GOBIERNO REGIONAL DE ÑUBLE
JUNTOS POR UN FUTURO MEJOR

Manual de Producción de Biocarbón en Predios agrícolas

Dra. Cristina Muñoz Vargas
Dr. Erick Zagal Venegas
Ing. Jonathan Henriquez Arevalo

Fondo de Innovación para la Competitividad del Gobierno Regional de Ñuble

Universidad de Concepción

CAPÍTULO 1.

REVALORIZACIÓN DE RESIDUOS EN BIOCARBÓN Y SU IMPORTANCIA EN LA REGIÓN DE ÑUBLE

La revalorización de residuos agrícolas se presenta como una estrategia crucial para promover la sostenibilidad agrícola en la región de Ñuble. Esta región destaca por su notable contribución a la producción de cultivos frutales, incluyendo el avellano (6.558 hectáreas), el arándano (4.142 hectáreas) y el cerezo (2.973 hectáreas) (CIREN, 2022).

La producción intensiva de estos cultivos genera una variedad de residuos, lo que conlleva a problemas de acumulación de desechos en los terrenos agrícolas. Esta situación no solo afecta la estética del paisaje agrícola, sino que también puede tener repercusiones negativas en la salud del suelo y en la sostenibilidad de los sistemas de producción. En este contexto, el presente manual propone una alternativa para el manejo de los residuos generados en el campo, a través de la instalación de un horno de pirólisis abierto del tipo Kon-Tiki en las explotaciones agrícolas, este sistema tiene como objetivo la producción de biocarbón, un enmendante que puede ser incorporado en los suelos, mejorando así su estructura, potencial de almacenamiento de carbono y salud integral.

La implementación de esta técnica no solo contribuye a la reducción de residuos, sino que también promueve prácticas agrícolas más sostenibles, alineadas con las necesidades actuales de la agricultura en la región. Al transformar los residuos en biocarbón, se cierra el ciclo de nutrientes, se mejora la calidad del suelo y se mitiga el impacto ambiental asociado a la acumulación de desechos.

¿Qué es la Pirólisis?

La pirólisis es un proceso térmico que transforma los residuos agrícolas en biocarbón mediante la conversión de biomasa en condiciones de ausencia o limitación de oxígeno. Esta característica es fundamental, ya que evita que la biomasa se someta a combustión, lo que, de otro modo, resultaría en la formación de ceniza. Como resultado de este proceso, se obtiene un producto carbonoso estable, rico en carbono recalcitrante y con una estructura altamente porosa. Estas propiedades son esenciales, ya que incrementan la capacidad de retención de agua y nutrientes en el suelo (Lehmann y Joseph, 2015), además de contribuir a la mejora integral de la salud del suelo (Verheijen et al., 2019).

Durante la pirólisis, las temperaturas alcanzadas en los hornos pueden oscilar entre 350 °C y 600 °C (Schmidt y Taylor, 2014). Sin embargo, las propiedades químicas del producto final variarán en función de la temperatura máxima alcanzada, el tiempo de pirólisis y la composición inicial del residuo a pirolizar. Esta variabilidad permite la producción de una amplia gama de enmiendas carbonosas, adaptadas a los diferentes tipos de residuos generados en la región. Por lo tanto, este manual se enfocará específicamente en el uso de biomasa proveniente de residuos lignocelulósicos, tales como restos de poda, matorrales y residuos de madera cortada, entre otros.

Biocarbón y sus Efectos sobre el Suelo

El biocarbón presenta múltiples efectos positivos sobre las propiedades físico, químicas y biológicas del suelo, los cuales han sido documentados y respaldados por diversos estudios. Su característica más destacada es su estructura porosa, que le confiere la capacidad de adsorber y retener agua. Esta propiedad resulta especialmente beneficiosa en suelos donde la retención de agua es limitada, pudiendo aumentar la capacidad de retención de humedad hasta en un 30% (Nguyen *et al.,* 2015). Este incremento reduce la necesidad de riego y mejora la resiliencia de los cultivos durante períodos de sequía (Glaser *et al.,* 2002).

Además de su capacidad para retener agua, el biocarbón mejora la fertilidad del suelo al provocar cambios en sus propiedades químicas. En particular, se ha observado que puede aumentar el pH en suelos ácidos, lo que a su vez incrementa la disponibilidad de nutrientes esenciales como nitrógeno, fósforo y potasio (Ginebra *et al.,* 2022; Schmidt *et al.,* 2014).

La superficie porosa del biocarbón también actúa como refugio para los microorganismos del suelo, lo que resulta en un aumento de su actividad y diversidad. Esta mejora en la biota del suelo contribuye a optimizar los ciclos de nutrientes y la descomposición de materia orgánica, lo que se traduce en una mayor fertilidad del suelo (Ginebra *et al.,* 2022).

A continuación, se presenta una recopilación de los cambios observados en diversas propiedades del suelo al ser enmendados con biocarbón, de acuerdo a la literatura reciente:

Figura 1. Impacto de los biocarbones sobre las propiedades químicas, físicas y biológicas de los suelos.

Simbología: **+** = potencia, **-** = disminuye, **+-** = depende del tipo de Biocarbón o propiedades del suelo. Fuente: Elaboración propia (adaptada de Cui et al., 2018; Nguyen et al., 2021; Yang et al., 2021; Liu et al., 2021; Awad et al., 2018; Wang et al., 2019; Lopes et al., 2021; Zhang et al., 2018; Li et al., 2020).

CAPITULO 2.

PRODUCCIÓN DE BIOCARBÓN EN EL PREDIO USANDO HORNO TIPO KON-TIKI.

Si bien, la producción de biocarbón parece una alternativa ideal al manejo de residuos lignocelulosos que desecha un predio agrícola ligado a su producción, es primordial para garantizar la sostenibilidad económico-ambiental, tanto como la viabilidad técnica del proceso. Procesar los residuos lignocelulósicos como restos de podas y matorrales dentro del predio del productor agrícola, reducirá considerablemente los costos de la producción de esta enmienda, permitiendo rentabilizar los beneficios de su aplicación en el suelo. En este sentido se evaluó un modelo de horno abierto para la producción de biocarbón en campo.

Se propuso un horno abierto de forma cónica denominado Kon-Tiki por Schmidt and Taylor en (2014) que mediante un efecto *venturi* permite que la termodinámica del aire caliente que expulsa la pirólisis, haciendo que la temperatura de éste impida la entrada de oxígeno de menor temperatura proveniente desde el exterior hacia la biomasa que se está procesando.

El modelo del horno tipo Kon-Tiki diseñado por Schmidt y Taylor (2014) se le realizaron modificaciónes para facilitar la descarga y el traslado del horno, considerando las condiciones locales.

Figura 2. Planos del horno abierto tipo Kon-Tiki.

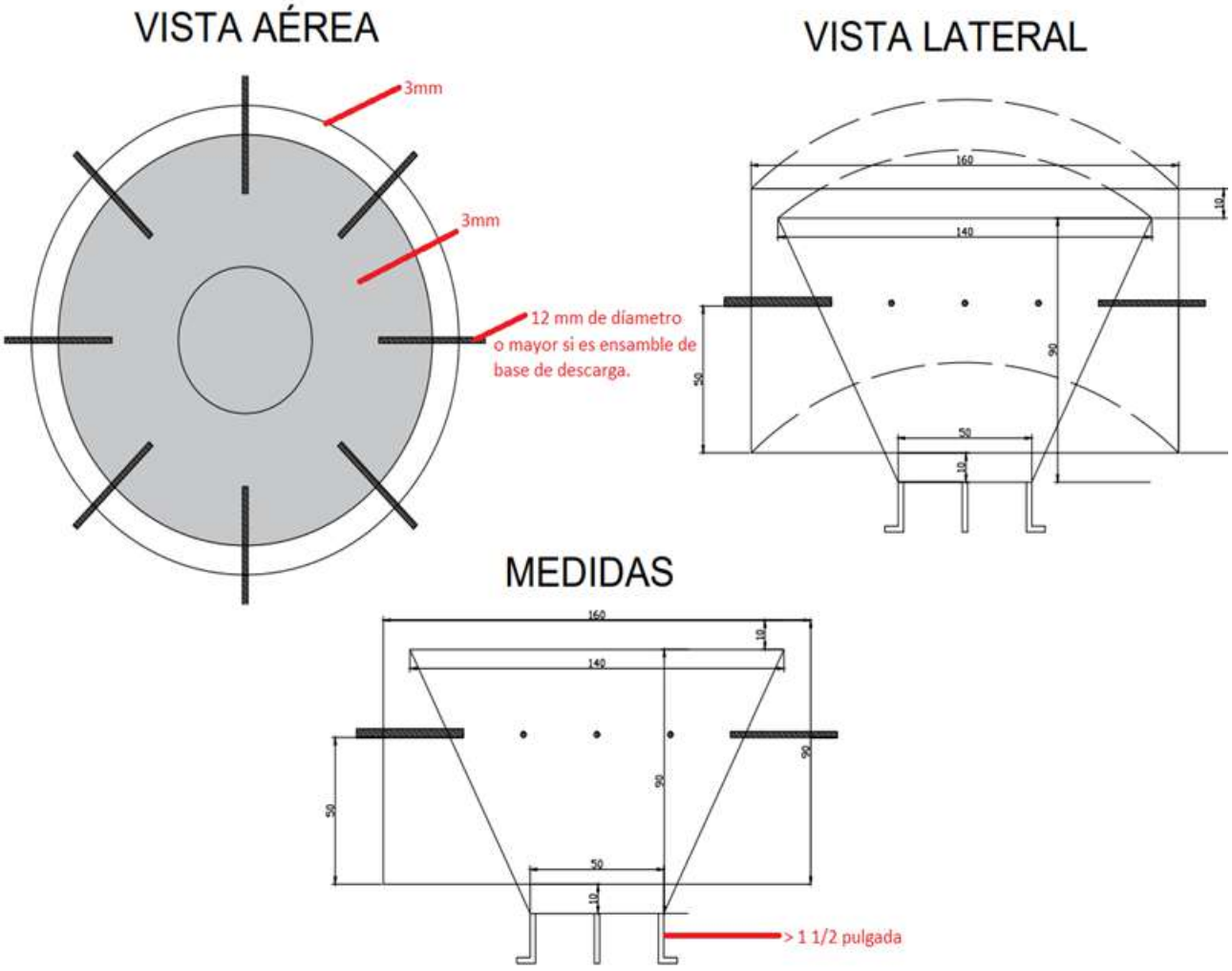


Tabla 1. Materiales e insumos utilizados para la fabricación del horno tipo Kon-tiki.

Materiales e insumos		
Detalle	**Cantidad**	**Peso (kg)**
Planchas de 1500*3000*3mm	2	108
Corte de planchas	2	108
Plegado de conos	2	108
Asas en fierro redondo de 5/8" de diametro y desarrollo 250mm	2	0,4
Contorno en macizo de 3/8"*5190mm de longitud	1	3,66
Fierro redondo para pivote de giro del horno des. 1 ¼"* 175 mm	2	1,25
Plancha de seguro des. 80*65*8 mm	2	0,64
Estructura para soporte del horno des. Rectangular de 100*50*3*750 mm	4	5
Escuadras de refuerzo soporte horno 243*212*5 mm	2	2,5
Travesaño inferior soporte giro, tubo de 1 ¼ "*2*750 mm	1	1,47
Cañería de 1 ¼ "SCH 40*100mm	1	3,4
Refuerzo soporte de giro 100*100*5 mm	4	0,62
Buje pivote para estructura de giro Cañeria 1 ¼ " SCH40* 100mm	2	0,5
Codo para decantación con hilo de 1/14" de diámetro	1	
Sistemas de cierre tipo picaporte con cierre y pestillo	2	
Soldadura Mig (m)	11	

Figura 3. Horno tipo Kon-tiki en predio vitivinicola del Valle del Itata.

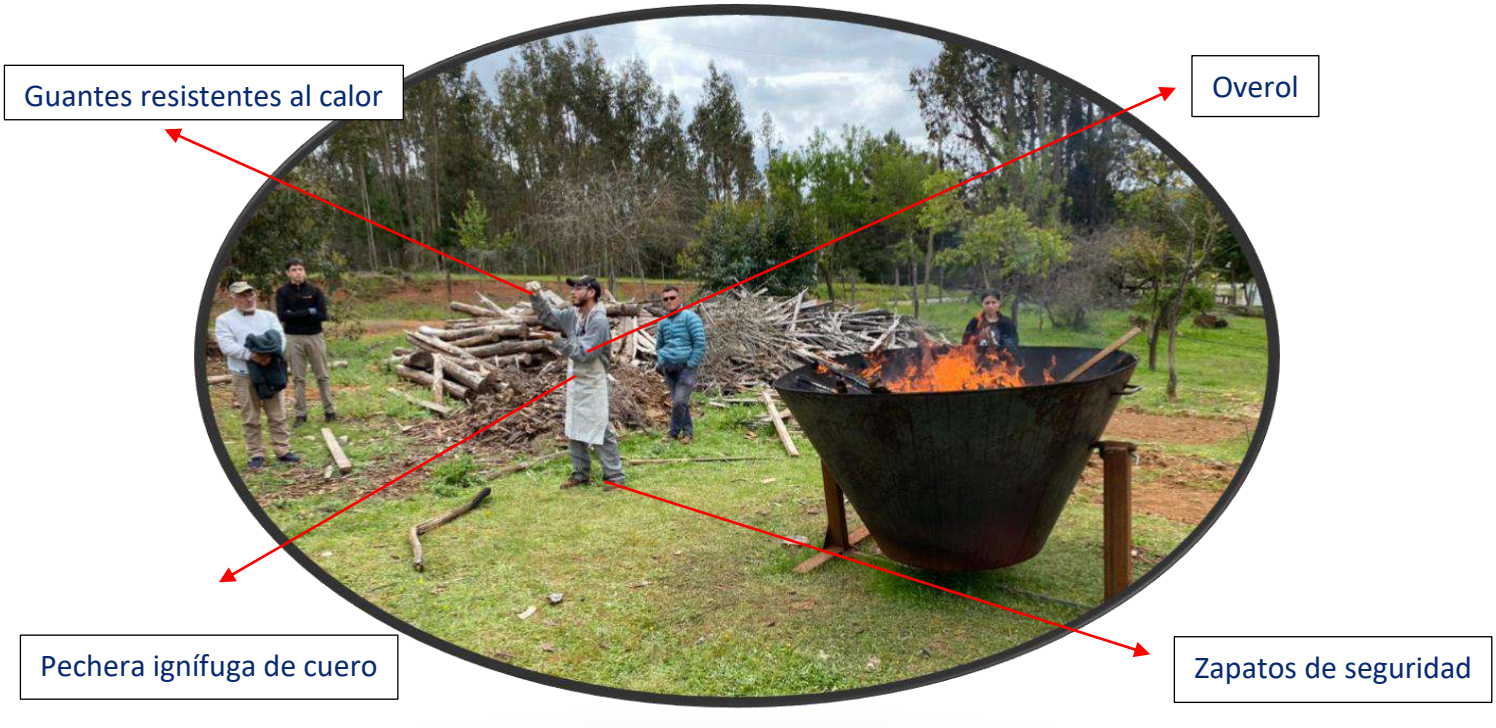
Seguro para el eje

Válvula de entrada de oxígeno

MEDIDAS DE SEGURIDAD PARA PRODUCIR TRABAJAR CON HORNO ABIERTO

A continuación se presentan las medidas de seguridad para trabajar con un horno abierto tipo Kon-tiki diseñado especialmente para los residuos lignocelulosos, adaptado de Schmidt y Taylor (2014).

Figura 4. Ejemplos de elementos de protección personal requeridos para trabajar con un horno abierto tipo Kon-Tiki.



1. **Verificación del Lugar de Instalación:** Asegúrese de que el área destinada para la instalación del horno de pirólisis esté libre de material vegetal seco, manteniendo un espacio limpio de vegetación de al menos 2 m² alrededor del horno.
2. **Uso de Elementos de Seguridad:** Desde el inicio del proceso de pirólisis, es fundamental utilizar equipos de protección personal, tales como pecheras ignífugas, guantes de cuero y zapatos de seguridad.
3. **Disponibilidad de Recursos para Apagar Fuego:** Mantenga a la mano una manguera conectada a una fuente de agua o baldes llenos de agua, para poder extinguir cualquier incendio que pudiera surgir.
4. **Condiciones Meteorológicas:** Realice el proceso preferentemente en condiciones de calma, evitando días con viento extremo que puedan aumentar el riesgo de propagación del fuego.

5. **Época del Año:** Se recomienda llevar a cabo la pirólisis durante las estaciones de otoño, invierno o primavera, eligiendo días en los que no exista probabilidad de lluvia.
6. **Restricciones Estacionales:** No se aconseja el uso del horno de pirólisis en verano, debido a las restricciones sobre el uso del fuego en toda la región.

CONSIDERACIONES PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOCARBÓN EN PREDIO

Tamaño de los residuos: La adecuada disposición de los residuos es un paso fundamental en el proceso de pirólisis, ya que influye directamente en la eficiencia del mismo y en la calidad del biocarbón producido. Para optimizar este proceso, se recomienda clasificar los residuos según su grosor o tamaño, organizándolos de manera que se facilite su uso durante la pirólisis. La clasificación de los residuos puede dividirse en dos categorías principales:

- **Residuos Finos o Pequeños:** Estos son aquellos residuos que tienen un diámetro inferior a una 3 cm y que, por lo general, se queman rápidamente durante el proceso de pirólisis. Suelen incluir restos de hojas, ramas delgadas y otros desechos vegetales que pueden ser procesados eficientemente a altas temperaturas.
-
- **Residuos Gruesos o Grandes:** Esta categoría incluye residuos cuyo diámetro es mayor a una pulgada, como troncos, ramas gruesas y otros materiales lignocelulósicos que requieren un tiempo de pirólisis más prolongado para alcanzar una descomposición adecuada. Es importante asegurarse de que estos residuos sean cortados o fragmentados en tamaños manejables para facilitar su tratamiento. La correcta disposición y clasificación de los residuos no solo mejora la eficiencia del proceso de pirólisis, sino que también contribuye a la producción de un biocarbón de mayor calidad, optimizando así los beneficios agronómicos del producto

Figura 5. Separación por tamaño de los residuos.

<u>Humedad de los Residuos</u>: Para garantizar un adecuado proceso de pirólisis, es fundamental que los materiales utilizados estén lo más secos posible. La humedad de los residuos influye significativamente en la eficiencia del proceso y en la calidad del biocarbón producido. Por lo tanto, la decisión de utilizar ciertos residuos dependerá de este parámetro. A continuación, se presentan las clasificaciones de los residuos según su contenido de humedad, así como las acciones recomendadas para cada caso:

- **Residuos con Humedad Baja (menor al 20%):** Estos residuos son ideales para el proceso de pirólisis, ya que su bajo contenido de humedad permite una combustión más eficiente y una conversión más efectiva en biocarbón. Las accciones a seguir son utilizar estos residuos de inmediato en el proceso de pirólisis. Se recomienda monitorear la temperatura y el tiempo de pirólisis para optimizar la producción de biocarbón.
-
- **Residuos con Humedad Media (20-40%):** Estos residuos pueden ser utilizados, pero su contenido de humedad puede afectar la eficiencia del proceso, ya que parte de la energía se destinará a evaporar el agua antes de que se produzca la pirólisis. Acciones a Seguir: Se sugiere secar los residuos al sol o en un ambiente controlado antes de su uso. Si no es posible secarlos, se puede proceder a la pirólisis, pero se debe tener en cuenta que el rendimiento del biocarbón podría verse comprometido.
-
- **Residuos con Humedad Alta (más del 40%):** Estos residuos no son recomendables para el proceso de pirólisis, ya que su alto contenido de humedad dificultará la conversión eficiente en biocarbón y puede resultar en un producto de menor calidad. Acciones a Seguir: Es aconsejable secar estos residuos antes de utilizarlos. Se pueden emplear métodos de secado natural, como la exposición al sol, o métodos mecánicos, como el uso de deshidratadores, para reducir su contenido de humedad a niveles aceptables.
-

A continuación se presenta un esquema resumen respecto al nivel de humedad de los residuos:

Baja < 20% Humedad Humedad.

¡Humedad ideal para pirolizar!

Media 20 - 40% Humedad

1-Buscar residuos secos para encender el horno.
2-Ubicar los residuos gruesos por fuera del horno de forma perpendicular y formando un círculo con el contorno para facilitar su secado con el calor del horno.
3-Aplicar los residuos en medida que se vayan secando.

Alta > 40%

¡No es recomendable pirolizar ¡

Esperar secar los residuos en días de sol para disminuir la humedad.

Encendido del Horno: El proceso de encendido del horno de pirólisis es un paso crucial para garantizar un funcionamiento eficiente y seguro. En la parte inferior del horno se encuentra la tapa de salida (ver Figura 6), la cual debe abrirse para permitir la entrada de oxígeno, un elemento esencial para iniciar la combustión.

Figura 6. Apertura de la tapa de salida inferior en el horno.

Incorporación de Residuos Más Inflamables: La incorporación de residuos más inflamables es necesario para asegurar un encendido rápido del horno de

pirólisis. A continuación, se describen las recomendaciones para llevar a cabo esta etapa de manera segura y efectiva:

- **Selección de Residuos:** Comience incorporando los residuos más finos y secos que se hayan recolectado. Estos materiales son ideales para facilitar el encendido debido a su menor densidad y mayor superficie expuesta.
-
- **Uso de Materiales Acelerantes:** Si es posible, se recomienda añadir algún material acelerante para optimizar el inicio del fuego. En este sentido, las pastillas de bencina, que se pueden adquirir en comercios locales, son una opción efectiva. Coloque una o dos pastillas en el fondo del horno, asegurándose de que estén bien distribuidas entre los residuos.
-
- **Facilitación del Encendido:** Para facilitar el encendido, se puede utilizar un pequeño soplete que emita una llama controlada a distancia. Esto permite iniciar el fuego de manera segura sin necesidad de acercarse demasiado a la fuente de ignición.
-
- **Rotación del Horno:** En esta etapa, el horno aún no estará caliente, lo que permite girarlo sobre su eje diseñado. Esta acción facilita el encendido de los materiales al permitir que el aire circule adecuadamente y que la llama alcance todos los residuos incorporados, minimizando el riesgo de exposición directa a la llama.

Figura 7. Sopletes e iniciadores de fuego.

Soplete

Pastilla de bencina

Cierre de la Tapa de Salida Bajo el Horno: Una vez que la combustión de los residuos más finos y secos sea evidente, es momento de proceder con el cierre de la tapa de salida del horno de pirólisis. Este paso debe realizarse con cuidado. A continuación, se describen los procedimientos y consideraciones relevantes para esta etapa:

- **Observación de la Combustión:** Monitoree el proceso de combustión hasta que sea claramente visible que los residuos más finos y secos están ardiendo de manera efectiva. Esto se puede identificar por la presencia de llamas estables y un calor significativo emanando del horno.
-
- **Cierre Manual de la Tapa de Salida:** Una vez que la combustión es evidente, cierre la válvula de entrada de aire manualmente. Este cierre es fundamental, ya que interrumpe el flujo de oxígeno hacia el interior del horno, lo que a su vez detiene la combustión y da inicio al proceso de pirólisis.
-
- **Observación de la Disminución de Humos:** Tras cerrar la tapa, se observará una disminución considerable en la generación de humos. Este cambio es indicativo de que la combustión ha sido efectivamente detenida y que el proceso de pirólisis ha comenzado. La quema de biomasa se transformará en un proceso más limpio, evidenciándose una quema libre de humo.
-

Incorporación de Residuos Gruesos: La incorporación de residuos gruesos permite maximizar la eficiencia del horno y para ello se debe tener en cuenta:

- **Posicionamiento del Horno:** Con cuidado, gire el horno utilizando las manillas diseñadas para este propósito, asegurándose de volverlo a su eje y dejarlo en posición vertical. Este movimiento es esencial para facilitar la incorporación de los residuos gruesos.
-
- **Incorporación de Residuos Gruesos:** Una vez que el horno esté en posición vertical, proceda a introducir los residuos más gruesos que se habían separado previamente. Estos materiales comenzarán a quemarse utilizando el fuego generado en etapas anteriores, lo que contribuirá a mantener la temperatura necesaria para el proceso de pirólisis.
-
- **Aumento de Temperatura:** A partir de este momento, el horno comenzará a aumentar su temperatura, alcanzando hasta 500-600 °C. Es fundamental no tocar el horno durante esta fase y evitar cualquier roce

con la superficie, ya que las altas temperaturas pueden causar quemaduras graves.

-
- **Observación de la Biomasa:** A medida que la biomasa incorporada se va convirtiendo en un material negro, este comenzará a acumularse en el fondo del horno. Este cambio es un indicativo de que el proceso de pirólisis está en marcha y que los residuos se están transformando en biocarbón.
-
- **Continuación del Llenado:** A medida que el material negro se acumula, continúe llenando el horno con más material grueso que se había separado anteriormente. Este proceso debe realizarse con cuidado para asegurar una distribución uniforme de los residuos y optimizar la eficiencia del horno.

-

Figura 8. Llenado de horno con material grueso.

Plena Pirólisis: En esta fase del proceso de pirólisis, se ha alcanzado una temperatura aproximada entre 500-600 °C gracias al ingreso constante de residuos. A medida que los materiales se introducen en el horno, comenzará a formarse una pila de biocarbón en el fondo del horno, que irá aumentando progresivamente hacia la superficie. Este fenómeno es un indicativo de que el proceso de pirólisis se está llevando a cabo de manera efectiva. Para mantener una pirólisis adcuada se debe considerar lo siguiente:

- **Efecto Venturi:** El diseño del horno incorpora el efecto Venturi, que se refiere a la reducción de presión que ocurre cuando el aire caliente sale

del horno. Este efecto ayuda a mantener el flujo de aire caliente, lo que contribuye a la estabilidad del proceso de pirólisis.

-
- **Termodinámica del Aire Caliente:** La termodinámica del aire caliente saliente juega un papel fundamental en la regulación del proceso. A medida que el aire caliente se eleva y sale del horno, se crea una presión negativa que impide la entrada de oxígeno. Este mecanismo evita la combustión completa de los residuos, permitiendo que se mantenga el proceso de pirólisis.
-
- **Formación de Biocarbón:** Con el continuo ingreso de residuos y la adecuada regulación de la temperatura, la acumulación de biocarbón en el fondo del horno se intensificará. Este biocarbón, que se forma a partir de la descomposición térmica de la biomasa, es el producto final deseado, que puede ser utilizado para mejorar la calidad del suelo y contribuir a prácticas agrícolas sostenibles.

Figura 9. Proceso de elaboración de biocarbón en horno abierto.

Fin del Proceso de Pirólisis: El proceso de pirólisis se considera finalizado aproximadamente entre 2 y 3 horas después de haber alcanzado la fase de plena pirólisis con residuos gruesos. En este punto, cuando el volumen del horno se ha llenado hasta aproximadamente 40 cm de su capacidad total con biocarbón, es el momento adecuado para incorporar nuevamente residuos finos y secos. Esta acción marcará el cierre del proceso de pirólisis y garantizará que los residuos gruesos introducidos al final se pirolicen de manera adecuada. El rendimiento de la pirólisis es de entre un 30 a 40% dependiendo de la humedad y el tipo de biomasa, lo que significa que de 1000 kg de residuos se

puede generar aproximadamente 300-400 kg de biocarbón. La capacidad del horno tipo Kon-Tiki es de 1000 Kg de biocarbón producido por cada vez.

El procedimiento para el término del proceso de pirólisis es el siguiente:

- **Incorporación de Residuos Finos y Secos**: Una vez que se ha alcanzado el volumen deseado de biocarbón en el horno, proceda a añadir residuos finos y secos. Esta acción ayudará a asegurar que los residuos gruesos que se encuentran en la parte superior del horno se pirolicen correctamente y se conviertan en biocarbón de alta calidad.
- **Finalización del Proceso:** La adición de estos residuos finos y secos no solo marca el final del proceso de pirólisis, sino que también contribuye a la homogeneidad del biocarbón producido. A medida que estos materiales se integran, se facilita una combustión más uniforme, lo que resulta en un producto final más consistente.
-
- **Observación del Producto Final:** A medida que el proceso se acerca a su fin, se podrá observar la formación de un biocarbón de color negro característico, que indica que la pirólisis ha sido exitosa.

Figura 10. Horno tipo Kon-Tiki con soporte de fierro.

Apagado de la Pirólisis: Una vez que el proceso de pirólisis ha finalizado, es fundamental proceder con el apagado del horno para detener la reacción de manera efectiva. Este procedimiento, conocido como "quenching", implica la aplicación de abundante agua dentro del horno, lo que detendrá la pirólisis de forma inmediata. El procedimiento consiste en:

- **Aplicación de Agua:** Inicie el proceso de "quenching" aplicando una cantidad generosa de agua en el interior del horno. Lo que permitirá que el agua enfríe rápidamente el material y detenga la reacción de pirólisis, evitando que continúe la descomposición térmica de los residuos.
- **Apertura de la Tapa de Salida:** Una vez que se ha aplicado el agua y se ha detenido la pirólisis, proceda a abrir la tapa de salida de flujo ubicada en la parte inferior del horno. Este paso permitirá que el agua utilizada para el apagado se drene adecuadamente.
- **Vaciado del Horno:** Deje la tapa de salida abierta durante un par de horas para facilitar el vaciado total del agua del interior del horno. Es importante asegurarse de que el agua se elimine por completo antes de proceder a cualquier otra operación, ya que la presencia de agua residual puede afectar la calidad del biocarbón producido y la operación futura del horno.

Figura 11. Biocarbón elaborado después de la pirólisis.

Procedimiento para Descargar el Biocarbón producido: El proceso de descarga del contenido del horno de pirólisis debe realizarse con cuidado. A continuación, se describen los pasos a seguir para llevar a cabo esta operación de manera efectiva:

- **Giro del Horno en su Eje:** Comience girando el horno en su eje utilizando las manillas diseñadas para este propósito. Este movimiento facilita la descarga del biocarbón acumulado en el fondo del horno.
- **Asegurar la Posición del Horno:** Una vez que el horno esté en la posición adecuada para la descarga, asegúrelo con el mecanismo de seguridad

correspondiente. Esto evitará cualquier movimiento inesperado durante el proceso de descarga.

- **Descarga del Biocarbón:** Utilice una pala para descargar el biocarbón del horno. Dirija el material sobre una malla rachell, que permitirá que cualquier residuo de ceniza o partículas finas se caiga, asegurando que solo el biocarbón de calidad sea recolectado.

Almacenamiento en Sacos: Una vez que el biocarbón haya sido descargado, guárdelo en sacos adecuados. Asegúrese de que los sacos estén limpios y secos para evitar la contaminación del biocarbón, el peso de estos sacos variará entre 15 a 20 kg dependiendo la humedad dinal del biocarbó**mpieza del Horno de Pirólisis:** Después de la descarga, es importante limpiar el interior del horno para eliminar cualquier residuo o ceniza que haya quedado. Esto ayudará a mantener el horno en condiciones óptimas para futuros ciclos de pirólisis.

- **Regreso a la Posición Original:** Una vez que el horno esté limpio, devuélvalo a su posición original. Asegúrese de que todos los mecanismos de seguridad estén en su lugar antes de proceder

Precauciones para Aumentar la Vida Útil del Horno: La prolongación de la vida útil de un horno es fundamental para asegurar su eficiencia operativa y minimizar los costos de mantenimiento y reemplazo. A continuación, se presentan una serie de recomendaciones que deben ser consideradas para optimizar la durabilidad del horno:

- **Evitar la Presión sobre los Pestillos de los Ejes:** No ejercer presión sobre los pestillos de los ejes del horno, ya que estos componentes no están diseñados para soportar un sobrepeso en el peso del horno. La aplicación de una carga excesiva puede resultar en daños estructurales que comprometan la integridad del equipo y su funcionamiento.
- **Descarga Oportuna del Biocarbón:** Se recomienda proceder a la descarga del biocarbón inmediatamente después de la pirólisis. Si el biocarbón se deja en el horno por un período prolongado, puede formar una pasta densa y difícil de remover, lo que podría obstruir la tubería de intercambio de aire. Esta obstrucción no solo afecta la eficiencia del horno, sino que también puede provocar problemas de ventilación que impacten negativamente en el proceso de combustión.
- **Protección Contra la Corrosión:** Es necesario proteger el horno de la exposición a la lluvia y la humedad, ya que esto puede provocar corrosión en los materiales. Dado que el horno opera a altas temperaturas, la aplicación de pinturas anticorrosivas que sean efectivas en estas condiciones puede resultar complicada. Por lo tanto, se sugiere

implementar medidas de resguardo, como la instalación de cubiertas o la ubicación del horno en áreas protegidas, para mitigar el riesgo de corrosión.

Vida Útil Estimada: La vida útil promedio del horno se estima entre 5 y 7 años, dependiendo del uso y del mantenimiento adecuado. Es importante llevar a cabo revisiones periódicas y un mantenimiento preventivo para maximizar la durabilidad del horno y asegurar su funcionamiento óptimo a lo largo de su vida útil.

Incorporación del Biocarbón en Distintos Cultivos Agrícolas: El biocarbón se puede incorporar al suelo utilizando varios métodos, cada uno con sus ventajas específicas. La mezcla directa del biocarbón con el suelo, mediante arados o herramientas, es una técnica efectiva para lograr una incorporación uniforme. Alternativamente, el biocarbón puede aplicarse en surcos o hileras, lo que resulta especialmente útil para cultivos específicos como frutales. La dosis de biocarbón a aplicar depende del tipo de suelo, los cultivos y los objetivos específicos de cada agricultor. Las dosis recomendada según el tipo de suelo son:

- **Suelos Arenosos:** En suelos donde la retención de agua es un desafío, se recomienda una dosis más alta de biocarbón para mejorar la capacidad de retención de agua. Esto permitirá maximizar la eficiencia del riego y mejorar la salud de las plantas.

- **Suelos Arcillosos:** En suelos arcillosos, una dosis moderada de biocarbón puede mejorar la estructura del suelo y la aireación, facilitando el crecimiento de las raíces. Esto es especialmente importante para cultivos que requieren un buen drenaje y aireación.

Dosis y Métodos Específicos para la Región de Ñuble:

- Praderas, Cereales y Cultivos Industriales: Se recomienda una dosis de 5-12 toneladas por hectárea. Este biocarbón debe ser incorporado en los primeros 20 centímetros del perfil del suelo, preferentemente antes del establecimiento. Con aplicaciones todos los años dependiendo del cultivo.

Figura 12. Aplicación de biocarbón en el campo.

<u>Incorporación de Biocarbón en Huertos de Frutales:</u> La aplicación de biocarbón en huertos de frutales es una práctica que puede mejorar la salud del suelo y la productividad de las plantas. Se recomienda una dosis de entre 10 a 20 toneladas por hectárea, que debe ser incorporada de manera adecuada para maximizar sus beneficios. Los métodos de incorporación son los siguientes:

- **Incorporación en el surco u hoyo de plantación:** Al establecer un nuevo huerto, el biocarbón debe ser incorporado en el surco u hoyo de plantación antes de la siembra en una dosis de 6 - 7 kg/hoyo. Es recomendable mezclar el biocarbón con el suelo o algún sustrato, ubicándolo debajo de la raíz de las plantas. Esto asegura que las raíces tengan acceso directo a los beneficios del biocarbón desde el inicio del crecimiento.

- **Incorporación en huertos establecidos:** En huertos que ya están en producción, se recomienda la incorporación directa de biocarbón en un hoyo hecho en el suelo, cerca de la zona radicular de las plantas. Este hoyo debe estar alineado con el sistema de riego, lo que facilita una mejor absorción de nutrientes por las raíces. La aplicación en esta ubicación estratégica permite que el biocarbón actúe como un reservorio de nutrientes y agua, mejorando la salud general de las plantas.

- **Dosis Superiores de Biocarbón y su Efecto Fitotóxico:** La aplicación de biocarbón en dosis superiores a 40 toneladas por hectárea son de difícil aplicación; pero dosis extremas como 100 toneladas por hectárea o el 10% en peso/volumen (p/p) a una profundidad de 10 cm, ha demostrado efectos potencialmente fitotóxicos para la germinación y sobre el crecimiento radicular de las plantas de semillas sensibles como rabanito (*Raphanus sativus* L.) y lechuga (*Lactuca sativa* L.).

Figura 13. Comparación de raíces con y sin biocarbón; y aplicación de biocarbón en el hoyo de plantación.

<u>Consideraciones sobre el Manejo del Biocarbón y su Impacto en la Salud Respiratoria:</u> El biocarbón cuando se encuentra en forma fina y seca puede ser inhalado, lo que representa un riesgo para la salud respiratoria. La inhalación de partículas finas puede provocar una disminución de la capacidad pulmonar y otros problemas respiratorios. Por lo tanto, es fundamental manejar el biocarbón con precaución y adoptar medidas que minimicen la generación de polvo durante su manipulación. Entre las recomendaciones para el manejo seguro del biocarbón están:

- **Control de humedad:** Se recomienda trabajar con el biocarbón en un estado que contenga cierto grado de humedad. Esto no solo ayuda a reducir la cantidad de polvo generado durante la manipulación, sino que también puede mejorar la estabilidad del biocarbón y su eficacia como enmendante del suelo.
- **Uso de equipos de protección personal (EPP):** Al manipular biocarbón, es esencial utilizar equipos de protección personal, como mascarillas o respiradores, que filtren partículas finas. Esto es especialmente

importante en entornos donde se genera polvo, como durante el transporte o la aplicación del biocarbón en el suelo.

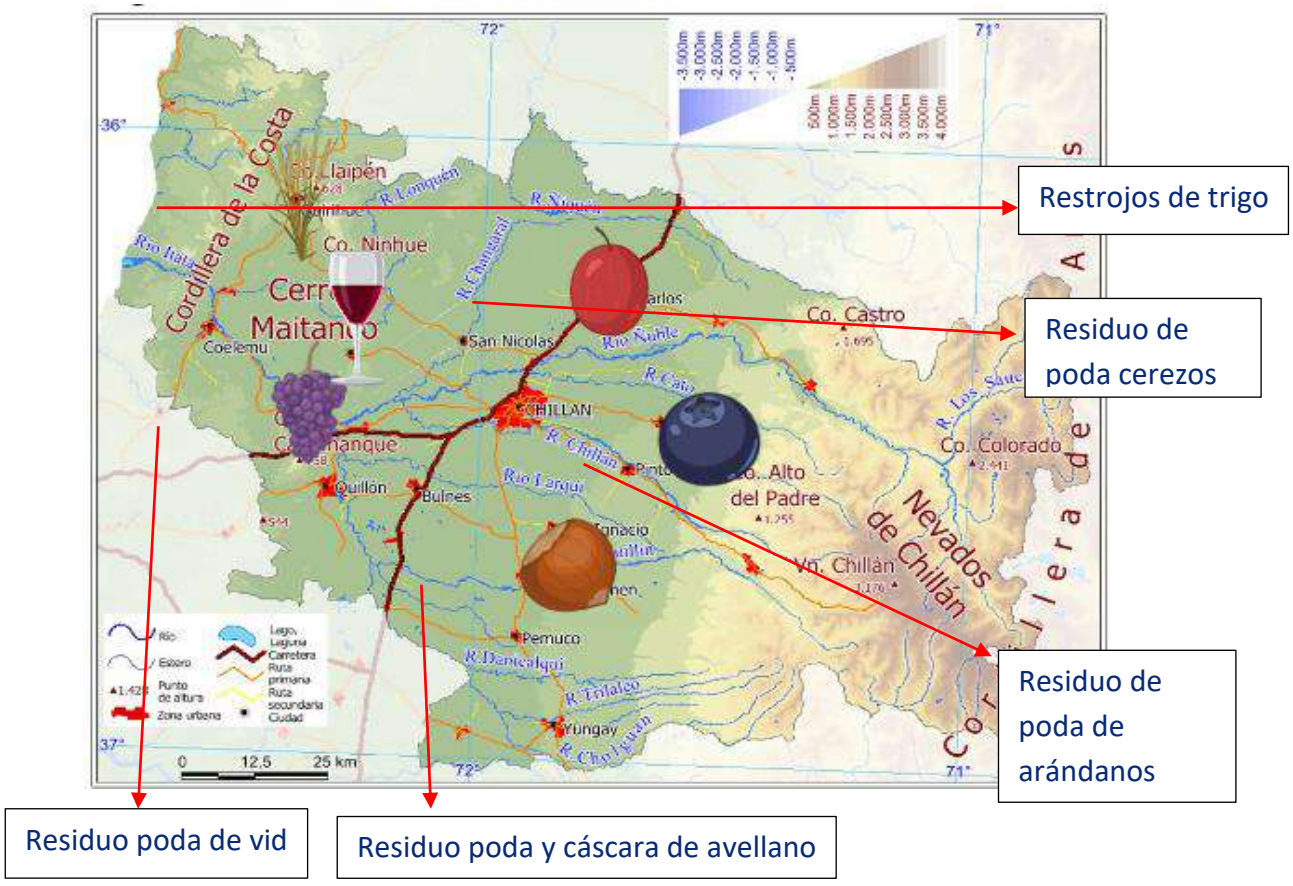
- **Ventilación adecuada:** Asegúrese de que el área de trabajo esté bien ventilada para minimizar la concentración de partículas en el aire. Esto permitirá proteger la salud de los trabajadores y prevenir la inhalación de polvo.
- **Técnicas de aplicación:** Al aplicar biocarbón en el suelo, considere métodos que reduzcan la generación de polvo, como la incorporación directa en el suelo con herramientas adecuadas o la aplicación en condiciones de humedad.

CAPÍTULO 3.

TRANSFORMACIÓN DE RESIDUOS EN BIOCARBÓN EN LA REGIÓN DE ÑUBLE

A continuación se muestran distintos tipos de residuos lignocelulosos que podemos encontrar en la región de Ñuble para la elaboración de biocarbón.

Figura 14. Mapa de la región de Ñuble con los residuos utilizados.



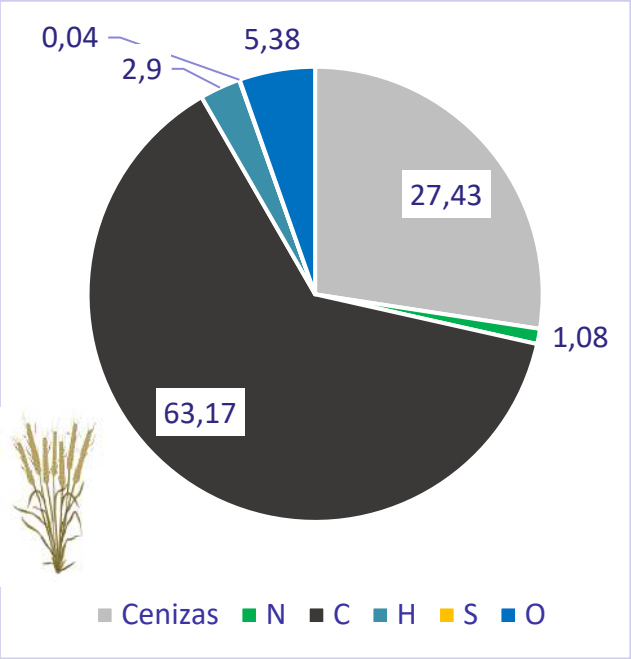
En la Región de Ñuble, diversos tipos de residuos pueden ser transformados en biocarbón a partir de diferentes fuentes de biomasa, principalmente de origen lignocelulósico. El biocarbón producido a partir de restos de poda se caracteriza por su alta capacidad de retención de agua, así como por su buena porosidad y estabilidad. Este tipo de biocarbón es particularmente beneficioso para mejorar la estructura del suelo y aumentar la fertilidad en suelos arenosos (Verheijen *et al*., 2019; Lehmann *et al*., 2015).

Otros residuos que contienen un menor porcentaje de lignina y son prominentes en celulosa y hemicelulosa, como los residuos de trigo, producen

enmiendas carbonosas con distintas composiciones y efectos. Por ejemplo, el biocarbón obtenido a partir de residuos de cultivos de trigo, como la paja, mejora la estructura del suelo y reduce la erosión. Este tipo de biocarbón presenta un buen balance entre cenizas y contenido de carbono, lo que lo hace ideal para suelos compactados, mejorando la aireación y la penetración de las raíces (Smith *et al*., 2019).

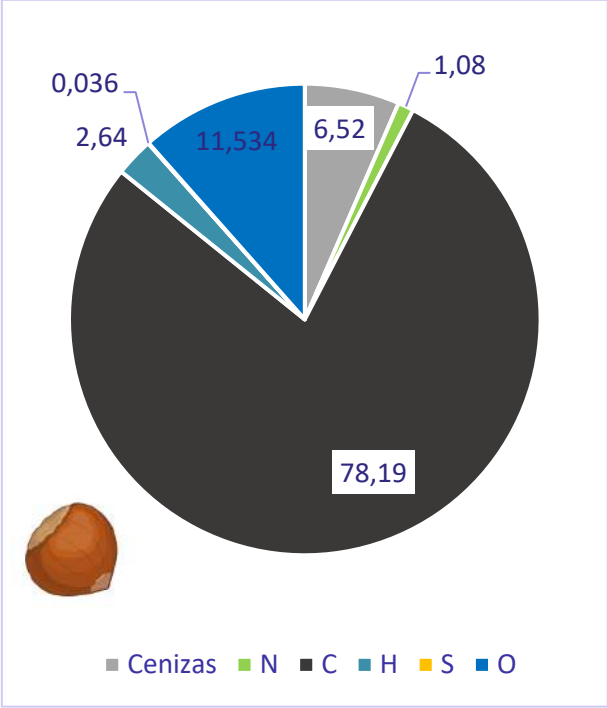
A continuación se presentan las fichas técnicas de los biocarbones producidos con los residuos más representativos de la Región de Ñuble.

Ficha Técnica 1: Biocarbón a partir de Rastrojos de Trigo



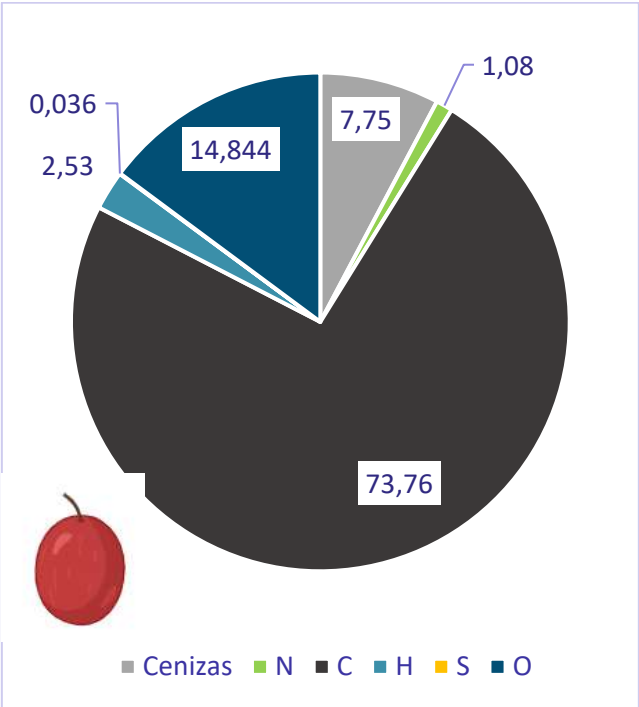
Residuos de Trigo	
Cenizas (%)	27,43 ± 0,01
C.E (dS/m)	10,59
M.Volátil (%)	12,88
pH	10,36
N (%p/p)	< 2,00
C (%p/p)	63,17 ± 1
H (%p/p)	2,9 ± 7,6
S (%p/p)	< 2,00
O (%p/p)	5,34

Ficha Técnica 2: Biocarbón de residuos de poda de avellano europeo



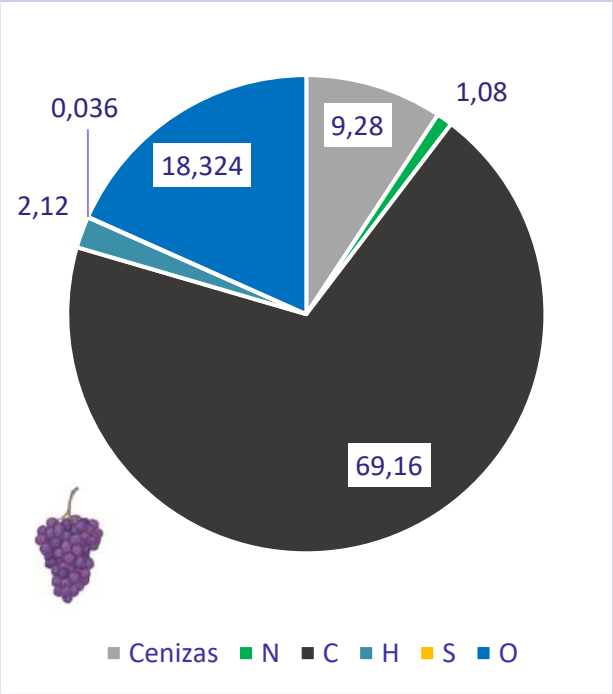
Poda de avellano europeo	
Cenizas (%)	6,52 ± 0, 1
C.E (dS/m)	0,98
M.Volátil (%)	12,8
pH	9,86
N (%p/p)	< 2,00
C (%p/p)	78,19 ± 6,5
H (%p/p)	2,64 ± 7,8
S (%p/p)	< 2,00
O (%p/p)	12,62

Ficha Técnica 3: Biocarbón de residuos de poda de cerezo



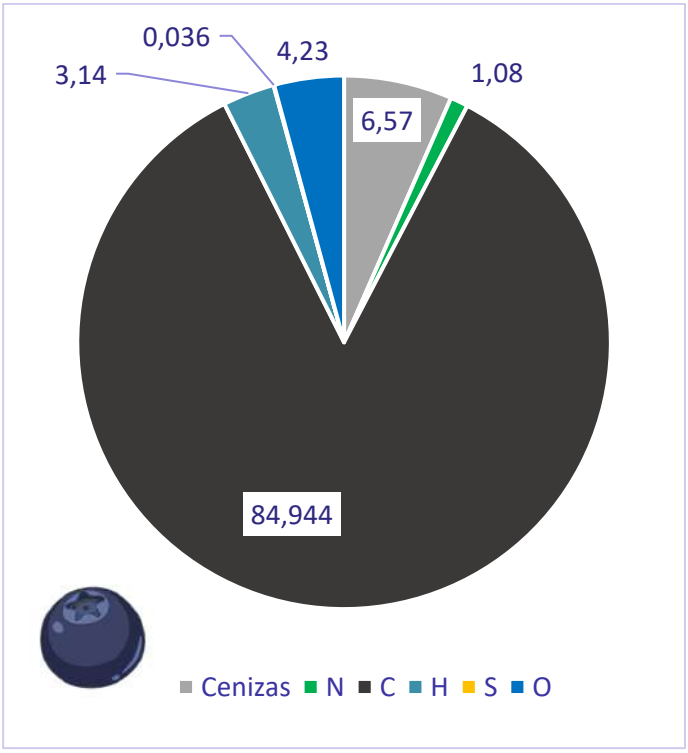
Residuos de cerezo	
Cenizas(%)	7,75 ± 0,28
C.E (dS/m)	1,01
M.Volátil (%)	10,39
pH	9,82
N (%p/p)	< 2,00
C (%p/p)	73,76 ± 0,4
H (%p/p)	2,53 ± 0,36
S (%p/p)	< 2,00
O (%p/p)	15,93

Ficha Técnica 4: Biocarbón de residuos de poda de vid



Residuos de poda de vid	
Cenizas (%)	9,28 ± 0,17
C.E (dS/m)	2,73
M.Volátil (%)	12,64
pH	9,72
N (%p/p)	< 2,00
C (%p/p)	69,16 ± 1,6
H (%p/p)	2,12 ± 0,43
S (%p/p)	< 2,00
O (%p/p)	19,17

icha Técnica 5: Biocarbón de residuos de poda de arándano

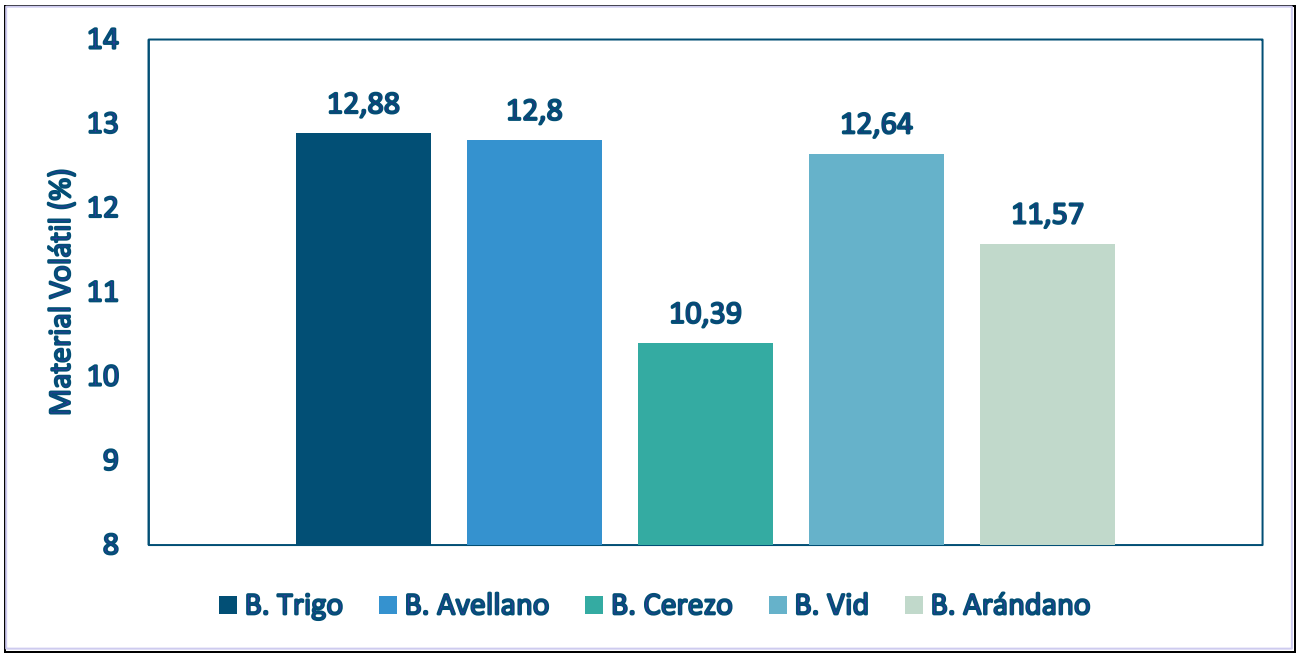


Residuos de poda de arándano	
Cenizas (%)	9,15 ± 0,13
C.E (dS/m)	1,05
M.Volátil (%)	11,57
pH	9,66
N (%p/p)	< 2,00
C (%p/p)	71,84 ± 8
H (%p/p)	3,14 ± 1,6
S (%p/p)	< 2,00
O (%p/p)	15,83

Otras Propiedades de Interés:

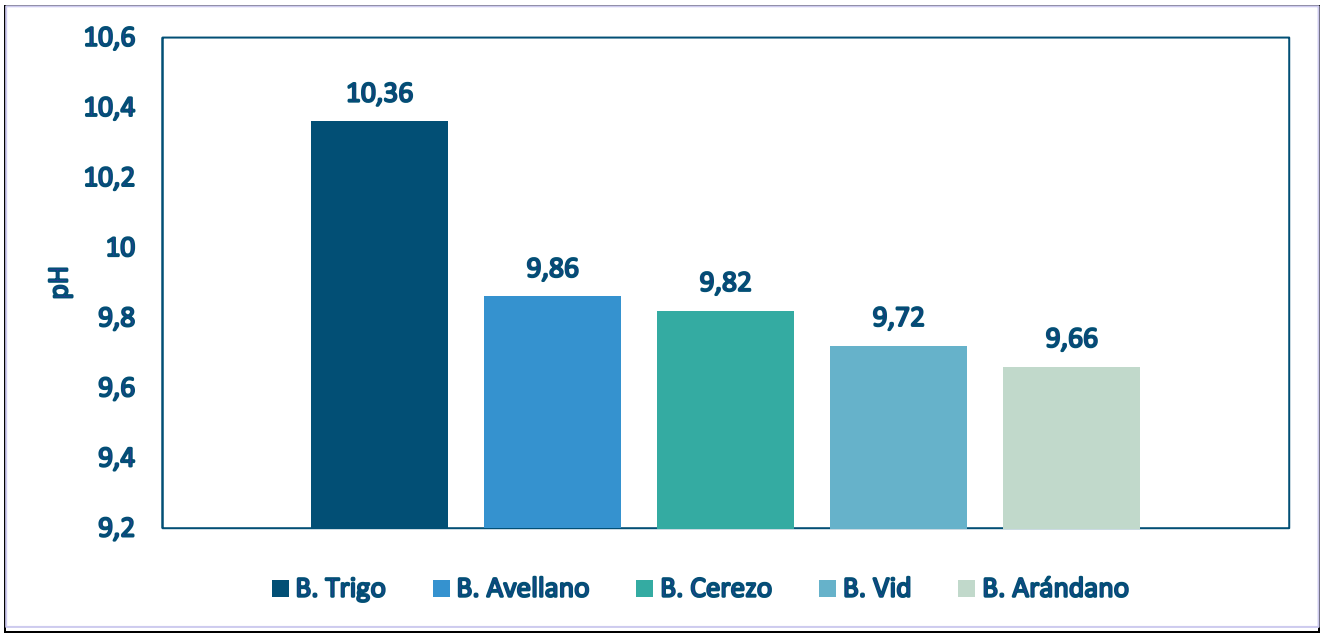
Material Volátil: El contenido de material volátil en el biocarbón es una propiedad que indica el porcentaje de compuestos orgánicos volátiles que permanecen en el biocarbón después del proceso de pirólisis (Fan *et al.*, 2024). Este parámetro permite evaluar la estabilidad del biocarbón. Un contenido bajo de material volátil generalmente sugiere que el biocarbón es más estable. Esto significa que tiene una mayor capacidad para resistir la descomposición en el suelo, lo que es esencial para su efectividad a largo plazo como enmendante. A continuación se muestran los niveles de material volátil en los diferentes tipos de biocarbones obtenidos con residuos lignocelulósicos.

Figura 15. Contenido de materia volátil (%) en biocarbones producidos.



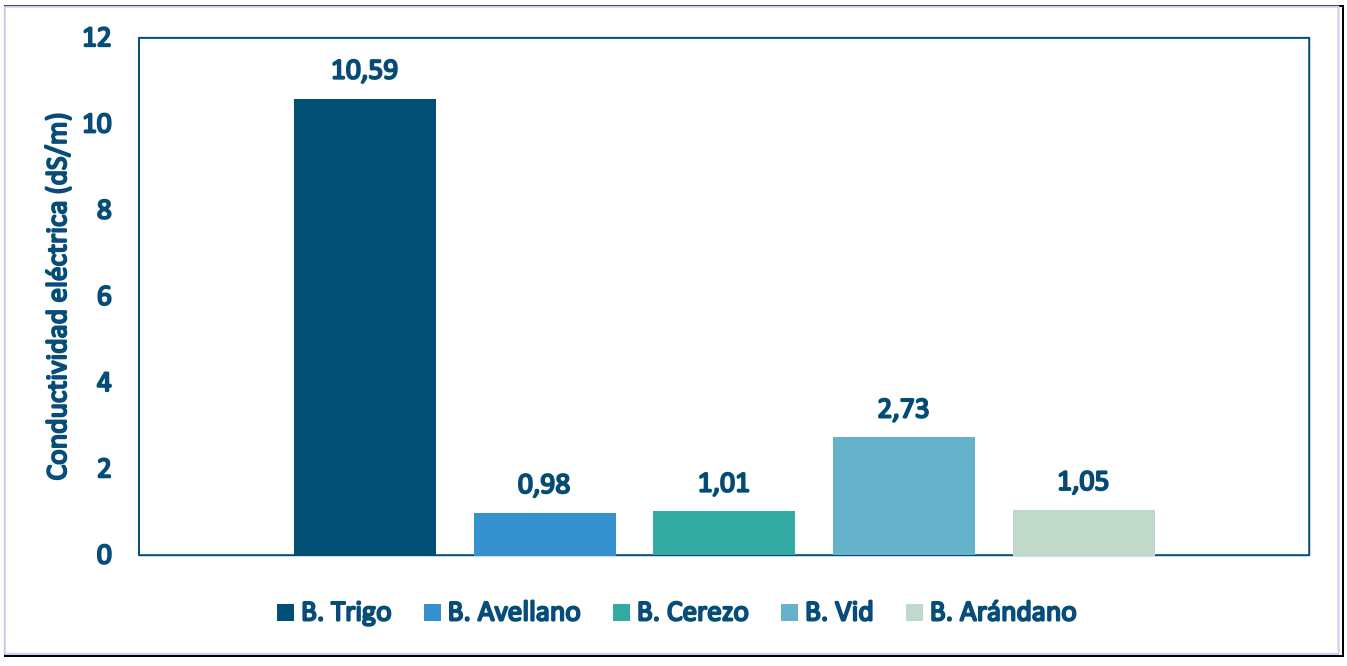
pH : El pH del Biocarbón es fundamental porque influye directamente en la acidez o alcalinidad del suelo al que se aplica. Un Biocarbón con un pH alto puede neutralizar suelos ácidos, mejorando la disponibilidad de nutrientes para las plantas y beneficiando la productividad agrícola debido a que la disponibilidad del Fósforo, macronutriente esencial para el crecimiento, aumenta con el incremento de pH en el suelo. (Jeffery *et al.*, 2017; Ginebra *et al.*, 2022.).

Figura 16. Nivel de pH de los biocarbones producidos.



Conductividad eléctrica: La conductividad eléctrica es un indicador de la concentración de sales solubles en el Biocarbón. Un Biocarbón con alta conductividad podría aportar nutrientes esenciales, como potasio o calcio al suelo, pero en exceso, podría llevar a problemas de salinidad, afectando negativamente el crecimiento de las plantas (Glaser *et al.*, 2002; Laird *et al.*, 2010), la Norma Chilena de Compost (Nch 2880) permite un máximo de 3 dS/m, siendo la del Biocarbón de Trigo extremadamente alta.

Figura 17. Conductividad eléctrica de biocarbones producidos.



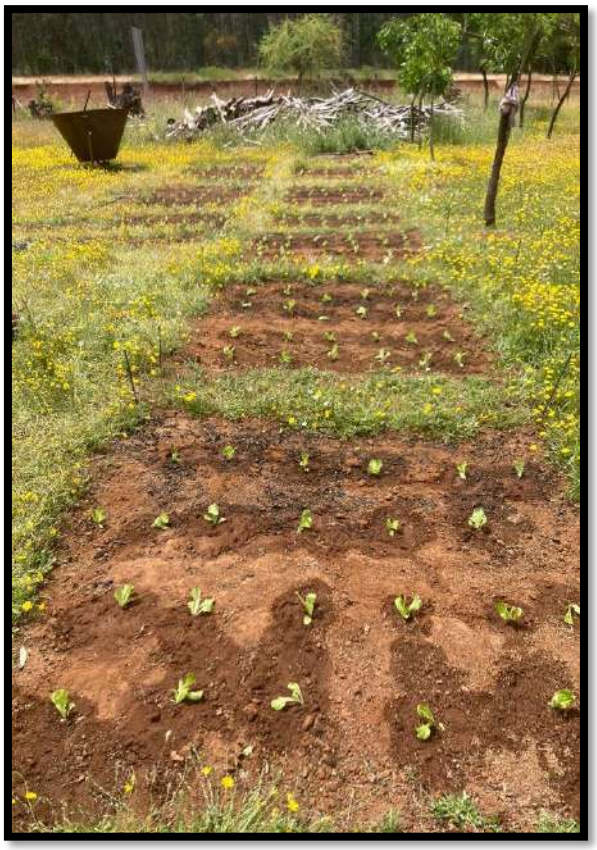
CAPITULO 4.

COMPARANDO EL EFECTO DEL BIOCARBÓN CON LA ADICIÓN DE RESIDUOS SIN PIROLIZAR

Figura 18. Compilado de imágenes de los estudios de campo con aplicaciones de biocarbón.

En este estudio, evaluamos distintos tipos de residuos como restos de poda de avellano, vid y arándano en tres localidades de la región de Ñuble: Portezuelo,

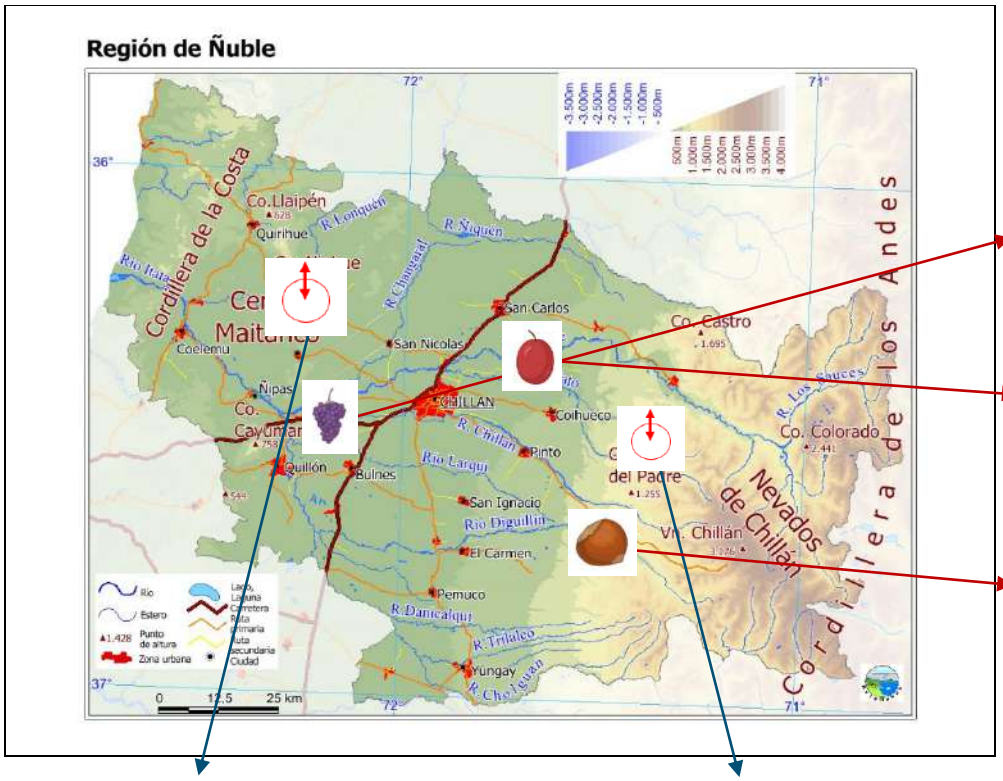
Coihueco y Quirihue. Se determinó su efecto sobre la productividad de una especie vegetal y los cambios químicos del suelo. Los manejos de los residuos fueron (1) residuos picados e incorporados al suelo en proporciones del 1% p/p, (2) residuos convertidos en biocarbón y aplicados al suelo a la dosis de 1%, y (3) suelo sin incorporación de residuos el cuál fue utilizado como control.



Ensayo de productividad: Para medir el efecto de los residuos o biocarbones sobre la productividad, se cultivaron Lechugas (*Lactuca sativa*) variedad Sierra Morena en las localidades de Quirihue y Coihueco donde se establecieron 28 parcelas de 2 m^2 (7 tratamientos por 4 repeticiones) con incorporación de tratamientos de biocarbón de poda de Cerezo, Avellano y Vid contrastado con la adición de los mismos tres residuos pero sin pirolizar e incorporados al suelo. Todos los tratamientos en dosis del 1% aplicados en forma manual e incorporados con rastrillo en los primeros 20 cm del perfil de suelo, se consideró un control absoluto en cada localidad, el cultivo se mantuvo durante 3 meses entre diciembre y febrero y las parcelas fueron regadas con una frecuencia cada 2 días. A la cosecha se evaluaron parámetros como volúmen de raíces y biomasa seca total, que corresponde al peso seco radicular medido más el peso seco aéreo medido de la planta.

A continuación se muestra los lugares de recolección de residuos y establecimiento de parcelas demostrativas en la Región de Ñuble.

Figura 20. Ubicación de los sitios experimentales y los lugares de recolección de residuos.



Resultados.

Volumen de raíces (mL): Todos los tratamientos obtuvieron un aumento significativo en el volúmen de raíces respecto al control, principalmente atribuíble a los cambios en parámetros del suelo originados por la incorporación de las distintas enmiendas. Algunos cambios reportados en la literatura que benefician a los cultivos son por ejemplo, un aumento en la retención hídrica, un aumento en la porosidad total (Ngambia *et al.*, 2024), cambios en los distintos reservorios de nutrientes y enzimas, modificaciones en el pH del suelo, o aumento en carbono total, nitrógeno total o fósforo Olsen (Ginebra *et al.*, 2022). En la localidad de

Coihueco, el principal aumento respecto a los residuos sin pirolizar es que el biocarbón de Avellano y de Vid, obtuvieron una media de 1,95 mL por lechuga en comparación con 0,46 mL de los residuos sin pirolizar, lo que representa un aumento del rendimiento de hasta 4 veces. En la localidad de Quirihue, el biocarbón de avellano obtuvo una media de 1,21 mL en comparación a 0,39 mL de la media de los tratamientos aplicados de residuos sin pirolizar, lo que refleja un aumento de hasta 3 veces el volumen de raíces.

Figura 21. Volúmen de raíces en mililítros (mL) para la localidad de Coihueco.

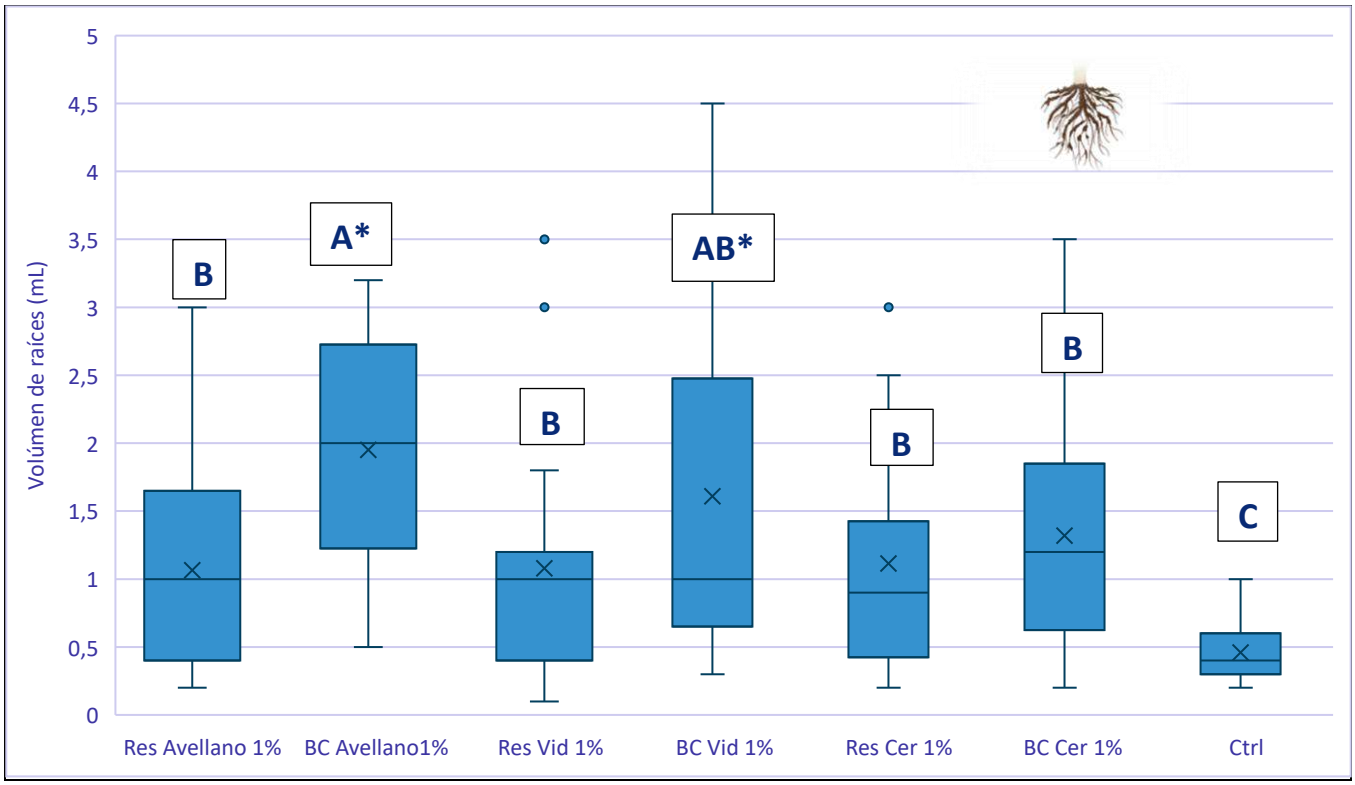
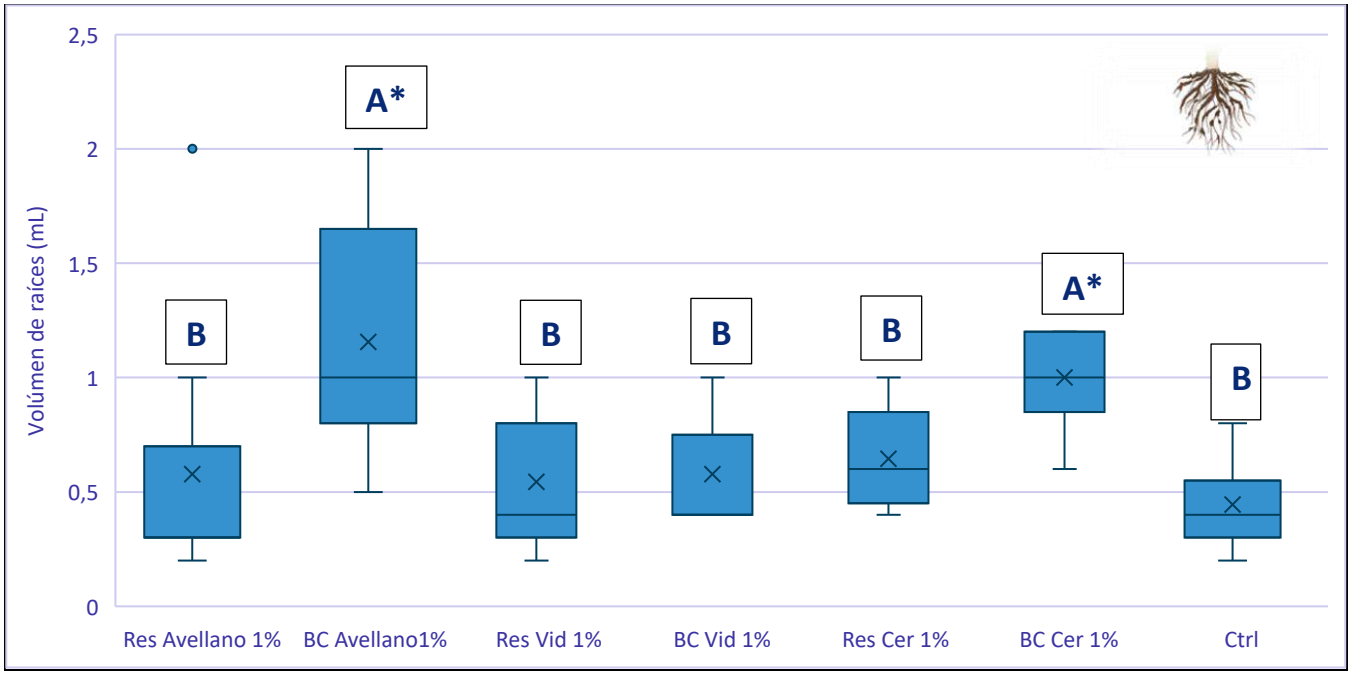


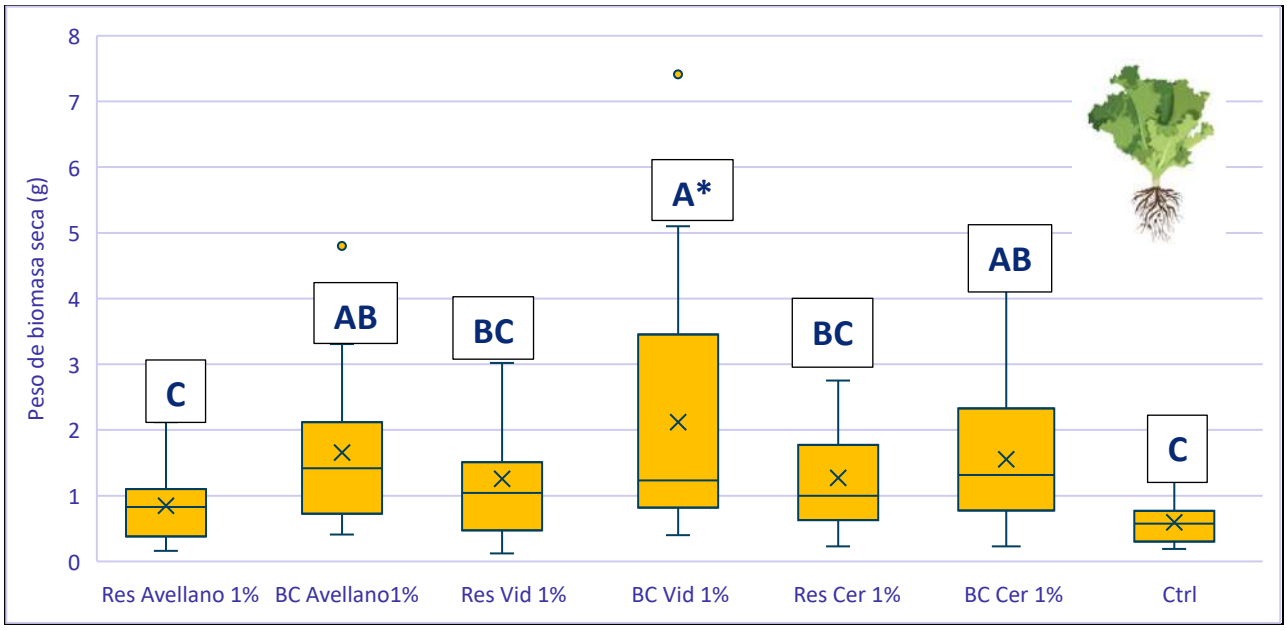
Figura 22. Volúmen de raíces en mililítros (mL) para la localidad de Quirihue.



Biomasa seca total:

Todos los tratamientos con adición de biocarbón destacan con un aumento significativo en la biomasa seca total respecto al control; incluyendo el peso de la biomasa seca radicular sumado al peso de la biomasa seca aérea. Estos cambios son principalmente atribuíbles a los cambios en el ambiente edafico de la planta que influenciado por la adición de biocarbón generan incrementos a pesar de las altas temperaturas reportadas en la localidad. El principal aumento respecto a las otras enmiendas se destaca en la localidad de Coihueco para el caso del biocarbón de vid con una media de 1,42 g comparado a 0,42 g de la media de los tratamientos con residuos sin pirolizar; lo que representa un aumento de casi tres veces. Para la localidad de Quirihe, el principal aumento respecto a las otras enmiendas fue obtenida por el biocarbón de cerezo con una media de 1,1 g en comparación con 0,4 g de la media de los tratamientos aplicados directo al suelo, lo que representa un aumento de casi tres veces el rendimiento de biomasa seca total de las lechugas evaluadas. Estos rendimientos son muy bajos para un cultivo comercial; sin embargo, los sitios en estudio son suelos muy degradados que no utilizados para el cultivo de hortalizas, pero se eligió este cultivo dado que se requería evaluar en un cultivo de crecimiento rápido y que sea sensible a los cambios en el suelo.

Figura 23. Biomasa seca de lechuga obtenido con diferentes tratamientos en la localidad de Coihueco.



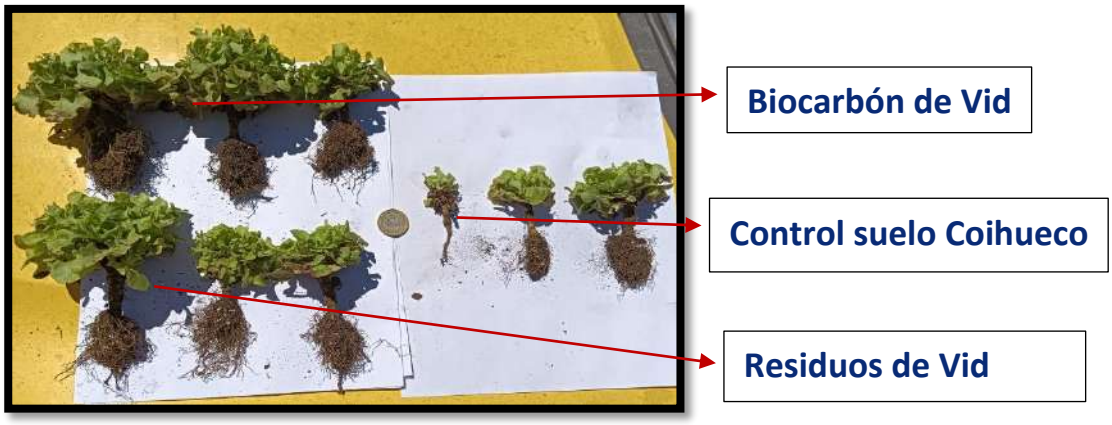
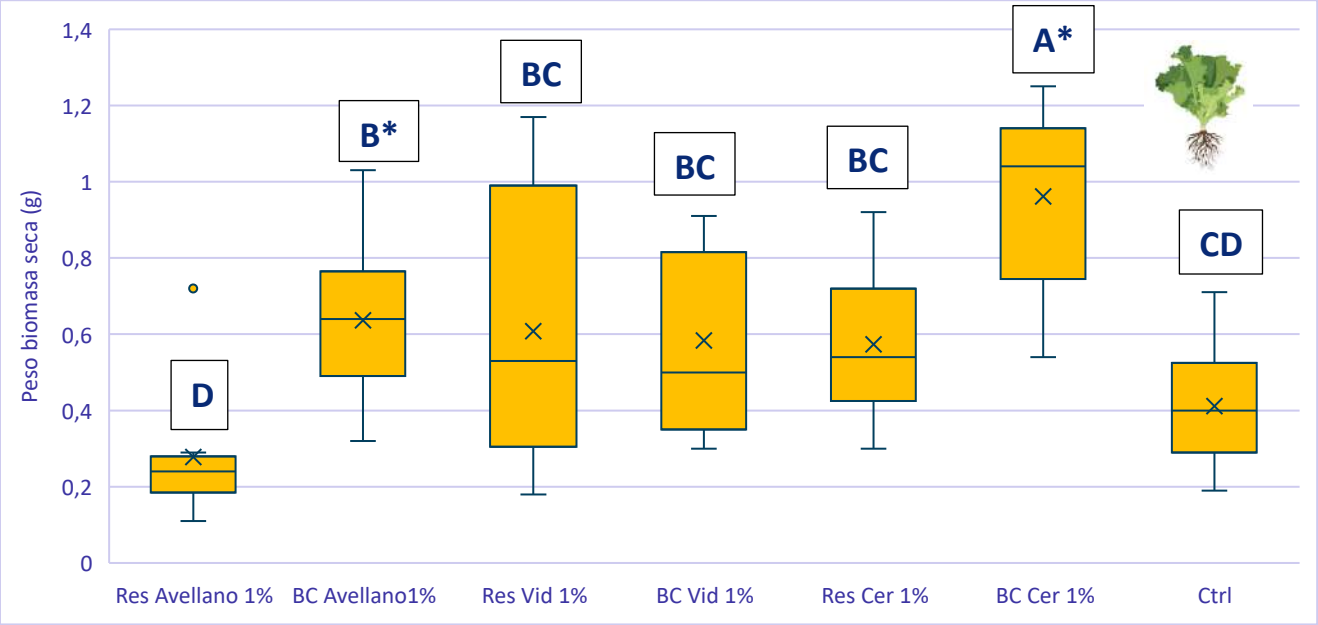


Figura 24. Biomasa seca de lechuga obtenida con diferentes tratamientos en la localidad de Quirihue.



EFECTO DE LAS ENMIENDAS EN EL AUMENTO DEL CARBONO TOTAL DEL SUELO.

Las enmiendas pirolizadas en forma de biocarbón, aumentaron el contenido de carbono total en el suelo en un 20-30% más que las enmiendas sin pirolizar y los respectivos controles. Esto representa aumentos del carbono total entre un 1% en Coihueco y un 1,85% en Portezuelo, atribuible principalmente a la composición rica en carbono (> 80%) por causa de la lignina y celulosa de su composición. Esta composición le otorga mayor estabilidad al carbono en el suelo, que resiste la degradación y se mantiene por periodos más prolongados. Este resultado se evidenció en las tres localidades evaluadas: Coihueco, Quirihue y Portezuelo, donde las enmiendas incorporadas sin pirolizar no presentan diferencias significativas en el aumento de carbono total del suelo comparado con los controles en las tres localidades.

Figura 25. Carbono total del suelo después de 60 días de recibir los diferentes tratamientos para la localidad de Coihueco en un suelo de la serie Arrayán

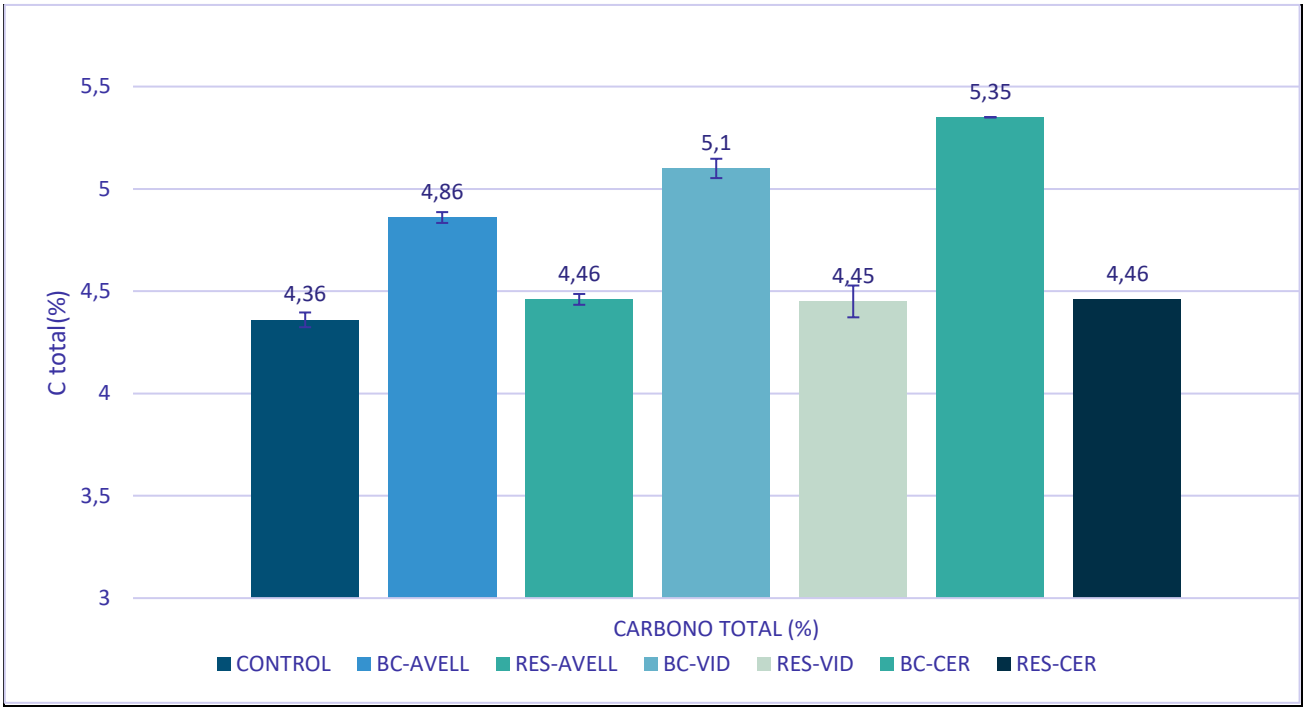


Figura 26. Carbono total del suelo después de 60 días de recibir los diferentes tratamientos para la localidad de Portezuello en un suelo de la serie Cauquenes.

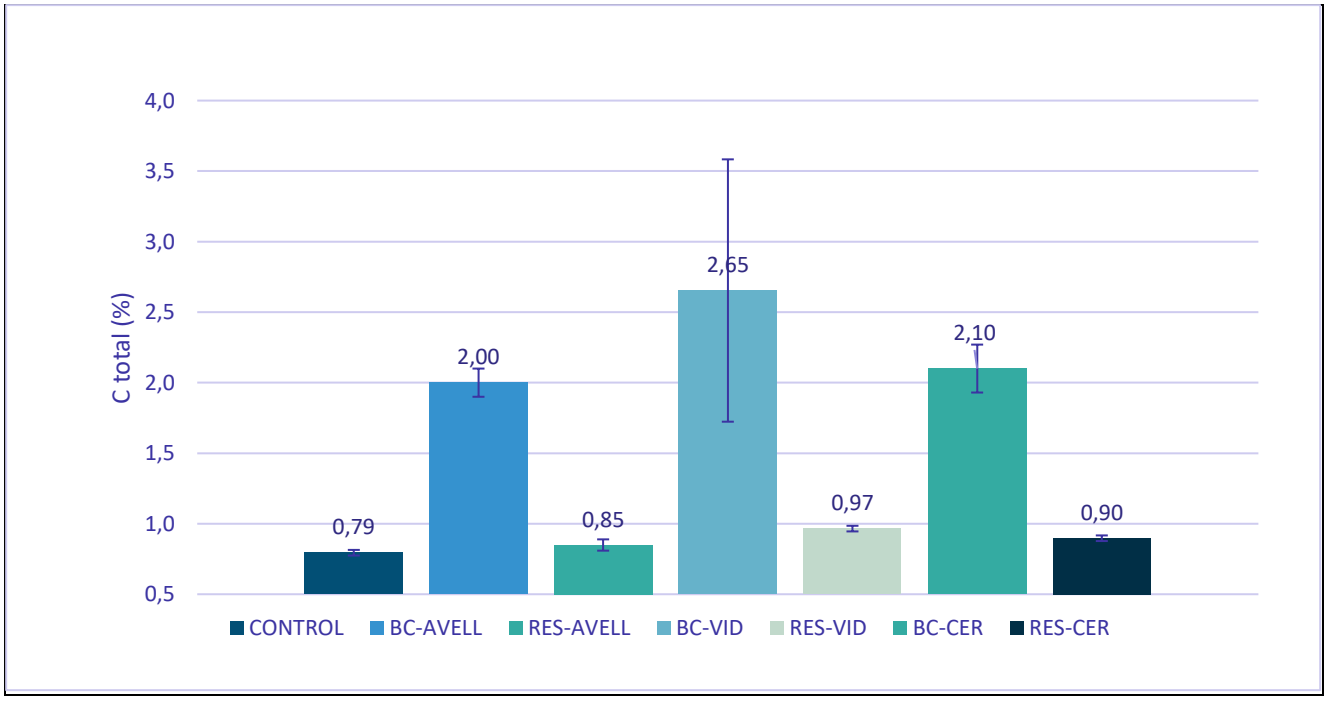
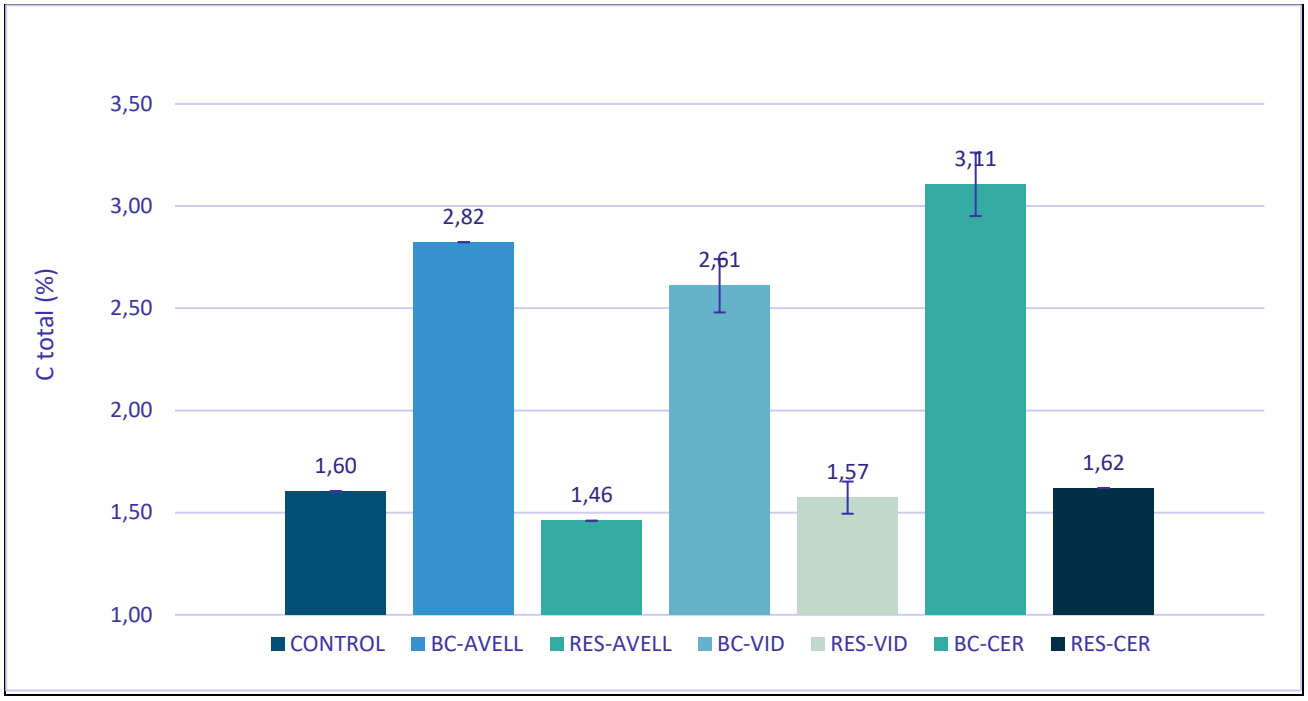


Figura 27. Carbono total del suelo después de 60 días de recibir los diferentes tratamientos para la localidad de Quirihue en un suelo de la serie Cauquenes.



La región de Ñuble presenta una diversidad de suelos que van desde suelos originados por cenizas volcánicas en la cordillera de los andes como las series Arrayán y Santa Bárbara llamados suelos Andisoles, hasta suelos de orígen granítico mas cercanos a la costa como la serie Cauquenes o Pocillas llamados suelos Alfisoles (Stolpe, 2015). Los Alfisoles como de la serie Arrayán presentan menor retención hídrica y materia orgánica, mientras que los Andisoles, derivados de ceniza volcánica se caracterizan por un alto contenido de materia orgánica y una mayor retención de humedad. Esto se evidencia con los resultados obtenidos de C total de la Figura 25, en la que el suelo Coihueco, obtuvo un mayor incremento en el contenido de C total que los suelos mas costeros; sin embargo, mayores incrementos del contenido de C total fue determinado en los suelos con menos C total inicial alcanzando incrementos de hasta tres veces en relación al suelo control.

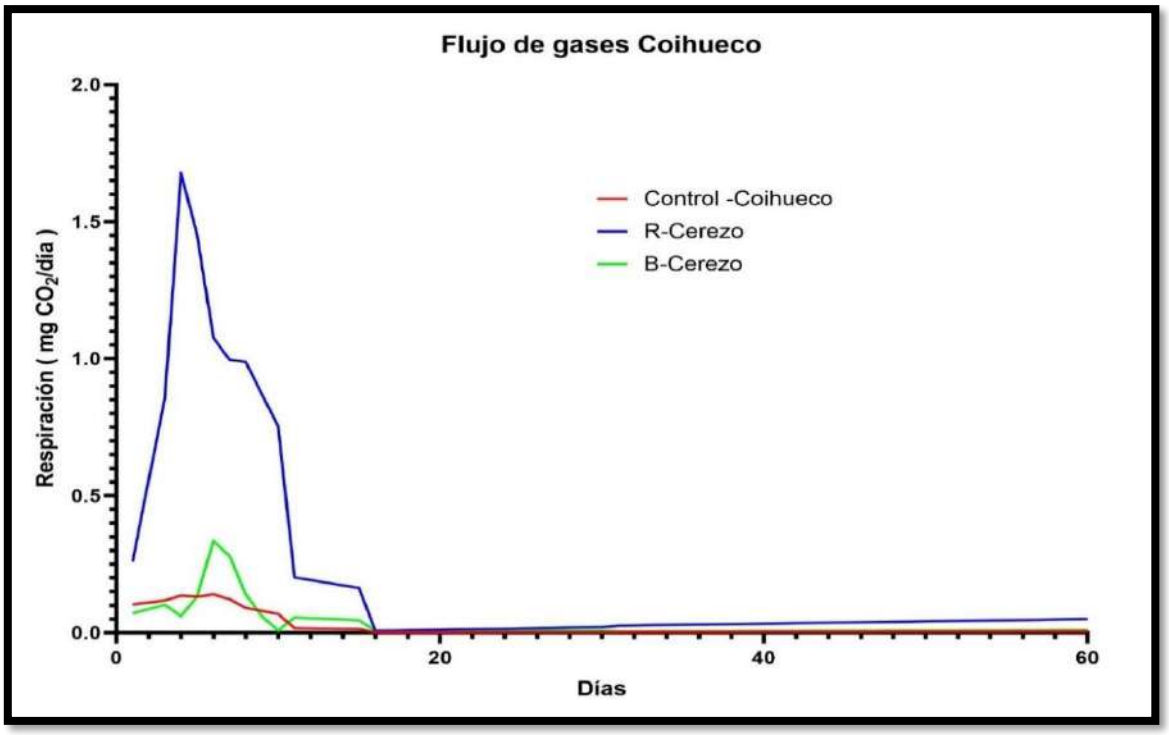
EFECTO DE LAS ENMIENDAS EN LAS EMISIONES DE CO_2

En la búsqueda de prácticas agrícolas sostenibles que reduzcan las emisiones de CO_2 y promuevan el secuestro de carbono en el suelo, es fundamental considerar cómo las enmiendas, como el biocarbón, interactúan con las propiedades del suelo. Estas interacciones pueden generar diversos resultados en las emisiones de CO_2 a la atmósfera. A continuación, se presentan los resultados de evaluaciones sobre las emisiones de CO_2 generadas por distintos biocarbones en las localidades de Quirihue, Coihueco y Portezuelo.

El residuo de cerezo es representativo de la producción agrícola de la localidad de Coihueco, el cuál produce una máxima emisión entre el día 5 y 7 de 1,7 mg

CO_2/día al ser incorporado el residuo sin pirolizar, mientras que el biocarbón de poda de cerezo produjo una máxima emision de 0,4 mg CO_2/día el día 7 posterior a su aplicación siendo 4 veces menor.

Figura 28. Emisiones diarias de CO_2 debido a los tratamientos aplicados en suelo serie arrayán de la localidad de Coihueco .

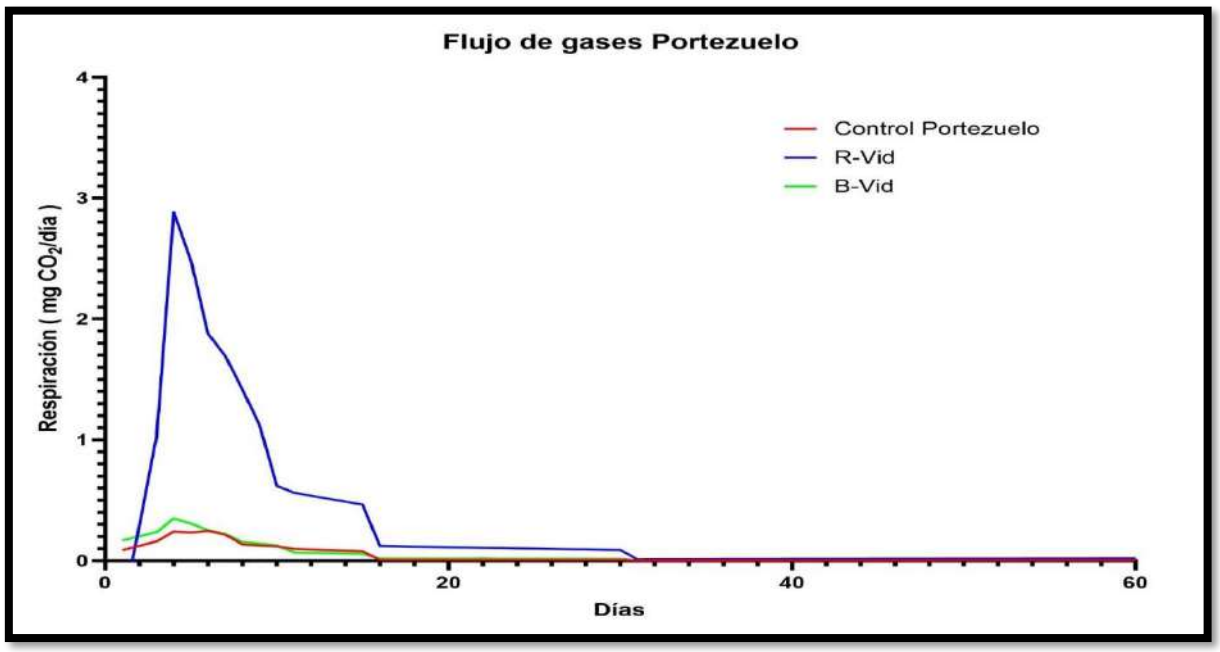


A partir del día 15 las enmiendas estabilizan su emisión de CO_2, habiendo acumulado a la fecha una emisión de 12 mg CO_2, en cambio el biocarbón presenta emisión de menos de 1 mg CO_2 al mismo período, valor similar a la respiración basal del suelo.

La vid es cultivo representativo del Valle del Itata teniendo un gran valor turístico. De las viñas se producen residuos de poda y zarmientos y los productores, muchas veces son incorporarlos al suelo suponiendo una descomposición completa de estos residuo. A continuación se muestran las emisiónes de CO_2 del residuo pirolizado y sin pirolizar, comparados con un suelo control.

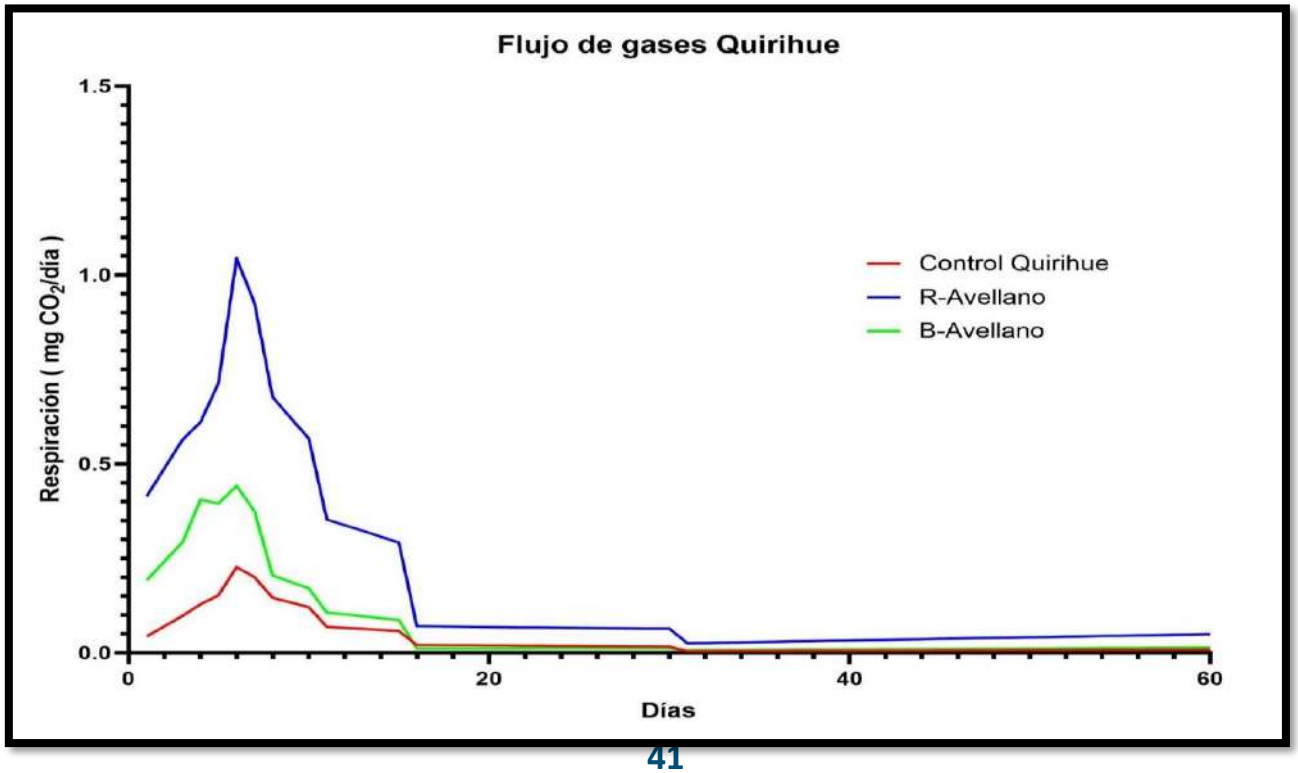
El residuo de vid durante su descomposición en el suelo produce máximas emisiones de CO_2 entre el día 5 y 7 de 3 mg CO_2/día al ser incorporado sin pirolizar, mientras que la respiración basal del suelo de Portezuelo y el biocarbón de residuo de vid muestran una máxima emisión entre 0,3 y 0,4 mg CO_2/día. A partir del día 15 las enmiendas se estabilizan en el suelo, sin embargo el residuo sin pirolizar sigue emitiendo aunque levemente, de forma continua.

Figura 29. Emisiones diarias de CO_2 debido a los tratamientos aplicados en suelo serie Pocillas de la localidad de Portezuelo.



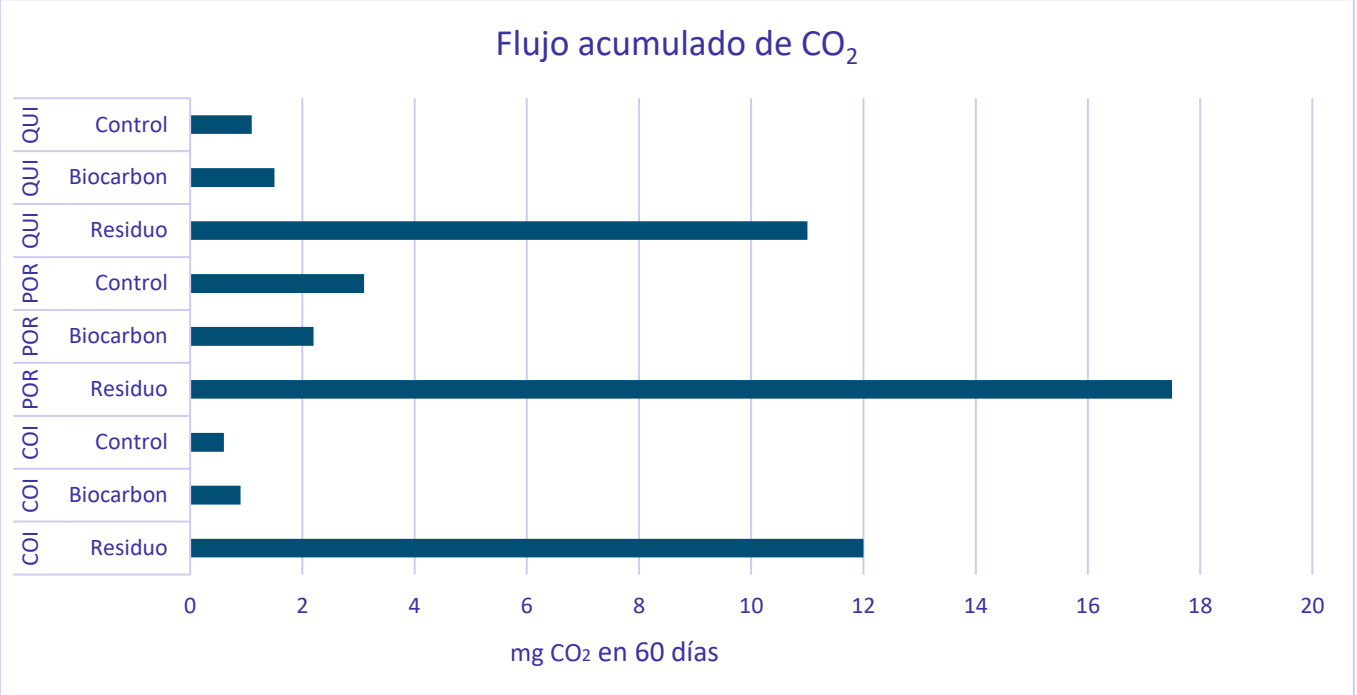
Con un Alfisol similar al de Portezuelo, Quirihue destaca por una diversa actvidad familiar y campesina sumado a actividad forestal ocasional. Para esta localidad, se ha seleccionado el residuo de mayor contenido de carbono que es el residuo de avellano europeo para comprar sus emisiones respecto al biocarbón del mismo residuo y un control.

Figura 30. Emisiones diarias de CO_2 debido a los tratamientos aplicados en suelo serie Cauquenes de la localidad de Quirihue.



El residuo de avellano europeo produce una máxima emisión entre el día 5 y 7 de 1,1 mg CO_2/día al ser incorporado sin pirolizar, mientras que el biocarbón de residuos de avellano europeo alcanza una máxima emisión de 0,4 mg CO_2/día entre los días 7 y 10 posterior a su aplicación, al igual que el resto de enmiendas y localidades, a partir del día 15 las enmiendas estabilizan su emisión de CO_2, sin embargo la enmienda sin pirolizar de avellano acumuló una emisión de 8 mg CO_2 e incluso se evidencian leves emisiones posterior a este período, lo que otorga un valor muy superior si consideramos que el biocarbón de residuos de avellano europeo presenta una respiración acumulada inferior a 2 mg CO_2.

Figura 31. Respiración acumulada (60 días) de los suelos con aplicaciones de los tratamientos al final de período para las tres localidades.



COI = Coihueco; POR = Portezuelo; QUI = Quirihue

Los residuos orgánicos lignocelulosos tienden a descomponerse liberando CO_2 y otros gases de efecto invernadero durante este proceso; sin embargo, esta descomposición no siempre es completa lo que ocasiona que continúe emitiendo CO_2 en el tiempo. En contraste, el biocarbón generó significativamente menos emisiones de CO_2 durante su estabilización en el suelo, lo que finalmente contribuye a la mitigación del cambio climático (Mahuia *et al.,* 2024) y a la sustentabilidad agroambiental de la gestión de los residuos. Otros estudios han mostrado que el uso de biocarbón puede reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en un 50-70% en comparación

con las enmiendas sin pirolizar. Esto destaca la importancia del biocarbón como una herramienta para el secuestro de carbono y la reducción de emisiones de gases en la agricultura (Smith *et al.,* 2019; Glaser *et al.,* 2002).

CONCLUSIONES

La implementación de hornos de pirólisis tipo Kon-Tiki ha demostrado ser una alternativa factible y eficiente para los productores agrícolas de la región de Ñuble, este sistema no solo aprovecha los residuos agrícolas lignocelulósicos generados localmente, sino que también permite la producción de biocarbón en los mismos predios, reduciendo costos de transporte y promoviendo una economía circular sostenible, las adaptaciones locales del diseño de los hornos facilitan su uso práctico y su integración en las actividades agrícolas.

El uso de biocarbón producido mediante pirólisis ha generado mejoras significativas en las propiedades químicas del suelo, incluyendo aumentos en el contenido de carbono total, ajustes en el pH y mayor disponibilidad de nutrientes esenciales como el fósforo, que terminan influyendo en el rendimiento, estos efectos benefician la fertilidad y productividad agrícola, en especial en suelos degradados, marcando una diferencia notable respecto a la aplicación de residuos sin pirolizar.

La incorporación de biocarbón en los suelos ha resultado en una notable disminución de las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) en comparación con residuos agrícolas sin pirolizar, esto se debe a la mayor estabilidad del carbono en el biocarbón, lo que contribuye al secuestro de carbono y la mitigación del cambio climático.

REFERENCIAS

Antileo-Mellado, S., Muñoz, C., Sanchez-Hernandez, J. C., Ginebra, M., and Sandoval, M. (2024). Effect of biochar on vermicompost production: Chemical, biochemical, and biological properties. *Agronomy*, *14*(615).

Awad, Y.M., Lee, S.S., Kim, K.H., Ok, Y.S., and Kuzyakov, Y. (2018). Carbon and nitrogen mineralization and enzyme activities in soil aggregate-size classes: Effects of biochar, oyster shells, and polymers. *Chemosphere*, *198*, 40-48.

Cui, J., Glatzel, S., Bruckman, V.J., Wang, B., and Lai, D.Y. (2021). Long-term effects of biochar application on greenhouse gas production and microbial community in temperate forest soils under increasing temperature. *Sci. Total Environ.*, *767*, 145021.

Fan, M., Shao, Y., Li, C., Kontchouo, F.M.B., Ren, W., Zhang, S., Wang, S., Li, B., and Hu, X. (2024). Balanced anchoring sites and volatile matter in biochar render Ni/biochar with higher metal dispersion and superior activity in hydrogenation of vanillin. *Fuel*, *357*(C), 129923.

Ginebra, M., Muñoz, C., Calvelo-Pereira, R., Doussoulin, M., and Zagal, E. (2022). Biochar impacts on soil chemical properties, greenhouse gas emissions, and forage productivity: A field experiment. *Sci. Total Environ.*, *806*, 150465.

Ginebra, M., Muñoz, C., y Zagal, E. (2022). Carbon stability and soil N_2O emissions. Pyrolyzed or unpyrolyzed manure? *J. Environ. Manag.*, *322*, 116095.

Glaser, B., Lehmann, J., and Zech, W. (2002). Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal–a review. *Biol. Fertil. Soils*. Alemania.

Kammann, C., Ratering, S., Eckhard, C., and Müller, C. (2016). Biochar and hydrochar effects on greenhouse gas (carbon dioxide, nitrous oxide, and methane) fluxes from soils. *J. Environ. Qual.* Alemania.

Lal, R. (2006). Soil carbon sequestration in Latin America: An issue of global significance. *Soil Sci.*, *172*(6), 467-482.

Lehmann, J., and Joseph, S. (2015). Biochar for environmental management: Science, technology and implementation. *Routledge*. Reino Unido.

Li, X., Wang, T., Chang, S.X., Jiang, X., and Song, Y. (2020). Biochar increases soil microbial biomass but has variable effects on microbial diversity: A meta-analysis. *Sci. Total Environ.*, *749*, 141593.

Liu, X., Wei, Z., Ma, Y., Liu, J., and Liu, F. (2021). Effects of biochar amendment and reduced irrigation on growth, physiology, water-use efficiency and nutrients uptake of tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) on two different soil types. *Sci. Total Environ.* China.

Lopes, É. M., Reis, M. M., Frazão, L. A., Terra, L. E. M., Lopes, E. F., Santos, M. M., and Fernandes, L. A. (2021). Biochar increases enzyme activity and total microbial quality of soil grown with sugarcane. *Environ. Technol. Innov.*, *21*, 101270.

Muema, F.M., Richardson, Y., Keita, A., and Sawadogo, M. (2024). An interdisciplinary overview on biochar production engineering and its agronomic applications. *Biomass Bioenergy*, *190*, 107416.

Muñoz, C., Ginebra, M., and Zagal, E. (2024). Impact of pyrolyzed and unpyrolyzed animal manures on soil properties, carbon sequestration, and clover productivity in Andisol. *Agronomy*, *14*(592).

Ngambia, A., Mašek, O., y Erastova, V. (2024). Development of biochar molecular models with controlled porosity. *Biomass Bioenergy*, *184*, 107199.

Nguyen, B.T., Le, L.B., Le, L.P., Nguyen, H.T., Tran, T.D., and Van Thai, N. (2021). The effects of biochar on the biomass yield of elephant grass and properties of acidic soils. *Ind. Crops Prod.*, *161*, 113224.

Novak, J.M., Busscher, W.J., Laird, D.A., Ahmedna, M., Watts, D.W., and Niandou, M.A.S. (2009). Impact of biochar amendment on fertility of a southeastern coastal plain soil. *Soil Sci.* Estados Unidos.

Schmidt, H.-P., y Taylor, P. (2014). Kon-Tiki flame cap pyrolysis for the democratization of biochar production. *Biochar J.*, *1*(1), 14-24.

Schmidt, H.-P., y Wilson, K. (2014). The 55 uses of biochar. *Biochar J.* Suiza.

Sohi, S.P., Krull, E., Lopez-Capel, E., and Bol, R. (2010). A review of biochar and its use and function in soil. *Adv. Agron.* Reino Unido.

Spokas, K.A. (2010). Review of the stability of biochar in soils: Predictability of O molar ratios. *Carbon Manag.*, *1*(2), 289-303.

Verheijen, F., Jeffery, S., Bastos, A.C., Van der Velde, M., and Diafas, I. (2019). Biochar application to soils: A critical scientific review of effects on soil properties, processes and functions. *Eur. Comm.* Bélgica.

Wang, Y., Ma, Z., Wang, X., Sun, Q., Dong, H., Wang, G., and Mao, Z. (2019). Effects of biochar on the growth of apple seedlings, soil enzyme activities and fungal communities in replant disease soil. *Sci. Hortic.*, *256*, 108641.

Woolf, D., Amonette, J.E., Street-Perrott, F.A., Lehmann, J., and Joseph, S. (2010). Sustainable biochar to mitigate global climate change. *Nat. Commun.*, *1*(1), 56.

Yang, L., Wu, Y., Wang, Y., An, W., Jin, J., Sun, K., and Wang, X. (2021). Effects of biochar addition on the abundance, speciation, availability, and leaching loss of soil phosphorus. *Sci. Total Environ.*, *758*, 143657.

Zhang, G., Guo, X., Zhu, Y., Liu, X., Han, Z., Sun, K., and Han, L. (2018). The effects of different biochars on microbial quantity, microbial community shift, enzyme activity, and biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil. *Geoderma*, *328*, 100-108.