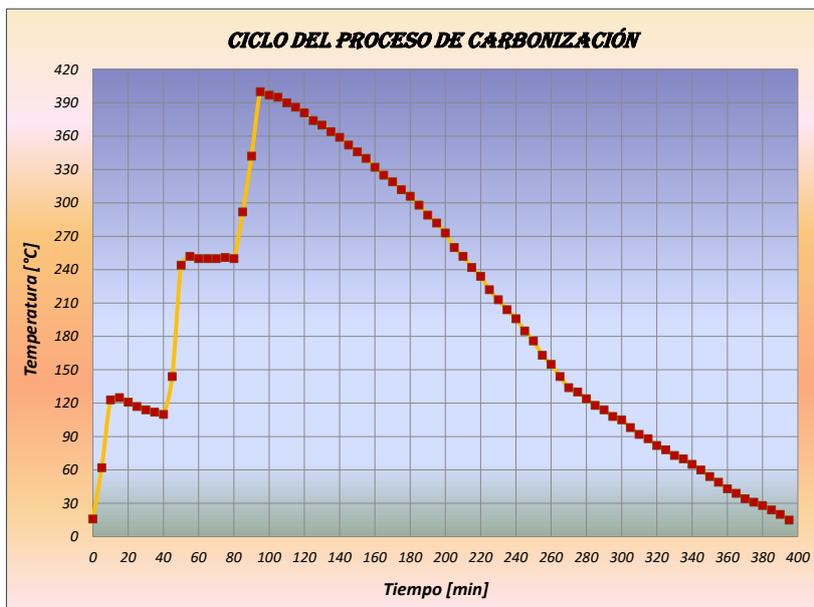
PRUEBA V	
Muestra 2 (Pumamaqui)	
Hora	Condiciones
9:00	Empieza el vacío por 20 min.
9:20	Se enciende el horno hasta que alcance (115 ± 10) °C.
9:30	Alcanza la temperatura de (115 ± 10) °C y se mantiene por 30 min.
10:00	Se sube la temperatura en el PID hasta (250 ± 5) °C como límite.
10:15	Alcanza la temperatura de (250 ± 5) °C y se la mantiene por 25 min.
10:40	Se sube la temperatura en el PID hasta 400 °C como límite.
10:55	Alcanza la temperatura de 400 °C, se apaga el horno y se concluye el proceso.
	Empieza el enfriamiento con una duración aproximada de 5 horas.
11:15	Se apaga el vacío.

Nota	Esta prueba se realizó sin presencia de aire de entrada durante los 20 minutos de vacío, al instante de encender el horno se permite la entrada de aire hasta concluir el proceso, pero no durante el vacío final.
-------------	--

Observaciones	Se alcanzó la temperatura de carbonización requerida de 400 °C.
----------------------	---

Resultado	En gran parte de la muestra obtenida se presentó una cierta cantidad de ceniza. Al momento de extraer la muestra, esta se pulverizó en un pequeño porcentaje, reduciendo su volumen. Se logró recuperar una considerable cantidad de la muestra carbonizada, ya que se conservó en un solo cuerpo. Se produjo varias fisuras a simple vista.
------------------	--

Registro de valores		
Hora	Tiempo [min]	Temperatura [°C]
9:20	0	14
9:25	5	46
9:30	10	116
9:35	15	125
9:40	20	121
9:45	25	116
9:50	30	119
9:55	35	121
10:00	40	116
10:05	45	147
10:10	50	222
10:15	55	255
10:20	60	250
10:25	65	251
10:30	70	249
10:35	75	251
10:40	80	250
10:45	85	286
10:50	90	340
10:55	95	400
11:00	100	398
11:05	105	394
11:10	110	391
11:15	115	387
11:20	120	382
11:25	125	376
11:30	130	371
11:35	135	364
11:40	140	358
11:45	145	353
11:50	150	346
11:55	155	340
12:00	160	332
12:05	165	326
12:10	170	318
12:15	175	311
12:20	180	306
12:25	185	299
12:30	190	290
12:35	195	281
12:40	200	272
12:45	205	261
12:50	210	251
12:55	215	242
13:00	220	232
13:05	225	224
13:10	230	213
13:15	235	205
13:20	240	195
13:25	245	186
13:30	250	177
13:35	255	164
13:40	260	156
13:45	265	144
13:50	270	135
13:55	275	130
14:00	280	124
14:05	285	120
14:10	290	115
14:15	295	109
14:20	300	105
14:25	305	100
14:30	310	94
14:35	315	88
14:40	320	81
14:45	325	76
14:50	330	73
14:55	335	68
15:00	340	65
15:05	345	60
15:10	350	54
15:15	355	48
15:20	360	44
15:25	365	39
15:30	370	35
15:35	375	32
15:40	380	27
15:45	385	25
15:50	390	18
15:55	395	15



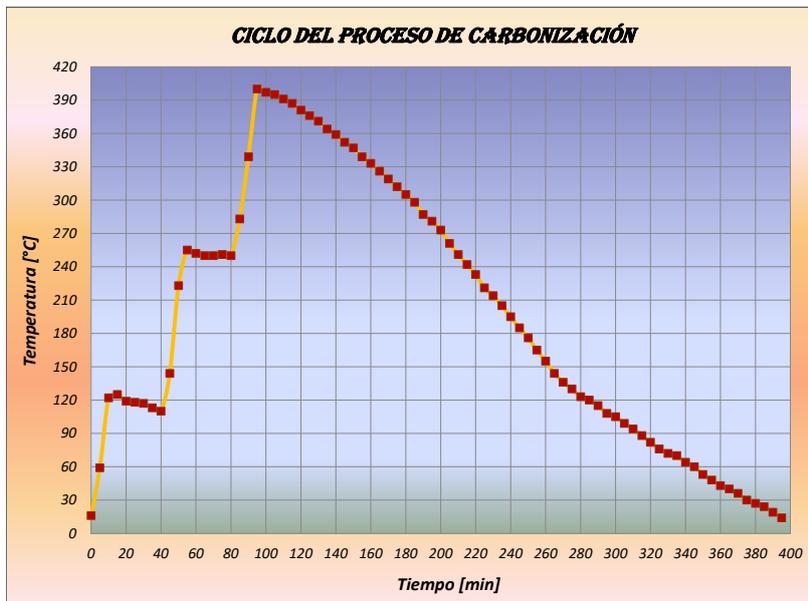
PRUEBA W	
Muestra 3 (Palo Rosa)	
Hora	Condiciones
10:10	Empieza el vacío por 20 min.
10:30	Se enciende el horno hasta que alcance (115 ± 10) °C.
10:40	Alcanza la temperatura de (115 ± 10) °C y se mantiene por 30 min.
11:10	Se sube la temperatura en el PID hasta (250 ± 5) °C como límite.
11:25	Alcanza la temperatura de (250 ± 5) °C y se la mantiene por 25 min.
11:50	Se sube la temperatura en el PID hasta 400 °C como límite.
12:05	Alcanza la temperatura de 400 °C, se apaga el horno y se concluye el proceso.
12:25	Empieza el enfriamiento con una duración aproximada de 5 horas.
12:25	Se apaga el vacío.

Nota	Esta prueba se realizó sin presencia de aire de entrada durante los 20 minutos de vacío, al instante de encender el horno se permite la entrada de aire hasta concluir el proceso, pero no durante el vacío final.
-------------	--

Observaciones	Se alcanzó la temperatura de carbonización requerida de 400 °C.
----------------------	---

Resultado	Se produjo cierta cantidad de ceniza en la muestra obtenida. Al momento de extraer la muestra, esta se pulverizó en un pequeño porcentaje, reduciendo un poco su volumen. Se logró recuperar una considerable cantidad de la muestra carbonizada, ya que se fragmentó en cinco medianas partes. Se produjo varias grietas y fisuras a simple vista.
------------------	---

Registro de valores		
Hora	Tiempo [min]	Temperatura [°C]
10:30	0	16
10:35	5	59
10:40	10	122
10:45	15	125
10:50	20	119
10:55	25	118
11:00	30	117
11:05	35	113
11:10	40	110
11:15	45	144
11:20	50	223
11:25	55	255
11:30	60	252
11:35	65	250
11:40	70	250
11:45	75	251
11:50	80	250
11:55	85	283
12:00	90	339
12:05	95	400
12:10	100	397
12:15	105	395
12:20	110	391
12:25	115	387
12:30	120	381
12:35	125	376
12:40	130	371
12:45	135	364
12:50	140	359
12:55	145	352
13:00	150	347
13:05	155	339
13:10	160	333
13:15	165	326
13:20	170	319
13:25	175	312
13:30	180	305
13:35	185	298
13:40	190	287
13:45	195	281
13:50	200	273
13:55	205	261
14:00	210	251
14:05	215	242
14:10	220	233
14:15	225	221
14:20	230	214
14:25	235	205
14:30	240	195
14:35	245	185
14:40	250	176
14:45	255	165
14:50	260	155
14:55	265	144
15:00	270	136
15:05	275	130
15:10	280	123
15:15	285	120
15:20	290	115
15:25	295	108
15:30	300	105
15:35	305	99
15:40	310	94
15:45	315	88
15:50	320	82
15:55	325	76
16:00	330	72
16:05	335	70
16:10	340	64
16:15	345	60
16:20	350	53
16:25	355	48
16:30	360	43
16:35	365	40
16:40	370	36
16:45	375	30
16:50	380	27
16:55	385	24
17:00	390	19
17:05	395	14



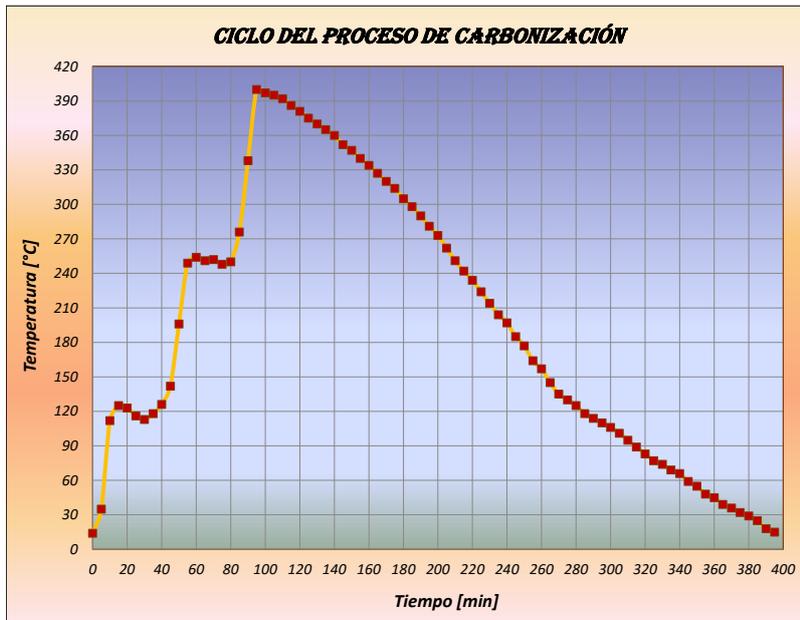
PRUEBA X	
Muestra 4 (Charmuelan)	
Hora	Condiciones
9:35	Empieza el vacío por 20 min.
9:55	Se enciende el horno hasta que alcance (115 ± 10) °C.
10:05	Alcanza la temperatura de (115 ± 10) °C y se mantiene por 30 min.
10:35	Se sube la temperatura en el PID hasta (250 ± 5) °C como límite.
10:50	Alcanza la temperatura de (250 ± 5) °C y se la mantiene por 25 min.
11:15	Se sube la temperatura en el PID hasta 400 °C como límite.
11:30	Alcanza la temperatura de 400 °C, se apaga el horno y se concluye el proceso.
11:50	Empieza el enfriamiento con una duración aproximada de 5 horas.
11:50	Se apaga el vacío.

Nota	Esta prueba se realizó sin presencia de aire de entrada durante los 20 minutos de vacío, al instante de encender el horno se permite la entrada de aire hasta concluir el proceso, pero no durante el vacío final.
-------------	--

Observaciones	Se alcanzó la temperatura de carbonización requerida de 400 °C.
----------------------	---

Resultado	Se presentó una mínima cantidad de ceniza en la muestra obtenida. Al momento de extraer la muestra, esta no se redujo, conservando su volumen final. Se logró recuperar una considerable cantidad de la muestra carbonizada, ya que se conservó en un solo cuerpo. Se produjo varias grietas y fisuras a simple vista.
------------------	--

Registro de valores		
Hora	Tiempo [min]	Temperatura [°C]
9:55	0	14
10:00	5	35
10:05	10	112
10:10	15	125
10:15	20	123
10:20	25	116
10:25	30	113
10:30	35	118
10:35	40	126
10:40	45	142
10:45	50	196
10:50	55	249
10:55	60	254
11:00	65	251
11:05	70	252
11:10	75	248
11:15	80	250
11:20	85	276
11:25	90	338
11:30	95	400
11:35	100	397
11:40	105	395
11:45	110	392
11:50	115	386
11:55	120	381
12:00	125	375
12:05	130	370
12:10	135	365
12:15	140	360
12:20	145	352
12:25	150	347
12:30	155	340
12:35	160	334
12:40	165	327
12:45	170	320
12:50	175	314
12:55	180	305
13:00	185	298
13:05	190	290
13:10	195	281
13:15	200	273
13:20	205	262
13:25	210	251
13:30	215	242
13:35	220	234
13:40	225	224
13:45	230	214
13:50	235	204
13:55	240	197
14:00	245	185
14:05	250	177
14:10	255	164
14:15	260	157
14:20	265	145
14:25	270	135
14:30	275	130
14:35	280	125
14:40	285	118
14:45	290	114
14:50	295	110
14:55	300	106
15:00	305	101
15:05	310	95
15:10	315	89
15:15	320	83
15:20	325	77
15:25	330	74
15:30	335	69
15:35	340	66
15:40	345	59
15:45	350	55
15:50	355	48
15:55	360	45
16:00	365	39
16:05	370	36
16:10	375	32
16:15	380	29
16:20	385	25
16:25	390	18
16:30	395	15



PRUEBA Y	
Muestra 5 (Cascarilla)	
Hora	Condiciones
8:45	Empieza el vacío por 20 min.
9:05	Se enciende el horno hasta que alcance (115 ± 10) °C.
9:15	Alcanza la temperatura de (115 ± 10) °C y se mantiene por 30 min.
9:45	Se sube la temperatura en el PID hasta (250 ± 5) °C como límite.
10:00	Alcanza la temperatura de (250 ± 5) °C y se la mantiene por 25 min.
10:25	Se sube la temperatura en el PID hasta 400 °C como límite.
10:40	Alcanza la temperatura de 400 °C, se apaga el horno y se concluye el proceso.
	Empieza el enfriamiento con una duración aproximada de 5 horas.
11:00	Se apaga el vacío.

Nota:	Esta prueba se realizó sin presencia de aire de entrada durante los 20 minutos de vacío, al instante de encender el horno se permite la entrada de aire hasta concluir el proceso, pero no durante el vacío final.
--------------	--

Observaciones	Se alcanzó la temperatura de carbonización requerida de 400 °C.
----------------------	---

Resultado	Se presentó muy poca cantidad de ceniza en las esquinas de la muestra obtenida. Al momento de extraer la muestra, esta no se redujo, conservando su volumen final. Se logró recuperar una considerable cantidad de la muestra carbonizada, ya que se conservó en un solo cuerpo. Se produjo varias fisuras a simple vista.
------------------	--

Registro de valores		
Hora	Tiempo [min]	Temperatura [°C]
9:05	0	18
9:10	5	59
9:15	10	120
9:20	15	125
9:25	20	123
9:30	25	119
9:35	30	115
9:40	35	114
9:45	40	112
9:50	45	144
9:55	50	209
10:00	55	251
10:05	60	248
10:10	65	251
10:15	70	250
10:20	75	250
10:25	80	250
10:30	85	282
10:35	90	338
10:40	95	400
10:45	100	397
10:50	105	393
10:55	110	391
11:00	115	386
11:05	120	382
11:10	125	376
11:15	130	371
11:20	135	364
11:25	140	359
11:30	145	353
11:35	150	347
11:40	155	339
11:45	160	332
11:50	165	324
11:55	170	318
12:00	175	312
12:05	180	306
12:10	185	298
12:15	190	290
12:20	195	282
12:25	200	272
12:30	205	262
12:35	210	252
12:40	215	243
12:45	220	233
12:50	225	221
12:55	230	213
13:00	235	204
13:05	240	196
13:10	245	185
13:15	250	176
13:20	255	163
13:25	260	155
13:30	265	144
13:35	270	134
13:40	275	130
13:45	280	124
13:50	285	118
13:55	290	114
14:00	295	108
14:05	300	105
14:10	305	98
14:15	310	92
14:20	315	88
14:25	320	82
14:30	325	78
14:35	330	73
14:40	335	70
14:45	340	65
14:50	345	60
14:55	350	54
15:00	355	49
15:05	360	43
15:10	365	39
15:15	370	34
15:20	375	31
15:25	380	29
15:30	385	24
15:35	390	20
15:40	395	15

