

SEED YIELD AND FATTY ACID COMPOSITION IN SESAME (*Sesamum indicum* L.) AS AFFECTED BY SILICON APPLICATION UNDER A SEMI-ARID CLIMATE

EFFECTO DE LA APLICACIÓN DE SILICIO EN EL RENDIMIENTO DE SEMILLAS Y COMPOSICIÓN DE ÁCIDOS GRASOS EN AJONJOLÍ (*Sesamum indicum* L.) EN UN CLIMA SEMIÁRIDO

Abdul Manaf¹, Mehreen Shoukat¹, Ahmad Sher^{2*}, Abdul Qayyum³, Ahmad Nawaz^{2*}

¹Department of Agronomy, PMAS- Arid Agriculture University Rawalpindi, 46000, Pakistan.

²College of Agriculture, Bahauddin Zakariya University, Bahadur Sub-Campus Layyah, 31200, Pakistan. (ahmadnawaz2006@gmail.com), (ahmad.sher@bzu.edu.pk). ³Department of Agricultural Sciences, University of Haripur, 22620, Pakistan.

ABSTRACT

Sesame (*Sesamum indicum* L.) is a short duration, low input and highly drought tolerant conventional oilseed crop with high edible seed oil contents. This study was aimed to evaluate the response of four sesame genotypes to silicon (Si) application under a semi-arid climate. For this study, we hypothesized that Si application may improve seed yield, oil contents and fatty acid composition in sesame. The experimental design was a two factor-factorial randomized complete block, replicated four times, and the treatments were four sesame genotypes (TS-3, SG-120, SG-169 and SG-170) and three Si levels (0, 22 and 44 kg ha⁻¹). The data was analyzed statistically with the 'Statistics 8.1' software. The genotype TS-3 had the highest ($p \leq 0.05$) seed yield (479.1 kg ha⁻¹), oil content (40.2%), oleic acid (41.8%), and the lowest content of palmitic acid (6.37%) and linoleic acid (38.5%). Silicon application significantly enhanced the seed yield, oil and unsaturated fatty acids (oleic and linoleic acid) contents and reduced the saturated fatty acid (palmitic and stearic acid) over control. The highest seed yield (487.8 kg ha⁻¹), oil contents (38%), oleic acid (40.9%), linoleic acid (41.7%), as well as the lowest palmitic acid (6.49%) and stearic acid (3.66%) were recorded with the application of 44 kg Si ha⁻¹. The seed yield of sesame genotypes followed the order TS-3>SG-120>SG-169>SG-170.

Key words: Oilseed crops, crop nutrition, rainfed areas, oil contents, oil quality.

RESUMEN

El ajonjolí (*Sesamum indicum* L.) es un cultivo oleaginoso convencional de corta duración, bajo costo, con alta resistencia a la sequía y las semillas tienen un contenido alto de aceite comestible. El objetivo de este estudio fue evaluar la respuesta de cuatro genotipos de ajonjolí a la aplicación de silicio (Si), en un clima semiárido. La hipótesis de este estudio fue que la aplicación de Si pudiera mejorar el rendimiento, el contenido de aceite y la composición de ácidos grasos del ajonjolí. El diseño experimental fue un factorial con dos factores en bloques completos al azar, con cuatro repeticiones, y los tratamientos fueron cuatro genotipos de ajonjolí (TS-3, SG-120, SG-169 y SG-170) y tres niveles de Si (0, 22 y 44 kg ha⁻¹). Los datos se analizaron con el software Statistics 8.1. El genotipo TS-3 tuvo el mayor rendimiento ($p \leq 0.05$) de semilla (479.1 kg ha⁻¹), contenido de aceite (40.2%), ácido oleico (41.8%), y el menor contenido de ácido palmítico (6.37%) y de ácido linoleico (38.5%). La aplicación de Si aumentó significativamente el rendimiento de semilla y el contenido de aceite y de ácidos grasos insaturados (ácido oleico y linoleico), y redujo los ácidos grasos saturados (ácido palmítico y esteárico) con respecto al testigo. El rendimiento más alto de semillas (487.8 kg ha⁻¹) y de contenidos de aceite (38.6%), ácido oleico (40.9%) y ácido linoleico (41.7%), así como el porcentaje más bajo de ácido palmítico (6.49%) y de ácido esteárico (3.66%), se registraron al aplicar 44 kg ha⁻¹ de Si. El orden del rendimiento de la semilla de los genotipos de ajonjolí fue el siguiente: TS-3>SG-120>SG-169>SG-170.

Palabras clave: cultivos oleaginosos, nutrición del cultivo, áreas de secano, contenidos de aceite, calidad del aceite.

* Author for correspondence ♦ Autor para correspondencia.

Received: June, 2018. Approved: January, 2019.

Published as ARTICLE in *Agrociencia* 54: 367-376. 2020.

INTRODUCTION

Sesame (*Sesamum indicum* L.) is an important short duration, low input and highly drought tolerant conventional oilseed crop with high edible seed oil contents. The presence of natural antioxidants makes it one of the most stable vegetable oil of the world. Its seed contains ~50-60% oil and ~25% protein (Gharby *et al.*, 2015). Sesame oil contains palmitic acid, stearic acid (Orsavova *et al.*, 2015), linoleic acid (40.7-49.3%), and oleic acid (29.3-41.4%) (Uzun *et al.*, 2008). Sesamin, sesamol and sesamolins are natural anti-oxidants of sesame oil, which increase its stability and shelf life (Obiajunwa *et al.*, 2005).

Pakistan faces a constant shortage of edible oil and the production meets only 18% of the total edible oil consumption of the country; the remaining 82% is met through imports by spending US\$ 2.23 billion (Government of Pakistan, 2015). The oilseed crops, including the sesame, are grown in small areas on marginal lands with low inputs by the subsistence farmers, which results in lower yield, thus enhancing the burden of oil imports in Pakistan (Amjad, 2014).

There is a great potential in the Pothwar region for growing oilseed crops (*e.g.* sesame) due to unique environmental conditions, mainly the pattern/distribution/frequency of rainfall and temperature. Annual rainfall in the Northern parts of the region ranges between 1000 to 1500 mm, while Southern parts only receive 300-400 mm. The rainfall pattern in the Western and the Eastern areas (Jhelum and Attock) varies between 450-750 mm. Temperature also varies during the rainy season and afterward, which is the peak season of sesame crop growth and development. Water stress and the environment affect fatty acid contents in an oilseed genotype, in particular, oil and linoleic acid accumulation (Dwivedi *et al.*, 1993). The warmer climate favors the production of unsaturated fats in oilseeds more than the cooler climate (Bachlava and Cardinal, 2009).

After oxygen, silicon (Si) is the second most abundant element in soil, with 50-70 % of total soil mass. The roots of all the plants have some quantities of Si in their tissues. According to Ma (2004), the intensive crop production and constant use of heavy doses of synthetic fertilizer (*e.g.* nitrogen, phosphorous and potassium) has depleted the surplus quantities of

INTRODUCCIÓN

El ajonjolí (*Sesamum indicum* L.) es un cultivo oleaginoso convencional de corta duración, bajo costo y con alta resistencia a la sequía; sus semillas tienen un alto contenido de aceite comestible. La presencia de antioxidantes naturales lo convierte en uno de los aceites vegetales más estables del mundo. Sus semillas contienen ~50-60% de aceite y ~25% de proteína (Gharby *et al.*, 2015). El aceite de ajonjolí contiene ácido palmítico, ácido esteárico (Orsavova *et al.*, 2015), ácido linoleico (40.7-49.3%) y ácido oleico (29.3-41.4%) (Uzun *et al.*, 2008). Sesamina, sesamol y sesamolinas son antioxidantes naturales del aceite de ajonjolí que aumentan su estabilidad y vida útil (Obiajunwa *et al.*, 2005).

Pakistán enfrenta una escasez constante de aceite comestible y la producción cubre sólo el 18% del total del consumo interno; las importaciones cubren el 82% restante de la demanda, lo cual representa un gasto de US\$2.23 mil millones (Gobierno de Pakistán, 2015). Los cultivos de semillas oleaginosas, incluyendo las de ajonjolí, se realizan en zonas pequeñas o en tierras marginales con pocos aportes de campesinos dedicados a la agricultura de subsistencia, lo cual resulta en rendimientos bajos y así aumenta la carga de las importaciones de aceite en Pakistán (Amjad, 2014).

En la región de Pothwar hay un gran potencial para el cultivo de oleaginosas (*v.gr.* ajonjolí), debido a las condiciones ambientales únicas de la región, principalmente el patrón/la distribución/la frecuencia de las precipitaciones y la temperatura. Las precipitaciones anuales en el norte de la región varían entre 1000 y 1500 mm, mientras que la zona sur sólo recibe entre 300 y 400 mm. El patrón de precipitaciones en las regiones occidental y oriental (Jhelum y Attock) varía entre 450 y 750 mm. La temperatura también varía durante y después de la temporada de lluvias, lo cual es la temporada alta para el crecimiento y desarrollo de los cultivos de ajonjolí. El estrés hídrico y el ambiente afectan el contenido de ácidos grasos en el genotipo de oleaginosas, en particular, en la acumulación de aceite y de ácido linoleico (Dwivedi *et al.*, 1993). El clima más cálido es más propicio para la producción de grasas insaturadas en las oleaginosas que un clima más frío (Bachlava y Cardinal, 2009).

Si from our crop soils. The characteristic function of Si is to help plants to overcome the multiple abiotic (Ma, 2004; Ma and Yamaji, 2006) and biotic stresses. Besides, application of Si improved nutrient uptake (Bacchus, 2010). The Si deposition in leaves reduces the transpiration rate thus enhancing the resistance against various abiotic stresses including drought, temperature, and radiation stress (Ma *et al.*, 2006). Moreover, Si is involved in many physiological, structural and metabolic processes in higher plants under abiotic and biotic stresses (Liang *et al.*, 2003). The beneficial effects of Si were found in a variety of plant species, which include an improvement in the quality of several oil seed crops. Liang *et al.* (2015) reported that Si enhances the growth, biomass, yield and quality of many field crops.

The impact of Si in the improvement of crop performance under optimal and sub optimal conditions was reported, but no studies were found about the influence of various Si levels on yield, oil quality and fatty acid composition of sesame seeds. The hypothesis of this study was that Si application may improve yield, oil contents and fatty acid composition in sesame seeds. The objective was to optimize the Si level for boosting seed yield and oil quality of various sesame genotypes under rainfed conditions of Pothwar, Punjab, Pakistan.

MATERIALS AND METHODS

Experimental site and soil

This field study was conducted at PMAS-Arid Agriculture University, Research Farm Chakwal Road, Rawalpindi (33° 06' N, 73° 00' E, and 502 m ASL) during Kharif 2015. In Pakistan, Kharif starts between March and July, and it finish at the end of autumn or beginning of winter. The soil physicochemical characteristics of the experimental site and the weather data are shown in [Tables 1 and 2](#), respectively.

Experimental design and treatments

The experimental design was a two factor-factorial randomized complete block, replicated four times, and the treatments were four sesame genotypes (TS-3, SG-120, SG-169 and SG-170) and three Si levels (0, 22 and 44 kg ha⁻¹). The size of the net plot was 2.7 m×5 m. In each plot there were six rows, 45 cm apart; plant to plant distance of 10 cm was maintained after thinning.

Después del oxígeno, el silicio (Si) es el segundo elemento más abundante en los suelos con 50-70% de su masa total. Los tejidos de las raíces de todas las plantas tienen alguna cantidad de Si en sus tejidos. De acuerdo con Ma (2004), la agricultura intensiva y el uso constante de altas dosis de fertilizantes sintéticos (*v.gr.*, nitrógeno, fósforo y potasio) han mermado el excedente de Si de los suelos de cultivo de Pakistán. La función característica de Si es ayudar a las plantas a superar los múltiples estreses abióticos y bióticos (Ma, 2004; Ma y Yamaji, 2006). Además, la aplicación de Si mejora la absorción de nutrientes (Bacchus, 2010). El depósito de Si en las hojas reduce la tasa de transpiración y mejora así la resistencia contra varios estreses abióticos incluyendo la sequía, la temperatura y el estrés por radiación (Ma *et al.*, 2006). Más aún, el Si forma parte de muchos procesos fisiológicos, estructurales y metabólicos en las plantas vasculares con estreses abióticos y bióticos (Liang *et al.*, 2003). Los efectos benéficos de Si se encontraron en una variedad de especies de plantas, que incluyen una mejora en la calidad de varios cultivos de oleaginosas. Liang *et al.* (2015) reportaron que el Si mejora el crecimiento, la biomasa, el rendimiento y la calidad de muchos cultivos en campo.

El impacto del Si en la mejora del rendimiento de los cultivos bajo óptimas y subóptimas condiciones se ha reportado, pero no se encontraron estudios acerca de la influencia de varios niveles de Si en el rendimiento, la calidad del aceite y la composición de los ácidos grasos de las semillas de ajonjolí. La hipótesis de este estudio fue que la aplicación de Si puede mejorar el rendimiento, el contenido del aceite y la composición de los ácidos grasos de la semilla de ajonjolí. El objetivo fue optimizar el nivel de Si para estimular el rendimiento de la semilla y la calidad del aceite de varios genotipos de ajonjolí, en condiciones de secano, en Pothwar, Punjab, Pakistán.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio experimental y suelo

El estudio de campo se efectuó en PMAS-Arid Agriculture University, Research Farm Chakwal Road, Rawalpindi (33° 06' N, 73° 00' E y 502 msnm) durante la temporada Kharif de 2015. En Pakistán, la temporada Kharif inicia entre marzo y julio y termina al final del otoño o principios del invierno. Las características físicoquímicas del suelo del sitio experimental y

Table 1. Physicochemical properties of the experimental site.
Cuadro 1. Propiedades físicoquímicas del sitio experimental.

Depth	0-15 cm	15-30 cm
Soil texture	Sandy clay loam	Sandy clay loam
Soil saturation (%)	32	33
Soil pH	7.48	7.61
EC (ds m ⁻¹)	0.78	0.69
Soil organic matter (%)	0.71	0.43
Bulk density (g cm ⁻³)	1.52	1.54
Available phosphorous (mg kg ⁻¹)	4.6	4.2
Available potassium (mg kg ⁻¹)	100	80

Table 2. Mean rainfall, temperature and relative humidity during the crop growth period.
Cuadro 2. Precipitación media, temperatura y humedad relativa durante el período de crecimiento del cultivo.

Month	Rainfall (mm)	Maximum temperature (°C)	Minimum temperature (°C)	Relative humidity (%)
July	151.1	33.7	23.3	75.3
August	105.9	32.2	22.8	80.4
September	38.0	32.7	20.3	73.5
October	34.4	29.9	14.9	53.9
November	9.20	22.9	7.4	64.7

Crop husbandry

The seedbed was prepared by three cultivations (up to 0.30 m) followed by two plantings. The sesame crop was seeded (5 kg ha⁻¹) with a manual hand drill. The dose of Si was applied as sodium silicate (Na₂SiO₃) solution, immediately after sowing of crop. All other agronomic and cultural operations were uniform during the whole crop period. Weeds were controlled through manual weeding. The fertilizer (N and P) was applied at the rate of 50-60 kg ha⁻¹ as urea and di-ammonium phosphate, respectively. No irrigation was applied to the crop during the full crop season.

Harvesting and data recording

At maturity, ten plants were randomly selected from each experimental plot to record the morphological and yield variables: plant height, number of branches, number of capsules, and number of seeds per capsule. The crop was harvested from two central rows of each plot and harvested plants were sun dried for two weeks. These dried samples were weighed on an electric balance to record the biological yield, they were manually threshed and well cleaned to remove the inert matter and to

la información climatológica se muestran en los cuadros 1 y 2, respectivamente.

Diseño experimental y tratamientos

El diseño experimental fue factorial con dos factores en bloques completos al azar con cuatro repeticiones, y los tratamientos fueron cuatro genotipos de ajonjolí (TS-3, SG-120, SG-169 y SG-170) y tres niveles de Si (0, 22 y 44 kg ha⁻¹). El tamaño neto de cada parcela fue 2.7 m × 5 m. En cada parcela había seis filas, con 45 cm de separación entre ellas; y entre las plantas de cada fila se mantuvo una distancia de 10 cm, después del aclareo.

Producción agrícola

El lecho de siembra se preparó con tres cultivos (hasta 0.30 m), seguido de dos siembras. El ajonjolí se sembró (5 kg ha⁻¹) con un taladro manual. Después de sembrar la parcela, de inmediato se aplicó la dosis de Si: una solución de silicato de sodio (Na₂SiO₃). Todas las otras operaciones agrícolas y de cultivo fueron uniformes durante todo el período de cultivo. Las hierbas se controlaron de manera manual. La aplicación de fertilizante fue 50 y 60 NP kg ha⁻¹ de fosfato de urea y fosfato diaónico,

record the seed yield. Three sub-samples of 1000 seeds were taken from each plot to record the 1000-seed weight. The seed samples were further transferred to the laboratory in polythene bags for the quality analysis.

Oil/protein contents and fatty acid composition of sesame seeds were determined at the laboratory by Near Infrared Reflectance Spectroscopy (NIRS) (Sato *et al.*, 2008) with a NIR Systems Model 6500 spectrophotometer (Foss-NIR Systems, Inc., Silver Spring, MD, USA) followed by recording of Spectra in reflectance mode (Font *et al.*, 2006).

Statistical analysis

The data was analyzed statistically with ANOVA and the treatment means were compared using LSD test ($p \leq 0.05$) (Steel *et al.*, 1997).

RESULTS AND DISCUSSION

Morphological and yield variables

Sesame genotypes differed ($p \leq 0.05$) for plant height, branches per plant, capsules per plant, biological yield and seed yield, but results were non-significant for 1000-seed weight, seeds per capsule and harvest index. Application of Si affected ($p \leq 0.05$) the plant height, seeds per capsule, biological/seed yield and harvest index, but results were non-significant for branches per plant, 1000-seed weight and capsules per plant. The interaction of sesame genotypes with Si application was significant only for biological yield and harvest index (Table 3). Among the sesame genotypes, the highest plant height and number of branches per plant were found in genotype TS-3, which was statistically similar with genotype SG-120 for plant height. The genotypes SG-120, SG-169 and SG-170 showed the highest number of capsules per plant, and the lowest number was in genotype TS-3. The highest biological and seed yield was recorded in genotype TS-3 (Table 3), which might be attributed to more branches per plant and the highest plant height which resulted in the accumulation of more biomass and improved the biological yield in TS-3. Although the number of capsules was the lowest in TS-3, the highest 1000 seed weight stimulated the highest seed yield in this genotype. Sabiel *et al.* (2015) reported that seed yield in sesame showed a high positive correlation with the 1000-seed weight. Moreover, the differences in

respectivamente. No se regaron las parcelas durante todo el período de cultivo.

Cosecha y registro de información

Al alcanzar la madurez, diez plantas se escogieron al azar de cada parcela experimental para registrar las variables morfológicas y de rendimiento: altura de la planta, cantidad de ramas, cantidad de cápsulas y la cantidad de semillas por cápsula. El cultivo de las dos filas centrales de cada parcela se cosechó y las plantas cosechadas se secaron al sol por dos semanas. Estas muestras secas se pesaron en una balanza electrónica para registrar el rendimiento biológico, las muestras secas de las plantas se trillaron y limpiaron a mano para eliminar la materia inerte y registrar el rendimiento de la semilla. Tres submuestras de 1000 semillas se tomaron de cada parcela para registrar su peso por millar. Las muestras de semillas se transportaron en bolsas de polietileno al laboratorio para realizar el análisis de calidad.

El contenido de aceite/proteínas y la composición de los ácidos grasos de las semillas de ajonjolí se determinaron en el laboratorio por espectroscopía de infrarrojo cercano (NIRs, por sus siglas en inglés) (Sato *et al.*, 2008), con un espectrofotómetro NIR Systems modelo 6500 (Foss-NIR Systems, Inc., Silver Spring, MD, USA). Luego se registró el espectro de reflectancia (Font *et al.*, 2006).

Análisis estadístico

El análisis estadístico de la información se realizó con ANDEVA y las medias del tratamiento se compararon con la prueba LSD ($p \leq 0.05$) (Steel *et al.*, 1997).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Variables morfológicas y de rendimiento

Los genotipos de ajonjolí difirieron ($p \leq 0.05$) en altura de las plantas, ramas por planta, cápsulas por plantas, rendimiento biológico y rendimiento de la semilla; los resultados no fueron significativos para peso por millar de semillas, semillas por cápsula e índice de cosecha. La aplicación de Si tuvo un efecto significativo en altura de las plantas, semillas por cápsula, rendimiento biológico y de semilla e índice de cosecha, pero los resultados no fueron significativos para cantidad de ramas por planta, peso por millar de semillas y cantidad de cápsulas por planta. La interacción de los genotipos de ajonjolí con aplicación de Si sólo fue significativa para rendimiento biológico

Table 3. Impact of silicon application at three levels on morphological and yield variables of four sesame genotypes.**Cuadro 3. Impacto de la aplicación de tres niveles de silicio sobre las variables morfológicas y de rendimiento de cuatro genotipos de ajonjolí.**

Treatments	PH (cm)	NB	NC	NS	TGW (g)	BY (kg ha ⁻¹)	SY (kg ha ⁻¹)	HI (%)
Genotypes (G)								
TS-3	87.88 a	5.90 a	14.4 b	47.57	3.58	1172.8 a	479.1 a	41.55
SG-120	86.88 ab	5.07 b	17.56 a	50.25	3.41	1055.6 b	449.8 b	44.07
SG-169	84.92 bc	3.90 c	17.01 a	49.22	3.40	999.9 b	434.5 b	44.71
SG-170	82.73 b	3.07 d	16.86 a	49.67	3.21	1000 b	432.8 b	46.22
LSD ($p \leq 0.05$)	2.69	0.61	1.32	Ns	ns	112.41	28.00	ns
Silicon level (Si) (kg ha ⁻¹)								
0	82.51 c	4.28	15.90	47.61 b	3.32	847.2 c	399.7 c	48.0 a
22	85.75 b	4.55	16.70	51.09 a	3.41	1092.6 b	459.6 b	44.0 b
44	88.55 a	4.64	16.78	48.80 b	3.47	1231.5 a	487.8 a	40.4 c
LSD ($p \leq 0.05$)	2.33	ns	ns	1.97	ns	97.28	24.25	3.60
G × Si	ns	ns	ns	ns	ns	194.58	ns	7.21

PH, plant height; NB, number of branches per plant; NC, number of capsules per plant; ns, number of seed per capsules; TGW, 1000-grain weight; BY, biological yield; SY, seed yield; HI, harvest index; Different letters indicate significant differences among the values in each column and individual factors (LSD test; $p \leq 0.05$); ns: non-significant ♦ PH, altura de la planta; NB, cantidad de ramas por plantas; NC, cantidad de cápsulas por planta; ns, cantidad de semillas por cápsula; TGW, peso por millar de granos; BY, rendimiento biológico; SY, rendimiento de semilla; HI, índice de cosecha. Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas entre los valores de cada columna y los factores individuales (prueba LSD; $p \leq 0.05$); ns: no significativo.

morphological (plant height, number of branches per plant) and yield variables (number of capsules per plant, number of seeds per capsule, 1000 seed weight) among the sesame genotypes analyzed might be attributed to the differences in the genetic makeup of these genotypes (Sabiell *et al.*, 2015). Other studies reported the differences in the morphological and yield variables of diverse sesame genotypes under different environmental conditions (Ogbonna and Ukaa, 2012; Revathi *et al.*, 2012; Ahmed and Ahmed, 2012, 2013; Chandramohan, 2014; Abate and Mekbib, 2015). Thus, the genotype TS-3 had the greatest yield due to the highest seed weight and it should be grown under rainfed conditions. This might be useful to enhance the oilseed production in Pakistan and lower the burden of oil imports, which have a high cost for our country annual budget.

The application of 44 kg Si ha⁻¹ was the most beneficial for the improvement of plant height, biological yield and seed yield. Number of seeds per capsule and the harvest index was the highest with Si application at 22 and 0 kg ha⁻¹, respectively (Table 3). Silicon has a vital role in plant growth and development under optimal and sub-optimal conditions (Ma, 2004; Ma and Yamaji, 2006) by

e índice de cosecha (Cuadro 3). Entre los genotipos de ajonjolí, la altura más grande en las plantas y la mayor cantidad de ramas por planta se encontraron en el genotipo TS-3, y en cantidad de ramas por planta fue estadísticamente similar con el genotipo SG-120. Los genotipos SG-120, SG-169 y SG-170 presentaron el mayor número de cápsulas por planta, y el menor número estuvo en el genotipo TS-3. El mayor rendimiento biológico y de semillas se registró en el genotipo TS-3 (Cuadro 3), que puede atribuirse al mayor número de ramas por planta y la mayor altura de planta, lo cual resultó en la acumulación de más biomasa que mejoró el rendimiento biológico de TS-3. Aunque la cantidad de cápsulas fue la más baja en TS-3, el mayor peso por millar de semillas estimuló el mayor rendimiento de las semillas de este genotipo. Sabiell *et al.* (2015) reportaron que el rendimiento de semilla en ajonjolí mostró una relación positiva alta con el peso por millar de semillas. Más aún, las diferencias entre las variables morfológicas (altura de la planta, cantidad de ramas por planta) y de rendimiento (cantidad de cápsulas por planta, cantidad de semillas por cápsula, peso por millar de semillas) entre los genotipos de ajonjolí examinados pueden atribuirse a las diferencias en la constitución

rising uptake of other macro and micronutrients (Bacchus, 2010), decreasing transpiration rate (Ma *et al.*, 2006), increasing photosynthesis (Agarie *et al.*, 1992), and with a role in the metabolic, physiological and structural activities of the plants (Liang *et al.*, 2003). As a result, there was an increase in growth, biomass, seed yield and quality of crops are improved (Liang *et al.*, 2015). That was also the result in our study. However, yield increment due to Si application might be indirectly attributed to indirect effects of Si on adjustment of soil pH and acquisition of macro and micro nutrients (Liang *et al.*, 2015).

Quality variables

Sesame genotypes significantly differed for oil contents, stearic acid, palmitic acid, oleic acid and linoleic acid, but results were not significant for protein contents. Silicon application significantly affected the oil contents, stearic acid, palmitic acid, oleic acid and linoleic acid, but results were not significant for protein contents. The interaction of sesame genotypes with Si application was non-significant for all the quality variables (Table 4). Among the sesame genotypes, the highest oil contents were recorded in genotype TS-3, which were statistically similar with genotype SG-170. The

genética de dichos genotipos (Sabiell *et al.*, 2015). Otros estudios reportaron diferencias entre las variables morfológicas y de rendimiento de los diversos genotipos de ajonjolí, bajo diferentes condiciones ambientales (Ogbonna y Ukaa, 2012; Revathi *et al.*, 2012; Ahmed y Ahmed, 2012, 2013; Chandramohan, 2014; Abate y Mekbib, 2015). Así, el genotipo TS-3 tuvo el rendimiento más alto debido al mayor peso de semillas y se debe cultivar en condiciones de secano. Esto puede ser útil para aumentar la producción de oleaginosas en Pakistán y reducir la carga de las importaciones de aceite, la cual tiene un alto costo para el presupuesto anual de dicho país.

La aplicación de 44 kg ha⁻¹ de Si aportó los mayores beneficios para mejorar la altura de las plantas, el rendimiento biológico y de semilla. La cantidad de semillas por cápsula y el índice de cosecha fue el más con la aplicación de 22 a 0 kg Si ha⁻¹, respectivamente (Cuadro 3). Silicio tiene una función vital en el crecimiento y desarrollo de las plantas en condiciones óptimas y subóptimas (Ma, 2004; Ma y Yamaji, 2006) al mejorar el consumo de otros macro y micronutrientes (Bacchus, 2010), disminuir la tasa de transpiración (Ma *et al.*, 2006), mejorar la fotosíntesis (Agarie *et al.*, 1992) y participar en las actividades metabólicas, fisiológicas y estructurales de los cultivos (Liang *et al.*, 2003). Como resultado,

Table 4. Impact of silicon application at three levels on oil/protein contents and fatty acid composition of four sesame genotypes. Cuadro 4. Impacto de la aplicación de tres niveles de silicio en los contenidos de aceite/proteínas y en la composición ácidos grasos de cuatro genotipos de ajonjolí.

	Oil content (%)	Protein content (%)	Stearic acid (%)	Palmitic acid (%)	Oleic acid (%)	Linoleic acid (%)
Genotypes (G)						
TS-3	40.2 a	19.0	4.26 a	6.37 b	41.8 a	38.5 b
SG-120	34.7 b	20.2	3.33 b	7.13 a	36.9 b	44.1 a
SG-169	35.9 b	19.8	3.87 ab	7.07 a	39.2 ab	43.2 a
SG-170	37.5 ab	19.4	3.98 a	6.83 ab	41.04 a	41.8 a
LSD (p≤0.05)	3.00	Ns	0.59	0.56	2.75	2.84
Silicon level (Si) (kg ha ⁻¹)						
0	35.4 b	19.4	4.07 a	7.23 a	38.6 b	39.8 b
22	37.3 a	19.6	3.84 ab	6.83 ab	39.7 ab	42.3 a
44	38.6 a	19.7	3.66 b	6.49 b	40.9 a	43.7 a
LSD (p≤0.05)	1.74	ns	0.30	0.51	1.38	1.93
G×Si	ns	ns	Ns	ns	ns	ns

Different letters indicate significant differences among the values in each column and individual factors (LSD test; p≤0.05); ns: non-significant ♦ Letras diferentes indican diferencias estadísticas entre los valores en cada columna y los factores individuales (prueba LSD; p≤0.05); ns=no significativo.

highest amount of stearic acid and oleic acid were found in the genotype TS-3, followed by SG-170 and SG-169, and the lowest content in SG-120. The percentage of palmitic acid and linoleic acid were higher in genotype SG-120 followed by SG-169 and SG-170, and the lowest percentage was found in TS-3. (Table 4). This indicates that the genotype TS-3 had the highest content of oil and oleic acid and the lowest content of palmitic acid, as well as a high seed yield potential. The higher contents of oleic acid in the seeds, and as a consequence in foods, would lower the blood cholesterol and blood pressure, protects against heart attack, improve the immune system and it is essential for brain functioning (Egger, 2017). The breeding of oilseed crops with high oleic acid has remained an ultimate objective of breeders since these oils have high stability against oxidation, which is desirable for frying and long terms storage of edible oils (Flagella *et al.*, 2002). But palmitic acid may enhance the incidence of heart attack, increase the blood cholesterol level and sometimes cause tumor formation (Fattore and Fanelli, 2013).

The differences within the sesame genotypes for oil contents and fatty acid profile might be due to the particular genetic makeup of that genotype and the environmental conditions prevailing during crop life cycle (Were *et al.*, 2006; Asghar and Majeed, 2013; Bhunia *et al.*, 2015; Kurt, 2018). Thus, Dwivedi *et al.* (1993) reported that the oil content decreases due to moisture stress at end of season, whereas Mustafa *et al.* (2015) found that temperature above 30 °C can significantly reduce the oil content since the higher temperature restricts the period for capturing radiation and, therefore, reduces the amount of oil accumulation within seeds. In our study, the climate of the experimental site was dry with temperature above 30 °C during the crop growth cycle; therefore, the low oil contents in some genotypes might be attributed to these environmental variables, as well as the genetic makeup of these genotypes. As compared to control without Si, the application of Si at 22 and 44 kg ha⁻¹ increased oil and linoleic acid content; besides, 44 kg Si ha⁻¹ increased oleic acid. In samples without Si or with 22 kg Si ha⁻¹, stearic and palmitic acid reached their highest level (Table 4).

CONCLUSIONS

There is a great variability in the response of the sesame genotypes to the variable rates of silicon

hubo un aumento del crecimiento, la biomasa, el rendimiento de la semilla y la calidad de los cultivos (Liang *et al.*, 2015). Éste también fue el resultado del presente estudio. Sin embargo, el incremento del rendimiento debido a la aplicación de Si se puede atribuir, de manera indirecta, a los efectos de Si en el ajuste del pH del suelo y la adquisición de macro y micro nutrientes (Liang *et al.*, 2015).

Variables de calidad

Los genotipos de ajonjolí difirieron significativamente en contenido de aceite, ácido esteárico, ácido palmítico, ácido oleico y ácido linoleico, pero los resultados no fueron significativos para el contenido de proteínas. La aplicación de Si afectó de manera significativa el contenido de aceite, ácido esteárico, ácido palmítico, ácido oleico y ácido linoleico, pero los resultados no fueron significativos para el contenido de proteína. La interacción de los genotipos de ajonjolí con la aplicación de Si no fue significativa en todas las variables de calidad (Cuadro 4). Entre los genotipos de ajonjolí, los contenidos mayores de aceite se registraron en el genotipo TS-3, los cuales fueron estadísticamente similares con el genotipo SG-170. El contenido más alto de ácido esteárico y ácido oleico se registró en el genotipo TS-3, seguido por SG-170 y SG-169, y el menor contenido en SG-120. El porcentaje de ácido palmítico y ácido linoleico fue mayor en el genotipo SG-120, seguido por el SG-169 y el SG-170, y el más bajo porcentaje se encontró en TS-3 (Cuadro 4). Esto indica que el genotipo TS-3 posee el contenido más alto de aceite y ácido oleico y el contenido más bajo de ácido palmítico, además de un alto potencial de rendimiento de semilla. Los contenidos más altos de ácido oleico en las semillas, y como consecuencia en los alimentos, reducirían el colesterol en la sangre y la presión sanguínea, protegerían contra los ataques al corazón, mejoran el sistema inmunológico y son esenciales para el funcionamiento del cerebro (Egger, 2017). La producción de oleaginosas con alto contenido de ácido oleico ha sido uno de los objetivos más importantes de los productores, debido a su alta estabilidad contra la oxidación, lo cual es deseable para freír y para el almacenamiento a largo plazo de esos aceites comestibles (Flagella *et al.*, 2002). Pero el ácido palmítico puede aumentar la incidencia de los ataques al corazón, elevar el nivel de colesterol en la sangre, y,

applied to the soil, and genotypes TS-3 and G-120 performed better under rainfed conditions of Pakistan. This better performance was visible through improvement in seed yield, oil and unsaturated fatty acids and reduced saturated fatty acid contents, as compared to control.

The farmers of the rainfed zones should apply silicon to boost the sesame yield. The genotypes TS-3 and G-120 should be grown under these environments for harvesting better seed and oil seed of sesame.

LITERATURE CITED

- Abate, M., and F. Mekbib. 2015. Study on genetic divergence in low-altitude sesame (*Sesamum indicum* L.) germplasm of Ethiopia based on agro morphological traits. *J. Adv. Stud. Agric. Biol. Environ. Sci.* 2: 78-90.
- Agarie, S., W. Agata, F. Kubota, and P. B. Kaufman. 1992. Physiological roles of silicon in photosynthesis and dry matter production in rice plants I. Effects of silicon and shading treatments. *Jpn. J. Crop Sci.* 61: 200-214.
- Ahmed, B. M. S., and F. A. Ahmed. 2012. Variability genotype' season interaction and characters association of some sesame (*Sesamum indicum* L.) genotypes under rainfed conditions of Sudan. *Afr. J. Plant Sci.* 6: 39-42.
- Ahmed, B. M. S., and F. A. Ahmed. 2013. Variability of yield and some morphological traits in some sesame (*Sesamum indicum* L.) genotypes under rain-fed conditions. *Int. J. Agric. Sci. Res.* 2: 54-59.
- Amjad, M. 2014. Oilseed crops of Pakistan. Status Paper, Plant Sciences Division, Pakistan Agricultural Research Council Islamabad. 40 p.
- Asghar, A., and M. N. Majeed. 2013. Chemical characterization and fatty acid profile of different sesame varieties in Pakistan. *Am. J. Sci. Indus Res.* 4: 540-545.
- Bacchus, G. L. 2010. An evaluation of the influence of biodynamic practices including foliar-applied silica spray on nutrient quality of organic and conventionally fertilised lettuce (*Lactuca sativa* L.). *J. Org. Sys.* 5: 4-13.
- Bachlava, E., and A. J. Cardinal. 2009. Correlation between temperature and oleic acid seed content in three segregating soybean population. *Crop Sci.* 49: 1328-1335.
- Bhunja, R. K., A. Chakraborty, R. Kaur, T. Gayatri, K. V. Bhat, A. Basu, M. K. Maiti, and S. K. Sen. 2015. Analysis of fatty acid and lignan composition of Indian germplasm of sesame to evaluate their nutritional merits. *J. Am. Oil Chem. Soc.* 92: 65-76.
- Chandramohan, Y. 2014. Variability and genetic divergence in sesame (*Sesamum indicum* L.). *Int. J. Appl. Biol. Pharm. Technol.* 5: 222-225.
- Dwivedi, S. L., S. N. Nigam, R. Jambunathan, K. L. Sahrawat, G. V. S. Nagabhushanam, and K. Raghunath. 1993. Effect of genotypes and environments on oil content and oil quality parameters and their correlation in peanut (*Arachis hypogaea* L.). *Peanut Sci.* 20: 84-89.
- en ocasiones, causar la formación de tumores (Fattore y Fanelli, 2013).
- Las diferencias dentro de los genotipos de ajonjolí para los contenidos de aceite y el perfil de ácidos grasos pueden deberse a la estructura genética del genotipo y a las condiciones ambientales imperantes durante el ciclo de vida del cultivo (Were *et al.*, 2006; Asghar y Majeed, 2013; Bhunia *et al.*, 2015; Kurt, 2018). Así, Dwivedi *et al.* (1993) reportaron que el contenido de aceite disminuye debido al estrés hídrico al final de la temporada, mientras que Mustafa *et al.* (2015) encontraron que la temperatura mayor a 30 °C puede reducir significativamente el contenido de aceite dado que las temperaturas más elevadas restringen el período de captura de radiación y, por lo tanto, disminuye la cantidad de acumulación de aceite dentro de las semillas. En nuestro estudio, el clima del sitio experimental fue seco con temperatura sobre 30 °C durante el ciclo de crecimiento del cultivo; por lo tanto, los bajos contenidos de aceite en algunos genotipos se pueden atribuir a estas variables ambientales, así como a la estructura genética de estos genotipos. La aplicación de 22 y 44 kg Si ha⁻¹ aumentó el contenido de aceite y de ácido linoleico respecto al testigo sin Si; además, 44 kg Si ha⁻¹ incrementaron el contenido de ácido oleico. En las muestras sin Si o con 22 kg Si ha⁻¹ los ácidos esteárico y palmítico alcanzaron su mayor nivel (Cuadro 4).

CONCLUSIONES

La respuesta de los genotipos de ajonjolí a los niveles de Si aplicados en los suelos muestra gran variabilidad y los genotipos TS-3 y SG-120 se desempeñaron mejor en las condiciones de secano de Pakistán. Esta mejor respuesta fue visible por la mejora en el rendimiento de la semilla, el aceite y los ácidos grasos insaturados y por la reducción de los contenidos de los ácidos grasos saturados respecto al testigo.

Los campesinos de zonas de secano debieran aplicar silicio para estimular el rendimiento del ajonjolí. El cultivo de los genotipos TS-3 y SG-120 en estos ambientes proporcionaría una mejor semilla y un mejor aceite de ajonjolí.

—End of the English version—



- Egger, R. 2017. 13 Interesting Health Benefits of Oleic Acid+Negatives. <https://selfhacked.com/blog/oleic-acid-benefits/> (Access: January 2019).
- Fattore, E., and R. Fanelli. 2013. Palm oil and palmitic acid: a review on cardiovascular effects and carcinogenicity. *Int. J. Food Sci. Nutr.* 64: 648-659.
- Flagella, Z., T. Rotunno, E. Tarantino, R. D. Caterina, and A. D. Caro. 2002. Changes in seed yield and oil fatty acid composition of high oleic sunflower (*Helianthus annuus* L.) hybrids in relation to the sowing date and water regime. *Eur. J. Agron.* 17: 221-230.
- Font, R., M. D. R. Celestino, and A. D. Haro-Bailón. 2006. The use of near-infrared spectroscopy (NIRS) in the study of seed quality components in plant breeding programs. *Indust. Crops Prod.* 24: 307-313.
- Gharby, S., H. Harhar, Z. Bouzoubaa, A. Asdadi, A. El Yadini, and Z. Charrouf, 2015. Chemical characterization and oxidative stability of seeds and oil of sesame grown in Morocco. *J. Saudi Soc. Agric. Sci.* 16: 105-111.
- Government of Pakistan. 2015. Economic Survey of Pakistan. Government of Pakistan, Finance Division, Islamabad. Chapter 2, Agriculture. pp: 23-41.
- Kurt, C. 2018. Variation in oil content and fatty acid composition of sesame accessions from different origins. *Grasas y Aceites.* 69: 241.
- Liang, Y., M. Nikolic, R. Bélanger, H. Gong, and A. Song. 2015. Effect of silicon on crop growth, yield and quality. *In: Silicon in Agriculture.* Springer, Dordrecht. pp: 209-223.
- Liang, Y., Q. Chen, W. Zhang, and R. Ding. 2003. Exogenous silicon increases antioxidant enzyme activity and reduces lipid peroxidation in root of salt-stressed barley (*Hordeum vulgare* L.). *Plant Physiol.* 160: 1157-1167.
- Ma, J. F. 2004. Role of silicon in enhancing the resistance of plants to biotic and abiotic stresses. *Soil. Sci. Plant Nutr.* 50: 11-18.
- Ma, J. F., and N. Yamaji. 2006. Silicon uptake and accumulation in higher plants. *Trends Plant. Sci.* 8.
- Ma, J. F., K. Tamai, N. Yamaji, N. Mitani, S. Konishi, M. Katsuhara, M. Ishiguro, Y. Murata, and M. Yano. 2006. A silicon transporter in rice. *Nature* 440: 688-691.
- Mustafa, H. S. B., N. Batool, Z. Iqbal, E. Hasan, and T. Mahmood. 2015. Effect of fruit position and variable temperature on chemical composition of seeds in brassica, cotton, sunflower and maize crops. *Researcher* 7: 51-67.
- Obiajunwa, E. I., F. M. Adebiyi, and P. E. Omode. 2005. Determination of essential minerals and trace elements in Nigerian sesame seeds, using TXRF-Technique. *Pak. J. Nutr.* 4: 393-395.
- Ogbonna, P. E., and S. I. Ukaa. 2012. Yield evaluation of 13 sesame (*Sesamum indicum* L.) accessions in the derived savannah agro-ecology of southeastern Nigeria. *Afr. J. Agric. Res.* 7: 5772-5778.
- Orsavova, J., L. Misurcova, J. V. Ambrozova, R. Vicha, and J. Mlcek. 2015. Fatty acids composition of vegetable oils and its contribution to dietary energy intake and dependence of cardiovascular mortality on dietary intake of fatty acids. *Int. J. Mol. Sci.* 16: 12871-12890.
- Revathi, S., J. A. John, and N. Manivannan. 2012. Genetic variability in sesame (*Sesamum indicum* L.). *Elect. J. Plant Breed.* 3: 692-694.
- Sabiel, S. A. I., M. I. Ismail, E.A. Abdalla, and A.A. Osman. 2015. Genetic variation in sesame genotypes (*Sesamum indicum* L.) grown in the semi-arid zone of the Sudan. *SABRAO J. Breed. Genet.* 47: 214-220.
- Sato, T., K. Eguchi, T. Hatano, and Y. Nishiba. 2008. Use of near-infrared reflectance spectroscopy for the estimation of isoflavone content in soyabean seeds. *Int. J. Pt. Prod. Sci.* 11: 481-486.
- Steel, R. G. D., J. H. Torrie, and D. A. Dickey. 1997. Principles and Procedures of Statistics: A Biometric Approach. 3rd Ed. McGraw Hill Book Co. Inc. New York. USA. 672 p.
- Uzun, B., I. Arslan, and E. Furat. 2008. Variation in fatty acid compositions, oil content and oil yield in a germ plasm collection of sesame (*Sesamum indicum* L.). *J. Am. Oil Chem. Soc.* 85: 1135-1142.
- Were, B. A., A. O. Onkware, S. Gudu, M. Welander, and A. S. Carlsson. 2006. Seed oil content and fatty acid composition in East African sesame (*Sesamum indicum* L.) accessions evaluated over 3 years. *Field Crops Res.* 97: 254-260.