

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA

FUENTES ALTERNATIVAS DE NUTRIENTES PARA CULTIVOS ANUALES

por

Joaquín Arturo PERAZA RUD
Joaquín SILVA HENDERSON

TESIS presentada como uno de
los requisitos para obtener el
título de Ingeniero Agrónomo.

MONTEVIDEO
URUGUAY
2021

Tesis aprobada por:

Director:

Ing. Agr. (Dr.) Sebastián Ramón Mazzilli Vanzini

Ing. Agr. (Dr.) Oswaldo Ernst Benech

Ing. Agr. (PhD.) Pablo Martín González Barrios

Fecha: 30 de abril de 2021

Autores:

Joaquín Arturo Peraza Rud

Joaquín Silva Henderson

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a nuestras familias por el apoyo brindado a lo largo de la carrera, amigos y todas aquellas personas que de una u otra forma estuvieron acompañándonos.

A UPM Biofuels y sus productores asociados que nos brindaron sus establecimientos para instalar los ensayos.

A la Facultad de Agronomía por la oportunidad de transitar este camino en nuestra formación como profesionales.

A nuestro tutor el Ing. Agr. (Dr.) Sebastián Mazzilli, director de este trabajo, por guiarnos y apoyarnos en esta etapa.

A Federico Domínguez y el personal del Laboratorio de Procesamiento Primario por su gran colaboración durante el trabajo práctico.

A la Lic. Sully Toledo por sus aportes durante la corrección de los aspectos formales de este trabajo.

A el Ing. Agr. (PhD.) Pablo González por la orientación brindada en el análisis estadístico de los datos.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES.....	VI
1. <u>INTRODUCCIÓN</u>	1
2. <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u>	2
2.1. <u>CULTIVO (<i>Brassica carinata</i>)</u>	2
2.1.1. <u>Origen y descripción del cultivo</u>	2
2.1.2. <u>El cultivo de carinata</u>	3
2.1.3. <u>Fenología del cultivo</u>	3
2.1.4. <u>Manejo del cultivo</u>	5
2.1.5. <u>Requerimientos nutricionales</u>	6
2.1.5.1. <u>Nitrógeno</u>	6
2.1.5.2. <u>Azufre</u>	7
2.1.5.3. <u>Fósforo</u>	7
2.1.5.4. <u>Potasio</u>	7
2.2. <u>ENMIENDAS ORGÁNICAS</u>	8
2.3. <u>AGRICULTURA POR AMBIENTES</u>	10
2.4. <u>HIPÓTESIS</u>	11
3. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u>	12
3.1. <u>DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO</u>	12
3.1.1. <u>Tratamientos aplicados</u>	16
3.1.2. <u>Muestreo de suelo</u>	18
3.1.3. <u>Muestreo de biomasa</u>	19
3.1.4. <u>Manejo agronómico</u>	19
3.1.5. <u>Diseño experimental y descripción estadística</u>	20
4. <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>	22
4.1. <u>CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA</u>	22
4.1.1. <u>Precipitaciones</u>	22
4.1.2. <u>Temperatura</u>	24
4.1.3. <u>Radiación</u>	26
4.2. <u>ANÁLISIS DE LOS ENSAYOS</u>	28
4.2.1. <u>Población</u>	28
4.2.2. <u>Rendimiento</u>	29
4.2.3. <u>Biomasa acumulada</u>	31
4.2.4. <u>Nitrógeno</u>	32
4.2.5. <u>Fósforo</u>	39
5. <u>CONCLUSIONES</u>	43
6. <u>RESUMEN</u>	45

7. <u>SUMMARY</u>	46
8. <u>BIBLIOGRAFÍA</u>	47
9. <u>ANEXOS</u>	55

LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Escala fenológica CETIOM.....	4
2. Descripción de los sitios	12
3. Características de suelo según sitio experimental, ambiente dentro de cada sitio y profundidad	13
4. Tratamientos aplicados con sus respectivas dosis.	17
5. Concentración de nutrientes en los lodos utilizados	18
6. Manejo agronómico en el sitio Moscoso-Molina y Rosello-Dalmás.....	19
7. Parámetros estadísticos y p-valor de la prueba F de Fisher para la variable población en dos estados diferentes del cultivo	28
8. Parámetros estadísticos y p-valor de la prueba F de Fisher para la variable rendimiento en grano.	30
9. Parámetros estadísticos y p-valor de la prueba F de Fisher para la variable biomasa	31
10. Parámetros estadísticos y p-valor de la prueba F de Fisher para la variable absorción de nitrógeno	33
11. Parámetros estadísticos y p-valor de la prueba F de Fisher para la variable INN.	36
12. Parámetros estadísticos y p-valor de la prueba F de Fisher para la concentración y la absorción de fósforo	39
Figura No.	
1. Ubicación de los sitios experimentales	12
2. Distribución del carbono orgánico (%C), acidez titulable, nitratos en suelo (ppm) y fósforo Bray No. 1 (ppm) en los primeros 20 cm de profundidad.	14

3. Distribución del carbono orgánico (%C), acidez titulable, nitratos en suelo (ppm) y fósforo Bray No. 1 (ppm) en los primeros 20 cm de profundidad.	15
4. Distribución de tratamientos en cada uno de los sitios experimentales.	17
5. Precipitaciones medias mensuales para la serie histórica y el año 2019	23
6. Temperatura media mensual, temperatura mínima y máxima para la serie histórica y el año 2019	25
7. Radiación promedio mensual para la serie histórica y radiación el año 2019	27
8. Relación entre población y rendimiento	29
9. Boxplot para la variable rendimiento según tratamiento y sitio.	30
10. Dinámica de la biomasa para dos momentos evaluados, C1 y floración.	32
11. Dinámica de la absorción de nitrógeno en dos momentos evaluados, C1 y floración.	34
12. Relación entre concentración de nitrógeno en planta evaluado en C1 y biomasa acumulada a C1	35
13. Boxplot para la variable INN en C1 por tratamiento en ambos sitios	36
14. Relación entre el índice de nutrición nitrogenada (C1) y el rendimiento y relación entre el índice de nutrición nitrogenada (C1) y biomasa acumulada a floración	38
15. Dinámica de absorción y concentración en planta, de fósforo, en los estados C1 y floración en el sitio Moscoso-Molina.	40
16. Absorción y concentración de fósforo en planta en floración, en cada tratamiento, en el sitio Rosello-Dalmás.	41
17. Relación entre el rendimiento en grano y absorción de fósforo a floración, y relación entre el rendimiento en granos y la concentración de fósforo en floración	42

1. INTRODUCCIÓN

Brassica carinata L. (carinata) es una especie oleaginosa invernal del género Brassica, perteneciente a la familia Brassicaceae. Se caracteriza por presentar un alto contenido de ácidos grasos; sin embargo, el aceite no es comestible ya que presenta alto contenido de ácido erúcido. No obstante, el alto contenido de dicho ácido, junto con ácido linoleico, hacen del aceite un excelente material para la producción de biocombustibles, particularmente como reemplazo a los combustibles fósiles en la aviación (Seepaul et al., 2015).

En los últimos años se ha incrementado el interés por la producción de biocombustibles como el etanol y biodiésel, utilizados a modo de fuentes renovables que permitan sustituir los combustibles fósiles provenientes del petróleo. Este interés es explicado en mayor medida por el incremento de la presión para reducir las emisiones de anhídrido carbónico emitidas a la atmósfera, con el fin de mitigar el problema del cambio climático a nivel global (Ovando et al., 2009).

La inclusión de un cultivo *Brassica spp.* en las rotaciones es una alternativa a los cereales de invierno tradicionales. Sin embargo, estos cultivos no se habían extendido en Uruguay hasta hace pocos años, debido, a entre otros factores, limitantes en la comercialización. En Uruguay, hasta el momento el cultivo de carinata ha sido impulsado exclusivamente por la empresa UPM Biofuels, con el objetivo de desarrollar un cultivo que proporciona nuevas soluciones de materias primas para los biocombustibles con bajos niveles de emisiones de carbono y sin comprometer la actual producción de alimentos (UPM Biofuels, 2019). Estos biocombustibles, elaborados a partir de productos de organismos vivos o sus desechos metabólicos, son considerados menos contaminantes, sin embargo, es necesario establecer que el impacto de estos sobre el ambiente no es nulo, y requieren un análisis intenso desde su proceso de elaboración hasta el origen de la materia prima de los mismos.

Actualmente la industria papelera nacional, genera aproximadamente 15 mil toneladas anuales de lodos con potencial de ser utilizados como enmiendas en cultivos, incluido el de carinata.

Esta tesis tiene como objetivo determinar la viabilidad del uso de enmiendas orgánicas compuestas por lodos provenientes de desechos de la industria de celulosa, como fuentes de nutrientes que permitan una sustitución parcial o total de fertilizantes inorgánicos en cultivos de carinata.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. CULTIVO (*Brassica carinata*)

2.1.1. Origen y descripción del cultivo

El género *Brassica* es el más importante dentro de la familia Brassicaceae, y se encuentra representado por seis especies cultivadas, las cuales están íntimamente relacionadas (Torres, 2019). Las relaciones genómicas entre estas especies están descritas en el triángulo U 1935 (Thakur et al., 2019). *Brassica carinata*, se originó a partir de la hibridación de *Brassica nigra* ($2n = 16$, genoma BB) y *Brassica oleracea* ($2n = 18$, genoma CC), resultando en una especie anfidiplóide $2n = 34$, BBCC (Sheikh et al., 2014).

Brassica carinata L. (*carinata*), es una especie anual invernal, nativa del macizo etíope, motivo por el cual se la conoce como mostaza etíope. En el proceso de mejoramiento de esta especie se ha buscado incrementar determinados caracteres de interés agronómico, destacándose la resistencia a varios tipos de estrés biótico, por ejemplo: *Sclerotinia sclerotiorum*, ataque de áfidos, sequía, y reducción de la dehiscencia espontánea de silicuas. Por otra parte, se han buscado eliminar o reducir caracteres indeseables como: bajo índice de cosecha, bajo contenido de aceite, altura excesiva de la planta y disminuir la duración del ciclo a madurez (Thakur et al., 2019).

Esta especie se caracteriza por producir mayores rendimientos de grano que *B. napus* (colza) bajo condiciones ambientales desfavorables. Estas últimas podrían ser: deficiencias hídricas y alta temperatura del aire durante el período de crecimiento, por lo tanto, el cultivo tiene potencial para desarrollarse en áreas donde actualmente no se pueden cultivar especies como la colza. Esto se complementa con el hecho de que el biodiésel resultante se caracteriza por sus destacadas propiedades físico-químicas para su uso como combustible (Cardone et al., 2003).

Dentro de estas características se destacan un mayor contenido de ácido erúico (36%, siendo una importante limitante para el consumo humano) y linolénico en el aceite extraído (Seepaul et al., 2019). La mayor proporción de estos ácidos grasos de cadena muy larga (VLCFAs), es lo que hace de *carinata* un cultivo con un gran potencial para la producción de biocombustibles, incluidos biocombustibles para la aviación, área en la cual ya se han realizado múltiples pruebas exitosas (Marillia et al., 2014). Adicionalmente, presenta una alta producción de biomasa que puede ser aprovechada con fines térmicos (Falasca y Ulberich, 2010). Es por este motivo, que el cultivo presenta un menor índice de cosecha que colza, sin embargo, el potencial de producción de biocombustibles por unidad de superficie continúa siendo mayor (Gesch et al., 2015), al menos en los ambientes evaluados hasta ahora.

2.1.2. El cultivo de carinata

El interés por el cultivo de carinata ha crecido exponencialmente en los últimos años, por lo cual, el cultivo es considerado emergente y aún se encuentra en etapas de investigación en diversas regiones del mundo. Seepaul et al. (2019) reportaron como objetivo para los próximos 5 años establecer un área superior a las 323.000 ha cultivadas en Estados Unidos, donde ha sido objeto de estudio por parte de University of Florida y Agrisoma. Actualmente, es una especie que ha despertado mucho interés en investigadores en Canadá, India, Australia, España y Estados Unidos (Kumar et al., 2020). También, se ha demostrado su viabilidad agronómica y económica en otras regiones como Brasil, Italia y otros países (Cardone et al., 2003).

En Uruguay en los últimos años el área del cultivo de carinata ha aumentado desde el año 2016, cuando la empresa UPM Biofuels comenzó a tener planes comerciales. Actualmente, el área cultivada supera las 8000 hectáreas, siendo sembradas por productores asociados a la empresa UPM Biofuels (Mazzilli, 2019). En cuanto al potencial de rendimiento observado en esta región, se sitúa en torno a 5.000 kg ha⁻¹ (Castro, 2018). Sin embargo, el rendimiento promedio de las últimas 4 zafas de carinata es de 1.600 kg ha⁻¹ (Mazzilli, 2019), siendo aproximadamente un 40% del rendimiento de trigo en cada una de dichas zafas (FUCREA, 2019).

2.1.3. Fenología del cultivo

En este trabajo se utilizará la escala fenológica CETIOM (1978, Cuadro No. 1), siendo la más difundida en el mundo y en la investigación regional. Si bien es utilizada principalmente para describir los estados fenológicos de colza, se utiliza también en la descripción de carinata, dadas las similitudes en el desarrollo a lo largo del ciclo de dichas especies.

Cuadro No. 1. Escala fenológica CETIOM

Período	Estado de CETIOM		Descripción
PLÁNTULA	“A”: cotiledonar		Sin hojas verdaderas. Dos cotiledones visibles.
	“B”: formación de roseta	“B1”	Una hoja verdadera desplegada.
		“B2”	Dos hojas verdaderas desplegadas
ROSETA	“C”: inicio elongación	“Bn”	“n” hojas verdaderas desplegadas.
		“C1”	Aumento de la vegetación. Aparición de hojas jóvenes
ELONGACIÓN	“D”: yemas unidas	“C2”	Entrenudos visibles. Estrangulamiento verde claro en la base de los nuevos pecíolos.
		“D1”	Yemas unidas, escondidas por hojas terminales
	“E”: yemas separadas	“D2”	Inflorescencia principal despejada, aún con yemas unidas. Inflorescencias secundarias visibles.
FLORACIÓN-MADURACIÓN	“F”: floración	“F1”	Primeras flores abiertas
		“F2”	Alargamiento de vara floral. Numerosas flores abiertas
	“G”: formación de silicuas	“G1”	Caída de primeros pétalos. Las diez primeras silicuas tienen un largo menor a 2 cm. Comienza la floración de inflorescencias secundarias
		“G2”	Las diez primeras silicuas miden entre 2 y 4 cm
		“G3”	Las diez primeras silicuas tienen un largo mayor a 4 cm
		“G4”	Las diez primeras silicuas comienzan a madurar
		“G5”	Granos coloreados

Fuente: adaptado de CETIOM por Planchón y Figares (2004).

Según datos publicados por Meikle y Möller (2018), en las condiciones locales, el ciclo comprendido entre la emergencia y la madurez fisiológica transcurre en aproximadamente 170 días, dependiendo de la fecha de siembra, el cultivo alcanza el 50% de floración en torno a los 106 días post-emergencia, en siembra realizadas en La Estanzuela-Colonia el 3 de junio de 2017. Mazzilli et al. (2020) reportaron duraciones de ciclo en el rango de $900^{\circ}\text{C día}^{-1}$ a $2200^{\circ}\text{C día}^{-1}$, acortando el ciclo al atrasar la fecha de siembra para un grupo de experimentos llevados a cabo entre las zafras 2016 y 2018.

2.1.4. Manejo del cultivo

La siembra de carinata puede ser realizada mediante siembra directa o convencional con laboreo; sin embargo, se debe garantizar un buen contacto semilla-suelo (Meikle et al., 2019). Arshad y Gill (1997), encontraron rendimientos y acumulación de biomasa superiores en colza cuando se realizó un laboreo reducido. Adicionalmente, es esperable encontrar menores cantidades de malezas. En rastros de mala calidad se logra una mejor cama de siembra cuando se realiza un laboreo mínimo previo a la siembra del cultivo (Fooladi-Vanda et al., 2009).

En Argentina, Falasca y Ulberich (2010), sugieren como época óptima para la siembra de carinata los meses de abril y mayo. Así, se sitúa la floración al inicio de la primavera, y la maduración y cosecha a finales de noviembre o principio de diciembre. En este sentido, estudios locales han comprobado que la fecha de siembra para el cultivo, los mayores rendimientos se logran situando la fecha de siembra entre fines de marzo y mediados de mayo. En cambio, siembras más tardías suelen acortar el ciclo del cultivo, aproximadamente $5,4\text{ }^{\circ}\text{C día}^{-1}$ por cada día de atraso y disminuyendo el rendimiento aproximadamente 22 kg por día atrasado, sin embargo, siembras más tempranas, incrementan el riesgo de heladas durante la floración (Mazzilli et al., 2020). Kirkegaard et al. (2018), definen el período crítico para la determinación del rendimiento del cultivo entre los 100 y 400 $^{\circ}\text{C día}^{-1}$ acumulados posterior al inicio de floración, siendo importante que el cultivo maximice la tasa de crecimiento durante dicho período.

De igual forma, es importante definir la densidad y profundidad de siembra óptima del cultivo. En lo que respecta al primer punto, se ha observado en diferentes trabajos que poblaciones en torno a 100 pl m^{-2} logran alcanzar los máximos rendimientos, siendo recomendable situar la densidad de siembra en torno a los 5,5 kg ha^{-1} (Zanetti et al. 2009, Seepaul et al. 2016). Ensayos locales, han mostrado que hay un amplio rango de poblaciones que maximizan el rendimiento (entre 40 a 110 pl m^{-2}), pero sólo empieza a observarse una disminución de rendimientos con poblaciones menores a las 40 pl m^{-2} a cosecha. Por otra parte, en términos medios, los mayores rendimientos fueron logrados cuando se utilizaron distancias entre filas de 0,17 m y los menores con distancias de 0,34 m (Mazzilli et al., 2020). Un aspecto para considerar es la variabilidad en la proporción de semillas que logran implantarse, que dependiendo del trabajo tienen un rango de 82 a 42 % dependiendo básicamente de la población objetivo (Mazzilli et al., 2020). A medida que aumenta la población objetivo, existe una tendencia a mayor variabilidad en la proporción de semillas que logran implantar. Respecto a la profundidad de siembra si bien no se han realizado estudios locales, se establece como profundidad óptima entre 1,5cm y 2,0 cm (Seepaul et al., 2019). Profundidades mayores pueden generar problemas en la emergencia de la plántula causando heterogeneidad en el stand de plantas.

2.1.5. Requerimientos nutricionales

Los requerimientos nutricionales del cultivo de carinata son similares a los de colza (Meikle et al., 2019), si bien la concentración de nutrientes por kg de grano en las *Brassica* es mayor a la de los cereales más sembrados en el país, la extracción total del cultivo dependerá principalmente del rendimiento. Es necesario un eficiente suministro de nutrientes para lograr un incremento en la producción, lo que se relaciona estrechamente no solo con la dosis de fertilizante aplicado, sino también con el momento en que están disponibles para el cultivo. La colza ha demostrado respuesta positiva a la fertilización, teniendo a nitrógeno (N) y potasio (K) como los nutrientes más requeridos por unidad de grano producido. Dichos nutrientes son seguidos por el fósforo (P) y azufre (S) en menores proporciones (García y Correndo, 2016).

2.1.5.1. Nitrógeno

En condiciones locales se ha observado que el cultivo posee una respuesta importante al N agregado y que en el promedio de los ensayos, la productividad se maximiza con una dosis de 90 kg ha⁻¹ (UPM Biofuels, 2019). El cultivo es relativamente sensible al nitrógeno localizado junto a la semilla a la siembra, por lo que debe situarse al menos a 2,5 cm de la semilla (Agrisoma, 2017). En colza es importante la disponibilidad de este nutriente durante todo el desarrollo del cultivo, principalmente en la etapa de elongación del tallo y la de botón floral, posteriormente a esta etapa disminuye su consumo y comienza la translocación de N de las hojas y tallos a las semillas en desarrollo (Meikle et al., 2019). Se puede cuantificar la extracción por parte del cultivo de colza tomando en cuenta un rendimiento de 2000 kg ha⁻¹, es de esperar que se extraigan aproximadamente 76 kg ha⁻¹ de N ha⁻¹ (Burzaco et al., 2009).

Para la determinación de deficiencias de este nutriente en el comienzo de la elongación (C1), existe la posibilidad de diagnosticar el estado de la nutrición nitrogenada mediante el uso de curvas de dilución. Ferreira y Ernst (2014), determinaron la siguiente ecuación para determinar el nivel crítico, en función de la producción de biomasa para el cultivo de colza:

$$N_c = 5,21 MS^{-0,36}$$

De igual forma, se determinó 1,04 como valor crítico de Índice de Nutrición Nitrogenada para la producción de biomasa (siendo INN el cociente entre la concentración de nitrógeno en un momento dado y el valor de N_c calculado a partir de la biomasa en ese momento). Sin embargo, no fue determinado un valor crítico para el rendimiento en grano en condiciones de suficiencia de azufre. Por otra parte, un exceso de N puede producir pérdidas de rendimiento a causa del vuelco de plantas (Mazzilli y Hoffman, 2010).

2.1.5.2. Azufre

El azufre forma parte de dos aminoácidos esenciales, precursores de la síntesis de proteínas y clorofila (Canola Council of Canada, 2020). La carinata tiene una alta respuesta al agregado de azufre, por lo tanto las deficiencias son esperables en situaciones de altos rendimientos y suelos de bajo contenido de materia orgánica (Parker, 2009). Dada la baja movilidad del nutriente en la planta, es necesario que esté disponible de forma continua a lo largo del ciclo del cultivo. Sin embargo, el momento de mayor demanda de este es entorno al período de floración (Seepaul et al., 2019).

Un cultivo de colza con rendimientos de 2000 kg ha⁻¹, extrae aproximadamente 13 kg ha⁻¹ de S, sin embargo, la sensibilidad a la deficiencia de este nutriente es muy significativa, llegando a no producir grano en condiciones de deficiencia severa (Mazzilli y Hoffman, 2010). Ferreira y Ernst (2014), recomiendan como herramienta para el diagnóstico de deficiencias de este nutriente el uso de curvas de dilución, donde se determina la concentración limitante de azufre en planta a través de la siguiente ecuación:

$$Sc = 1,22e^{-0,18MS}$$

Para este nutriente se determinaron dos niveles críticos de índice de nutrición azufrada (INS), 0,88 para la producción máxima de biomasa, y 0,74 para la producción máxima de grano.

2.1.5.3. Fósforo

La canola tiene la particularidad de ser un cultivo muy eficiente en la utilización del P del suelo y del P aplicado por lo que no sería necesario agregar éste en grandes cantidades (Grant y Bailey, 1993). La extracción por parte del cultivo oscila entre 13 y 17 kg de P Mg grano⁻¹ (Burzaco et al., 2009). La importancia de este nutriente radica principalmente al inicio del desarrollo del cultivo, posibilitando una buena implantación. Una deficiencia de P puede restringir el desarrollo de las raíces y retrasar la maduración del cultivo (Parker, 2009). En este sentido, en carinata se recomienda utilizar niveles críticos en torno a 15 ppm, coincidiendo con los niveles reportados para otras regiones (UPM Biofuels, 2019). Según datos reportados en Australia por Parker (2009), es esperable obtener una respuesta positiva al agregado con niveles superiores en suelos ácidos (pH < 4.8) y con baja capacidad de intercambio catiónico (CIC).

2.1.5.4. Potasio

La importancia de este nutriente está asociada al desarrollo de la planta, aunque es utilizado en grandes cantidades durante su crecimiento (Martino y Ponce de León, 1999). La respuesta al agregado de potasio es similar a la de otros cultivos de secano, situándose como nivel crítico en suelo 0,34 meq/100g (UPM Biofuels, 2019). Cabe

destacar que se debe evitar el agregado de potasio en la siembra junto a la semilla, dado que puede producir un descenso en el porcentaje de germinación (Parker, 2009). Cada tonelada de grano producida necesita absorber 65 kg de potasio, mientras que se exportan 28 kg Mg^{-1} cosechado (Grant y Bailey 1993, Burzaco et al. 2009).

2.2. ENMIENDAS ORGÁNICAS

En la actualidad se han generado diversas discusiones, sobre el impacto de la agricultura en el medioambiente. En esta línea, la interrogante ha dejado de ser la agricultura en sí, para cuestionar qué tipo de agricultura es la que se debería realizar. Así, Sarandón (2011) plantea avanzar hacia un manejo más sustentable de los agroecosistemas, marcando como uno de los objetivos clave una menor dependencia del uso de insumos externos, entre ellos, combustibles fósiles y fertilizantes inorgánicos. Cuando se busca reducir el uso de insumos externos, se tiende a pensar que estas propuestas de agricultura alternativa suelen llevar a disminuir el crecimiento económico. Al considerar la generación de nuevos mercados y cadenas de valor, en donde los “residuos” de otras industrias sean valuados económicamente, surgen nuevas oportunidades y se logra aplicar el concepto de economía circular a la agricultura (Amador, 2017).

Según estimaciones de IPCC (2019) la agricultura actualmente genera entre 4,8 y 7,4 miles de millones de toneladas de CO_2eqv , lo que supone el 10 - 15% del total de gases de efecto invernadero emitidos a la atmósfera. De esa proporción de gases que son responsabilidad del sector, solamente con los fertilizantes nitrogenados, se genera el 8% en la fabricación de los mismos, y el 12% es producido por las emisiones de N_2O por volatilización de los fertilizantes nitrogenados (Brentrup, 2008). Es por esto que resulta pertinente avanzar en la investigación de nuevas fuentes de nutrientes, para así reducir la dependencia de energías fósiles, y comenzar a practicar una agricultura más responsable (Sarandón 2011, Amador 2017).

En este sentido se puede considerar la utilización de residuos orgánicos como enmiendas para su uso agrícola, sirviendo como una forma eficaz de reciclar la materia orgánica y los nutrientes que contienen. Asimismo, por una parte, se facilita la deposición final de “residuos” generados en otras actividades, y por otra parte surge una oportunidad en el uso de los mismos como fuente de nutrientes en la agricultura, permitiendo reducir la dependencia de fertilizantes sintéticos (McGeehan, 2012). Cabe destacar que enmiendas orgánicas refiere a aquellos productos de origen animal o vegetal que se agregan al suelo para mejorar las propiedades físicas y químicas. Se caracterizan por presentar alto contenido de agua, alto contenido de carbono, entre otras (Perdomo et al., 2015).

Estas enmiendas o abonos orgánicos pueden clasificarse como procesadas o sin procesar. Dentro de las enmiendas no procesadas se distinguen: excretas animales, desechos vegetales, abonos verdes y efluentes como lodos industriales o lodos cloacales,

se diferencian de los procesados, los cuales pueden ser líquidos o sólidos, se incluyen en los primeros a los efluentes de fermentaciones y compostajes, en cambio los últimos abarcan principalmente a los productos de compostaje (Soto y Meléndez, 2004).

Según Salcedo-Pérez et al. (2007) el uso de lodos residuales como fuente de materia orgánica, mejora las propiedades físico- químicas del suelo agrícola a partir de incrementos en los niveles de materia orgánica, mayor formación y estabilidad de agregados y mejoras en las propiedades físicas como disminución de la densidad aparente, mejor retención de humedad, incremento en el tamaño de poros, entre otros aspectos. Al mismo tiempo, aportan cantidades significativas de nitrógeno y fósforo que contribuyen a disminuir el consumo de fertilizantes químicos. El incremento de materia orgánica en los suelos donde se utilizan lodos de la industria papelera dependerá principalmente de la composición de estos, y de la cantidad que se aplique. De esta forma, cantidades menores implican que los aumentos sean menores y menos persistentes en el tiempo (Camberato et al., 2006). Medhi et al. (2009) reportan efectos positivos en el cultivo de la especie *Brassica campestris*, en experimentos en macetas con mezclas de entre 20% y 30% lodos de residuos de papeleras, incrementando las variables de la planta (altura de planta) y de rendimiento (número de silicuas, número de granos, peso de granos).

El uso de lodos, productos de industrias papeleras, como fertilizantes o enmiendas orgánicas es una práctica que se realiza desde finales del siglo pasado. Si bien estos lodos provocan varios impactos positivos (como muchas enmiendas), también se ha comprobado que pueden contener metales pesados, patógenos y otras sustancias no deseadas en diferentes proporciones. Previo a la utilización de los mismos, es necesario analizar tanto el lodo como los suelos donde serán utilizados, para así asegurar la sostenibilidad de los mismos y proteger el medioambiente (Camberato et al., 2006).

Un aspecto clave para tener en cuenta cuando se utilizan enmiendas orgánicas, es el impacto que genera su utilización en las emisiones de gases de efecto invernadero del suelo/cultivo. En este sentido, Faubert et al. (2017) observaron que la sustitución de fertilizantes químicos nitrogenados por enmiendas orgánicas producidas a partir de lodos provenientes de la industria papelera, no provocó aumentos en las emisiones de dióxido de carbono ni de metano. Sin embargo, el alto contenido de materia orgánica, y por ello de carbono, intervino con la dinámica del nitrógeno en el suelo, aumentando en algunos casos las emisiones de óxido nitroso, cuando el contenido de carbono orgánico del suelo (COS) es limitante.

También se ha comprobado que el hecho de que cada material es diferente lleva a que puedan presentar características negativas, como lo es la presencia de altas concentraciones de elementos potencialmente tóxicos (EPT) para los cultivos o para los consumidores de los productos. Una fuerte limitante es la posibilidad de contaminar suelos y aguas subterráneas, por lo que resulta necesario una adecuada investigación y evaluación de éstos previo a su utilización (Otero et al. 1996, Perdomo et al. 2015).

2.3. AGRICULTURA POR AMBIENTES

La agricultura por ambientes, también conocida como agricultura de precisión, se define como la gestión de parcelas agrícolas mediante el uso de técnicas que permiten realizar los manejos más adecuados, en el momento adecuado y en el lugar adecuado, involucrando el uso de herramientas que facilitan la optimización de los recursos disponibles. Utilizando las tecnologías actualmente existentes y que integran un gran número de disciplinas científicas, es posible saber cuándo, dónde y qué se debe hacer para obtener el mejor rendimiento de un cultivo, con un alto nivel de detalle y precisión (Garitano, 2018).

El manejo de la agricultura por ambientes no solo incrementa la exactitud de los diferentes manejos que se realizan sobre los cultivos, sino que también permite mejorar la exactitud con la que se conocen los estados de las diferentes variables que definen tanto el resultado productivo como económico. En la mayoría de los casos, incluso genera una tendencia a aumentar la capacidad productiva de los sistemas (Yost et al., 2019). Esta subdivisión de los lotes intenta contemplar la mayor cantidad de variables espaciales, sobre todo aquellas directamente asociadas al rendimiento de los cultivos, y las que permitan adecuar los manejos para mejorar la conservación del ambiente. Se utilizan diferentes fuentes de información para generar las diferentes clases o zonas, incluyendo información de la topografía (mapas de elevación, pendiente), del suelo (profundidad, capacidad de almacenaje de agua, factores que afecten el cultivo), obtenidos a partir de muestreos invasivos o no invasivos, como puede ser la conductividad eléctrica, y a su vez se pueden contemplar mapas de rendimientos de cultivos previos, imágenes aéreas y otros datos de sensoramiento remoto (Guastaferrero et al., 2010).

Actualmente existen muchas metodologías y algoritmos para la generación de ambientes a partir de la información que se posee. Estos análisis geo-estadísticos de datos se dividen en dos grandes grupos, algoritmos de clasificación supervisada y no supervisada. El primer grupo, se trata de herramientas en las cuales se debe proporcionar un sub-conjunto de datos inicial categorizado para el entrenamiento del modelo, luego, el mismo algoritmo clasifica el conjunto de datos disponibles para la totalidad del área, con los criterios extraídos del sub-conjunto inicial de datos clasificado previamente. Por otra parte, la clasificación no supervisada, es capaz de determinar automáticamente los criterios más relevantes para la generación de ambientes similares contemplando las variables disponibles y en ciertos casos, sus posibles interacciones con el rendimiento (Fridgen et al., 2004).

La adaptación de un manejo por ambientes en la agricultura tiene un impacto positivo en la eficiencia con que se utilizan los recursos del sistema y la conservación de este. Al considerar la variabilidad espacial se evita utilización excesiva de insumos en ciertos lugares, y el aumento de estos en zonas puntuales donde son necesarias

correcciones mayores. Asimismo, también es esperable reducir la variabilidad de los rendimientos dentro del lote, debido a la mejora en la exactitud de los manejos realizados en cada sitio (Gavioli et al., 2019). Raun y Johnson (1999) reportaron que la eficiencia de uso del nitrógeno aplicado en cereales en el mundo se sitúa en torno al 33%, quiere decir que aproximadamente el 67% del nitrógeno aplicado se pierde del sistema cultivo, es por ello por lo que resulta necesario encontrar alternativas que permitan una mejor utilización de estos recursos. Peralta et al. (2015), encontraron en ensayos en la región, que las zonas de manejo determinadas por variables del suelo y del cultivo permiten optimizar el uso de nitrógeno en trigo, obteniendo eficiencias de uso diferentes de acuerdo con el tipo de suelo y potencial productivo de las mismas. Un aspecto clave respecto a esta metodología es que no existe un único método para la elaboración de los ambientes, sobre todo las variables a considerar, dependerán del objetivo de manejo, el recurso más limitante, o la variable cuyo impacto ambiental se busque reducir (Gili et al., 2017).

De igual forma, se pueden destacar importantes posibilidades de la determinación de zonas de manejo en sitios experimentales, en primer lugar, es posible reducir la variabilidad espacial del sitio que será fuente de error experimental ya que al determinar los ambientes similares, se intenta disminuir la misma; al mismo tiempo que se accede a una fuente de variabilidad in-situ surgiendo la posibilidad de utilizar esa variabilidad en la determinación del experimento en sí, y su posterior análisis en la evaluación de los resultados (Cassel et al., 2000). Por lo tanto, es posible utilizar las herramientas de la agricultura por ambientes para reducir las limitantes que implica en la investigación la variabilidad espacial, tanto en ensayos en situaciones controladas, como en ensayos dentro de sistemas comerciales, resultando estos muchas veces más complejos debido a la menor capacidad de control del ambiente (Drinkwater, 2002).

2.4. HIPÓTESIS

La hipótesis de trabajo es que los lodos aplicados previo a la siembra del cultivo de carinata permitirán sustituir el uso de fertilizantes inorgánicos y la combinación de ambas fuentes aumentará el rendimiento alcanzado por el cultivo.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO

Se instalaron un total de 2 experimentos en dos sitios (Figura No. 1) que fueron sembrados durante la zafra de invierno del año 2019 con *Brassica carinata* (carinata). Ambos sitios se ubican en la región centro Sur, uno en el departamento de Flores (Moscoso-Molina) y otro en el departamento de Colonia (Rosello-Dalmás).

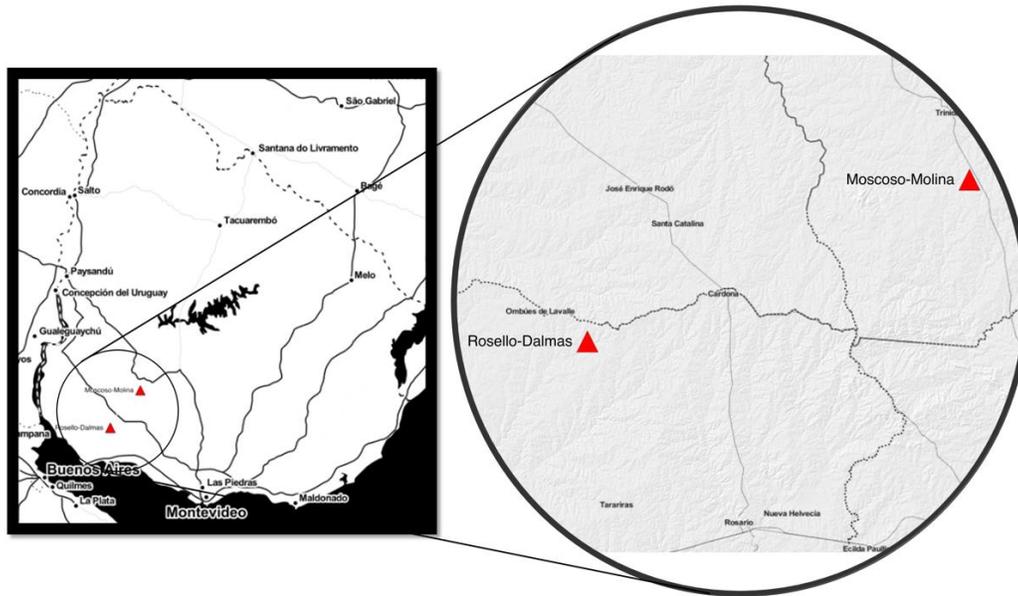


Figura No. 1. Ubicación de los sitios experimentales

Cuadro No. 2. Descripción de los sitios

Sitio	Formación	Unidad	Tipo de Suelo	Grupo CONEAT	Índice CONEAT
Moscoso-Molina	Asencio	Trinidad	Brunosoles eutrícos típicos lúvicos	10.12, 5.p02b	193/88
Rosello-Dalmás	Comp. Basal del CRP	La Carolina	Brunosoles eutrícos típicos lúvicos	10.12	193

Ambos sitios tienen características de suelo, historia agrícola y manejo similares, destacándose que ambos tienen alto potencial de producción siendo en ambos casos suelos dominantes Brunosoles Eutrícos Típicos Lúvicos, que en condiciones naturales presentan alto contenido de materia orgánica. Perfil de tipo: A/Bt/BCK/Ck, alta saturación en bases, texturas medias a pesadas y drenaje moderado a bueno. Todas estas características que benefician el desarrollo del cultivo. En ambos sitios se contaba con ambientes definidos a través de distintas capas de información (suelo, mapas de rendimiento e imágenes satelitales). Se manejaron dichos ambientes previamente definidos y de acuerdo con su productividad. Había un ambiente A, donde la productividad de la mayor parte de los cultivos fue superior al resto y un ambiente B, que se caracterizó por una productividad media inferior, pero principalmente con mayor variabilidad.

El sitio Rosello-Dalmás presenta menores niveles de fósforo (P_2O_5) y mayores niveles de calcio (Ca) y pH que el sitio Moscoso-Molina (Cuadro No. 3). En ninguno de los dos sitios fue posible detectar diferencias relevantes entre las variables evaluadas según cada ambiente de producción previamente definido (Cuadro No. 3). A su vez luego de realizar la interpolación de 63 muestras de suelo georreferenciadas mediante una interpolación kriging en el software QGIS, se comprobó, que dentro de cada sitio existió una importante variabilidad en la mayor parte de las variables analizadas (Figuras No. 2 y No. 3).

Cuadro No. 3. Características de suelo según sitio experimental, ambiente dentro de cada sitio y profundidad

Sitio Ambiente	Rosello-Dalmás				Moscoso-Molina			
	A		B		A		B	
Profundidad	0-10	10-20	0-10	10-20	0-10	10-20	0-10	10-20
%C	2,6	1,9	2,5	1,9	2,4	1,8	2,3	1,7
NO ₃ (ppm)	10,7	5,3	8,7	4,7	9,9	5,9	8,1	5,3
P (ppm)	5,4	2,3	6,7	2,4	17,5	4,1	18,4	4
Ca (meq/100g)	21,1	22,2	19,9	21	13,6	17,6	10,9	13,6
Mg (meq/100g)	4	4,4	4,1	4,5	3,6	4,3	3,4	4,1
K (meq/100g)	0,6	0,6	0,6	0,6	0,5	0,5	0,4	0,4
Na (meq/100g)	1,6	1,8	1,7	1,6	1,7	1,9	1,7	1,8
Ac. Tit (meq/100g)	2,8	1,7	3,1	2	3,9	2,8	4	3,4
pH (H ₂ O)	6,4	6,9	6,3	6,7	5,6	6,1	5,5	5,7
pH (KCl)	5,4	5,7	5,2	5,6	4,6	5,1	4,6	4,7
Conductividad (μs)	142,5	126,3	131,2	125,8	129,4	142,9	121,4	106,3

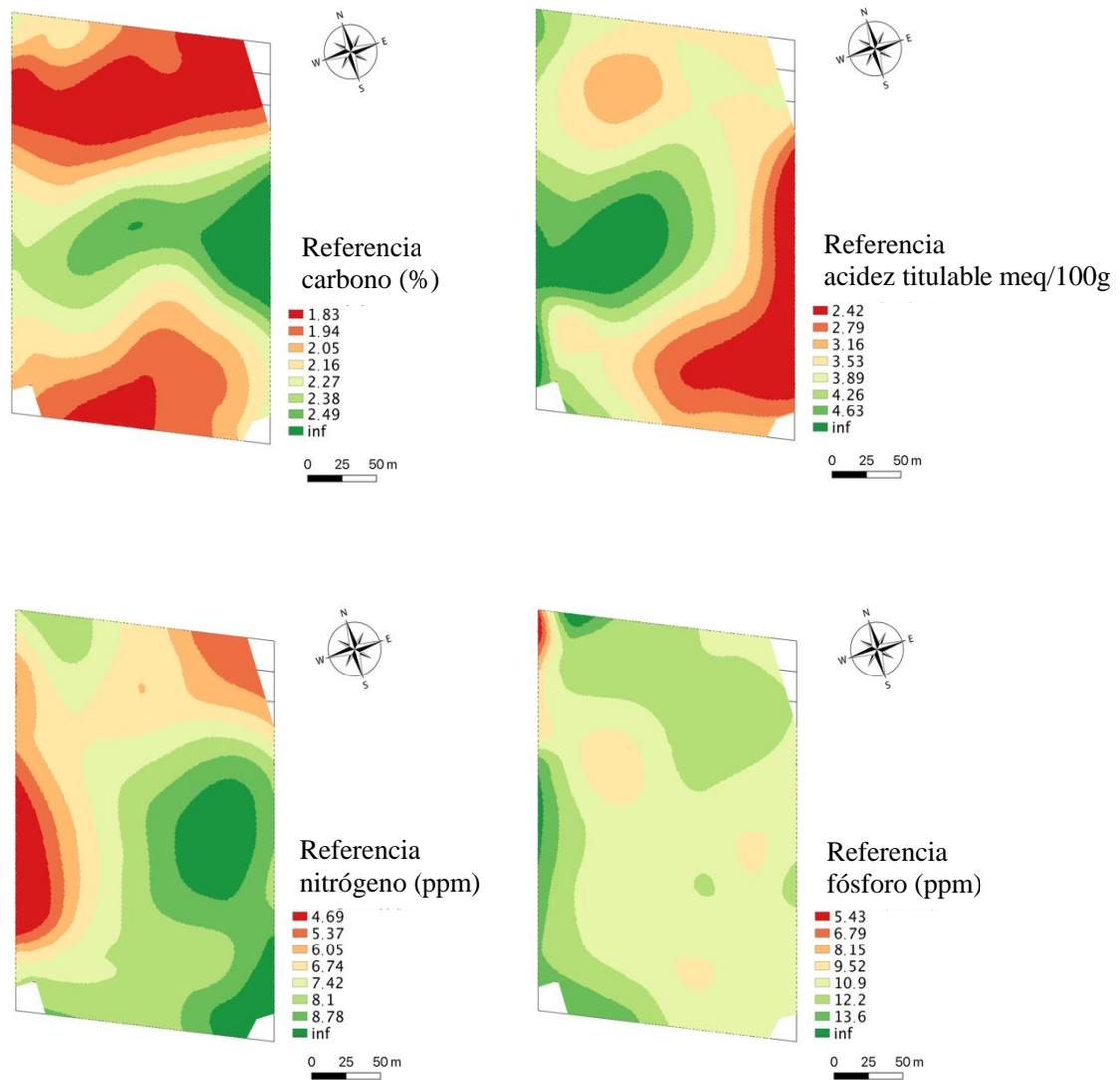


Figura No. 2. Distribución del carbono orgánico (%C), acidez titulable, nitratos en suelo (ppm) y fósforo Bray No. 1 (ppm) para el sitio Moscoso-Molina en los primeros 20 cm de profundidad

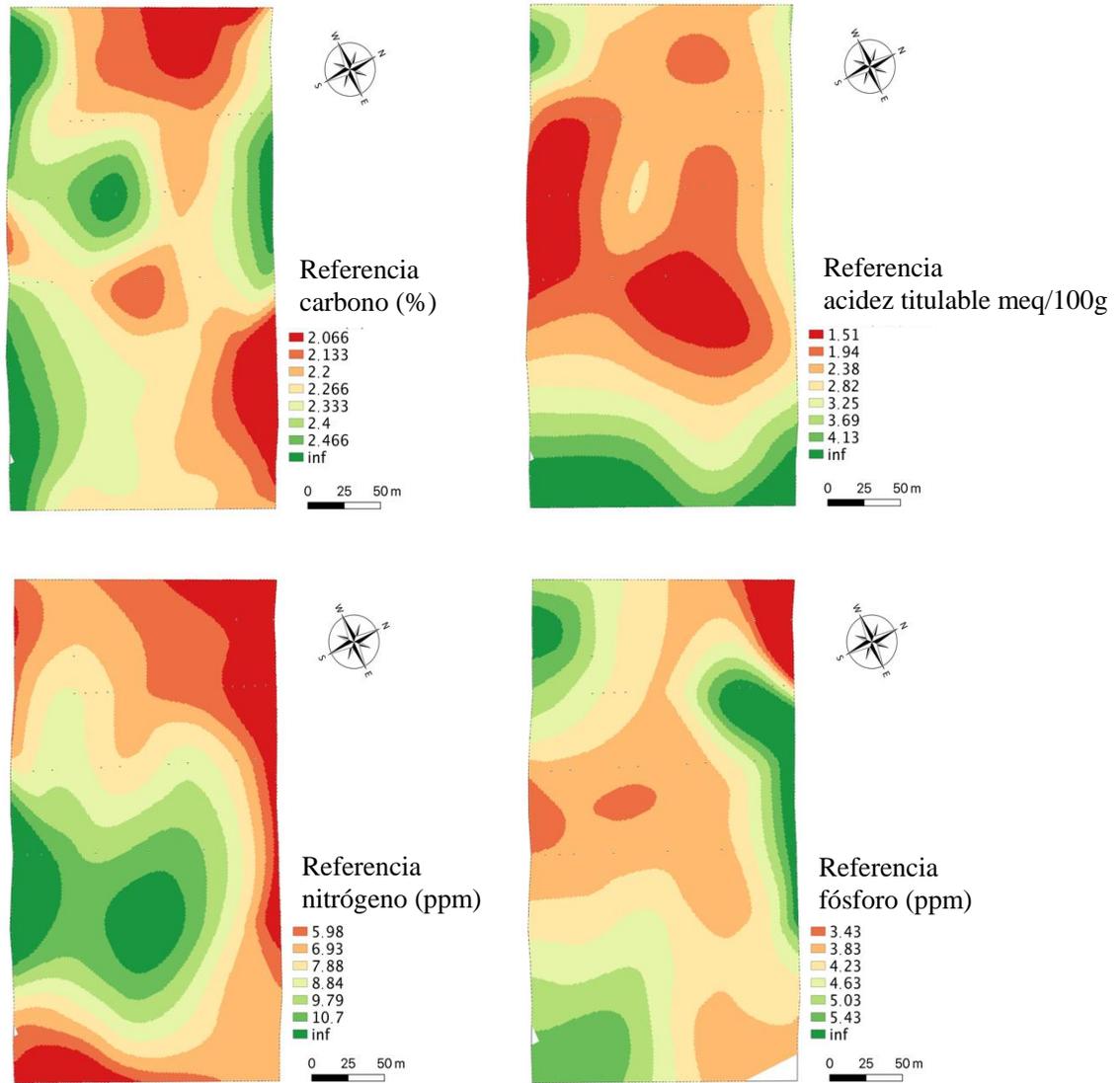


Figura No. 3. Distribución del carbono orgánico (%C), acidez titulable, nitratos en suelo (ppm) y fósforo Bray No. 1 (ppm) para el sitio Rosello-Dalmás en los primeros 20 cm de profundidad

3.1.1. Tratamientos aplicados

En cada uno de estos sitios se instalaron un total de 6 fajas con tratamientos de 30 m de ancho por 200 m de largo que atravesaban el sitio y pasaban por los dos ambientes de producción definidos. A su vez, cada faja de tratamiento estaba acompañada por un testigo apareado a cada lado del mismo tamaño (Figura No. 4). En ambos sitios se georreferenciaron 9 puntos en cada faja, los cuales fueron utilizados como sitios de muestreo. Estos puntos fueron analizados separadamente o en conjunto por ambiente, según la variable estudiada.

Se aplicaron 6 tratamientos, las dosis de lodos se calcularon de forma tal que igualaran el aporte de fósforo (P_2O_5) del tratamiento fertilizante. Los lodos en ambos casos fueron aplicados previo a la siembra del cultivo de carinata (Cuadro No. 4). El fertilizante fosforado (7-40-0/5) fue aplicado al momento de la siembra en el sitio Moscoso-Molina, pero en el sitio Rosello-Dalmás, aunque su aplicación estaba prevista para el momento de siembra, se demoró por problemas operativos del productor, aplicándose finalmente a inicios de elongación del cultivo. Por su parte, el fertilizante nitrogenado (urea azufrada) fue aplicado fraccionado: 60% luego de la implantación y 40% a inicio de elongación en el sitio Moscoso-Molina. En el sitio Rosello-Dalmás fue aplicado el 100% a inicio de elongación.

Ambos lodos presentaban características químicas diferentes (Cuadro No. 5) y fueron aplicados con la misma maquinaria con la que se aplicaron los fertilizantes químicos. No existieron mayores problemas para la aplicación, salvo que la baja capacidad de dichas máquinas de aplicar altas dosis (no más de 500 kg ha^{-1}) determinó la necesidad de realizar varias pasadas para lograr aplicar la dosis propuesta.

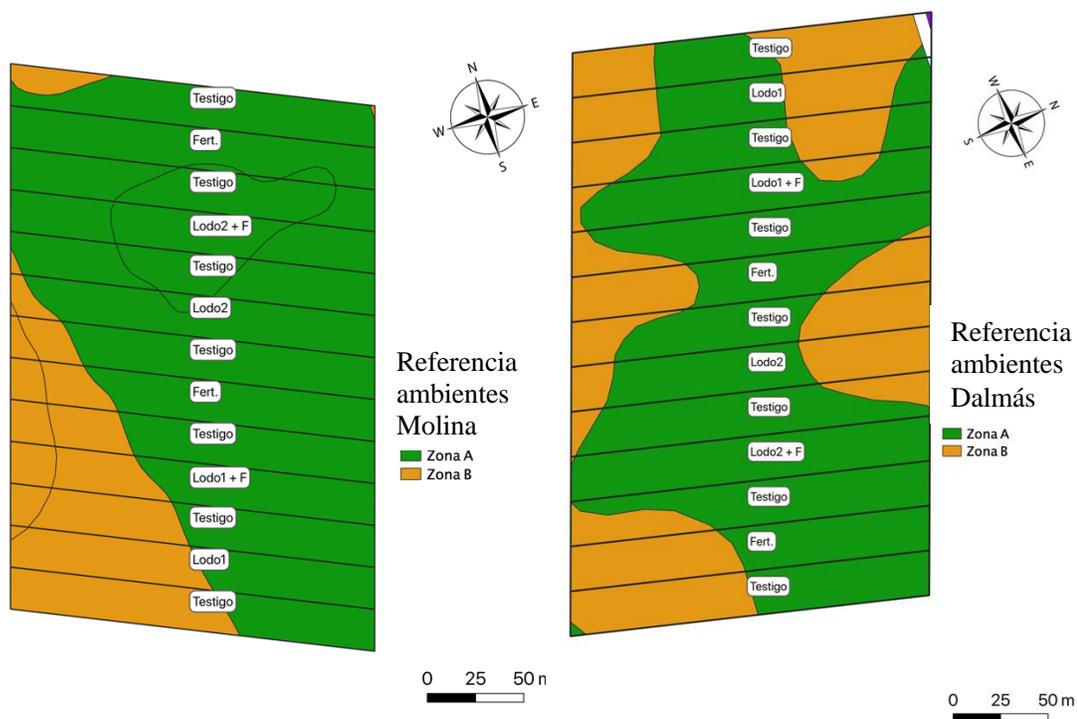


Figura No. 4. Distribución de tratamientos en cada uno de los sitios experimentales

Cuadro No. 4. Tratamientos aplicados con sus respectivas dosis

Tratamiento	Dosis
Biolodo (lodo 1)	3.044 kg ha ⁻¹
Lodo mezcla (lodo 2)	2.778 kg ha ⁻¹
Fertilizante	170 kg ha ⁻¹ 7-40-0/5 + 225 kg ha ⁻¹ urea
Biolodo + fertilizante	Dosis anteriores sumadas
Lodo mezcla + fertilizante	

Cuadro No. 5. Concentración de nutrientes en los lodos utilizados

	Biolodo (lodo 1)	Lodo mezcla (lodo 2)
PH	8	12.4
%		
MS	98	98
MO	75	62
mg/kg		
Al	15000	11000
As	10.0	5.0
B	100	100
Ca	25000	125000
Cd	0.5	0.4
Co	3.5	2.5
Cr	50.0	25.0
Cu	22	16
Fe	6500	5300
K	4100	3600
Mg	3100	6400
Mn	500.0	900.0
Mo	3.5	2.5
Na	8000	7000
Ni	25	12
P	9380	10500
Pb	12.0	13.0
S	12000	10500
Si	30000	5000
Zn	59	42
N	59200	34000

3.1.2. Muestreo de suelo

El muestreo a nivel de suelo se realizó previo a la siembra, muestreando la totalidad de los puntos de muestreo dentro de los tratamientos testigos (63 muestras por profundidad por sitio), en dos profundidades (0-10 cm y 10-20 cm), la totalidad de variables de manera de tener una buena descripción inicial del experimento previo a la aplicación de los tratamientos (Cuadro No. 3), con posibilidad de interpolar los datos a los puntos de los tratamientos evaluados dada la distribución espacial de los mismos.

3.1.3. Muestreo de biomasa

Durante el ciclo del cultivo de carinata se evaluó la acumulación de biomasa en 2 momentos, a inicio de elongación (C1) y al momento de floración (F1). Para esto se cortó con tijera un área de 0.38 m², contabilizando en cada punto de muestreo el número de plantas. La totalidad de las muestras fueron secadas en estufa a 60°C hasta masa constante, y almacenadas hasta su procesamiento. En los diferentes estados, elongación y floración, a partir de la muestra de biomasa, se evaluó la concentración de nitrógeno y fósforo, para posteriormente estimar la absorción de dichos nutrientes en de cada tratamiento y el Índice de Nutrición Nitrogenada (INN) en C1 y floración. Para el sitio Rosello-Dalmás, la absorción de fósforo solo se analizó en floración, dada la poca cantidad de muestra colectada en el estadio de C1, consecuencia del escaso crecimiento del cultivo.

3.1.4. Manejo agronómico

El cultivo de carinata fue sembrado a una distancia de 38 cm entre filas, en ambos sitios se utilizó la variedad Avanza 641. En cuanto a la densidad de semillas y fecha de siembra, se sembraron 4 kg ha⁻¹ en el sitio de Moscoso-Molina el 22 de abril y 4.5 kg ha⁻¹ en el sitio de Rosello-Dalmás, el 15 de mayo. El objetivo era obtener una población de 60 pl m⁻². En cuanto a la cosecha se realizó el 5 y el 2 de diciembre en Moscoso-Molina y Rosello-Dalmás respectivamente. En el Cuadro No. 6 se detalla una breve descripción del manejo de pulverizaciones en los tratamientos.

Cuadro No. 6. Manejo agronómico en el sitio Moscoso-Molina y Rosello-Dalmás

Sitio	Categoría	Producto	Lts ha ⁻¹
Moscoso-Molina	Herbicida	clopiralyd + cletodim	0,2 + 1
	Fungicida	swing plus	1,2
	Herbicida	diquat	2,5
Rosello-Dalmás	Herbicida (Presiembra)	glifosato + cletodim + amina	3 + 1 + 1 + 0,5
	Herbicida (Presiembra)	glifosato + cletodim + lid xtra	3 + 0,8 + 0,2 + 0,5
	Herbicida	cletodim + lid xtra	1,05 + 0,162 + 0,51

3.1.5. Diseño experimental y descripción estadística

Los experimentos analizados se instalaron utilizando un diseño de testigos apareados, el cual consiste en ubicar en forma aleatoria el conjunto de tratamientos a evaluar, intercalando con ellos siempre un testigo común, el cual permite modelar de forma sistemática el efecto de la calidad del terreno donde se ubican las parcelas experimentales. El modelo estadístico utilizado en el análisis fue el siguiente:

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij} \quad i = 1,2,3,4,5,6 \quad j = 1,2,3,4,5,6,7,8,9$$

Donde y_{ij} corresponde al valor de la variable de respuesta del i -ésimo tratamiento, τ_i corresponde al efecto del i -ésimo tratamiento y ε_{ij} el error asociado al ij -ésimo punto de medición.

Los datos experimentales se analizaron con el software estadístico R (R Core Team, 2017), a través de un modelo lineal mixto donde los efectos fijos de cada tratamiento fueron ajustados mediante el método de máxima verosimilitud restringida (“restricted maximum likelihood”). De esta forma se incluye la estimación del efecto ubicación, mediante la incorporación de una correlación espacial al modelo, determinando así gradientes donde el ambiente pondera o castiga el resultado de las variables de respuesta (Di Rienzo et al., 2011). Durante el análisis estadístico de los datos se seleccionó la correlación más apropiada al conjunto de datos, en base a tres indicadores. En primer lugar, los parámetros AIC (criterio de información de Akaike) y BIC (criterio de información bayesiano), los cuales son indicadores que tienen como función calificar qué modelo ajusta mejor dentro de un conjunto finito. Ambos toman en cuenta la función verosimilitud de este, y penalizan con el número de parámetros ajustados, evitando el sobreajuste de este. Por sí solos no permiten elaborar conclusiones respecto a la hipótesis nula, por lo cual no indican si todos o algunos de los modelos son correctos o no. Finalmente, se analizó el resultado del parámetro p -value (p-valor) del análisis de varianza de cada modelo, determinando que modelo tiene menor probabilidad de estar cometiendo error de tipo I al determinar que existen tratamientos diferentes; es decir, la probabilidad de rechazar la hipótesis nula de forma errónea, por lo tanto, se discrimina si los resultados son significativos o no.

Se plantea como hipótesis nula que no existen diferencias en los efectos de los tratamientos. Esto es, no se encuentran diferencias en las variables de respuesta debido a los diferentes tratamientos, y como hipótesis alternativa se establece que existen diferencias entre los mismos.

$$H_0: \tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = \tau_4 = \tau_5 = \tau_6$$

Ha: Existe al menos un τ_i diferente

Como criterio estadístico se establece un máximo de 0.05 para la probabilidad de estar cometiendo error de tipo I en el rechazo de la hipótesis nula ($p\text{-value} < 0.05$).

Se analizaron 6 variables de respuesta, dispuestas en 3 grandes grupos: rendimiento, dinámica del crecimiento y nutrición. Se ajustó un modelo para cada una de ellas, y se realizaron pruebas de comparación múltiple de Tukey, con un nivel de significancia $\alpha=0.05$, determinando las múltiples diferencias y similitudes entre tratamientos.

Finalmente, se realizaron diferentes análisis de regresión con el fin de determinar cuáles fueron las variables que interactuaron en mayor medida con el rendimiento logrado (Anexos No. 3 y No. 4). Se realizaron análisis de correlación de Pearson con las variables población, INN, absorción y contenido de fósforo con las variables de respuesta rendimiento y biomasa en floración, se estableció como criterio estadístico un nivel de significancia $\alpha=0.05$. Contemplando la significancia de las regresiones y su coeficiente de determinación, en ciertos casos resultó pertinente remover observaciones atípicas (outliers). Para esto, se calculó el parámetro de distancia de Cook (Cook, 1977) y se removieron los valores extremos (Anexos No. 5 y No. 6).

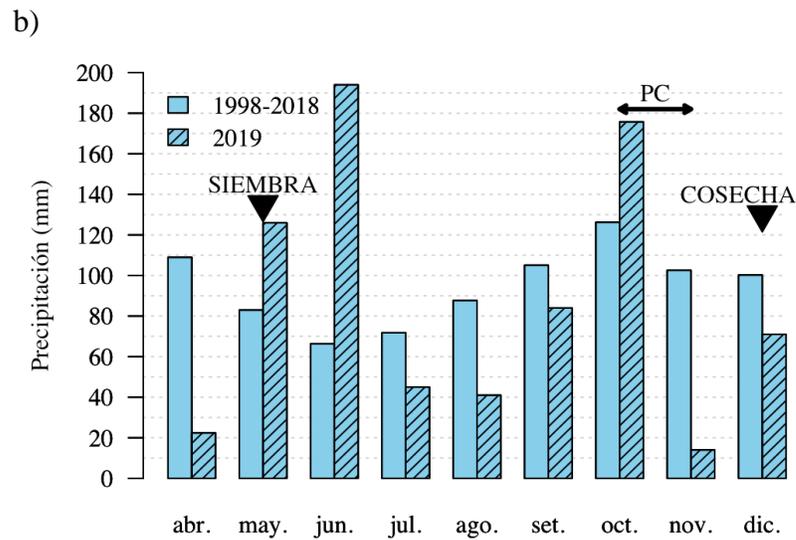
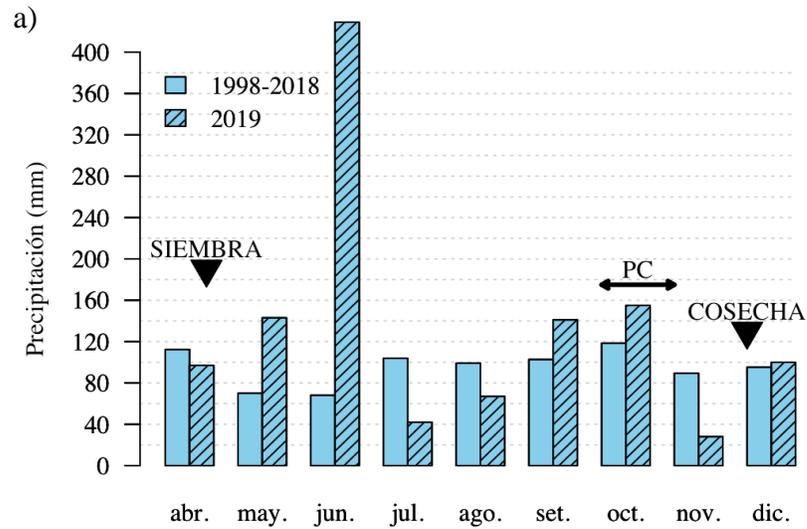
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA

Para el análisis de la caracterización agroclimática de las zonas en estudio se tomaron como referencia datos de la serie histórica (1998-2018) y de la zafra, de radiación y temperatura de la localidad de los sitios, extraída del modelo CFSR (Saha et al., 2010) a través de la plataforma Google Earth Engine (Gorelick et al., 2017). La base de datos de precipitaciones se extrajo de la serie histórica de INUMET para la localidad de Chamanga (sitio Moscoso-Molina) y Miguelete (sitio Rosello-Dalmás). La zafra de invierno del año 2019 fue comprendida por los meses de abril a diciembre.

4.1.1. Precipitaciones

Esta zafra se caracterizó por tener meses con problemas de exceso hídrico durante el ciclo del cultivo. Las precipitaciones acumuladas durante el ciclo del cultivo para ambos sitios fueron muy diferentes, siendo 1202 mm para Moscoso-Molina y 773 mm para Rosello-Dalmás. Por lo tanto, en ninguno de los dos sitios el total de precipitaciones acumuladas podría calificarse como una limitante, ya que normalmente se espera que el cultivo consuma entre 400 y 500 mm en situaciones hídricas favorables (Colomer et al., 2010).



PC: período crítico

a) Moscoso-Molina y b) Rosello-Dalmás.

Figura No. 5. Precipitaciones medias mensuales para la serie histórica (1998-2018) y el año 2019

Se observa una gran variabilidad mensual en las precipitaciones con respecto a la media histórica en ambos sitios (Figura No. 5). Durante el ciclo de cultivo en el sitio de Rosello-Dalmás, existieron meses como abril, en donde las precipitaciones fueron aproximadamente 5 veces inferior a la media histórica. Esto causó un déficit hídrico que

generó un atraso en la fecha de siembra, la cual estaba planeada para la última década de abril. Por otra parte, en el mes de junio, las precipitaciones fueron 5 veces superior a la media histórica en Moscoso-Molina, lo cual seguramente generó condiciones de exceso hídrico y anoxia prolongada del cultivo. En cambio, en el sitio Rosello-Dalmás las precipitaciones fueron más del doble con respecto a la media histórica, lo cual tuvo como consecuencia problemas en la implantación del cultivo para dicho sitio. En el mes de noviembre, en el cual el cultivo se encontraba en el final del llenado de granos, las precipitaciones fueron la tercera parte del promedio histórico para Moscoso-Molina y para el sitio de Rosello-Dalmás fueron la sexta parte del promedio histórico. Sin embargo, es probable que los cultivos no sufrieran déficit hídrico, ya que los suelos se encontraban recargados de agua por las lluvias registradas en los meses anteriores. Lo anteriormente mencionado se respalda en los valores de Índice de Bienestar Hídrico (IBH) registrados (Anexo No. 1), donde en noviembre rondan en un rango de 50 a 60%. Esto determina que el cultivo a pesar del déficit de precipitaciones para este mes, las mismas no limitaron la concreción del rendimiento generado hasta ese momento.

4.1.2. Temperatura

La zafra se caracterizó por tener gran variabilidad en la temperatura respecto a la media esperada (± 2 °C). Esto significó que las temperaturas registradas durante el desarrollo del cultivo adquirieron valores comprendidos en el rango óptimo de desarrollo para el cultivo (Colomer et al., 2010). Las temperaturas se ubicaron en un rango de 13 a 20°C durante todo el ciclo. Cabe destacar que específicamente en torno al período crítico, se registraron valores de 15°C. Se puede afirmar que las temperaturas, las extremas y la media, favorecieron al cultivo de carinata y no limitaron el rendimiento (Morrison y Stewart 2002, Dreccer et al. 2018).

En lo que respecta a la temperatura media, se puede afirmar que se mantiene la misma tendencia en ambos sitios, no obstante, se encuentran diferencias en los valores máximos y mínimos, donde en el sitio Moscoso-Molina hay una tendencia a una amplitud térmica mayor a la del sitio Rosello-Dalmás (Figura No. 6). Esto podría haber condicionado el desarrollo del cultivo y afectado el rendimiento.

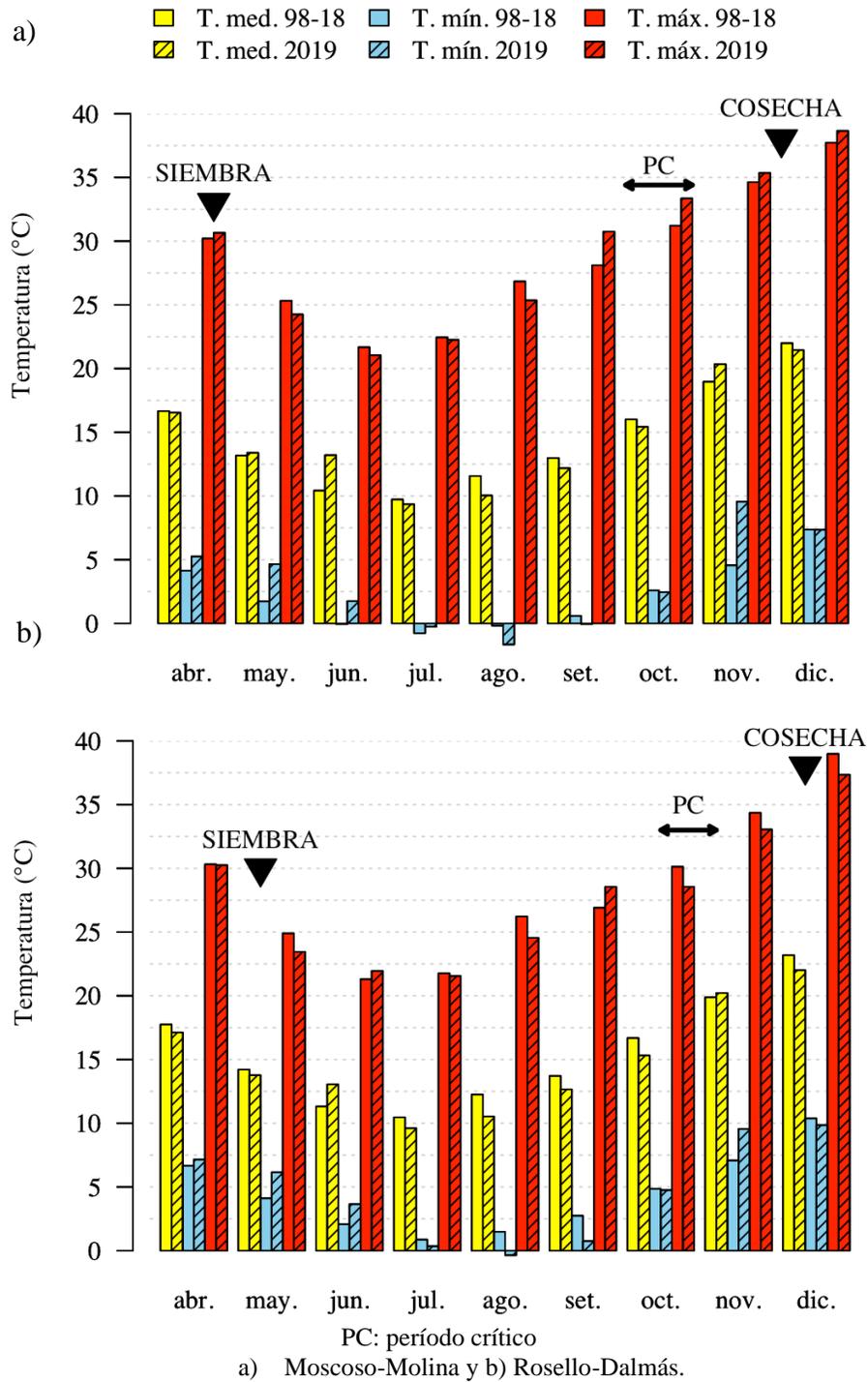


Figura No. 6. Temperatura media mensual, temperatura mínima y máxima para la serie histórica (1998-2018) y el año 2019

4.1.3. Radiación

Para ambos sitios las precipitaciones frecuentes afectaron la radiación solar en los meses de junio y octubre, donde ésta fue inferior a la media histórica (Figura No. 7) en un 20 y 27% en el sitio Moscoso-Molina y Rosello-Dalmás respectivamente para el mes de junio. En cuanto al mes de octubre, la radiación fue 20% debajo de la media histórica para el sitio de Moscoso-Molina y un 15% debajo para Rosello-Dalmás. En cuanto al resto de los meses analizados, tanto en abril como en setiembre se registró un aumento de la radiación con respecto a la media histórica. Los valores fueron de un 11 y 18% para cada mes y sitio respectivamente. En cuanto a la radiación total del período en estudio fue similar a la histórica para ambos ensayos.

Las precipitaciones registradas durante el período crítico en Moscoso-Molina, llevaron a que la radiación registrada en dicho momento estuviera por debajo de la media de la serie histórica. Esto pudo haber sido una limitante no solo para alcanzar tasas de crecimiento de cultivo altas en dicho período, sino también para lograr buenos rendimientos. También se puede concluir, que en el sitio Rosello-Dalmás el efecto de la radiación pudo haber tenido menos impacto en el rendimiento, ya que el período crítico de este sitio se ubicó más tarde en la estación de crecimiento (noviembre), período en el cual se observó un incremento significativo en la radiación con respecto al mes anterior.

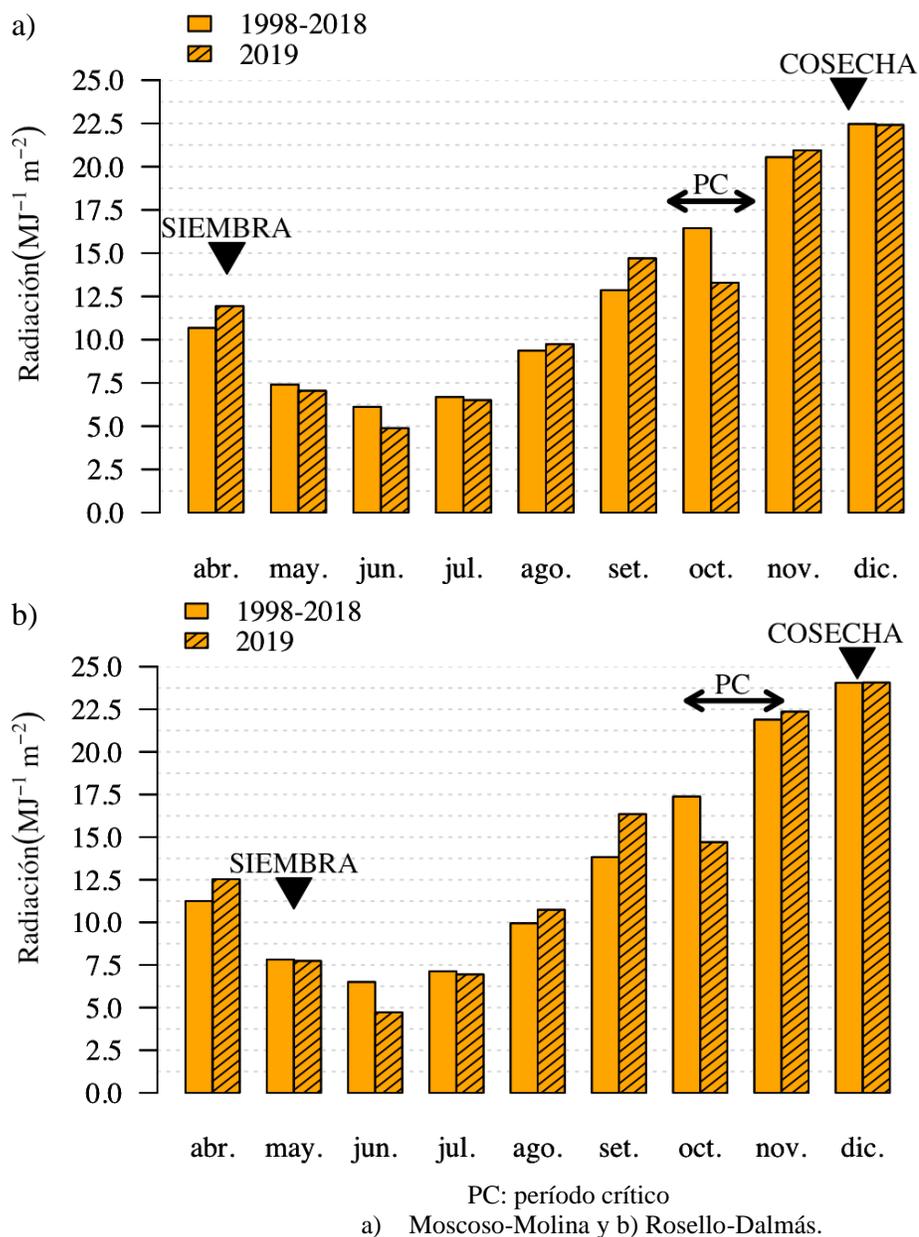


Figura No. 7. Radiación promedio mensual para la serie histórica (1998-2018) y radiación el año 2019

El período experimental presentó varios meses de excesos hídricos para ambos sitios, aunque sin sesgos mayores de temperaturas, sin embargo, la escasa radiación en torno al período crítico, definieron a esta zafra como un año con bajo potencial de rendimiento para el cultivo de carinata.

4.2. ANÁLISIS DE LOS ENSAYOS

En este capítulo se analizarán los resultados de cinco variables de respuesta que se consideraron de máxima importancia para ambos sitios experimentales: la población, el rendimiento, la biomasa acumulada, el nitrógeno absorbido, la concentración de este y su relación con la biomasa, y finalmente la absorción y concentración de fósforo. El objetivo fue evaluar los efectos de las diferentes fuentes y combinaciones de nutrientes sobre el cultivo.

4.2.1. Población

Previo al análisis de rendimiento, se analizó la dinámica de la población de plantas y su efecto en el rendimiento. La población a inicio de elongación (C1) y en floración (F1) no fue diferente entre tratamientos en ninguno de los dos ensayos. A pesar de no existir diferencias en la población entre puntos de muestreo (consecuencia del efecto de los tratamientos), éstas tuvieron un rango de 18 a 86 plantas m^{-2} y de 23 a 71 plantas m^{-2} en Moscoso-Molina y Rosello-Dalmás, respectivamente (Cuadro No. 7). En cuanto al efecto de la población en floración y el rendimiento logrado en el cultivo, ambos sitios arrojaron resultados similares; no se encontró ningún tipo de asociación entre ambas variables (Figura No. 8). Esta última conclusión es coincidente con trabajos previos (Mazzilli, 2018).

Cuadro No. 7. Parámetros estadísticos y p-valor de la prueba F de Fisher para la variable población

Variable	Unidad	Población C1 MM	Población C1 RD	Población Flor MM	Población Flor RD
Media	pl m^{-2}	46.3	47.1	42.6	46.5
Máximo	pl m^{-2}	92.1	81.6	86.8	71.1
Mínimo	pl m^{-2}	13.2	13.2	18.4	23.7
SD	pl m^{-2}	13.3	13.6	10.4	9.5
CV(%)	%	28.7	28.9	24.5	20.5
p-valor	-	0.31	0.597	0.739	0.068

En dos estados diferentes del cultivo (C1 y F1), en dos sitios experimentales (MM=Moscoso-Molina y RD=Rosello-Dalmás).

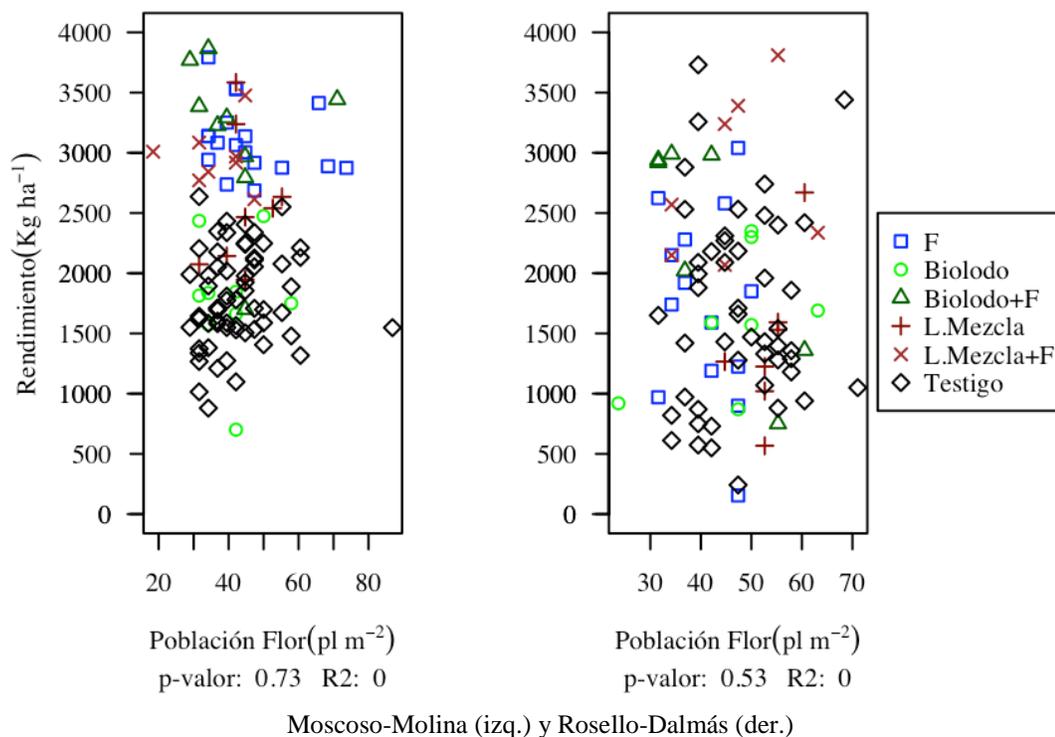


Figura No. 8. Relación entre población y rendimiento

4.2.2. Rendimiento

En cuanto al rendimiento, se observa que la zafra en la cual se realizaron los ensayos, las condiciones climáticas y su relación con las características de los sitios experimental determinaron que en Moscoso-Molina el rendimiento medio fuera 2.244 kg ha⁻¹ y para Rosello-Dalmás fuera de 1806 kg ha⁻¹. En ninguno de los dos sitios se alcanzó la mitad del potencial de rendimiento reportado para la especie (Castro, 2018). Si bien en ambos sitios los rendimientos máximos fueron similares, en el ensayo de Rosello-Dalmás se encontraron rendimientos más bajos. Al mismo tiempo, en ese sitio existió una mayor variabilidad en términos absolutos y respecto a la media, lo que resulta en un mayor coeficiente de variación. Finalmente, cabe destacar que el análisis de varianza del modelo mixto, realizado en ambos sitios en base a su correspondiente ajuste para el rendimiento por tratamiento, indicó diferencias significativas que pueden deberse al efecto de los tratamientos (Cuadro No. 8).

Cuadro No. 8. Parámetros estadísticos y p-valor de la prueba F de Fisher para la variable rendimiento en grano en los dos sitios experimentales

Variable	Unidad	Moscoso-Molina	Rosello-Dalmás
Promedio	kg ha ⁻¹	2244	1806
Máximo		3866	3810
Mínimo		701	155
SD		729	831
CV(%)	%	32,4	45,9
p-valor	-	<0,001	0,040*

Descartando 6 outliers.

Para el sitio Moscoso-Molina se detectaron diferencias entre tratamientos para el rendimiento en grano. Donde los tratamientos que fueron fertilizados presentaron mayores rendimientos que el resto de los tratamientos. El tratamiento Lodo mezcla no presentó diferencias con el tratamiento solo fertilizante, sí resultó significativamente superior al tratamiento Testigo en 721 kg ha⁻¹ de rendimiento, por lo tanto, considerando el aporte de 94 kg N ha⁻¹ en la dosis aplicada de Lodo mezcla, la eficiencia agronómica de dicho nutriente fue de 7,6 kilogramos de aumento en rendimiento por kilogramo de nutriente aplicado, para el caso del P, dicha eficiencia se situó en 24,3. El tratamiento Biolodo logró un rendimiento similar al del tratamiento Testigo e inferior al tratamiento fertilizado. Por otra parte, en el sitio Rosello-Dalmás, se encontraron diferencias entre los tratamientos lodos con fertilizantes y el tratamiento Lodo mezcla, siendo éste significativamente inferior (Figura No. 9).

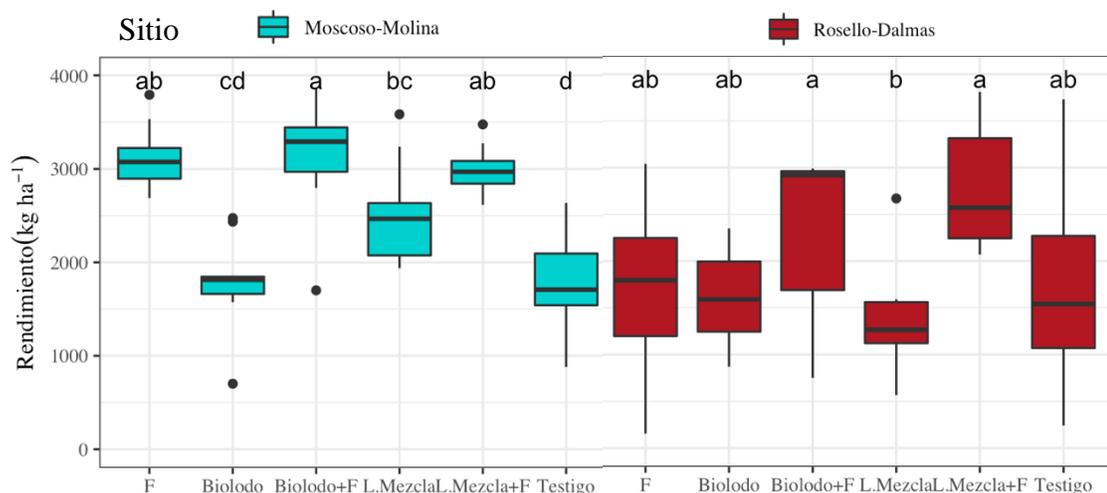


Figura No. 9. Boxplot para la variable rendimiento según tratamiento y sitio, letras diferentes indican diferencias entre tratamientos

Las diferencias observadas entre sitios pueden ser explicadas por la fertilización tardía en el sitio Rosello-Dalmás, además de una posible disminución del rendimiento en los tratamientos de lodos debido a la ausencia de fertilización nitrogenada en dichos tratamientos, que pudo haber operado como una limitante para el cultivo (Mazzilli y Hoffman, 2010).

4.2.3. Biomasa acumulada

A inicios de elongación (C1), la biomasa promedio fue de 219 kg MS ha⁻¹ en el sitio Moscoso-Molina y 195 kg MS ha⁻¹ en el sitio Rosello-Dalmás, muy por debajo de los valores reportados para colza por Ferreira y Ernst (2014), con valores máximos y mínimos similares en ambos sitios y con diferencias significativas entre tratamientos (Cuadro No. 9). Por otra parte, al estado de floración, aumentó considerablemente la diferencia de los valores medios de biomasa entre sitios, obteniéndose 5.680 kg MS ha⁻¹ en el sitio Moscoso-Molina, y 3.608 kg MS ha⁻¹ en el sitio Rosello-Dalmás. Así, se encontraron diferencias significativas entre tratamientos para ambos sitios. Esta puede deberse a la fecha de siembra más tardía en el sitio Rosello-Dalmás, acortando la duración del ciclo a floración (Mazzilli et al., 2020), pero también, la menor implantación lograda en dicho sitio debido a las condiciones ambientales y el manejo diferente de la fertilización en ambos sitios.

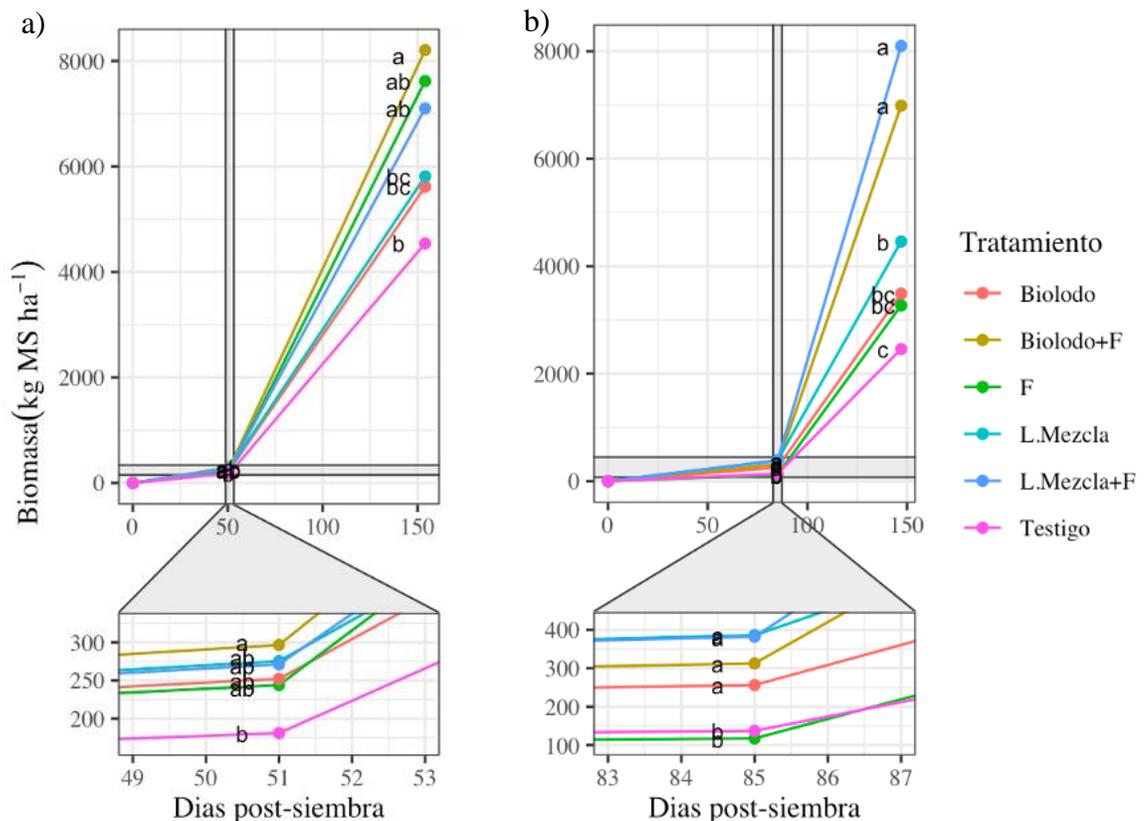
Cuadro No. 9. Parámetros estadísticos y p-valor de la prueba F de Fisher para la variable biomasa

Variable	Unidad	Biomasa-C1 MM	Biomasa-C1 RD	Biomasa-Flor MM	Biomasa-Flor RD
Promedio	KgMS ha ⁻¹	219	195	5680	3608
Máximo	KgMS ha ⁻¹	541	661	10483	10823
Mínimo	KgMS ha ⁻¹	39	31	1791	654
SD	KgMS ha ⁻¹	101	135	2000	2194
CV(%)	%	46	69	35	61
p-valor		0.021	<0.001	<0.001	<0.001

En dos estados diferentes del cultivo (C1 y F1), en dos sitios experimentales (MM=Moscoso-Molina y RD=Rosello-Dalmás).

En el sitio Moscoso-Molina existieron diferencias entre tratamiento a lo largo de todo el ciclo (Figura No. 10). En C1, se diferenció el tratamiento Biolodo + fertilizante, del tratamiento Testigo. Sin embargo, las diferencias entre los demás tratamientos de lodos y el Testigo no fueron significativas. En floración, continuaron diferenciándose, pero se observó que la aplicación de los lodos solos no logró producciones de biomasa diferentes del tratamiento fertilizado ni del tratamiento Testigo.

Para el sitio Rosello-Dalmás, se observó una diferencia en el estado de C1 en los tratamientos con lodos solos, o en combinación, siendo estos superiores a los tratamientos solo fertilizante y Testigo. Al estado de floración ocurre un efecto similar, donde se manifiestan diferencias en los tratamientos combinación de lodos más fertilizantes, siendo significativamente superiores a los demás. Lodo mezcla, obtuvo rendimientos equivalentes al solo fertilizante, pero superiores al Testigo, sin embargo, el tratamiento solo fertilizante, no se diferenció estadísticamente del tratamiento Testigo en ese sitio.



Letras diferentes indican tratamientos diferentes. Dos momentos evaluados, C1 (51 días post-siembra; 85 días post-siembra) y floración (154 días post-siembra; 147 días post-siembra) para los sitios a) Moscoso-Molina y b) Rosello-Dalmás respectivamente.

Figura No. 10. Dinámica de acumulación de biomasa

4.2.4. Nitrógeno

En el estado de C1 en el sitio Moscoso-Molina el cultivo absorbió en promedio 11 Kg N ha⁻¹, mientras que en el sitio Rosello-Dalmás la absorción fue de 9 Kg N ha⁻¹. Estos valores, en comparación con los datos publicados por Ferreira y Ernst (2014), son

valores bajos, pero razonables, considerando los valores de biomasa acumulados. En floración, al igual que la biomasa, aumentó la brecha entre ambos sitios, habiendo absorbido en términos medios 126 Kg N ha⁻¹, el cultivo en Moscoso-Molina y 59 Kg N ha⁻¹ en Rosello-Dalmás. Fue posible encontrar diferencias entre tratamientos para ambos momentos, en ambos sitios (Cuadro No. 10).

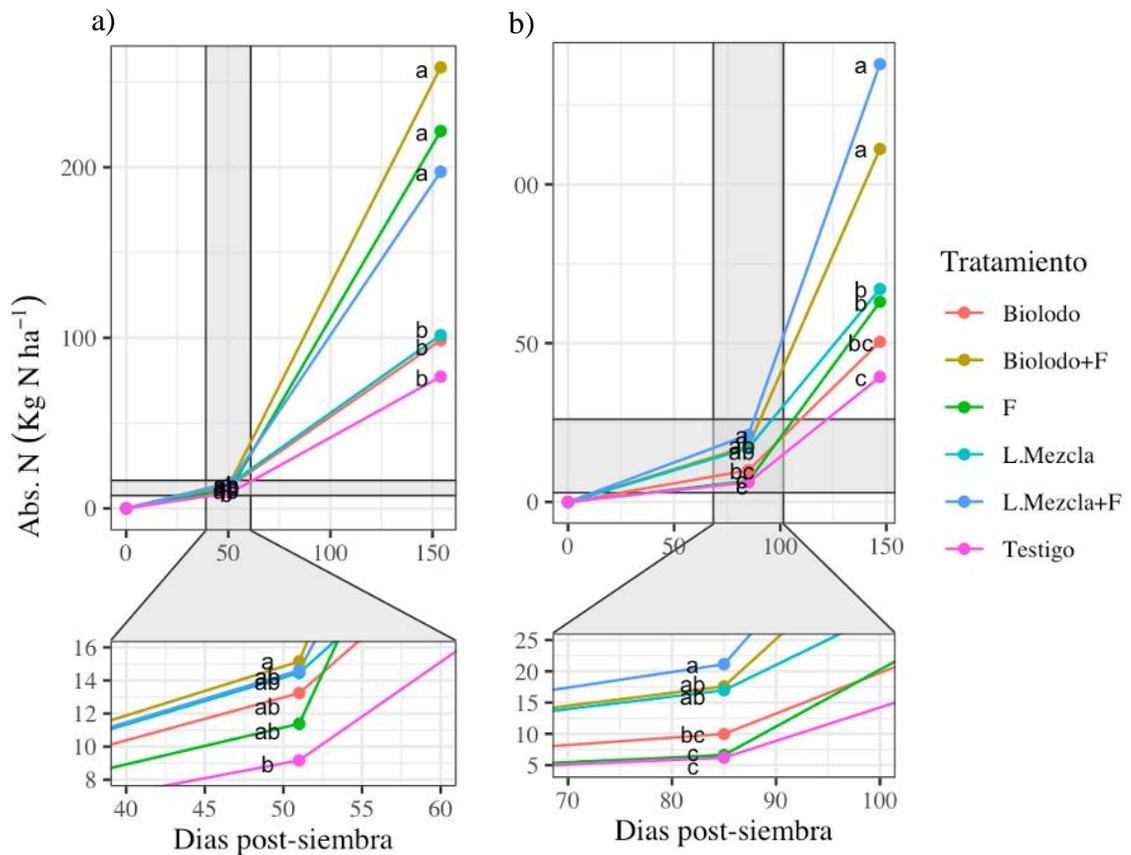
Cuadro No. 10. Parámetros estadísticos y p-valor de la prueba F de Fisher para la variable absorción de nitrógeno

Variable	Variable	KgN C1 MM	KgN C1 RD	KgN Flor.MM	KgN Flor. RD
Promedio	KgN ha ⁻¹	11.1	9.4	125.7	59.4
Máximo		29.8	35.8	360.8	222.2
Mínimo		2.7	1.0	28.4	9.9
SD		5.1	7.1	80.6	38.3
CV(%)	%	45.5	75.0	64.1	64.4
p-valor		0.012	<0.001	<0.001	<0.001

En dos estados diferentes del cultivo (C1 y F1), en dos sitios experimentales (MM=Moscoso-Molina y RD=Rosello-Dalmás).

En el sitio Moscoso-Molina, se encontraron diferencias en la absorción de N en C1, donde el tratamiento Biolodo + F fue superior al Testigo, los demás tratamientos no presentaron diferencias entre ellos ni con el resto. En floración se diferenciaron significativamente tres tratamientos superiores, solo fertilizante y las combinaciones de lodos y fertilizante, se diferencian de los tratamientos Testigo, Biolodo y Lodo mezcla (Figura No. 11).

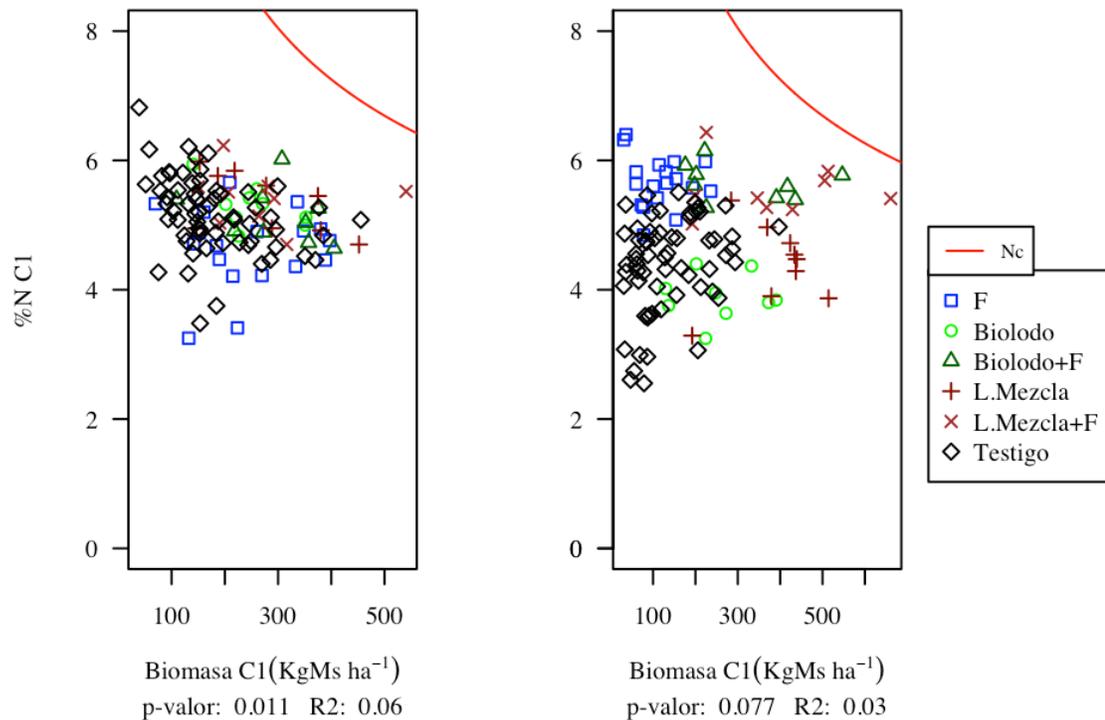
Por otra parte, en el ensayo del sitio Rosello-Dalmás, en C1, los tratamientos Lodos + fertilizante, y Lodo mezcla, fueron superiores a los tratamientos Testigo y solo fertilizante, mientras que Biolodo no presentó diferencias significativas con el resto. Cabe mencionar que si se identificaron diferencias entre este último y la combinación Lodo mezcla + F, la cual fue superior. Finalmente, en la absorción de N en floración, sobre todos los tratamientos analizados, se destacan las combinaciones de lodos y fertilizantes, y no se diferencian las aplicaciones únicamente lodo del tratamiento solo fertilizante, aunque el tratamiento Biolodo, tampoco presenta diferencias con el Testigo.



Dos momentos evaluados, C1 (51 días post-siembra;85 días post-siembra) y floración (154 días post-siembra;147 días post-siembra) para los sitios a) Moscoso-Molina y b) Rosello-Dalmás.

Figura No. 11. Dinámica de la absorción de nitrógeno

En ninguno de los sitios existió una relación clara entre el contenido de nitrógeno en planta y la biomasa entre los diferentes tratamientos. Asimismo, el tratamiento testigo, agrupó bajos valores de concentración de nitrógeno y bajos valores de biomasa acumulada. Por otra parte, en el sitio Rosello-Dalmás, los tratamientos que incluyeron la fertilización temprana de los lodos presentaron valores de biomasa mayores, con concentraciones de nitrógeno similares. Esto puede ser explicado por un aporte de nutrientes previo a la fertilización por parte de ambos lodos aplicados. Todos los tratamientos en ambos sitios alcanzaron valores de concentración de nitrógeno inferiores a la curva de dilución propuesta por Ferreira y Ernst (2014) como se presenta en la Figura No. 12.



Moscoso-Molina (izq.) y Rosello-Dalmás (der.). En rojo se representa la curva de dilución propuesta para colza por Ferreira y Ernst (2014).

Figura No. 12. Relación entre concentración de nitrógeno en planta evaluado en C1 y biomasa acumulada a C1

Para ambos sitios la variable INN, se encontró debajo del óptimo para la producción de biomasa reportado por Ferreira y Ernst (2014), para el cultivo de colza, encontrándose en promedio 0,55 en el sitio Moscoso-Molina, y 0,48 en el sitio Rosello-Dalmás. Si bien ambos sitios registraron valores similares, el sitio Rosello-Dalmás registró mínimos inferiores. Ambos sitios indican diferencias significativas entre los tratamientos (Cuadro No. 11).

Cuadro No. 11. Parámetros estadísticos y p-valor de la prueba F de Fisher para la variable INN en dos sitios experimentales

	INN Moscoso-Molina	INN Rosello-Dalmás
Promedio	0.553	0.481
Máximo	0.849	0.895
Mínimo	0.301	0.166
SD	0.1	0.162
CV(%)	18.1	33.8
p-valor	0.011	0.001

Mientras que el ensayo Moscoso-Molina no presentó diferencias entre tratamientos para esta variable, el sitio Rosello-Dalmás si presentó diferencias significativas entre los tratamientos lodos y fertilizante, y el tratamiento testigo, siendo este último significativamente inferior. El tratamiento Lodo mezcla, si bien es el lodo de menor concentración de nitrógeno, presentó un valor de INN superior al testigo. Esto puede deberse a aportes de otros nutrientes limitante por parte del lodo en etapas tempranas.

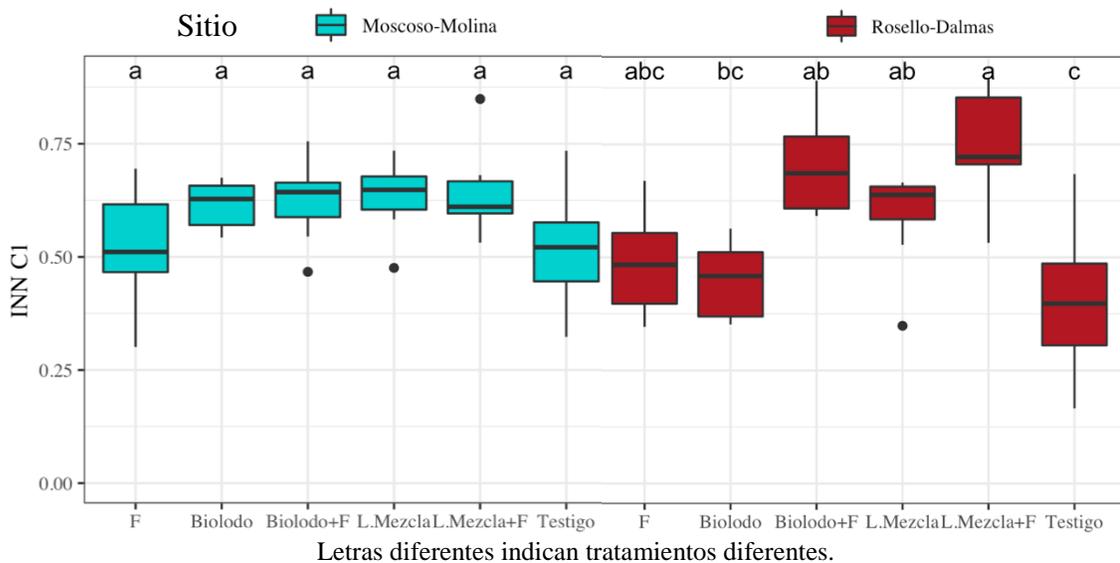
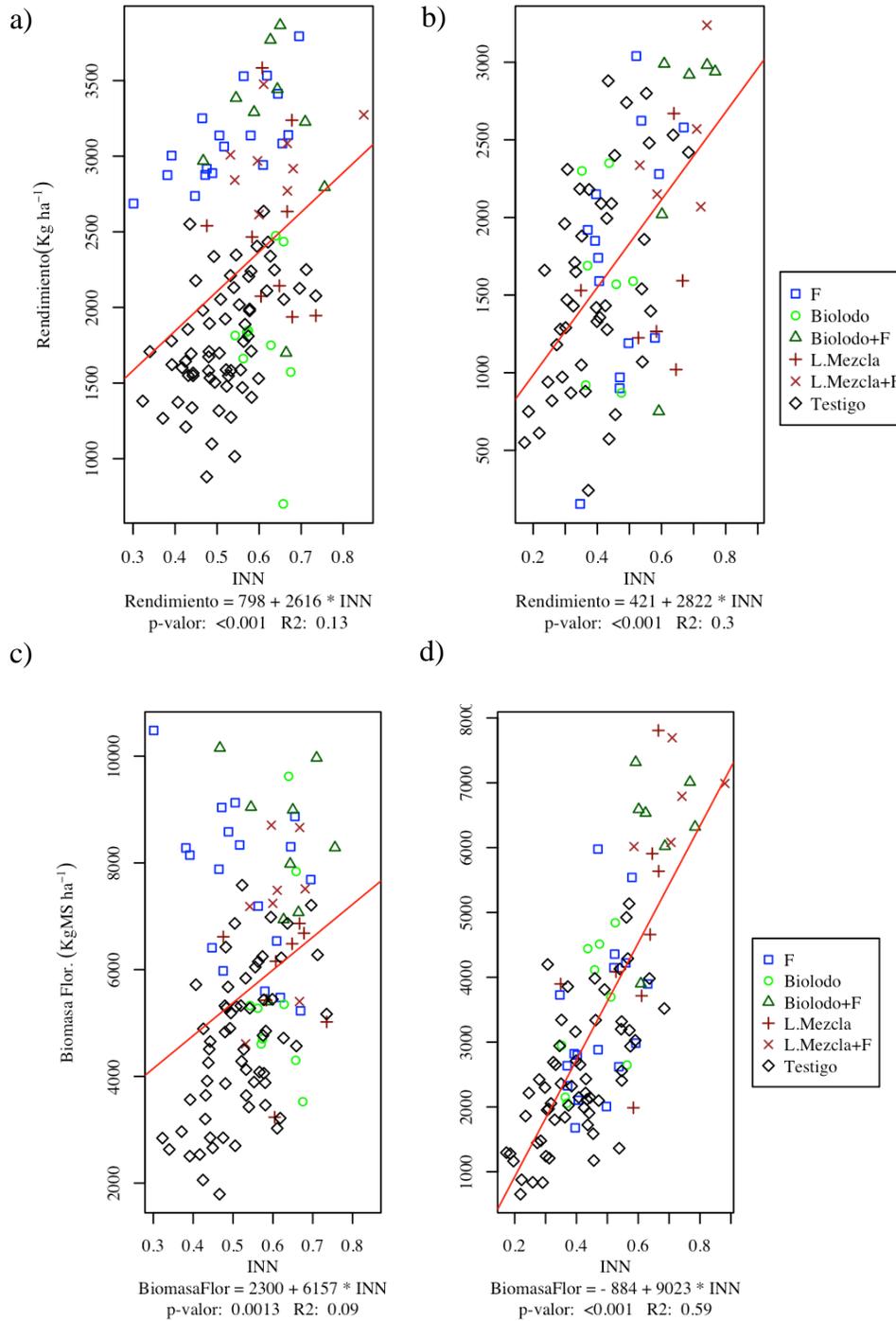


Figura No. 13. Boxplot para la variable INN en C1, analizado por tratamiento en ambos sitios

El valor de INN presentó correlaciones con el rendimiento logrado en ambos sitios, aunque dicha regresión, presentó un mayor coeficiente de determinación en el sitio Rosello-Dalmás. Por lo tanto, en dicho sitio se observó una mejor respuesta en

rendimiento, frente a una mejora en la suficiencia de nitrógeno. Sin embargo, en este sitio, el tratamiento solo fertilizante no logró concentrar rendimientos mayores, hecho sí ocurrido en el sitio Moscoso-Molina. Esto puede estar relacionado con la demora explicada en la aplicación de fertilizante en el sitio Rosello-Dalmás, lo que posiblemente determinó una mayor cantidad de sitios con altos valores de INN y mejores rendimientos de los tratamientos lodos en combinación con fertilizante. Se observó una correlación levemente más ajustada en ambos sitios, con la variable de respuesta biomasa acumulada a floración que la encontrada para rendimiento (Figura No. 14).



a y c) Moscoso-Molina, b y d) Rosello-Dalmás.

Figura No. 14. Relación entre el índice de nutrición nitrogenada (C1) y el rendimiento, y relación entre el índice de nutrición nitrogenada (C1) y biomasa acumulada a floración

4.2.5. Fósforo

Los valores de P absorbido estuvieron entre 0,32 y 2,95 kg P ha⁻¹ en C1 y entre 3,7 y 33,8 kg P ha⁻¹ en floración para el sitio Moscoso-Molina mientras que para el sitio Rosello-Dalmás la absorción en floración se ubicó en el rango entre 24,6 y 1,2 kg P ha⁻¹ (Cuadro No. 12). Los valores obtenidos en C1, se encuentran en el rango reportado por Thomas (1984) para colza, aunque se debe considerar una mayor concentración debido a los bajos valores de biomasa alcanzados en este estadio. Para floración, las concentraciones de fósforo se encuentran aproximadamente un 50% debajo de los niveles observado por García Ciudad et al. (2008), en el cultivo de colza.

Cuadro No. 12. Parámetros estadísticos y p-valor de la prueba F de Fisher para la concentración y la absorción de fósforo

	%P C1 MM	KgP C1 MM	%P Flor. MM	KgP Flor. MM	%P Flor. RD	KgP Flor. RD
Promedio	0.49	1.06	0.23	13.1	0.20	7.7
Máximo	0.73	2.95	0.46	33.8	0.36	24.6
Mínimo	0.30	0.32	0.15	3.7	0.07	1.2
SD	0.09	0.51	0.05	6.0	0.06	5.9
CV(%)	18	48	22	46	30	76
p-valor	0.003	0.006	0.057	<0.001	0.017	<0.001

Dos estados diferentes del cultivo (C1 y F1), en dos sitios experimentales (MM=Moscoso-Molina y RD=Rosello-Dalmás).

En términos absolutos, la absorción de kg P ha⁻¹ es significativamente mayor a partir de C1 hasta floración. Sin embargo, en términos relativos a la biomasa acumulada, en C1 la concentración de P es mucho mayor que en floración ya que hubo un efecto dilución con el transcurso del ciclo y el aumento de la biomasa acumulada, pero dicha concentración no se diferencia en el sitio Moscoso-Molina (Figura No. 15). Finalmente se observa una notoria superioridad en la absorción lograda a floración de los tratamientos fertilizados sobre los lodos solos y el testigo, tal diferencia podría ser explicada por el menor aporte de N de dichos tratamientos, logrando una menor acumulación de biomasa y con esto una menor absorción absoluta de P.

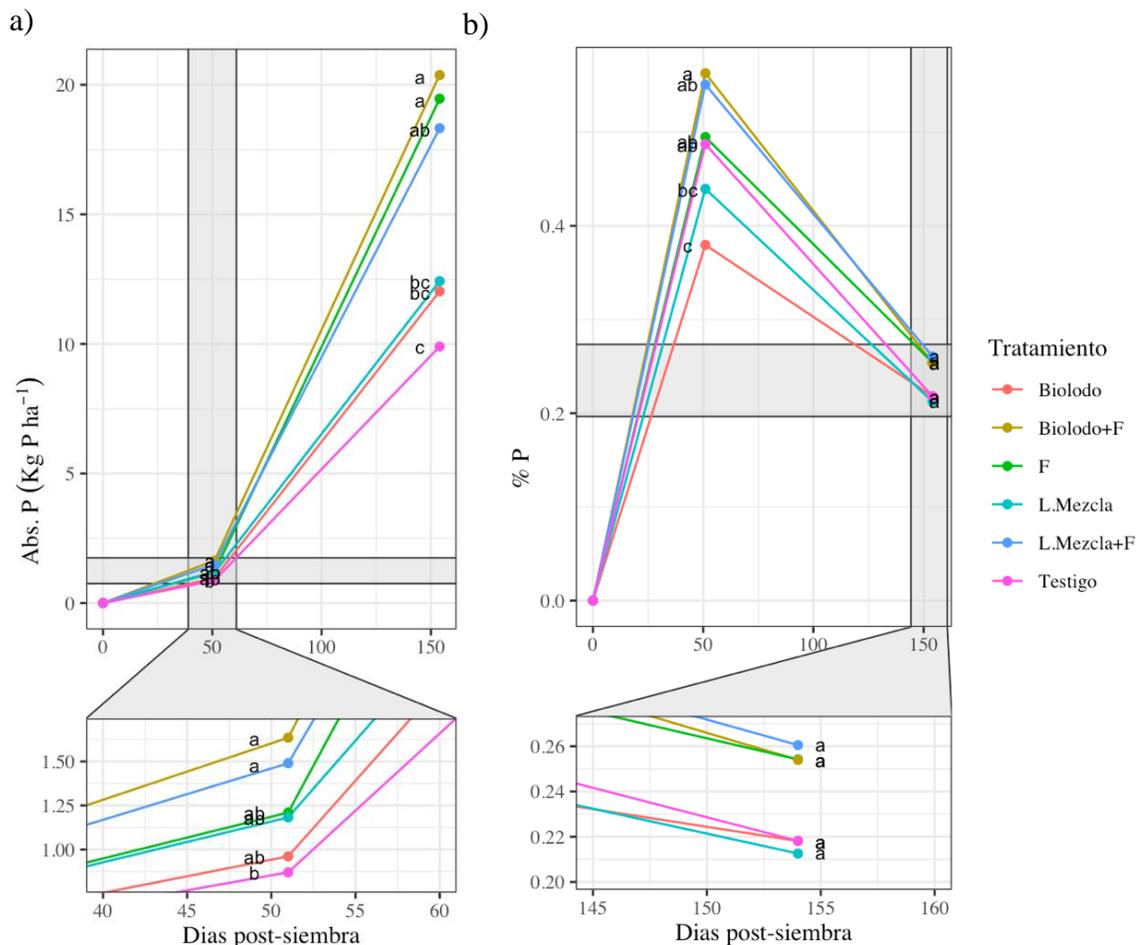


Figura No. 15. Dinámica de a) absorción y b) concentración en planta, de fósforo, en los estados C1 (51 días post-siembra) y floración (154 días post-siembra) en el sitio Moscoso-Molina

En el sitio Rosello-Dalmás, se observa una mayor absorción en términos absolutos por parte de los tratamientos lodos más fertilizante dado que estos fueron capaces de aportar nutrientes en etapas tempranas debido a la fertilización tardía en dicho sitio, lo que provoca que de igual forma se destaquen los tratamientos lodos más fertilizantes y Lodo mezcla, sobre el tratamiento solo fertilizante en cuanto al contenido relativo de fósforo. La ausencia de diferencias en rendimiento para el tratamiento Lodo mezcla, a pesar del mayor contenido relativo de fósforo, podría sugerir que un menor aporte de nitrógeno fue la limitante del resultado de este (Figura No. 16).

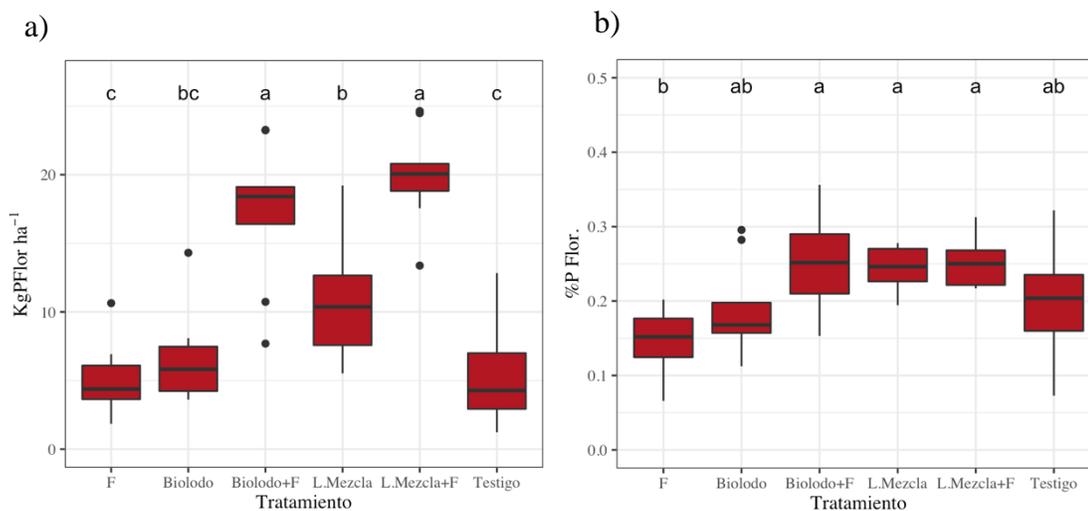
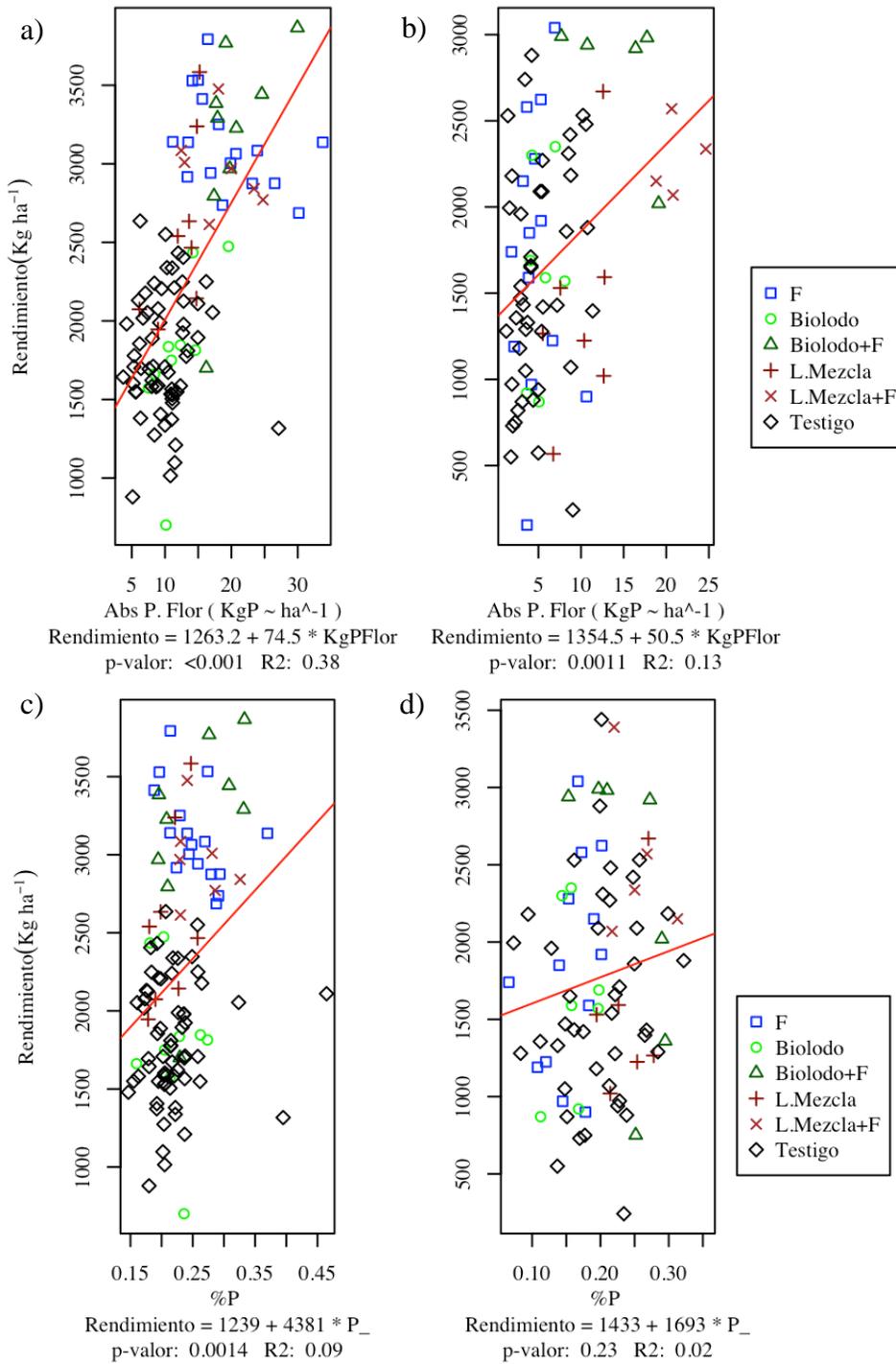


Figura No. 16. Boxplot para las variables a) absorción y b) concentración de fósforo en planta en floración, en cada tratamiento, en el sitio Rosello-Dalmás. Letras diferentes indican tratamientos diferentes

Se observó una correlación alta y positiva en ambos sitios entre el aumento en la absorción de fósforo y el rendimiento (Figura No. 17). En cuanto a la concentración de fósforo en floración para el sitio Moscoso-Molina, existió una correlación positiva con el rendimiento en donde se aprecia que los tratamientos con fertilizante tuvieron una mayor concentración y mayor rendimiento, sucediendo lo contrario con los testigos. Para el sitio Rosello-Dalmás la relación sigue siendo positiva, pero con un menor coeficiente de correlación y sin ningún agrupamiento detectable de los tratamientos.



a y c) Moscoso-Molina, b y d) Rosello-Dalmás.

Figura No. 17. Relación entre el rendimiento en grano y absorción de fósforo a floración, y relación entre el rendimiento en granos y la concentración de fósforo en floración

5. CONCLUSIONES

Para la zafra 2019, en la cual se realizaron los ensayos, las condiciones de precipitación ocurridas durante fines de abril y principios de mayo perjudicaron la implantación en el sitio Moscoso-Molina. En cambio, para Rosello-Dalmás, postergaron la fecha óptima de siembra, condicionando el rendimiento potencial del cultivo. Asimismo, la baja radiación con respecto a la media histórica en los meses en los cuales se ubicó el período crítico en ambos sitios afectó el rendimiento potencial para la zafra.

Los tratamientos evaluados presentaron diferencias en ambos sitios para las variables analizadas. En cuanto al rendimiento, los tratamientos que incluyeron fertilizantes se destacaron sobre el resto, surgiendo la hipótesis de un escaso aporte de nitrógeno por parte de los lodos. El tratamiento que logró mayor rendimiento frente al testigo fue Lodo mezcla en el sitio Moscoso-Molina, el cual tuvo un aumento de 721 Kg ha⁻¹, presentando una eficiencia agronómica de 7,6 kilogramos de aumento en rendimiento por kilogramo de nutriente aplicado para el caso del nitrógeno y 24,3 kilogramos de rendimiento por kilogramo de fósforo aplicado. Sin embargo, no se encontraron diferencias en el otro sitio experimental, sucediendo algo similar con el tratamiento Biolodo. La variable biomasa, se diferenció considerablemente entre tratamientos, destacándose los tratamientos en combinaciones con lodos. En el sitio Rosello-Dalmás los tratamientos con lodos lograron producciones de biomasa significativamente superiores, lo que puede explicarse por el aporte que fueron capaces de dar los lodos en el período entre la siembra y la fertilización del cultivo en ese sitio, dado que no fue fertilizado a siembra. A su vez, las condiciones posteriores a la floración no fueron favorables como para concretar el potencial. De igual forma, los diferentes tratamientos provocaron diferencias en la absorción de nitrógeno y fósforo, donde nuevamente se destacaron las combinaciones de lodos y fertilizantes, principalmente debido a la mayor biomasa acumulada por dichos tratamientos, aunque las diferencias observadas fueron mayores en el sitio Rosello-Dalmás, consecuencia del manejo tardío de la fertilización.

Dentro de las interacciones analizadas, se encontraron relaciones entre el rendimiento y las variables evaluadas. Para el caso del sitio Rosello-Dalmás, donde los lodos lograron efectuar aporte inicial de N al cultivo, el parámetro INN en C1, se relacionó más con la biomasa lograda posteriormente en floración, pudiendo inferir en este sitio una menor capacidad de aporte de N del suelo, a pesar de no ser tan fuerte la correlación con el rendimiento. Para el caso de fósforo también existió una correlación entre la absorción y concentración de este nutriente y las variables de respuesta, pero no fue significativo el impacto en el rendimiento, dada la limitante observada en la absorción de nitrógeno.

Las respuestas observadas al agregado de lodos fueron variables, permitiendo la formulación de diferentes hipótesis para sus causas. Sin embargo, con la información disponible no ha sido posible determinar de forma consistente que nutriente limitó las

respuestas en algunas situaciones, o si se tratase de algún efecto negativo por parte de ciertos lodos. Por estos motivos, se rechaza la hipótesis de trabajo ya que de la forma y las dosis que fueron agregados, lo lodos no lograron sustituir los fertilizantes químicos en su totalidad. Los nuevos trabajos por explorar deberían considerar el uso combinado de fuentes de nutrientes y/o dosis de lodos mayores.

6. RESUMEN

En el último tiempo, la creciente demanda y agotamiento de recursos no renovables como fuente de energía se ha sumado a una fuerte preocupación por el impacto ambiental de la quema de combustibles fósiles. Esto ha llevado a la búsqueda de alternativas para obtener dichos combustibles a partir de fuentes renovables. Entre estas últimas se encuentra la producción de biocombustibles a partir de carinata (*Brassica carinata*). Se trata de un cultivo nuevo en el país, especialmente en lo que concierne a su producción. Asimismo, constituye una opción como cultivo de invierno, presentando ventajas agronómicas y económicas respecto a *Brassica napus*, lo que genera especial interés en los productores uruguayos. El presente trabajo consistió en evaluar la utilización de dos tipos diferentes de lodos, ambos provenientes de desechos de la industria de celulosa, con el objetivo de ser utilizados como enmiendas orgánicas que permitan una sustitución parcial o incluso total de fertilizantes inorgánicos en cultivos de invierno. Así, durante la zafra de 2019 se instalaron dos experimentos, uno en el departamento de Flores y otro en el departamento de Colonia. En cada ensayo se sembraron un total de 13 fajas de 30 m de ancho por 400 m de largo, atravesando dos ambientes de producción previamente definidos. Los tratamientos fueron aplicados en dichas fajas. Estos consistieron en dos tipos de lodos por separado, cada uno en combinación con fertilizante; tratamientos solo con fertilizante comercial y tratamientos testigo intercalados. El diseño experimental que se utilizó fue diseño de testigos apareados al azar. Es decir, se ubicó de forma aleatoria el conjunto de tratamientos a evaluar, siempre intercalando con ellos un testigo común. Se analizaron así cinco variables de respuesta, las cuales se consideraron de máxima importancia: la población, el rendimiento en grano, la biomasa acumulada, el nitrógeno absorbido, la absorción y concentración de fósforo y finalmente la relación de estas con el rendimiento. Dicho análisis arrojó resultados sobre las variables en las que la aplicación de lodos causó mayor efecto, así como también sobre posibles interacciones entre dichas variables. Las respuestas observadas al agregado de lodos fueron variables. Con la información disponible no fue posible determinar de forma consistente que nutriente limitó las respuestas en algunas situaciones, o si se tratase de algún efecto negativo por parte de ciertos lodos. Por estos motivos, se rechazó la hipótesis de trabajo ya que de la forma y las dosis que fueron agregados, los lodos no lograron sustituir los fertilizantes químicos en su totalidad.

Palabras clave: *Brassica carinata*; Nitrógeno; Fósforo; Rendimiento; Enmiendas; Lodos.

7. SUMMARY

In the last couple of years, there has been both growing demand and depletion of non-renewable resources as a source of energy, which added to the increasing concern for the environmental impact of burning fossil fuels, has led to the search for alternative renewable sources. Amongst these new sources, we can find the production of biofuels from *Brassica carinata*. The latter is emerging in the country, especially with regards to its production, which introduces advantages to crop rotation, particularly since it constitutes an advantageous alternative as a winter crop. This makes it highly noteworthy for Uruguayan farmers, who see in it great agronomic and economic advantages over *Brassica napus*. The aim of this work was to evaluate the use of two different types of sludge obtained from pulp industry waste, which were used as organic amendments that would allow for a partial or even total replacement of inorganic fertilizers in winter crops. To do so, during 2019's winter harvest two trials were carried out, each in a different province: one in Flores and the other in Colonia. In each of them, a total of 13 strips of 30 m wide by 400 m long were planted, crossing two previously defined production environments. The treatments used were applications in those strips. Such treatments consisted of two different types of sludge, each in a combination with fertilizer: treatments only with commercial fertilizer and control treatments. What is more, the experimental design used was a paired plot design with interspersed control treatments. In other words, a set of treatments was randomly placed for evaluation, always inserting a common control in between them. Considering that they were of utmost importance, five different response variables were analyzed: population, performance, biomass, absorbed nitrogen, absorbed phosphorus and concentration, and finally, their relationship with performance. The results of the analysis were of extreme richness; for instance, it showed which were the variables where the application of sludge caused a greater impact of response, as well as data about the possible interaction between the variables. The available information was not enough to consistently determine which nutrient was limiting the response in particular situations or determine if the sludges had some negative effect on the crop. Therefore, the hypothesis was rejected, as the sludges could not replace totally nor partially the chemical fertilizers.

Keywords: *Brassica carinata*; Nitrogen; Phosphorus; Yield; Amendments; Sludge.

8. BIBLIOGRAFÍA

1. Agrisoma, US. 2017. Southeastern US 2017-18 Carinata Management Handbook. (en línea). Tifton, US. 33 p. Consultado mar. 2020. Disponible en https://agrisoma.com/wp-content/uploads/2018/10/2017_18_SE_Handbook.pdf
2. Amador, A. 2017. Valorización de lodos de depuradora como fertilizante en el marco de la economía circular de residuo a recurso. (en línea). Tesis PhD. Santiago de Compostela, España. Universidad de Santiago de Compostela. pp. 116-183. Consultado jun. 2020. Disponible en <https://docplayer.es/77540368-Tesis-doctoral-tesis-doctoral.html>
3. Arshad, M. A.; Gill, K. S. 1997. Barley, canola and wheat production under different tillage-fallow-green manure combinations on a clay soil in a cold, semiarid climate. (en línea). Soil and Tillage Research. 43(3-4):263-275. Consultado mar. 2020. Disponible en [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(97\)00017-2](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(97)00017-2)
4. Brentrup, F. 2008. Fertilizer, Biomass and CO2 Emission. In: IFA Technical Symposium (37th., 2008, San Pablo, Brazil). Proceedings. San Pablo, Brazil, International Fertilizers Association. pp. 4-10
5. Burzaco, J. P.; Ciampitti, I.; Garcia, F. 2009. Mejores practicas de manejo para la nutricion del cultivo de colza-canola: una revision. (en línea). IPNI Cono Sur. 3(13):1-8. Consultado mar. 2020. Disponible en [http://lacs.ipni.net/ipniweb/region/lacs.nsf/0/5751B09C6A6E7F2103257967004A184C/\\$FILE/AA_13.pdf](http://lacs.ipni.net/ipniweb/region/lacs.nsf/0/5751B09C6A6E7F2103257967004A184C/$FILE/AA_13.pdf)
6. Camberato, J. J.; Gagnon, B.; Angers, D. A.; Chantigny, M. H.; Pan, W. L. 2006. Pulp and paper mill by-products as soil amendments and plant nutrient sources. (en línea). Canadian Journal of Soil Science. 86(4):641-653. Consultado may. 2020. Disponible en <https://doi.org/10.4141/S05-120>
7. Canola Council of Canada, CA. 2020. Canola grower's manual. (en línea). Winnipeg, Canada. s.p. Consultado mar. 2020. Disponible en <https://www.canolacouncil.org/canola-encyclopedia/crop-nutrition/crop-nutrition/>
8. Cardone, M.; Mazzoncini, M.; Menini, S.; Rocco, V.; Senatore, A.; Seggiani, M.; Vitolo, S. 2003. *Brassica carinata* as an alternative oil crop for the production of biodiesel in Italy: agronomic evaluation, fuel production by transesterification and characterization. (en línea). Biomass and Bioenergy. 25(6):623-636. Consultado abr. 2020. Disponible en

[https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(03\)00058-8](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(03)00058-8)

9. Cassel, D. K.; Wendroth, O.; Nielsen, D. R. 2000. Assessing Spatial Variability in an Agricultural Experiment Station Field Opportunities Arising from Spatial Dependence. *Agronomy Journal*. 92(4):706-714.
10. Castro, M. 2018. ¿Puede *Brassica carinata*, una nueva oleaginosa de invierno, contribuir a la diversificación del sistema agrícola? In: Encuentro Nacional de la Mesa Tecnológica de Oleaginosos (7º, 2018, Montevideo). Trabajos presentados. Montevideo, Mesa Tecnológica de Oleaginosos. pp 5-12.
11. CETIOM (Centre Technique Interprofessionnel des Oléagineux Métropolitains, FR). 1978. Colza d'hiver. Toulouse, France, INRA. 30 p. (Cahier Technique)
12. Colomer, J. S.; Castillo, J.; Iriarte, L.; Villegas, N. 2010. Cultivo de colza bajo riego en Mendoza. (en línea). Junin, Argentina. INTA. 53 p. Consultado abr. 2020. Disponible en https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-cultivo_de_colza_bajo_riego_en_mendoza.pdf
13. Cook, D. 1977. Detection of Influential Observation in Linear Regression. (en línea). *Technometrics*. 19(1):15-18. Consultado may. 2020. Disponible en <https://www.jstor.org/stable/1268249?seq=1>
14. Di Rienzo, J.; Macchiavelli, R.; Casanoves, F. 2011. Modelos mixtos en Infostat. manual de usuario. Córdoba, Argentina, Brujas. pp. 182-193.
15. Dreccer, M. F.; Fainges, J.; Whish, J.; Ogbonnaya, F. C.; Sadras, V. O. 2018. Comparison of sensitive stages of wheat, barley, canola, chickpea and field pea to temperature and water stress across Australia. (en línea) *Agricultural and Forest Meteorology*. 248(17):275-294. Consultado abr. 2020. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.10.006>
16. Drinkwater, L. E. 2002. Cropping systems research: Reconsidering agricultural experimental approaches. (en línea). *HortTechnology*. 12(3):355-361. Consultado abr. 2020. Disponible en <https://doi.org/10.21273/horttech.12.3.355>
17. Falasca, S.; Ulberich, A. 2010. La producción de mostaza etíope (*Brassica carinata*) en Argentina como cultivo energético. (en línea). *Revista Geográfica*. 148:7-22. Consultado mar. 2020. Disponible en <http://proxy.timbo.org.uy/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edsjsr&AN=edsjsr.40996825&lang=es&site=eds-live>

18. Faubert, P.; Lemay-Bélisle, C.; Bertrand, N.; Bouchard, S.; Chantigny, M. H.; Durocher, S.; Paré, M. C.; Rochette, P.; Tremblay, P.; Ziadi, N.; Villeneuve, C. 2017. Greenhouse gas emissions following land application of pulp and paper mill sludge on a clay loam soil. (en línea). *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 250:102-112. Consultado abr. 2020. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.07.040>
19. Ferreira, G.; Ernst, O. 2014. Diagnóstico del estado nutricional del cultivo de colza (*Brassica napus*) en base a curvas de dilución de nitrógeno y azufre. (en línea). *Agrociencia (Uruguay)*. 18(1):65-74. Consultado mar. 2020. Disponible en <https://doi.org/10.2477/vol18iss1pp75-85>
20. Fooladi-Vanda, S.; Aynehband, A.; Naraki, F. 2009. Effects of tillage method, seed rate and microelement spraying time on grain yield and yield components of rapeseed (*Brassica napus*) in warm dryland condition. *Journal of Food, Agriculture and Environment*. 7(4):627-633.
21. Fridgen, J. J.; Kitchen, N. R.; Sudduth, K. A.; Drummond, S. T.; Wiebold, W. J.; Fraisse, C. W. 2004. Management Zone Analyst (MZA): software for Subfield Management Zone Delineation. (en línea). *Agronomy Journal*. 96(1):100-108. Consultado may. 2020. Disponible en <https://doi.org/10.2134/agronj2004.0100>
22. FUCREA (Federación Uruguaya de Grupos CREA, UY). 2019. Análisis de la zafra 2018, en el contexto de los resultados históricos de FUCREA. In: *Jornada de Cultivos de Invierno INIA - CREA (2019, Mercedes, Uruguay)*. Trabajos presentados. Mercedes, FUCREA. pp. 8-32.
23. García Ciudad, A.; García Criado, B.; García Criado, L.; Petisco, C.; Vázquez de Aldana, B. R. 2008. Efecto de la fertilización en la producción de biomasa aérea y concentraciones de nitrógeno y fósforo en plantas de colza. (en línea). Huesca, Sociedad Española para el Estudio de los Pastos. pp. 237-244. Consultado abr. 2020. Disponible en <https://digital.csic.es/handle/10261/28993>
24. García, F.; Correndo, A. 2016. Cálculo de requerimientos nutricionales. (en línea). Buenos Aires, International Plan Nutrition Institute - Cono Sur. s.p. Consultado mar. 2020. Disponible en <http://lacs.ipni.net/article/LACS-1024 - :-:~:text=En caso de la necesidad,unos 265 kg N%2Fha>.
25. Garitano, X. 2018. Servicios de posicionamiento GNSS y usos de la teledetección en la agricultura de precisión. *Revista Mapping*. 27:18-23.

26. Gavioli, A.; de Souza, E. G.; Bazzi, C. L.; Schenatto, K.; Betzek, N. M. 2019. Identification of management zones in precision agriculture: an evaluation of alternative cluster analysis methods. (en línea). *Biosystems Engineering*. 181:86-102. Consultado may. 2020. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.02.019>
27. Gesch, R. W.; Isbell, T. A.; Oblath, E. A.; Allen, B. L.; Archer, D. W.; Brown, J.; Hatfield, J. L.; Jabro, J. D.; Kiniry, J. R.; Long, D. S.; Vigil, M. F. 2015. Comparison of several Brassica species in the north central U.S. for potential jet fuel feedstock. (en línea). *Industrial Crops and Products*. 75:2-7. Consultado mar. 2020. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.05.084>
28. Gili, A.; Álvarez, C.; Bagnato, R.; Noellemeyer, E. 2017. Comparison of three methods for delineating management zones for site-specific crop management. (en línea). *Computers and Electronics in Agriculture*. 139:213-223. Consultado may. 2020. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.05.022>
29. Gorelick, N.; Hancher, M.; Dixon, M.; Ilyushchenko, S.; Thau, D.; Moore, R. 2017. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. (en línea). *Remote Sensing of Environment*. 202:18-27. Consultado may. 2020. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
30. Grant, C. A.; Bailey, L. D. 1993. Fertility management in canola production. (en línea). *Canadian Journal of Plant Science*. 73(3):651-670. Consultado abr. 2020. Disponible en <https://doi.org/10.4141/cjps93-087>
31. Guastaferrero, F.; Castrignanò, A.; de Benedetto, D.; Sollitto, D.; Troccoli, A.; Cafarelli, B. 2010. A comparison of different algorithms for the delineation of management zones. (en línea). *Precision Agriculture*. 11(6):600-620. Consultado abr. 2020. Disponible en <https://doi.org/10.1007/s11119-010-9183-4>
32. INIA. GRAS (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria. Unidad de Agroclima y Sistema de Información, UY). 2020. Mapas de precipitación acumulada. (en línea). Montevideo. s.p. Consultado jun. 2020. Disponible en <http://www.inia.uy/gras/Monitoreo-Ambiental/Balance-Hídrico/Balance-hídrico-suelos-Uruguay/Balance-Hidrico-Grilla>.
33. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, CH). 2019. Summary for

Policymakers. (en línea). IPCC. no. 5. 24 p. Consultado may. 2020.
Disponble en
https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/05/SR15_SPM_version_report_LR.pdf

34. Kirkegaard, J. A.; Lilley, J. M.; Brill, R. D.; Ware, A. H.; Walela, C. K. 2018. The critical period for yield and quality determination in canola (*Brassica napus L.*). (en línea). Field Crops Research. 222:180-188. Consultado mar. 2020. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.03.018>
35. Kumar, S.; Seepaul, R.; Mulvaney, M. J.; Colvin, B.; George, S.; Marois, J. J.; Bennett, R.; Leon, R.; Wright, D. L.; Small, I. M. 2020. *Brassica carinata* genotypes demonstrate potential as a winter biofuel crop in South East United States. (en línea). Industrial Crops and Products. 150(8):s.p. Consultado mar. 2020. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112353>
36. MacGeehan, S. L. 2012. Impact of waste materials and organic amendments on soil properties and vegetative performance. (en línea). Applied and Environmental Soil Science. 2012(1):s.p. Consultado abr. 2020. Disponible en <https://doi.org/10.1155/2012/907831>
37. Marillia, E. F.; Francis, T.; Falk, K. C.; Smith, M.; Taylor, D. C. 2014. Palliser's promise: *Brassica carinata*, An emerging western Canadian crop for delivery of new bio-industrial oil feedstocks. (en línea). Biocatalysis and Agricultural Biotechnology. 3(1):65-74. Consultado mar. 2020. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2013.09.012>
38. Mazzilli, S.; Hoffman, E. 2010. Respuesta a la fertilización con azufre en el cultivo de colza-canola en suelos del litoral Norte de Uruguay. Informaciones Agronómicas. no. 46:18-21.
39. _____. 2018. Conocimiento actual y desafíos para el desarrollo de Oleaginosas de invierno en Uruguay ¿ Qué trabajos de investigación hemos realizado ? In: Encuentro Nacional de la Mesa Tecnológica de Oleaginosos (7º., 2018, Montevideo). Trabajos presentados. Montevideo, Mesa Tecnológica de Oleaginosos. pp. 1-14.
40. _____. 2019. Crucíferas en Uruguay II. In: Curso de Cereales y Cultivos Industriales (2018, Paysandú). Trabajos presentados. Paysandú, FA. EEMAC. pp. 1-5.
41. _____.; Schenck, G.; Domínguez, F. 2020. *Brassica carinata L.* como alternativa de cultivo invernal: fecha de siembra y arreglo espacial.

Cangüe. no. 41:14-17.

42. Medhi, U. J.; Talukdar, A. K.; Deka, S. 2009. Agropotentiality of lime sludge waste from the paper industry. *Current Science*. 97(10):1416-1418.
43. Meikle, C.; Möller, B. 2018. Evaluación y caracterización de genotipos avanzados de *Brassica carinata* A. Braun como alternativa de producción invernal en Uruguay. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la Empresa. 73 p.
44. _____.; _____.; Stewart, S.; Vazquez, D.; Castro, M. 2019. Alternativa de producción invernal en uruguay: Carinata. *Revista INIA*. no. 57:4-8.
45. Morrison, M. J.; Stewart, D. W. 2002. Heat Stress during Flowering in Summer Brassica. (en línea). *Crop Science*. 42(3):797-803. Consultado may. 2020. Disponible en <https://doi.org/https://doi.org/10.2135/cropsci2002.7970>
46. Otero, J. L.; Andrade, M. L.; Marcet, P. 1996. Caracterización química y evaluación agronómica de dos tipos de lodos residuales. *Producción y Protección Vegetal*. 11(1):117-132.
47. Ovando, G.; Sorlino, D.; Torterolo, M. K. 2009. Ensayo comparativo tres especies *Brassica* como biodiesel Córdoba Argentina. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. 13:203-207.
48. Parker, P. 2009. Canola best practice management guide for south-eastern Australia. (en línea). Canberra, Grains Research and Development Corporation. pp. 31-81. Consultado mar. 2020. Disponible en https://grdc.com.au/data/assets/pdf_file/0016/202615/grdcanolaguide.pdf
49. Peralta, N. R.; Costa, J. L.; Balzarini, M.; Castro Franco, M.; Córdoba, M.; Bullock, D. 2015. Delineation of management zones to improve nitrogen management of wheat. (en línea). *Computers and Electronics in Agriculture*. 110:103-113. Consultado jun. 2020. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.compag.2014.10.017>
50. Perdomo, C.; Barbazán, M.; Del Pino, A. 2015. Materiales orgánicos y abonos verdes. In: *Curso de Fertilidad de Suelos* (2015, Montevideo). Trabajos presentados. Montevideo, Facultad de Agronomía. pp. 1-31.
51. Planchón, M. E.; Figares, H. J. 2004. Fertilización en colza-canola (*Brassica napus* L.). fenología y época de siembra en cultivares de *B. napus*, *B. rapa* y *B. juncea*. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de

la República. Facultad de Agronomía. 143 p.

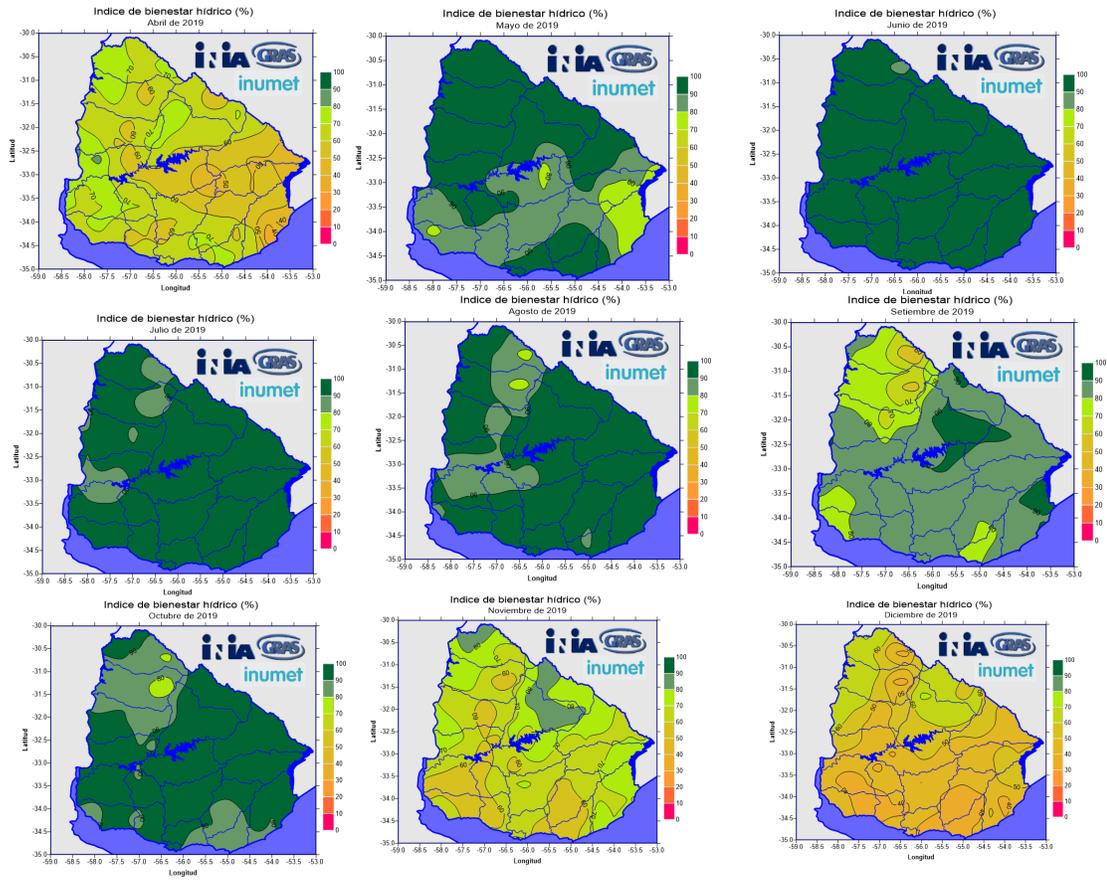
52. R Core Team. 2017. R: a Language and Environment for Statistical Computing. (en línea). Vienna, Austria, Foundation for Statistical Computing. s.p. Consultado jun. 2020. Disponible en <https://www.r-project.org/>
53. Raun, W. R.; Johnson, G. V. 1999. Improving nitrogen use efficiency for cereal production. (en línea). Agronomy Journal. 91(3):357-363. Consultado abr. 2020. Disponible en <https://doi.org/10.2134/agronj1999.00021962009100030001x>
54. Saha, S.; Moorthi, S.; Pan, H. L.; Wu, X.; Wang, J.; Nadiga, S.; Tripp, P.; Kistler, R.; Woollen, J.; Behringer, D.; Liu, H.; Stokes, D.; Grumbine, R.; Gayno, G.; Wang, J.; Hou, Y. T.; Chuang, H. Y.; Juang, H. M. H.; Sela, J.; Goldberg, M. 2010. The NCEP climate forecast system reanalysis. (en línea). Bulletin of the American Meteorological Society. 91(8):1015-1057. Consultado ago. 2020. Disponible en <https://doi.org/10.1175/2010BAMS3001.1>
55. Salcedo-Pérez, E.; Vázquez-Alarcón, A.; Krishnamurthy, L.; Zamora-Natera, F.; Hernández-Álvarez, E.; Macias, R. R. 2007. Evaluación de lodos residuales como abono orgánico en suelos volcánicos de uso agrícola y forestal en Jalisco, México. INCI. 32(2):115-120.
56. Sarandón, S. J. 2011. La agroecología: su rol en el logro de una agricultura sustentable. In: Curso de Agroecología y Agricultura Sustentable (2011, Buenos Aires). Trabajos presentados. La Plata, Universidad Nacional de La Plata. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales Prosecretaría de Posgrado. pp. 1-15.
57. Seepaul, R.; Bliss, C. M.; Wright, D. L.; Marois, J. J.; Leon, R.; Dufault, N.; George, S.; Olson, S. M. 2015. Carinata, the Jet Fuel Cover Crop 2015 Production Manual for the Southeastern United States. Gainesville, FL, USA, University of Florida. pp. 1-8.
58. _____; Sheeja, G.; Wright, D. L. 2016. Comparative response of *Brassica carinata* and *B. napus* vegetative growth, development and photosynthesis to nitrogen nutrition. (en línea). Industrial Crops and Products. 94:872-883. Consultado mar. 2020. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.09.054>
59. _____; George, S.; Small, I. M.; Mulvaney, M. J.; Leon, R. G.; Paula Moraes, S.; Geller, D.; Marois, J. J.; Wright, D. L. 2019. Carinata , the Sustainable Crop for a Bio-based Economy: 2018 - 2019 Production

Recommendations for the Southeastern United States. Gainesville, FL, USA, University of Florida. pp. 1-12.

60. Sheikh, F. A.; Bangha, S.; Banga, S. S. 2014. Broadening the genetic base of abbyssinian mustard (*Brassica carinata* A. Braun) through introgression of genes from related allotetraploid species. (en línea). Spanish Journal of Agricultural Research. 12(3):742-752. Consultado mar. 2020. Disponible en <https://doi.org/10.5424/sjar/2014123-5365>
61. Soto, G.; Meléndez, G. 2004. Cómo medir la calidad de los abonos orgánicos. Manejo Integrado de Plagas y Agroecología. no. 72:91-97.
62. Thakur, A. K.; Singh, K. H.; Sharma, D.; Parmar, N.; Nanjundan, J. 2019. Breeding and genomics interventions in Ethiopian mustard (*Brassica carinata* A. Braun) improvement - A mini review. (en línea). South African Journal of Botany. 125:457-465. Consultado mar. 2020. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2019.08.002>
63. Thomas, P. 1984. Canola growers manual. Winnipeg, Canada, Canola Council of Canada. pp. 1203-1289.
64. Torres, F. 2019. Caracterización morfológica y molecular de poblaciones de *Brassica rapa* y *Brassica napus* con resistencia a herbicidas. Tesis magíster. Bahía Blanca, Argentina. Universidad Nacional del Sur. 113 p.
65. UPM Biofuels. 2019. Guía de manejo *Brassica carinata*. s.n.t. 68 p.
66. Yost, M. A.; Kitchen, N. R.; Sudduth, K. A.; Massey, R. E.; Sadler, E. J.; Drummond, S. T.; Volkmann, M. R. 2019. A long-term precision agriculture system sustains grain profitability. (en línea). Precision Agriculture. 20(6):1177-1198. Consultado may. 2020. Disponible en <https://doi.org/10.1007/s11119-019-09649-7>
67. Zanetti, F.; Vamerali, T.; Mosca, G. 2009. Yield and oil variability in modern varieties of high-erucic winter oilseed rape (*Brassica napus* L. var. oleifera) and Ethiopian mustard (*Brassica carinata* A. Braun) under reduced agricultural inputs.(en línea). Industrial Crops and Products. 30(2):265-270. Consultado mar. 2020. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2009.05.002>

9. ANEXOS

Anexo No. 1. Evolución del Índice de Bienestar Hídrico para la zafra 2019

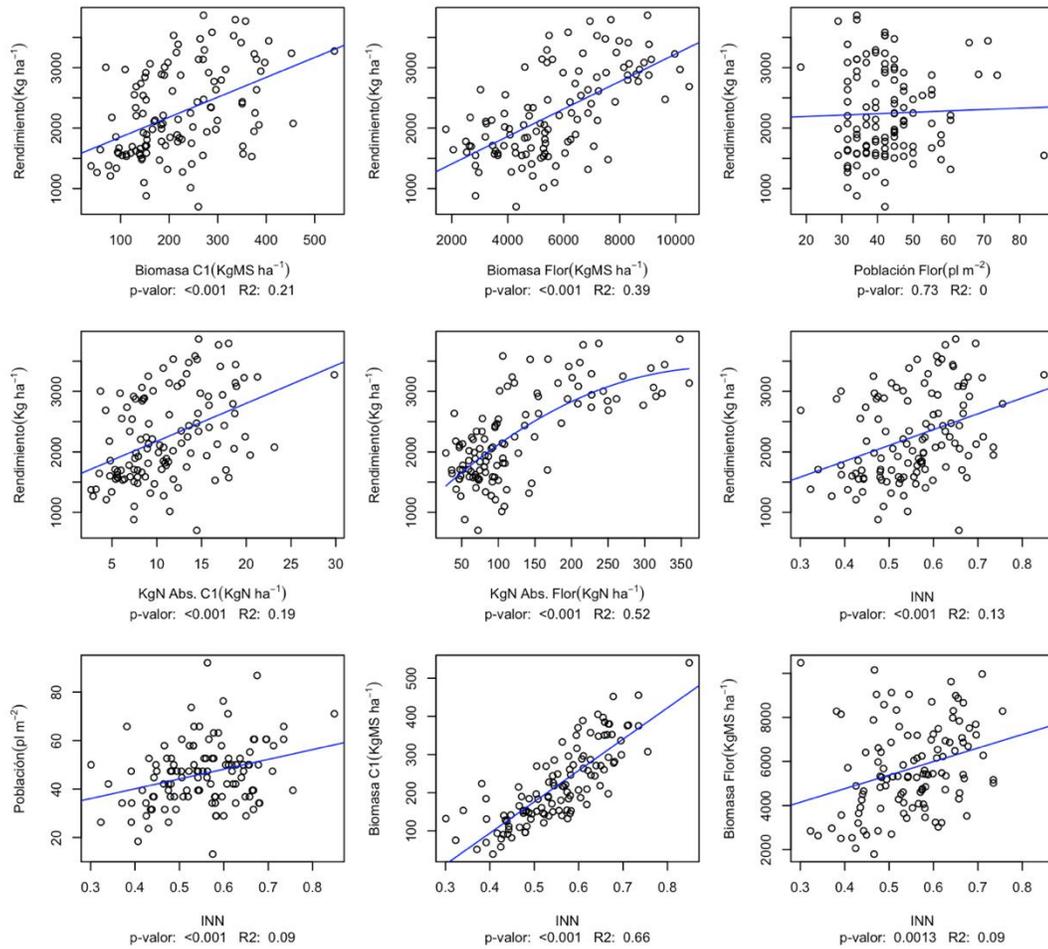


Fuente: INIA. GRAS (2020).

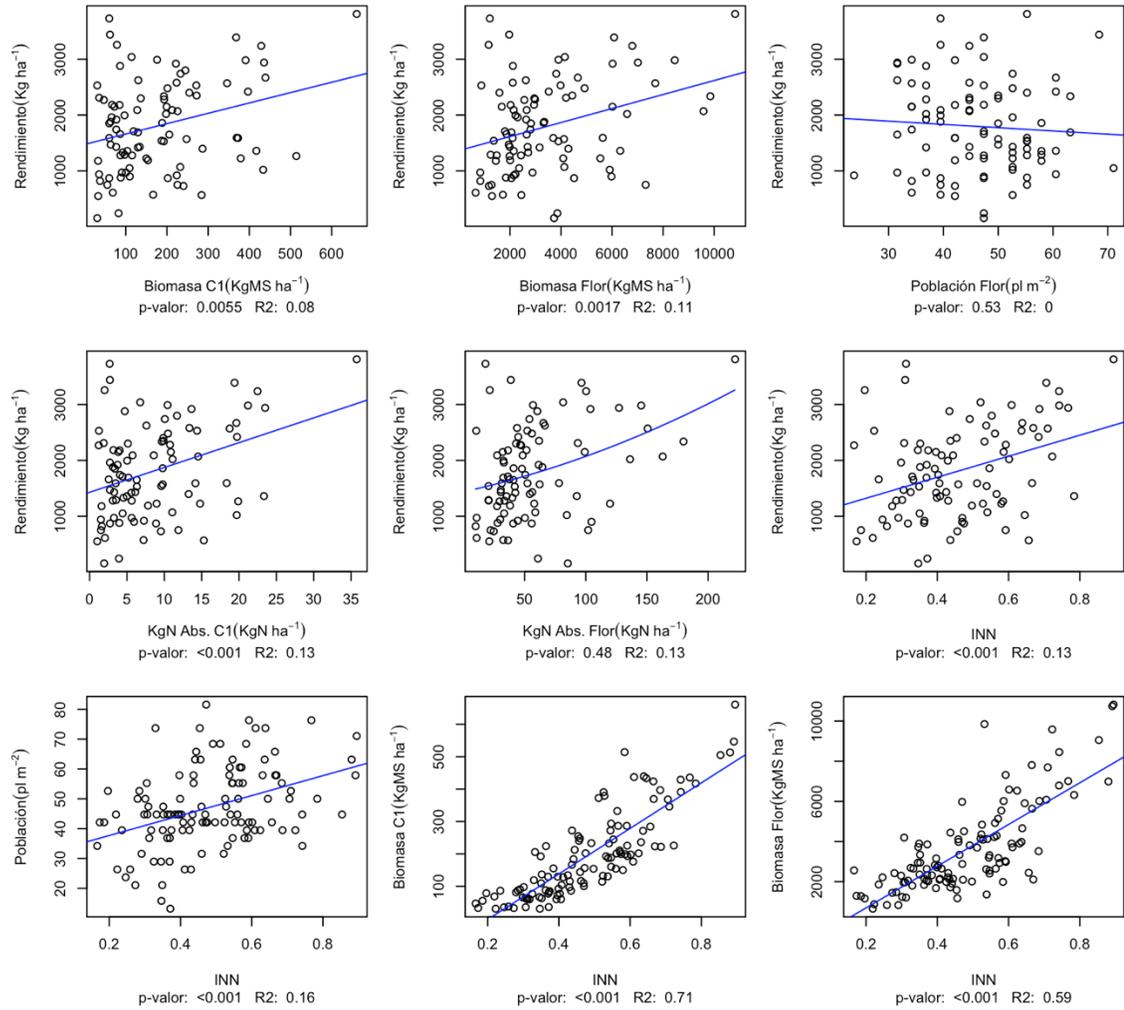
Parámetro	Sin correlación	CorGauss	Corexponencial	Corlíneal	Coresférica
AIC	1682.3	1665.5	1665.6	1665.9	1665.7
BIC	1704	1689.9	1690	1690.3	1690.1

Anexo No. 2. Valores de AIC y BIC para las correlaciones utilizadas

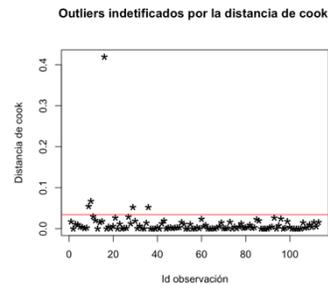
Anexo No. 3. Correlaciones analizadas para el sitio Moscoso-Molina



Anexo No. 4. Correlaciones analizadas para el sitio Rosello-Dalmás



Anexo No. 5. Outliers identificados por el método “Distancia de Cook”, para la regresión INN ~ Biomasa floración - Moscoso-Molina



Anexo No. 6. Outliers descartados identificados por el método “Distancia de Cook”, para los datos de rendimiento por tratamiento en el sitio Rosello-Dalmás

