

## Aplicación de hidrochar de residuos sólidos cítricos como mejorador de propiedades fisicoquímicas en suelos degradados

Diana Nava-Pacheco <sup>1\*</sup>, Dra. Ofelia Landeta-Escamilla <sup>1</sup>, M.I.A. Adrián Reyes-Benitez <sup>1</sup>, M.I.Q. Norma Alejandra Vallejo-Cantú <sup>1</sup>, Dr. Alejandro Alvarado-Lassman <sup>1</sup> y Dr. Erik Samuel Rosas Mendoza <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Afiliación 1; División de Estudios de Posgrado e Investigación, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Orizaba, Av. Oriente 9, 852. Col. Emiliano Zapata, Orizaba, Veracruz C.P. 94320, México

<sup>2</sup> Afiliación 2; CONACYT-Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Orizaba Av. Oriente 9, 852. Col. Emiliano Zapata, Orizaba, Veracruz C.P. 94320, México

\* Autor de correspondencia: dnavap@orizaba.tecnm.mx

**Desarrollo Sustentable** (Gestión y aprovechamiento de residuos sólidos).

**Resumen:** Se evaluó el hidrochar obtenido a partir de Residuos Sólidos Cítricos (RSC) como mejorador de propiedades fisicoquímicas en suelos degradados. Los RSC conformados por Residuos Sólidos de Naranja (RSN) y Residuos Sólidos de Limón (RSL) se sometieron a carbonización hidrotermal (CHT). Se realizaron siembras con rábano rojo agregando hidrochar y suelo degradado en relaciones: 1:100, 3:100, 6:100 y 12:100, con suelo fértil (testigo) y con suelo degradado (blanco). Las plantas de rábano rojo crecieron utilizando las relaciones: 1:100-RSN, 3:100-RSN, 6:100-RSN, 1:100-RSL y testigo. El pH fue un parámetro importante, ya que el hidrochar aportó alcalinidad al suelo, encontrándose que la relación 12:100 de RSN y RSL quedó fuera del rango que tolera el cultivo (5.5 a 6.8) y no logró germinación. Las plantas 3:100 y 6:100 de RSL se marchitaron después de la segunda semana, atribuyendo a la alcalinidad del suelo y falta de K como macronutriente. Las plantas 1:100 RSL y 3:100 RSN lograron resultados favorables, llegando a igualar su crecimiento de hojas y tamaño con la planta testigo, después de 8 semanas sus parámetros finales fueron: 1) planta testigo: 1.58% humedad, 15 cmol/kg de CIC y 2.44% SV; se cosechó un rábano alargado con 1.5 cm de ancho y 3 cm de largo; 2) 1:100 RSL: 14.46% humedad, 42 cmol/kg de CIC y 11.73% SV, se formó un bulbo de rábano con 3.5 cm de diámetro y 1.3 cm de largo; y 3) 3:100 RSN: 5.32% humedad, 18 cmol/kg de CIC y 13% SV, no hubo formación del bulbo del rábano, la raíz roja midió 2.5 cm de largo. Finalmente, la planta 1:100 RSN tuvo crecimiento del rábano similar al testigo, con 14.10% humedad, 25 cmol/kg de CIC y 85.90% SV; se cosechó un rábano alargado con 2.5 cm de ancho y 2.7 cm de largo.

**Palabras clave:** biomasa residual, enmienda del suelo, carbonización hidrotermal, rábano rojo

## Application of hydrochar obtained from solid citrus waste as an improver of physicochemical properties in degraded soils

**Abstract:** Hydrochar obtained from solid citrus waste (SCW) was evaluated as an improver of physicochemical properties in degraded soils. The SCW made up of Solid Orange Waste (SOW) and Solid Lemon Waste (SLW) were subjected to hydrothermal carbonization (HTC). Sowings were made with red radish adding hydrochar and degraded soil in ratios: 1:100, 3:100, 6:100 and 12:100, with fertile soil (control) and degraded soil (white). Red radish plants were grown using the ratios: 1:100-RSN, 3:100-RSN, 6:100-RSN, 1:100-RSL and control. The pH was an important parameter, since the hydrochar provided alkalinity to the soil, finding that the 12:100 ratio of RSN and RSL was outside the range tolerated by the crop (5.5 to 6.8) and did not achieve germination. The 3:100 and 6:100 RSL plants wilted after the second week, attributed to soil alkalinity and lack of K as a macronutrient. The 1:100 RSL and 3:100 RSN plants achieved favorable results, reaching the same leaf growth and size as the control plant, after 8 weeks their final parameters were: 1) control pot: 1.58% moisture, 15 cmol/kg CEC and 2.44% VS; an elongated radish 1.5 cm wide and 3 cm long was harvested; 2) 1:100 hydrochar-SLW: 14.46% moisture, 42 cmol/kg CEC and 11.73% VS, a radish bulb was formed with 3.5 cm diameter and 1.3 cm long; and 3) 3:100 hydrochar-SOW: 5.32% moisture, 18 cmol/kg CEC and 13% VS, there was no radish bulb formation, the red root measured 2.5 cm long. Ratio 1:100 SOW had radish growth similar to the control pot, with 14.10% moisture, 25 cmol/kg CEC and 85.90% VS; an elongated radish 2.5 cm wide and 2.7 cm long was harvested.

**Keywords:** residual biomass, soil amendment, hydrothermal carbonization, red radish

### Introducción

Es sabido que los residuos sólidos cítricos dejan de ser un beneficio para el proceso que los generó una vez que las cáscaras pasan por el proceso de extracción, sin embargo, son capaces de ser aprovechados o transformados para generar nuevos productos con valor económico, de interés comercial y/o social. Es por ello que se consideran una materia prima barata y muy abundante para su conversión a un mejorador de suelos, llamado hidrochar, mediante la

aplicación de un proceso termoquímico conocido como carbonización hidrotermal (CHT). En México, en el periodo de 2013/14 a 2017/18 se generaron de 2.3 a 2.8 millones de toneladas de residuos sólidos de naranja y de 1.3 a 1.6 millones de toneladas de residuos sólidos de limón, aproximadamente; siendo Veracruz el mayor productor de cítricos y el principal generador de estos residuos (Rosas-Mendoza *et al.*, 2020), es por ello que el combatir la demanda agroindustrial conlleva actividades de agricultura y arado periódicas, provocando un uso desmedido al suelo degradándolo física, química y biológicamente. Esto genera una problemática debido a que las familias que dependen económicamente de los productos del campo se han visto afectadas al no poder sembrar lo suficiente, o en otros casos no poder sembrar ningún tipo de cultivo debido a que el suelo ya no contiene los macro y micronutrientes necesarios para el crecimiento de sus cultivos (FAO, 2015).

Estudios recientes mencionan la aplicación de hidrochar como mejorador de suelos, entre ellos se encuentran: Busch y Glaser (2015), efectuaron el experimento de campo en una de las regiones más áridas de Alemania, la cual contiene un suelo tipo Regosol. El hidrochar fue producido con ensilaje de maíz y posteriormente mezclado con biomasa de residuos vegetales procedentes de horticultura y paisajismo. Los resultados de este estudio de campo indican que el hidrochar compostado se degradó dentro de los 2 años de dicho experimento, por lo que podría ser adecuado como mejorador del suelo, ya que puede proporcionar nutrientes esenciales y especialmente funciona como fertilizante de N de liberación lenta. Subedi *et al.* (2015), mezclaron una relación de hidrochar:suelo de 3:100 (g:g), en dos tipos de suelo, uno franco limoso y otro franco. Scheifele *et al.* (2017), utilizaron 4 tipos diferentes de suelos degradados en los cuales aplicaron hidrochar de hojarasca de maíz, encontrando un aumento en el N total del suelo ( $N_{tot}$ ) en todos los suelos. Bento *et al.* (2019), reportaron que existen tecnologías para contrarrestar la degradación del suelo, ayudar a recuperar su fertilidad y capturar el carbono, como lo es la aplicación de hidrochar, que es un producto de la carbonización hidrotermal de biomasa residual. Kalderis *et al.* (2018), utilizaron un suelo litosol calcárico y con RSN recolectados de un mercado comercial de Creta (Grecia) produjeron hidrochar. La aplicación de hidrochar en un suelo arcilloso compactado mostró resultados prometedores con respecto a sus propiedades físicas.

Por esta razón, el objetivo de este trabajo fue evaluar el hidrochar obtenido a partir de residuos sólidos cítricos como mejorador de propiedades fisicoquímicas en suelos degradados, siendo una propuesta de gestión ambiental para el tratamiento de dichos residuos generados en los establecimientos dedicados a la venta de jugos.

## Materiales y métodos

### Obtención de hidrochar a partir de RSC

La recolección de residuos sólidos cítricos se realizó en establecimientos de jugos aleñados al Instituto Tecnológico de Orizaba, específicamente después del proceso de extracción. Los RSC se dividieron en dos tipos: Residuos Sólidos de Naranja (RSN) y Residuos Sólidos de Limón (RSL). Mediante un proceso de Carbonización Hidrotermal (CHT) utilizando un reactor con carcasa de acero inoxidable 304 y un cilindro de teflón en el interior, bajo las condiciones de operación:  $T=220\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $P=3\text{ MPa}$  y  $t_{reacción}=5\text{ horas}$ , se realizó la obtención de hidrochar de RSN y RSL por separado, utilizando de 130 a 150 g de cada residuo. El hidrochar obtenido (llamado hidrochar húmedo) se secó en una estufa durante 2 horas a  $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ , una vez obtenido el hidrochar seco se almacenó y preservó para su aplicación.

Después del proceso de CHT, el hidrochar producido a partir de RSN y RSL fue clasificado para su caracterización como: hidrochar-RSN húmedo ( $h\text{-RSN}_H$ ), hidrochar-RSN seco ( $h\text{-RSN}_S$ ), hidrochar-RSL húmedo ( $h\text{-RSL}_H$ ) e hidrochar-RSL seco ( $h\text{-RSL}_S$ ).

### Caracterización fisicoquímica del hidrochar-RSN e hidrochar-RSL

Nava-Pacheco *et al.* (2021), realizaron la caracterización fisicoquímica del hidrochar húmedo y seco obtenido a partir de los RSC después del proceso de carbonización hidrotermal. La Tabla 1 muestra la caracterización fisicoquímica del hidrochar-RSN e hidrochar-RSL húmedo, mientras que la Tabla 2 muestra la caracterización fisicoquímica del hidrochar-RSN e hidrochar-RSL seco.

Tabla 1. Caracterización fisicoquímica del hidrochar-RSN e hidrochar-RSL húmedo.

Determinaciones	h-RSN <sub>H</sub>	h-RSL <sub>H</sub>
% Humedad	76.31 ± 3.29	37.58 ± 2.35
% ST	23.69 ± 3.29	62.42 ± 2.35
% SV	85.62 ± 5.24	61.48 ± 2.54
% Cenizas	14.38 ± 5.24	38.52 ± 2.54

Tabla 2. Caracterización fisicoquímica del hidrochar-RSN e hidrochar-RSL seco.

Determinaciones	h-RSN <sub>s</sub>	h-RSL <sub>s</sub>
% Humedad	10.41 ± 0.33	3.94 ± 0.60
% ST	89.59 ± 0.33	96.06 ± 0.61
% SV	31.36 ± 1.03	46.50 ± 6.53
% Cenizas	68.64 ± 27.16	53.50 ± 9.80
pH	4.66 ± 0.04	5.23 ± 0.00
CIC (cmol/kg)	14.4 ± 0.02	45.4±0.02

### Muestreo de suelos

Se realizó el muestreo de dos tipos de suelo: un suelo fértil que fue extraído de la zona de Paso del Macho, Ver., que se utilizaba para sembrar cultivos de caña de azúcar y un suelo degradado proveniente de la zona de Totutla, Ver., en donde anteriormente se sembraban cultivos de café. Con base en la NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-021-SEMARNAT-2000 que establecen las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis; se realizó de manera adecuada la extracción del suelo.

### Planteamiento experimental: Relaciones hidrochar:suelo y Siembra de especie vegetal

Se plantearon cuatro relaciones masa:masa (g:g) expresadas como hidrochar:suelo degradado, 1:100, 3:100, 6:100 y 12:100, además de un blanco que contenía únicamente suelo degradado y un testigo con suelo fértil para monitoreo. Para poder utilizar el suelo degradado se realizó un acondicionamiento, el cual consistió en un pulverizado con ayuda de un mortero, posteriormente un tamizado con malla de 2mm, esto debido a que venía compactado en forma de rocas de gran tamaño y no era posible su manipulación. En la Tabla 3 se muestran a detalle las relaciones hidrochar:suelo degradado que se agregaron a cada maceta.

Tabla 3. Relaciones hidrochar:suelo.

Relación	Testigo	1:100	3:100	6:100	12:100	Blanco
g suelo	400	396	388	376	352	400
g hidrochar	0	4	12	24	48	0

Se sembraron dos semillas de rábano rojo (*Raphanus sativus*) por cada maceta, ya que su ciclo vegetativo es aproximadamente de 4 a 8 semanas (Hydro Environment, 2020). Además, se tomaron en cuenta las especificaciones de crecimiento del rábano rojo como lo fueron: temperatura de desarrollo vegetativo (6 a 30 °C), pH del suelo (5.5-6.8), ciclo vegetativo, humedad del suelo, riego (el volumen de agua para riego varió de acuerdo con la cantidad de hidrochar presente en cada maceta, ya que el hidrochar posee la característica de retener agua en sus poros) y estrés hídrico. Las macetas se acondicionaron en un vivero para proteger a las plantas de cualquier tipo de contaminación posible en el aire y/o área.

### Determinaciones analíticas

Se realizó una caracterización fisicoquímica al suelo testigo y al suelo degradado para evaluar su clasificación con parámetros como clase textural, materia orgánica, pH, CIC, macronutrientes como % N, P asimilable y K, de acuerdo con la NOM-021.

Para las mezclas hidrochar:suelo se realizó una caracterización de pH en la semana 4 y 8 de crecimiento. Mientras que las plantas que resultaron con crecimiento se les realizaron determinaciones mediante los parámetros de pH, Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC), % de humedad, sólidos volátiles, sólidos totales y cenizas, de acuerdo con los métodos: Potenciómetro 4500-H+ B Standard Methods con un potenciómetro marca OAKTON, Determinación de la capacidad de intercambio catiónico con el método AS-12 (acetato de amonio), Método gravimétrico 2540 B SM Standard Methods mediante un horno marca RIOSSA y Método gravimétrico 2540 E SM a través de la mufla marca Barnstead Thermolyne 1300 Furnace; respectivamente. Cada medición se realizó por triplicado y los resultados fueron analizados mediante una comparación de medias utilizando una prueba t de Student para muestras simples a través del software Minitab 18.

## Resultados y Discusión

Los resultados de la caracterización fisicoquímica del suelo testigo y al suelo degradado se evaluaron categóricamente de acuerdo con la clasificación correspondiente a cada parámetro establecida en la NOM-021-SEMARNAT-2000.

### Caracterización fisicoquímica del suelo testigo

Los porcentajes de arena, limo y arcilla definieron el tipo de clase textural: franco arcilloso con una densidad aparente de  $1.67 \text{ g/cm}^3$ . Se obtuvo una materia orgánica de 5.57% evaluada como alta, un pH de 5.82 considerado como moderadamente ácido y un % de nitrógeno total alto de 0.254%; P asimilable de 23 mg/kg clasificado como medio. Mientras que de K fue un valor alto de 275.73 mg/kg y por último, una Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) de 20.63 cmol/kg evaluada como moderadamente alta. Con base en estos resultados se logró clasificar al suelo como un suelo fértil y apto para la siembra.

### Caracterización fisicoquímica del suelo degradado

Los porcentajes de arena, limo y arcilla definieron el tipo de clase textural de franco arenoso con una densidad aparente de  $1.56 \text{ g/cm}^3$ . Se obtuvo un porcentaje de materia orgánica de 0.49% evaluada como muy baja, por lo que este parámetro determina y confirma que el suelo se encontraba degradado. El pH fue neutro con 6.51, mientras que los macronutrientes fueron evaluados como: % bajo de nitrógeno total con 0.027, P asimilable bajo con 1.20 mg/kg y K moderadamente alto (pero no disponible para las plantas, debido que está fijado por las arcillas del suelo) (SMART Fertilizer Software, 2021) con 207.10 mg/kg. La Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) fue baja con 10.82 cmol/kg. De acuerdo con los resultados se logró clasificar al suelo como un tipo de suelo degradado y sin los requerimientos para siembra.

### Siembra y crecimiento del rábano rojo (*Raphanus sativus*)

A continuación, en las Figuras 1 y 2 se muestran las mezclas de la Tabla 3 ya realizadas en las macetas, las cuales se clasificaron de la siguiente manera: para hidrochar de RSN macetas amarillas (Figura 1), para hidrochar de RSL macetas verdes (Figura 2). Entre mayor contenido de hidrochar se tiene en la mezcla más oscura se torna, este fenómeno se observó claramente en el suelo degradado ya que presentó un color café claro al inicio.

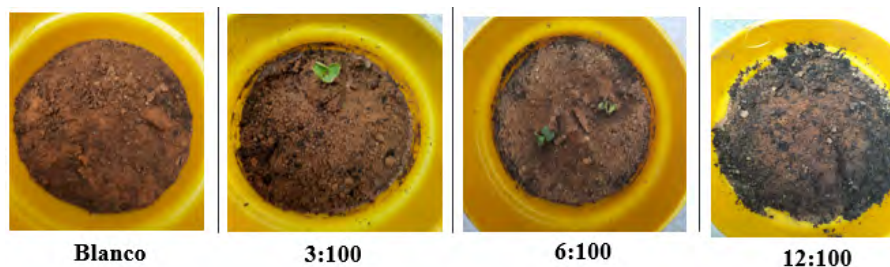


Figura 1. Mezcla hidrochar RSN y suelo degradado.

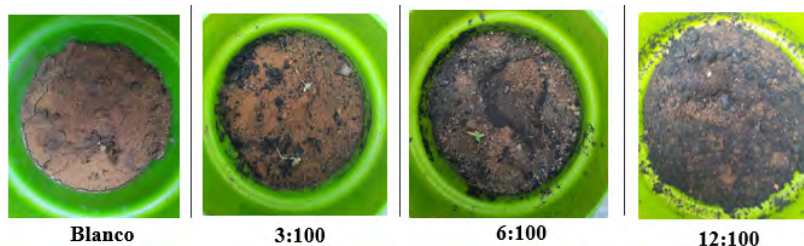


Figura 2. Mezcla hidrochar RSL y suelo degradado.

Para la maceta testigo y las relaciones 1:100 con hidrochar de RSN y RSL se utilizaron macetas de color morado, tal como se muestran en la Figura 3.

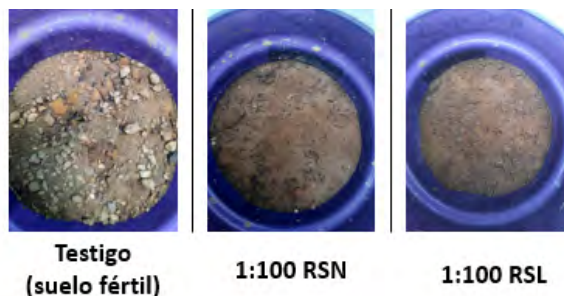


Figura 3. Testigo (suelo fértil) y relación 1:100 hidrochar-RSN e hidrochar-RSL con suelo degradado.

Debido a que la siembra se realizó en la tercera semana del mes de abril, el riego a cada planta se fijó en un periodo de cada dos días. El volumen de agua añadida a cada maceta se muestran en la Tabla 4:

Tabla 4. Relaciones hidrochar:suelo y suministro de agua.

Tipo de maceta	Testigo	Blanco	1:100	3:100	6:100	12:100
Volumen de agua (mL)	200	200	175	150	100	75

En la Figura 4, se observa el crecimiento que tuvieron las plantas durante la segunda semana de siembra. La planta testigo tuvo un crecimiento notable con sus hojas de germinación al igual que las plantas de la relación 1:100 RSN y RSL. Las plantas de las relaciones 3:100 y 6:100 de RSL tuvieron el crecimiento de dos plantas en cada maceta, las cuales tuvieron un aspecto más pequeño que las demás y marchito. Mientras que, las plantas de las relaciones 3:100 y 6:100 de RSN presentaron aparición de hojas de germinación con un tamaño más notable y con dos plantas, respectivamente. Las macetas de la relación 12:100 de RSL y RSN todavía no contaban con germinación.

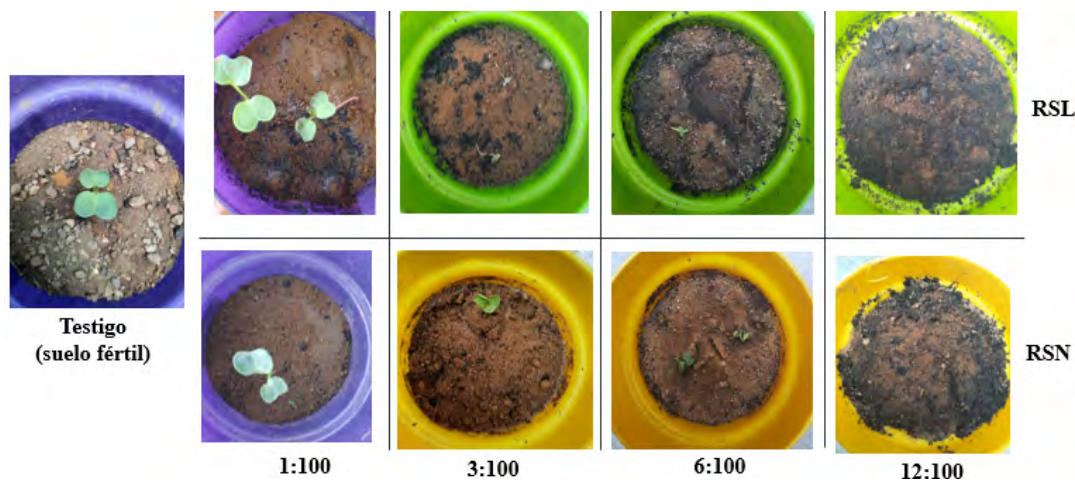


Figura 4. Segunda semana de crecimiento.

Transcurrida la tercer semana, las plantas de las relaciones 3:100 y 6:100 con hidrochar-RSL se marchitaron por completo, este fenómeno se atribuyó a la falta del macronutriente potasio, debido a que se generaron plantas poco turgentes (flácidas) y de aspecto marchito (Portal Frutícola, 2018). Al llegar la cuarta semana de siembra, las únicas plantas que siguieron su crecimiento fueron: testigo, 1:100, 3:100 y 6:100 con hidrochar-RSN y 1:100 con hidrochar-RSL, tal y como se muestran en la Figura 5.

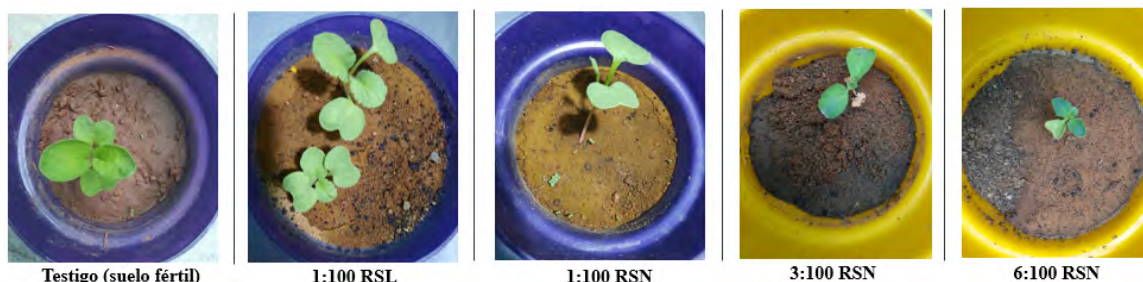


Figura 5. Cuarta semana de crecimiento.

Para finalizar la etapa de crecimiento, en la octava semana de siembra las plantas de las relaciones 1:100 hidrochar-RSL y 3:100 hidrochar-RSN alcanzaron el crecimiento de sus hojas como el de la planta testigo. Además, la planta de la relación 1:100 con hidrochar de RSN y RSN ya se notaba el brote del bulbo del rábano, como se observa en la Figura 6. Cabe mencionar que la relación 1:100 RSL fue la única maceta que tuvo el crecimiento de dos plantas.

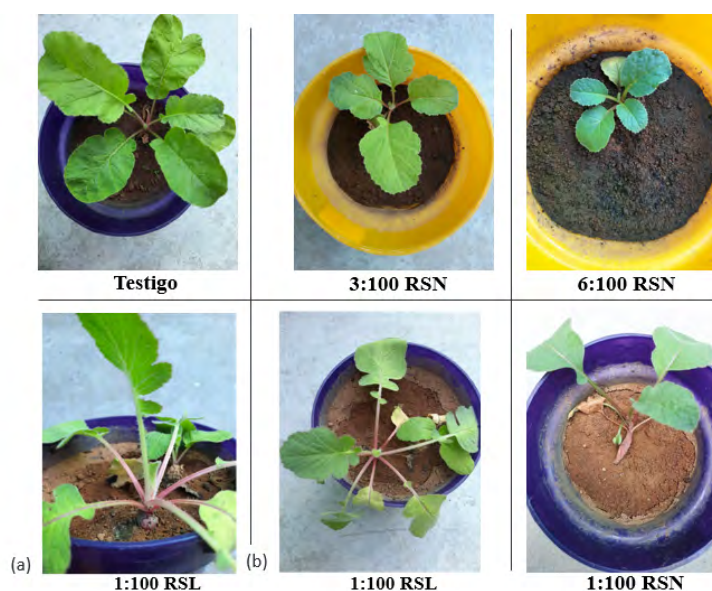


Figura 6. Octava semana de crecimiento, (a) crecimiento del bulbo del rábano (b) planta completa con 1:100 RSL.

### Cosecha del rábano rojo

En la Figura 7 se muestra la cosecha que se obtuvo en cada una de las relaciones, la planta testigo presentó un rábano alargado con 1.5 cm de ancho y 3 cm de largo, mientras que la planta de la relación 1:100 hidrochar-RSL en la Planta 1 no tuvo desarrollo del bulbo del rábano, sus hojas se encontraban pequeñas y su raíz midió 2 cm, por otro lado, la Planta 2 logró un rábano con bulbo de 3.5 cm de diámetro y 1.3 cm de largo. La planta de la relación 1:100 RSN formó un rábano alargado con 2.5 cm de ancho y 2.7 cm de largo. Las plantas de las relaciones 3:100 y 6:100 con hidrochar-RSN no presentaron formación del fruto y su raíz midió 2.5 cm y 1 cm de largo, respectivamente.

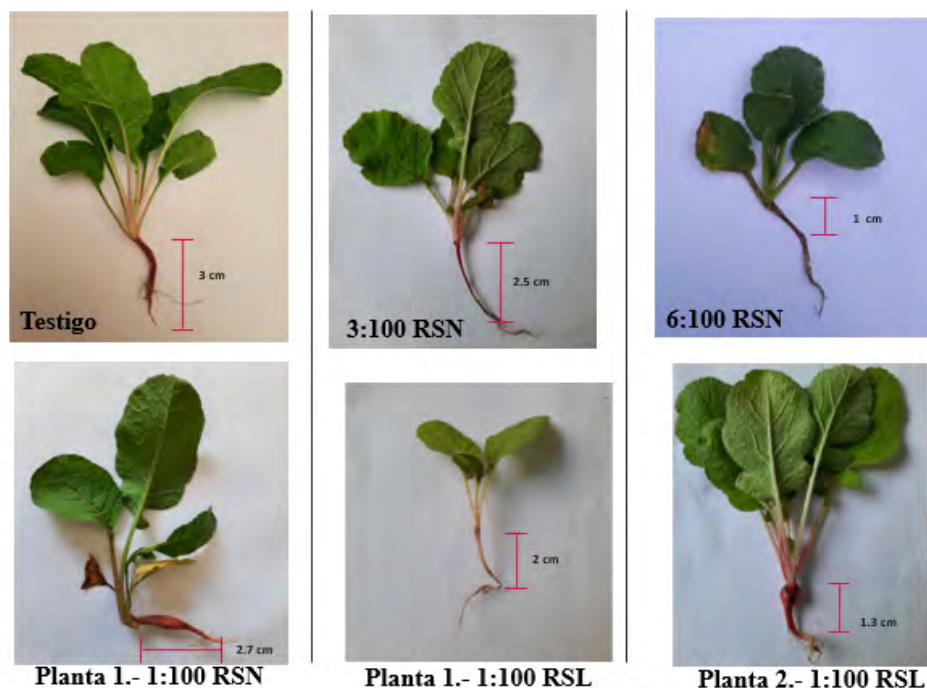


Figura 7. Cosecha después de 8 semanas de siembra.

Tabla 5. Medición de pH en la semana 4 y 8.

No. de semana	Testigo (Suelo fértil)	Blanco (Suelo degradado)	1:100		3:100		6:100		12:100	
			RSN	RSL	RSN	RSL	RSN	RSL	RSN	RSL
4	5.82	6.51	6.55	6.57	6.66	6.75	6.81	6.86	7.22	7.42
8	5.52	6.51	7.01	7.20	7.18	6.90	6.95	6.97	7.17	7.31

En la cuarta semana, se puede observar que el suelo testigo tuvo el pH más bajo, ya que de acuerdo con su análisis fue evaluado en la categoría como moderadamente ácido. Por otro lado, el pH del suelo degradado se mantuvo igual en ambos periodos. En la relación 1:100 se observa que el hidrochar-RSL aportó más alcalinidad al suelo, encontrando su valor de pH por encima que la relación que contiene hidrochar-RSN. Hubo un aumento en los valores de pH obtenidos en la octava semana, es decir, conforme transcurre el tiempo el hidrochar logra aumentar el pH del suelo. Las plantas que lograron crecimiento fueron las relaciones 3:100 y 6:100 con hidrochar-RSN, observando los resultados de pH, se encuentran con un 6.66 y 6.81, encontrándose dentro del rango de pH que tolera dicho cultivo. Para el hidrochar-RSL con la relación 3:100 se obtuvo un pH de 6.75, mientras que en la relación 6:100 un valor de 6.86, logrando así que no hubiera desarrollo en las plantas. El hidrochar-RSL tuvo un mayor aumento de pH al suelo en cada una de las mezclas, en cambio, el hidrochar-RSN mostró valores menores. Las mezclas de la relación 12:100 mostraron valores por encima de un pH neutro, con 7.22 y 7.42, para hidrochar-RSN e hidrochar-RSL, respectivamente. Siendo el valor de pH obtenido por la muestra mucho mayor que el que tolera la especie vegetal sembrada. Se notó un aumento de la alcalinidad especialmente en la relación 3:100 RSN llegando a un valor de pH de 7.18, por lo que se atribuye a dicha relación y a la 3:100 RSN (pH 6.95) una falta de desarrollo del bulbo del rábano debido a que se sobrepasó el rango de pH que soporta la planta (5.5-6.8).

Se realizó una caracterización fisicoquímica final de las mezclas hidrochar:suelo en las que hubo crecimiento de plantas. A continuación, en la Tabla 6 se muestran los resultados obtenidos de los parámetros de %ST, %Cenizas, %Humedad y %SV.

Tabla 6. Determinación de %ST, %Cenizas, %Humedad y %SV.

Muestra	% ST	% Cenizas	% Humedad	% SV
1:100 RSL	85.54 ± 0.60	88.27 ± 0.42	14.46 ± 0.60	11.73 ± 0.09
1:100 RSN	85.90 ± 0.04	89.14 ± 0.38	14.10 ± 0.04	10.86 ± 0.38
3:100 RSN	94.68 ± 0.13	87.00 ± 0.16	5.32 ± 0.09	13.00 ± 0.17
6:100 RSN	92.88 ± 0.14	86.54 ± 0.10	7.12 ± 0.14	13.46 ± 0.68
Testigo (Suelo fértil)	98.42 ± 0.12	97.21 ± 0.27	1.58 ± 0.12	2.44 ± 0.27

A pesar de ser diferentes relaciones de muestras hidrochar:suelo y suelo testigo, los resultados en %ST mostraron valores dentro del mismo rango. En cuanto al %cenizas, se observa que disminuye entre mayor sea el contenido de hidrochar, mientras que el valor más alto fue en la muestra de suelo fértil.

El suelo testigo después de ser ocupado para la siembra tuvo un % final de SV de 2.44, mientras que inicialmente presentó un 5.5% de materia orgánica. El % de materia orgánica del suelo degradado fue de 0.49, por otro lado, la caracterización del %SV para hRSN<sub>s</sub> y hRSL<sub>s</sub> mostró resultados de 31.36 y 46.50, respectivamente. La caracterización fisicoquímica final de %SV de la mezcla hidrochar-RSN y suelo degradado muestra que entre mayor contenido de hidrochar se agregue a la mezcla, se va a tener un aumento en el porcentaje de materia orgánica, en cambio, se necesita poco hidrochar-RSL en la mezcla para hacer notar este aumento.

El menor %humedad fue en el testigo con 1.58%, en cuanto a las mezclas de hidrochar:suelo, la que presentó un menor %humedad fue la relación 3:100 con 5.32%, mientras que la relación 6:100 hidrochar-RSN tuvo 7.12%, por lo que se confirma la característica de retención de agua que proporciona el hidrochar. Las relaciones 1:100 hidrochar RSL y RSN mostraron porcentajes altos de humedad, 14.46 y 14.10, respectivamente.

Se realizó una comparación de medias con el estadístico t a través del programa Minitab 18, para las plantas de las relaciones 1:100 RSL y 3:100 RSN, las cuales igualaron su crecimiento con la planta testigo, los parámetros de %ST, %Cenizas, %Humedad, %SV y pH en la semana 4 y 8 resultaron estadísticamente significativas. En cuanto al crecimiento del rábano, las plantas de las relaciones 1:100 RSL y 1:100 RSN presentaron en la cosecha la formación de rábano similar al encontrado en la planta testigo; mientras que al comparar los parámetros de dichas relaciones contra la planta testigo, se encontraron diferencias estadísticamente significativas en los parámetros de %ST, %Cenizas, %Humedad, %SV y pH en la semana 4 y 8.

La Tabla 7 muestra la Capacidad de Intercambio Catiónico que se obtuvo en las macetas donde hubo crecimiento de plantas de rábano.

Tabla 7. Determinación de CIC.

Muestra	CIC (cmol/kg)
Testigo (Suelo fértil)	15
1:100 RSN	25
1:100 RSL	42
3:100 RSN	18
6:100 RSN	48

El testigo tuvo una CIC de 15 cmol/kg considerado un valor de CIC medio (15-25 cmol/kg) al igual que la relación 3:100 que presentó 18 cmol/kg, esta clasificación fue de acuerdo con la NOM 021, mientras que para la relación con mayor contenido de hidrochar, es decir, 6:100 RSN presentó 48 cmol/kg, clasificando el valor obtenido como muy alto. Para la relación 1:100 RSL se obtuvo un valor de 42 cmol/kg clasificado como muy alto de acuerdo a la NOM 021, dicha relación tuvo un crecimiento de dos plantas, mientras que la relación 1:100 RSN con una CIC de 25 cmol/kg considerada dentro del rango de alta presentó crecimiento de una planta.

De acuerdo con Olmo-Prieto (2016), el hidrochar: 1) reduce la compactación del suelo, 2) aumenta la capacidad retención de hídrica, 3) modifica la capacidad de intercambio catiónico, 4) aumenta el pH, 5) reduce el lavado de nutrientes, lo que trae consigo un aumento de la fertilidad y por consiguiente un ahorro de nutrientes y 6) aumenta la temperatura del suelo, por consiguiente, mejora la actividad microbiana.

## Conclusiones

La aplicación de hidrochar de Residuos Sólidos Cítricos mejoró las propiedades fisicoquímicas de un suelo degradado que se utilizaba para cultivos de café, el cual no tenía las características necesarias para siembra debido a sus bajos valores en porcentaje de materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico y de macronutrientes primarios (N, P y K). Los parámetros medidos en el suelo degradado que presentaron mejoría con la adición de hidrochar durante la siembra de una especie vegetal como el rábano rojo fueron: pH, porcentaje de humedad, capacidad de intercambio catiónico y porcentaje de sólidos volátiles. El pH del suelo mejorado con hidrochar (1:100) presentó valores cercanos al rango óptimo de crecimiento del rábano rojo (5.5 a 6.8). El porcentaje de humedad más alto se encontró en la relación 6:100 con 7.12%, confirmando así la característica de retención de agua del hidrochar. En cuanto a la CIC, se observó que a mayor cantidad de hidrochar agregado, mayor será el valor de éste parámetro; lo cual significa que el hidrochar provee al suelo degradado una mejor capacidad de retención e intercambio de nutrientes. Por otro lado, el hidrochar incrementó el porcentaje de sólidos volátiles en el suelo degradado, mejorando la fertilidad en este tipo de suelo.

## Bibliografía

- Bento, L. R., Castro, A. J., Moreira, A. B., Ferreira, O. P., & Melo, M. C. (2019). Release of nutrients and organic carbon in different soil types from hydrochar obtained using sugarcane bagasse and vinasse. *Geoderma*, 334:24-32.
- Busch, D., & Glaser, B. (2015). Stability of co-composted hydrochar and biochar under field conditions in a temperate soil. *Soil use manage*, 31:251-258.
- FAO. (2015). Los suelos están en peligro, pero la degradación puede revertirse. [www.fao.org/news/story/es/item/357165/icode/](http://www.fao.org/news/story/es/item/357165/icode/) (consultada Julio, 2020)
- Hydro Environment. [www.hydroenv.com.mx/catalogo/index.php?main\\_page=page&id=406](http://www.hydroenv.com.mx/catalogo/index.php?main_page=page&id=406) (consultada Junio, 2021)
- Kalderis, D., Papameletiou, G., & Kayan, B. (2018). Assessment of Orange Peel Hydrochar as a Soil Amendment: Impact on Clay Soil Physical Properties and Potential Phytotoxicity. *Waste Biomass Valorization*.
- Nava-Pacheco Diana, Landeta-Escamilla Ofelia, Reyes-Benítez Adrián, Vallejo-Cantú Norma Alejandra, Alvarado-Lassman Alejandro y Rosas-Mendoza Erik Samuel. (2021). Carbonización Hidrotermal de Residuos Sólidos Cítricos para la Producción de Hidrochar. Congreso Internacional de Investigación Academia Journals Chiapas.
- NOM-021-SEMARNAT-2000. (2000). Establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelo, estudio, muestreo y análisis. <http://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Federal/wo69255.pdf> (consultada Mayo, 2021)
- Olmo-Prieto, M. (2016). Efectos del biochar sobre el suelo, las características de la raíz y la producción vegetal. España: Universidad de Córdoba.
- Portal Frutícola. (2018). Ficha técnica: Deficiencia y exceso de nutrientes esenciales en el suelo. [www.portalfruticola.com/noticias/2018/05/14/ficha-tecnica-deficiencia-y-exceso-de-nutrientes-esenciales-en-el-suelo/](http://www.portalfruticola.com/noticias/2018/05/14/ficha-tecnica-deficiencia-y-exceso-de-nutrientes-esenciales-en-el-suelo/) (consultada Enero, 2021)
- Rosas-Mendoza, E. S., Palacios-Ríos, J. H., Méndez-Contreras, J. M., Vallejo-Cantú, N. A., & Alvarado-Lassman, A. (2020). Designing a Supply Chain for the Generation of Bioenergy from the Anaerobic Digestion of Citrus Effluents. *Springer*.
- Scheifele, M., Hobi, A., Buegger, F., Gattinger, A., Schuli, R., Boller, T., & Mäder, P. (2017). Impact of pyrochar and hydrochar on soybean (*Glycine max* L.) root nodulation and biological nitrogen fixation. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 000,1-13.
- SMART Fertilizer Software. [www.smart-fertilizer.com/es/articulos/potassium-in-soil/](http://www.smart-fertilizer.com/es/articulos/potassium-in-soil/) (consultada Abril,2021)
- Subedi, R., Kammann, C., Pelissetti, S., Taupe, N., Bertora, C., Monaco, S., & Grignani, C. (2015). Does soil amended with biochar and hydrochar reduce ammonia emissions following the application of pig slurry? *Eur. J. Soil Sci.*, 66:1044–1053.