

Aporte de carbono y nitrógeno al suelo por residuos de cultivos forrajeros alternativos

Ana Isabel González-Cifuentes¹
David Guadalupe Reta-Sanchez^{2§}
José Antonio Cueto-Wong³
Juan Isidro Sánchez-Duarte³
Esmeralda Ochoa-Martínez³
Arturo Reyes-González³

¹Facultad de Agricultura y Zootecnia-Universidad Juárez del Estado de Durango. Domicilio conocido, Ejido Venecia, Gómez Palacio, Durango, México. AP. 1-142. (ana_0841@outlook.com). ²Campo Experimental Delicias-INIFAP. Carretera Delicias-Rosales km 2, Centro, Cd. Delicias, Chihuahua, México. CP. 33000. ³Campo Experimental La Laguna-INIFAP. Blvd. José Santos Valdez 1200 Pte. Col. Centro, Matamoros, Coahuila, México. CP. 27440. (cueto.jose@inifap.gob.mx; sanchez.juan@inifap.gob.mx; ochoa.esmeralda@inifap.gob.mx; reyes.arturo@inifap.gob.mx).

§Autor para correspondencia: reta.david@inifap.gob.mx.

Resumen

Una mayor diversidad de forrajes en otoño-invierno incrementa la entrada de carbono (C) y nitrógeno (N) al suelo en los residuos de cosecha. El objetivo del estudio fue evaluar el aporte potencial de C y N al suelo en los residuos de forrajes alternativos y tradicionales durante el ciclo otoño-invierno. En el experimento se evaluó el rendimiento de materia seca (MS), cantidad de residuos y la relación C/N en 11 especies forrajeras. Los cultivos tradicionales avena, cebada, triticale, trigo, trébol Alejandrino y ballico anual aportaron menor cantidad de residuos de cosecha (365 a 612 kg ha⁻¹) y de menor calidad con valores de la relación C/N de 23.5 a 42.8. Los cultivos alternativos canola, remolacha, brásicas, rábano y garbanzo aportaron mayor cantidad de residuos (432 a 2 958 kg ha⁻¹), con mayores contenidos de N (18.5 a 32.6 g kg⁻¹) y menores valores de la relación C/N (11.4 a 20). Los cultivos alternativos con raíces engrosadas como remolacha, brásicas y rábano mejoraron la cantidad y calidad de aportación de residuos de cosecha, con una capacidad potencial de captura de C similar a los cultivos tradicionales. Sin embargo, sólo la brásica Winfred y el rábano Graza obtuvieron rendimientos de MS (10 094 a 11 636 kg ha⁻¹) similares o mayores a los observados en los cereales testigo avena Cuauhtémoc (11 161 kg ha⁻¹) y triticale AN105 (9 644 kg ha⁻¹). Una mayor diversidad de forrajes puede mejorar en cantidad y calidad la aportación de residuos de cosecha al suelo.

Palabras claves: cultivos tradicionales, materia seca, relación C/N, rendimiento.

Recibido: abril de 2022

Aceptado: julio de 2022

Introducción

En la Comarca Lagunera la producción de forraje para alimentar el ganado lechero se realiza intensamente bajo riego con cultivos perennes como alfalfa y tres ciclos de cultivos anuales de maíz, sorgo y cereales de otoño-invierno. El principal cereal de invierno es la avena, mientras que en primavera y verano se obtienen dos cosechas de maíz o de sorgo (Santamaría *et al.*, 2006), todos producidos con un sistema de labranza convencional. La alfalfa es importante en la rotación de cultivos en la región porque produce forraje de calidad y contribuye a la acumulación de C y N lábiles, además de mejorar la utilización del N por las siguientes especies anuales en la rotación de cultivos (Chen *et al.*, 2019; Zhou *et al.*, 2019). Sin embargo, considerando que los cultivos anuales se establecen con labranza convencional, con al menos un paso de arado en el año y una o dos pasadas de rastra antes de la siembra de cada cultivo, el periodo de transición del cultivo perenne a la siembra de cultivos anuales es crítico porque ocurren pérdidas de carbono orgánico en el suelo.

De acuerdo con Chen *et al.* (2019) estas pérdidas pueden alcanzar hasta 30% en cultivos anuales con labranza convencional respecto a la labranza reducida. La adición de residuos agrícolas al suelo es una práctica que se realiza con el objetivo de mejorar las propiedades físicas y químicas del suelo y aportar nutrientes, pero para estos nutrientes puedan ser absorbidos por las plantas debe ocurrir un proceso de transformación denominado mineralización. Durante el proceso de mineralización, diversos factores como los organismos del suelo, la temperatura, la humedad, la textura, el tipo de suelo y la concentración de C y N intervienen en la descomposición de los residuos de cultivos (Monsalve *et al.*, 2017). Adicionalmente, la composición bioquímica de los residuos influye de manera importante ya que diversos estudios describen la calidad de los residuos por el contenido de N y C y el criterio de calidad que utilizan comúnmente para predecir la mineralización, es la relación C/N de los residuos (Trinsoutrot *et al.*, 2000).

En la producción de forrajes anuales en la región, la cantidad de residuos de cosecha incorporados al suelo es limitada porque la mayor proporción de la parte aérea es cosechada en los cultivos forrajeros. Además, los residuos de avena, maíz y sorgo son considerados de baja calidad para el suelo porque presentan valores altos de la relación C/N (31.4 a 56.4). Estos niveles de la relación C/N indican que probablemente ocurre un proceso de inmovilización de C y N en el suelo disminuyendo la disponibilidad de N para el aprovechamiento de los siguientes cultivos en la rotación (Lynch *et al.*, 2016; Singh *et al.*, 2021). Para mejorar el manejo de los residuos de cosecha es importante incrementar la cantidad y calidad de residuos orgánicos aportados al suelo por medio de una mayor diversificación de cultivos forrajeros. Zhou *et al.* (2019) encontraron que una alta diversidad de especies aumenta la calidad de los residuos de plantas con una disminución de la relación C/N, lo cual favorece indirectamente la acumulación de carbono en el suelo.

Al respecto, los cultivos alternativos como canola, remolacha, garbanzo y brásicas forrajeras presentaron un potencial de rendimiento de MS similar o mayor al de las especies tradicionales (avena, trigo y triticale), mientras que su composición nutricional fue superior, con contenidos de proteína cruda de 196 a 281 g kg⁻¹ (Reta *et al.*, 2008). El alto contenido de N en el forraje de los cultivos alternativos (31.36-44.96 g kg⁻¹) (Reta *et al.*, 2008) respecto a los observados en cultivos tradicionales (17.47-22.4 g kg⁻¹) (Reta *et al.*, 2018; Sánchez-Duarte *et al.*, 2019) sugiere que sus residuos pueden ser de mayor calidad, con potencial para mejorar la disponibilidad del N en la rotación de cultivos, además de afectar favorablemente la acumulación de C en el suelo. El objetivo del estudio fue evaluar el aporte potencial de C y N al suelo en los residuos de forrajes alternativos y tradicionales durante el ciclo otoño-invierno.

Materiales y métodos

La investigación se realizó en los ciclos otoño-invierno 2017-2018 y 2018-2019 en el Campo Experimental la Laguna (CELALA) del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), ubicado en el municipio de Matamoros, Coahuila, México (103° 13' 42" longitud oeste y 25° 31' 41" latitud norte, a una altura de 1 100 msnm). Se utilizó un suelo con textura franco-arcillosa sin problemas de salinidad, con una profundidad mayor a 1.8 m y un pH de 8.14. El suelo presentó en el estrado 0-30 cm, un contenido de materia orgánica de 1.41% y concentraciones de $\text{NH}_4\text{-NO}_3$ y P de 11.05 mg kg^{-1} y 5.16 mg kg^{-1} , respectivamente.

En los dos ciclos de crecimiento, la preparación del suelo consistió en realizar un barbecho, rastreo y la nivelación del terreno. Antes de la siembra se realizó el trazo del experimento y en cada parcela experimental se fertilizó con sulfato de amonio y fosfato monoamónico granulados, a razón de 50 kg N y 80 kg P_2O_5 ha^{-1} , respectivamente. Posteriormente, entre los cortes y después de los cortes se completó una dosis de fertilización nitrogenada de 250 kg ha^{-1} . Los fertilizantes se aplicaron y se incorporaron en forma manual. La siembra de todos los cultivos se realizó manualmente en suelo seco el 15 de septiembre de 2017 y el 12 de octubre en el 2018. Se evaluaron 11 especies forrajeras en 17 tratamientos basados en cultivos alternativos y tradicionales con capacidad de rebrote y adaptación al ciclo de producción otoño-invierno en la región.

Los cultivos y cultivares tradicionales utilizados fueron los siguientes: de avena (*Avena sativa* L.) variedades Cuauhtemoc y Karma; de cebada (*Hordeum vulgare* L.) variedades Cántabra y Narro 95; de triticale (*x Triticosecale Wittmack*) variedades Río Nazas y AN 105; de trigo (*Triticum aestivum* L.) variedades Salamanca y AN 265; de trébol Alejandrino (*Trifolium alexandrinum* L.) cultivar Multicut; de ballico anual (*Lolium multiflorum* Lam.), Tetraploide Oregón. Las especies alternativas y cultivares evaluados fueron las siguientes: de garbanzo (*Cicer arietinum* L.), variedad garbanzo porquero; de canola (*Brassica napus* L.), cultivar de primavera Ortégón y cultivar de invierno Riley; de remolacha (*Beta vulgaris* L.) cultivar Starmon; de brásicas, cultivar 'Winfred' (*Brassica oleracea* L. x *Brassica rapa* L.) y cultivar Hunter (*Brassica rapa* L. x *Brassica napus* L.); de rábano forrajero, cultivar Graza (*Raphanus sativus* L. x *Brassica oleracea* L., *Raphanus maritimus* L.). Los cultivos brásica 'Winfred', brásica 'Hunter' y rábano 'Graza' sólo se evaluaron en el ciclo 2018-2019.

El área experimental fue irrigada mediante un sistema de tubos de plástico PVC con compuertas. Se midió el volumen de agua aplicada en cada parcela, aforando el caudal de agua en las compuertas de los tubos instalados para el riego y considerando el tiempo de riego en cada parcela experimental. Se aplicó un riego el mismo día de la siembra con una lámina de 150 mm; ocho días después, se aplicó un riego ligero con una lámina de 60 mm. Durante el ciclo de producción se aplicaron seis riegos de auxilio con una lámina total de 75 cm en avena, triticale, trigo, trébol y brásica Hunter, mientras que, en cebada, brásica Winfred y rábano Graza se aplicaron cinco riegos de auxilio con una lámina de 63 cm.

También se completó la dosis de fertilización nitrogenada (250 kg ha^{-1}), con 55 kg ha^{-1} a los 33 dds, 90 kg ha^{-1} después del primer corte en cada especie entre los 77 y 112 dds, y 55 kg ha^{-1} antes del segundo corte entre los 112 y 135 dds. Se utilizó un diseño experimental de bloques completos al azar con cuatro repeticiones, en cada una de las cuales se distribuyeron al azar los 17

tratamientos. Cada una de las 68 parcelas experimentales consistió en 20 surcos a 0.18 m de separación y 6 m de longitud. En la cosecha se determinaron los rendimientos de forraje fresco y de MS. La parcela útil para determinar el rendimiento de forraje fue de 14.4 m², cosechando 16 surcos centrales de 5 m de longitud.

El contenido de MS se obtuvo en una muestra de 0.72 m² tomada al azar de la muestra usada para las mediciones del rendimiento de MS. Para ello se muestrearon dos de los surcos centrales de cada parcela de 2 m de longitud. Las plantas muestreadas se secaron a 60 °C en una estufa de aire forzado Marca Shel Lab Modelo FX28-2 hasta alcanzar peso constante. El rendimiento de MS se determinó multiplicando el rendimiento de forraje fresco por el contenido de MS de cada parcela. En el ciclo 2017-2018 se realizaron tres cosechas en los cereales en la etapa de embuche, en el ballico y el trébol Alejandrino se realizaron cinco cosechas en etapa vegetativa; la canola y la remolacha se cosecharon en tres ocasiones también en etapa vegetativa, mientras que el garbanzo se cosechó sólo una vez en la etapa de floración.

En el ciclo 2018-2019, los cereales se cosecharon en dos ocasiones en la etapa de embuche; el garbanzo se cosechó sólo en una ocasión en la etapa de floración y formación de vainas; mientras que en el resto de las especies las cosechas se realizaron en la etapa vegetativa, con dos cosechas en las brásicas, remolacha, rábano y canola, mientras que el ballico y el trébol Alejandrino se cosecharon en cuatro y tres ocasiones, respectivamente. Después de la cosecha de todos los cultivos, el 20 de marzo de 2018 correspondiente al primer ciclo y el 26 de marzo 2019 del segundo ciclo, se recolectó el residuo de la cosecha en dos puntos de muestreo en una superficie de 0.25 m² (0.5 x 0.5 m) tomadas al azar en cada parcela experimental, donde se incluyeron la raíz (20 cm profundidad) y residuos de órganos de la parte aérea. En cada muestra se cribó el suelo separando los residuos de plantas, las cuales posteriormente fueron lavadas para eliminar el suelo adherido.

Las muestras se secaron en una estufa de aire forzado Marca Shel Lab Modelo FX28-2 a 60 °C hasta alcanzar un peso constante, y posteriormente se obtuvo el peso de la materia seca. Las muestras de forraje seco se molieron en un molino Wiley (Thomas Scientific Swedesboro, NJ USA) con malla de 1 mm. Se realizó un cuarteo de la muestra molida con el fin de obtener una submuestra representativa de cada parcela en todas las cosechas realizadas y posteriormente se realizó el proceso de tamizado utilizando un tamiz de 100 µm. Para determinar los contenidos de C y N por el método de combustión seca se pesaron entre 10 y 15 mg de forraje con una balanza analítica OAHUS PA224C, previamente secado a temperatura ambiente y tamizado a 100 µm. Las muestras se calcinaron en el Analizador Elemental (Thermo Fisher Scientific Modelo Flash 2000) a 950 °C usando oxígeno como agente oxidante (AOAC, 2005).

Los datos meteorológicos fueron obtenidos de una estación de clima localizada en el sitio experimental. Las condiciones de clima en los dos años del estudio fueron similares en temperaturas medias, con una mayor precipitación pluvial en septiembre de 2018, lo cual retrasó el establecimiento del segundo ciclo hasta el 12 de octubre de 2018 (Cuadro 1). Debido a esta situación, junto con el hecho de que algunas especies sólo se evaluaron durante el segundo ciclo, los análisis estadísticos de las variables obtenidas se realizaron por año. Se realizaron análisis de varianza ($p \leq 0.05$) para los datos de rendimiento de MS total de forraje y para los contenidos de N y C, relación C/N y rendimiento de MS, N y C en los residuos (parte aérea y raíz). Para comparar las medias se utilizó la prueba de la diferencia mínima significativa protegida de Fisher ($p \leq 0.05$). El análisis de la información se efectuó con el programa estadístico SAS (SAS Institute, 2011).

Cuadro 1. Temperatura, precipitación y evaporación mensual durante el desarrollo de especies forrajeras en dos ciclos de producción en Matamoros, Coahuila, México.

Mes	Ciclo	Temperatura (°C)			Precipitación	Evaporación total (mm)
		Media de máximas	Media de mínimas	Media		
Septiembre	2017-2018	39.6	18	26.2	118.6	159.4
	2018-2019	36.8	17.8	24.7	309.8	124
Octubre	2017-2018	35.2	11	23.6	35.5	113.8
	2018-2019	35.2	10.5	21.8	40.7	110
Noviembre	2017-2018	36	4.5	19.9	0	77.5
	2018-2019	32.6	-0.1	17.1	2.9	93
Diciembre	2017-2018	30.2	-3.5	14.6	46.9	64.5
	2018-2019	32.2	-1	14.7	17.2	79.5
Enero	2017-2018	30.1	0.5	14.1	0	82.9
	2018-2019	31.9	3.5	15.5	3.5	84.8
Febrero	2017-2018	35.8	9.6	21.3	13.3	120.3
	2018-2019	39.3	5.5	20.7	0	139
Marzo	2017-2018	38	10.5	23.1	0	183.1
	2018-2019	37.6	6.5	22	0.6	175.6

Resultados y discusión

Relación C/N en residuos

Los residuos de cosecha de los cultivos tradicionales como cereales de grano pequeño y ballico anual presentaron mayores valores ($p \leq 0.05$) de relación C/N (22.6 a 42.8) respecto a los obtenidos por los cultivos alternativos canola, remolacha, brásicas y garbanzo porquero (11.4 a 20). Sólo la relación C/N del trébol Alejandrino (11.2 a 15) fue similar a la observada en los cultivos alternativos (Cuadro 2). De acuerdo con los valores indicados por Lynch *et al.* (2016), en los dos ciclos del estudio todos los cereales presentaron valores altos (>25) en la relación C/N, con excepción de avena Cuauhtémoc y los dos cultivares de cebada durante el ciclo 2017-2018 (Cuadro 2). También estas especies se caracterizaron por sus contenidos bajos de N (8 a 14.6 g kg⁻¹).

En otros estudios se indica que estos niveles de N y C/N provocan que se presente en el suelo el proceso de inmovilización temporal de N de la solución del suelo por microorganismos, el cual retrasa la mineralización del N contenido en los residuos (Alghamdi *et al.*, 2022) y esto ocurre porque los requerimientos de N de los microorganismos del suelo no son cubiertos por los residuos de cosecha (Gezahegn, 2017). Los valores de C/N en los residuos de las especies alternativas (canola, remolacha, brásicas, rábano, garbanzo y trébol Alejandrino) (Cuadro 2) fueron similares a los observados en otros estudios realizados con veza vellosa (9-9.9), trébol rojo (10.3 a 14.5), rábano forrajero (15.1 a 15.7), canola (24) (Finney *et al.*, 2016); chícharo (9), trébol (13) (Pereira *et al.*, 2017); espinaca (9.6) (Frerichs *et al.*, 2022); lenteja, garbanzo, frijol gandúl (17.7-19.5) (Singh *et al.*, 2021); chícharo (18) y rábano forrajero (8) (Alghamdi *et al.*, 2022).

Cuadro 2. Contenidos de carbono (C) y nitrógeno (N) y la relación C/N en los residuos de cosecha de cultivos convencionales y alternativos evaluados en los ciclos otoño-invierno 2017-2018 y 2018-2019.

Cultivo	2017-2018			2018-2019		
	N (g kg ⁻¹)	C (g kg ⁻¹)	C/N	N (g kg ⁻¹)	C (g kg ⁻¹)	C/N
Cultivos tradicionales						
Avena Cuauhtémoc	16 e	376.7 abc	23.5 b	13.8 d	368 bcd	27.5 cd
Avena Karma	14 fgh	401.9 a	28.6 a	12.1 de	343 ef	29.1 c
Cebada Narro 95	24.5 b	353.2 c	14.5 d	12.7 de	349 def	27.8 cd
Cebada Cántabra	14.5 fg	342.8 c	23.6 b	13.3 d	376 b	28.3 c
Triticale Río Nazas	12.6 h	358.8 bc	28.6 a	-	-	-
Triticale AN105	13.4 gh	346.3 c	25.9 ab	8 f	332 fg	42.8 a
Trigo AN265	14 fgh	357.9 bc	25.6 b	9.9 ef	339 efg	34.9 b
Trigo Salamanca	14.6 efg	376 abc	25.9 ab	13.5 d	304 h	22.6 de
Trébol Alejandrino	26.2 a	392.9 ab	15 d	33.4 a	373 bc	11.2 h
Ballico anual	15.4 ef	373.7 abc	24.4 b	14.5 d	380 b	26.3 cd
Cultivos alternativos						
Canola Ortegón	22.8 c	357.7 bc	15.7 d	18.8 c	318 gh	17 fg
Canola Riley	24.7 b	348 c	14.1 d	31.6 a	361 bcde	11.4 h
Remolacha	18.5 d	366.5 abc	20 c	21.5 c	382 b	17.7ef
Brásica Winfred	-	-	-	32.6 a	377 b	11.6 h
Brásica Hunter	-	-	-	30.1 ab	350 cdef	12 gh
Rábano Graza	-	-	-	18.5 c	303 h	17.2 f
Garbanzo Porquero	23.8 bc	372.9 abc	15.7 d	27.6 b	415 a	15.1 fgh

Medias con la misma letra en las columnas no son estadísticamente diferentes (DMS \leq 0.05).

Los residuos de estos cultivos, con alto contenido de N y valores bajos de C/N presentan una descomposición y liberación de N más rápida e intensa, con valores máximos entre los 42 y 56 días después del inicio de descomposición (Singh *et al.*, 2021; Alghamdi *et al.*, 2022); posteriormente, los valores declinan a los 60-90 días (Singh *et al.*, 2021). En cultivos con valores de la relación C/N mayores a 25, Singh *et al.* (2021) encontraron que ocurrió una liberación lenta de N hasta los 45 días, y después se presentó una rápida liberación a los 60 y 90 días.

En los dos ciclos de evaluación, la principal diferencia entre los residuos de cultivos alternativos y tradicionales fue el mayor contenido de N ($p \leq 0.05$) en los primeros; mientras que la diferencia entre ellos en concentración de C fue variable, con una tendencia a contenidos iguales o mayores en cultivos alternativos respecto a los tradicionales (Cuadro 2). Esto también ha sido observado en otros estudios donde se obtuvo la relación C/N de varias especies como avena, nabo forrajero, chícharo forrajero y veza común (Doneda, 2010; Murungu *et al.*, 2011). En el presente estudio se presentaron algunas variaciones en el segundo ciclo de producción, donde se observó estadísticamente ($p \leq 0.05$) un mayor contenido de C en garbanzo porquero y menores valores en trigo Salamanca y rábano Graza.

Las concentraciones de C en los residuos de cultivos alternativos y tradicionales fueron similares ($p > 0.05$) (Cuadro 2), lo que indica que la capacidad para secuestrar C en el suelo en cultivos alternativos puede también ser similar a las especies tradicionales, dependiendo de la cantidad de residuos dejada en el suelo y de la tasa de mineralización de la materia orgánica. Aunque los cultivos alternativos presentan el potencial de una mayor tasa de mineralización debido a su menor relación C/N, la cantidad de C secuestrada en el suelo después de los 18 meses de incorporación del residuo puede ser significativa, ya que en general la mineralización ocurre rápidamente en los primeros dos años, y después ocurre más lentamente (Jenkinson y Rayner, 1977; Mutegi *et al.*, 2013). Utilizando un modelo de pronóstico CN-SIM, Mutegi *et al.* (2013) estimaron que 30 años después de la incorporación de residuos de rábano forrajero, aún sería posible encontrar entre 8 y 10% del material incorporado a una profundidad de 0 y 45 cm. También encontraron que 18 meses después de incorporados los residuos, las pérdidas de C alcanzaron valores de 61.4%.

Aportación potencial de materia seca, carbono y nitrógeno en los residuos

Ciclo 2017-2018

La remolacha superó estadísticamente ($p \leq 0.05$) a las otras especies en la cantidad de MS aportada por hectárea en los residuos de cosecha, debido a su mayor producción de MS en la raíz engrosada (2 354 kg ha⁻¹) que fue dejada en el suelo después de la cosecha. La cantidad de MS aportada en los residuos por los otros cultivos fluctuó de 365 a 612 kg ha⁻¹. Entre estos cultivos fueron sobresalientes la canola Ortegón y el garbanzo, los cuales fueron superiores en cantidad de residuos a trigo, trébol y ballico anual (Cuadro 3).

Cuadro 3. Rendimiento de materia seca y cantidad de residuos de cosecha, nitrógeno y carbono aportados por cultivos tradicionales y alternativos durante el ciclo 2017-2018.

Cultivo	Rendimiento de materia seca (kg ha ⁻¹)	Cantidad de residuos (kg ha ⁻¹)		
		Materia seca	Nitrógeno	Carbono
Cultivos tradicionales				
Avena Cuauhtémoc	10116 de	517 cde	8.3 d	194.4 bcd
Avena Karma	10462 cd	520 cde	7.2 de	205.1 bc
Cebada Narro 95	8874 e	612 b	15 b	215.9 b
Cebada Cántabra	10258 de	540 bcd	7.9 d	185.5 bcde
Triticale Río Nazas	11971 ab	524 bcd	6.6 de	188 bcde
Triticale AN105	11164 bcd	532 bcd	7.1 de	183.9 bcde
Trigo AN265	11778 abc	419 f	5.8 e	149.9 ef
Trigo Salamanca	11930 abc	450 def	6.6 de	167.8 cdef
Trébol Alejandrino	11362 bcd	401 f	10.5 c	157.7 def
Ballico anual	12530 ab	365 f	5.6 e	136.5 f
Cultivos alternativos				
Canola Ortegón	13017 a	607 bc	13.8 b	217.2 b
Canola Riley	10056 de	432 ef	10.6 c	149.9 ef
Remolacha	7366 f	2354 a	43.7 a	864.1 a
Garbanzo Porquero	3742 g	575 bc	13.7 b	214.3 b

Medias con la misma letra en las columnas no son estadísticamente diferentes (DMS ≤ 0.05).

La concentración de C (348 a 373 g kg⁻¹) en los cultivos alternativos fue similar ($p > 0.05$) a las concentraciones observadas en los cultivos tradicionales (343 a 402 g kg⁻¹) (Cuadro 2); sin embargo, la remolacha puede aportar mayor cantidad de C (864 kg ha⁻¹) al suelo debido a su mayor cantidad de residuos (2 354 kg ha⁻¹) respecto a los cultivos tradicionales (365 a 612 kg ha⁻¹). La canola y el garbanzo porquero aportaron cantidades de C (150 a 217 kg ha⁻¹) similares ($p > 0.05$) a las observados en cultivos tradicionales (136 a 216 kg ha⁻¹) (Cuadro 3). El potencial de aportación de N al suelo en los residuos de canola y garbanzo porquero fue superior ($p \leq 0.05$) entre 28 y 94.4% respecto al observado en los testigos avena Cuauhtémoc (8.3 kg ha⁻¹) y el triticale AN105 (7.1 kg ha⁻¹); mientras en remolacha, la aportación potencial de N fue superior ($p \leq 0.05$) entre 526 y 616%, lo cual equivale a cantidades entre 35.4 y 36.6 kg N ha⁻¹ adicionales a los que aportaron los cultivos tradicionales (Cuadro 3).

Ciclo 2018-2019

Los residuos de los cultivos tradicionales alcanzaron de 385 a 597 kg ha⁻¹ de MS, con aportaciones de 137 a 205 kg ha⁻¹ de C y de 4.0 a 14.4 kg ha⁻¹ de N. La remolacha, las brásicas Winfred y Hunter, y el rábano Graza aportaron al suelo en sus residuos la mayor cantidad de N (32.7 a 56.1 kg ha⁻¹) y C (564 a 1 168 kg ha⁻¹). Este comportamiento ocurrió debido a su mayor concentración de N ($p \leq 0.05$) en los residuos (18.5 a 32.6 g kg⁻¹) (Cuadro 4), además de su mayor aportación ($p \leq 0.05$) de MS por hectárea (1 684 a 2 958 kg ha⁻¹), principalmente en las raíces engrosadas (Cuadro 4).

Cuadro 4. Rendimiento de materia seca y cantidad de residuos de cosecha, nitrógeno y carbono aportada por cultivos tradicionales y alternativos durante el ciclo 2018-2019.

Cultivo	Rendimiento de materia seca (kg ha ⁻¹)	Cantidad de residuos (kg ha ⁻¹)		
		Materia seca	Nitrógeno	Carbono
Cultivos tradicionales				
Avena Cuauhtémoc	11161 abcd	414 ghi	5.7 e	152 gh
Avena Karma	10046 cdef	597 ef	7.3 e	205 ef
Cebada Narro 95	9784 cdef	478 ghi	6 e	166 fgh
Cebada Cantabria	10547 bcde	507 fg	6.7 e	188 fg
Triticale Río Nazas	9355 def	-	-	-
Triticale AN105	9644 cdef	499 gh	4.0 e	165 fgh
Trigo AN265	12134 ab	409 hi	4.1 e	139 h
Trigo Salamanca	9105 ef	453 ghi	6.2 e	137 h
Trébol Alejandrino	10093 bcdef	431 ghi	14.4 d	161 gh
Ballico anual	12735 a	385 i	5.6 e	146 h
Cultivos alternativos				
Canola Ortegón	8937 ef	758 d	14.2 d	241 de
Canola Riley	8155 f	747 d	23.6 c	271 d
Remolacha	8828 ef	2958 a	54.2 a	1168 a
Brásica Winfred	11636 abc	1684 c	54.2 a	646 b
Brásica Hunter	8952 ef	1852 b	56.1 a	655 b
Rábano Graza	10094 bcdef	1874 b	32.7 b	564 c
Garbanzo Porquero	9671 cdef	606 e	16.8 d	252 d

Medias con la misma letra en las columnas no son estadísticamente diferentes (DMS ≤ 0.05).

Aunque en menor proporción, también la canola y el garbanzo porquero presentaron mayor ($p \leq 0.05$) capacidad de aportación de N (14.2 a 23.6 kg ha⁻¹) y C (241 a 272 kg C ha⁻¹) respecto a los cultivos tradicionales avena Cuauhtémoc y triticale AN105 (Cuadro 4). La razón de esta ventaja fue también su mayor ($p \leq 0.05$) aportación de MS (606 a 758 kg ha⁻¹) (Cuadro 4) y mayor ($p \leq 0.05$) concentración de N (18.8 a 31.6 g kg⁻¹) (Cuadro 4). Las cantidades de N depositadas en los residuos de las especies con raíces engrosadas son similares a las cantidades de N reportadas con especies cultivadas para abono verde como veza común, veza vellosa, chícharo forrajero (34.4 a 65.7 kg N ha⁻¹) (Murungu *et al.*, 2011; Mattei *et al.*, 2018) y avena (30.4 kg ha⁻¹) (Reis *et al.*, 2014).

Los resultados del presente estudio indican que los cultivos anuales de otoño-invierno en los sistemas de producción forrajeros aportan poca cantidad de residuos de cultivo (414 a 612 kg ha⁻¹) y de baja calidad por sus altos valores de la relación C/N (23.5 a 42.8). Por lo que estos residuos no son una adición significativa de carbono al suelo, ni constituyen una aportación de N al suelo para el siguiente cultivo. Probablemente, los residuos afectan el rendimiento del siguiente cultivo por inmovilización de N, ya que se ha observado que cantidades de paja cercanas a 2 000 kg ha⁻¹ no afectaron el rendimiento del siguiente cultivo (Flores *et al.*, 2007; Castagnara *et al.*, 2014). Aún si se aumenta la cantidad de residuos con mayores alturas de corte en los cereales de otoño-invierno, esto no representaría un beneficio a corto plazo para el sistema de producción de la región.

Esto debido que la incorporación de más de 4 000 kg ha⁻¹ de paja de avena, con una relación C/N mayor a 34, puede limitar el rendimiento del maíz que se siembra inmediatamente después en primavera, independientemente de la aplicación fraccionada de N (Castagnara *et al.*, 2014). Los datos del presente estudio también sugieren que la diversificación de cultivos permite mejorar la aportación de materia orgánica al suelo, con mayor cantidad y calidad de residuos de cosecha, lo cual coincide con lo observado por Zhou *et al.* (2019), en cuanto a que ocurre un decremento de la relación C/N y un incremento de la calidad de residuos de plantas con una mayor diversidad de plantas.

En el presente estudio, esto se obtuvo principalmente con los cultivos alternativos con raíces engrosadas como remolacha, brásicas y rábano, los cuales presentaron rendimientos de forraje competitivos respecto a los observados en los cultivos tradicionales (Cuadros 3 y 4). Estos cultivos alternativos, además de tener una menor relación C/N en sus residuos (11.6 a 20) (Cuadro 2), pueden aportar al suelo mayores ($p \leq 0.05$) cantidades por hectárea de materia seca (338 a 714%), carbono (392 a 768%) y nitrógeno (951 a 1 355%) respecto a los cultivos tradicionales (Cuadros 3 y 4). Debido a las características de sus residuos, la siembra continua de estos cultivos en un periodo de largo plazo puede contribuir a conservar o mejorar la concentración de materia orgánica de los suelos de la región (Smith *et al.*, 1992), además de aumentar la disponibilidad de N mineral en los cultivos de los ciclos de primavera y verano.

En el sistema de producción intensivo de forraje en la región, la siembra de primavera se realiza durante un período corto después de la cosecha de los cultivos de otoño-invierno (30 a 40 días). Bajo estas condiciones, es probable que la rápida descomposición y liberación del N contenido en los residuos de cultivos alternativos pueda ser aprovechado durante las primeras etapas del desarrollo por el cultivo de primavera (maíz o sorgo). Al respecto, Murungu *et al.* (2011) encontraron que el N liberado de residuos de veza y chícharo fue utilizado por el maíz como cultivo siguiente en el período de 60 a 78 días después de la incorporación de los residuos al suelo.

La cantidad de N liberado por los residuos de veza y chícharo contribuyeron con 41.3 y 37.5%, respectivamente del total del N absorbido por el maíz. Sin embargo, en especies con baja relación C/N como la canola y brásicas forrajeras puede haber pérdidas de N después de la cosecha, durante la preparación e inicios de crecimiento de los cultivos de primavera, ya que la mineralización de los residuos de especies con C/N similares ya ocurre a los 21 días después de la incorporación al suelo, y alcanza valores altos entre los 42 y 56 días (Pereira *et al.*, 2017; Alghamdi *et al.*, 2022).

Potencial de rendimiento de materia seca de especies

La decisión de incorporar nuevas especies forrajeras al patrón de cultivos regional debe ser tomada no sólo por sus beneficios ecológicos, sino por su potencial de producción de forraje. De las especies alternativas evaluadas, la remolacha, las brásicas Winfred y Hunter y el rábano Graza mostraron beneficios potenciales al incorporar los residuos de cosecha al suelo; sin embargo, sólo la brásica Winfred y el rábano Graza obtuvieron rendimientos de MS (10 094 a 11 636 kg ha⁻¹) similares o mayores estadísticamente a los observados en los cereales testigo avena Cuauhtémoc (11 161 kg ha⁻¹) y triticale AN105 (9 644 kg ha⁻¹). Esto indica que los cultivos alternativos sobresalientes por sus residuos de cosecha también son competitivos en la cantidad de producción de forraje (Cuadro 4).

Conclusiones

Una mayor diversidad de forrajes en el ciclo de producción de otoño-invierno con especies de forrajes alternativos como brásicas, rábano, canola y remolacha puede contribuir a mejorar la aportación de C y N al suelo en sus residuos de cosecha con mejor calidad respecto a forrajes tradicionales y al mismo tiempo a mantener o a incrementar el rendimiento de forraje en el ciclo de producción.

Literatura citada

- Alghamdi, R. S.; Cihacek, L.; Daigh, A. L. M. and Rahman, S. 2022. Post-harvest crop residue contribution to soil N availability or unavailability in north dakota. *Agrosyst. Geosci. Environ.* 5(1):1-10. <https://doi.org/10.1002/agg2.20233>.
- AOAC. 2005. Official Methods of Analysis of AOAC International. *In*: 4.0. Animal Feed. 18th edition. Washington DC, USA. 1-38 pp.
- Castagnara, D. D.; Bulegon, L. G.; Rabello de Oliveira, P. S.; Zoz, T.; Neres, M. A.; Deminichis, B. B. and Steiner F. 2014. Oats forage management during winter and nitrogen application to corn in succession. *Afr. J. Agric. Res.* 9(13):1086-1093. Doi: 10.5897/AJAR2013.8512.
- Chen, J.; Zhu, R.; Zhang, Q.; Kong, X. and Sun, D. 2019. Reduced-tillage management enhances soil properties and crop yields in alfalfa-corn rotation: case study of the songnen plain, China. *Scientific Reports.* 9(1):1-10. Doi: 10.1038/s41598-019-53602-7.
- Doneda, A. 2010. Plantas de cobertura de solo consorciadas e em cultivo solteiro: decomposição e fornecimento de nitrogênio ao milho. Dissertação de mestrado em ciência do solo, Universidade Federal de Santa Maria. Brasil. 28-47 pp. <http://repositorio.ufsm.br/handle/1/5509>.

- Finney, D. M.; White, C. M. and Kaye J. P. 2016. Biomass production and carbón/nitrogen ratio influence ecosystem services from cover crop mixtures. *Agron. J.* 108(1):39-52. Doi: 10.2134/agronj15.0182.
- Flores, J. P. C.; Anghinoni, I.; Cassol, L. C.; Carvalho, P. C. F.; Leite, J. G. D. B. and Fraga, T. I. 2007. Soil physical attributes and soybean yield in an integrated livestock-crop system with different pasture heights in no-tillage. *Brasileira de Ciência do Solo.* 31(4):771-780. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832007000400017>.
- Frerichs, C.; Glied-Olsen, S.; De Neve, S.; Broll, G. and Daum, D. 2022. Crop residue management strategies to reduce nitrogen losses during the winter leaching period after autumn spinach harvest. *Agronomy.* 12(3)1-20. <https://doi.org/10.3390/agronomy12030653>.
- Gezahegn, A. M. 2017. C and N mineralization of newly applied crop residues under different soil fertilization history. *American-Eurasian J. Agric. Environ. Sci.* 17(4):354-364. doi:10.5829/idosi.ajeaes.2017.354.364.
- Jenkinson, D. S. and Rayner, J. H. 1977. The turnover of soil organic matter in some of the Rothamsted classical experiments. *Soil Sci.* 123(5):298-305. <https://doi.org/10.1097/00010694-197705000-00005>.
- Lynch, M. J.; Mulvaney, M. J.; Hodges, S. C.; Thompson, T. L. and Thomason, W. E. 2016. Decomposition, nitrogen and carbon mineralization from food and cover crop residues in the central plateau of Haiti. *SpringerPlus.* 5(1):1-9. Doi: 10.1186/s40064-016-2651-1.
- Mattei, E.; Rabello de Oliveira, P. S.; Rampim, L.; Egewarth, J. F.; Rocha de Moraes Rego, C. A.; Tiago, P. J. and López de Herrera, J. 2018. Remaining straw and release of nutrients from oat managed in integrated crop-livestock. *Bios. J.* 34(1):206-215. Doi: 10.14393/BJ-v34n6a2018-42036.
- Monsalve, C. O. I.; Gutiérrez, D, J. S. and Cardona, W. A. 2017. Factores que intervienen en el proceso de mineralización de nitrógeno cuando son aplicadas enmiendas orgánicas al suelo. Una revisión. *Rev. Colom. Cienc. Hortíc.* 11(1):200-209. <http://dx.doi.org/10.17584/rcch.2017v11i1.5663>.
- Murungu, F. S.; Chiduza, C.; Muchaonyerwa, P. and Mnkeni, P. N. S. 2011. Decomposition, nitrogen and phosphorus mineralization from winter grown cover crop residues and suitability for a smallholder farming system in South Africa. *Nutr. Cycl. Agroecosys.* 89(1):115-123. <https://doi.org/10.1080/00103624.2011.609255>.
- Mutegi, J. K.; Petersen, B. M. and Munkholm, L. J. 2013. Carbon turnover and sequestration potential of fodder radish cover crop. *Soil Use Manag.* 29(2):191-198. <https://doi.org/10.1111/sum.12038>.
- Pereira, E. S.; Duval, M. E. and Galantini, J. A. 2017. Decomposition from legume and non-legume crop residues: Effects on soil organic carbon fractions under controlled conditions. *Spanish J. Soil Sci.* 7(2):86-96. <https://doi.org/10.3232/SJSS.2017.V7.N2.06>.
- Reis-Junior, J. R.; Botelho, R. V.; Trevizam, A. R.; Müller, M. M. L.; Bendassolli, J. A. and Rombolá, A. D. 2014. Potential use of winter green manure species for nitrogen recycling by ‘Niagara rosada’ grapevines. *Ciência e Técnica Vitivinícola.* 29(2):44-52. <https://doi.org/10.1051/ctv/20142902044>.
- Reta, S. D. G.; Serrato, C. J. S.; Figueroa, V. R.; Cueto, W. J. A.; Berúmen, P. S. and Santamaría, C. J. 2008. Cultivos alternativos con potencial de uso forrajero en la Comarca Lagunera. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP)-Campo Experimental La Laguna. Libro técnico núm. 3. 268 p.

- Reta, S. D. G.; Sánchez, D. J. I.; Torres, H. D.; Reyes, G. A.; Ochoa, M. E.; Chew, M. Y. I. y Cueto, W. J. A. 2018. Evaluación semicomercial de cereales alternativas en siembras tardía de otoño-invierno en la comarca lagunera. Volumen especial AGROFAZ. 69-79 pp.
- Sánchez-Duarte, J. I.; Reta-Sánchez, D. G.; Cueto-Wong, J. A.; Reyes-González, E. and Ochoa-Martínez, E. 2019. Canola and oat forage potential evaluation in four early planting dates. *Phyton*. 88(4):435-448. doi:10.32604/phyton.2019.07512.
- Santamaría, C. J.; Reta, S. D. G.; Chávez, G. J. F. J.; Cueto, W. J. A. y Romero, P. R. J. I. 2006. Caracterización del medio físico en relación con cultivos forrajeros alternativos para la comarca lagunera. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP)- Campo Experimental La Laguna. Matamoros, Coahuila, México. Libro técnico núm. 2. 240 p.
- SAS Institute. 2011. The SAS system for windows, release 9.3. Statistical Analysis Systems Inst, Cary, NC.
- Singh, S.; Sharma, P. K.; Singh, S. and Kumar, A. 2021. Addition of crop residues with different C: N ratios on the release pattern of available nitrogen and sulfur in different soils. *Comm. Soil Scien. and Plant Anal.* 52(22):2912-2920. <https://doi.org/10.1080/00103624.2021.1971692>.
- Smith, J. L.; Papendick, R. I.; Bezdicek, D. F. and Lynch, J. M. 1992. Soil organic matter dynamics and crop residue management. *In: metting, Jr. F. B. (Ed.). Soil microbial ecology: applications in agricultural and environmental management.* Marcel dekker Inc. 65-94 pp.
- Trinsoutrot, I.; Recous, S.; Bentz, B.; Lineres, M.; Cheneby, D. and Nicolardot, B. 2000. Biochemical quality of crop residues and carbon and nitrogen mineralization kinetics under nonlimiting nitrogen conditions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64(3):918-926. Doi: 10.2136/sssaj2000.643918x.
- Zhou, G.; Xu, S.; Ciais, P.; Manzoni, S.; Fang, J.; Yu, G.; Tang, X.; Zhou, P.; Wang, W.; Yan, J.; Wang, G.; Ma, K.; Li, S.; Du, S.; Han, S.; Ma, Y.; Zhang, D.; Liu, J.; Liu, S.; Chu, G.; Zhang, Q.; Li, Y.; Huang, W.; Ren, H.; Lu, X. and Chen, X. 2019. Climate and litter C/N ratio constrain soil organic carbon accumulation. *National Sci. Review.* 6(4):746-757. <https://doi.org/10.1093/nsr/nwz045>.