

OPTIMIZACIÓN DE SEIS FACTORES PRODUCTIVOS PARA EL GIRASOL

Optimization of Six Productive Factors for Sunflower

Oscar Humberto Moreno R.¹, Isidro Roberto Cruz Medina^{2*}, Hermelinda Herrera Andrade¹
y Antonio Turrent Fernández³

RESUMEN

El problema principal del cultivo del girasol en el Sur de Sonora es su baja rentabilidad, ocasionada por rendimientos bajos y altos costos de producción. Con el propósito de incrementar la rentabilidad de este cultivo, en este trabajo se estudiaron, por medio de un diseño en parcelas divididas, seis factores productivos: calendarios de riego, control de insectos, genotipos y dosis de N, P y densidad de plantas (N-P-D) en un sitio experimental con un suelo arcilloso, típico de la región. El objetivo fue generar tecnología para la producción de este cultivo, se postuló la hipótesis de que el girasol, con tecnología óptima, representa una alternativa rentable para el agricultor de esta región. Los resultados identificaron a los calendarios de riego, como el factor que tuvo mayor influencia en el rendimiento del girasol en los tratamientos de parcela grande, de los cuales, la aplicación de insecticidas no se justificó económicamente y la diferencia de rendimiento entre los genotipos no fue significativa. El calendario de riego óptimo fue una lámina de 15 cm en presiembra y tres riegos de auxilio de 12 cm en intervalos de 40, 30 y 20 días con una lámina acumulada de 51 cm. Debido a que la interacción entre genotipo, control de insectos y fertilizantes resultó significativa; para este calendario de 51 cm, sin la aplicación de insecticidas, se obtuvieron las dosis óptimas económicas para los tratamientos de parcela chica, para los dos genotipos. La comparación de los ingresos netos permitió recomendar al genotipo Madero-91 con una dosis óptima económica de 0 kg ha⁻¹ de N, 0 kg ha⁻¹ de P y 85 000 plantas por ha.

Palabras clave: calendarios de riego, dosis óptima económica de N-P-densidad de plantas.

SUMMARY

The main problem of sunflower in southern Sonora is its low profitability, which is due to low grain yield and high production costs. In order to increase the profitability of this crop, six productive factors were studied: irrigation scheduling, insect control, genotypes and N, P and density rates (N-P-D), these factors were studied in a split-plot design established in an experimental site with soil with typical clay texture. The objective of this research was to generate production technology for sunflower, in this work with optimum production technology, it was hypothesized that sunflower represents an alternative crop for this region. Results showed that irrigation schedule, was the factor with the greatest influence in sunflower yield among the treatments of whole plots, insect control is not justified economically and the yield difference among genotypes was not significant. The optimum schedule has a pre sown irrigation of 15 cm and three auxiliary irrigations of 12 cm each one, at intervals of 40, 30 and 20 days with a total irrigation depth of 51 cm. Due to the significant interaction of genotypes, insect control and fertilizers; for the optimum irrigation schedule, with no insect control, the optimum economic rates of N, P and D in small plots were obtained for each genotype. The comparison among net return permitted us to select genotype Madero-91, with an optimum rate of 0 kg ha⁻¹ of N, 0 kg ha⁻¹ of P and 85 000 plants per ha.

Index words: irrigation schedule, optimum economic rates of nitrogen-phosphorus-plant density.

INTRODUCCIÓN

El girasol (*Helianthus annuus*), también conocido como: calom, jáquima, maravilla, mirasol, tlapolote,

¹ Instituto Tecnológico del Valle del Yaqui. Km 25 carretera a San Ignacio Río Muerto. 85260 Valle del Yaqui, Bácum, Sonora, México.

² Instituto Tecnológico de Sonora. 5 de Febrero 818 Sur, Col. Centro. 85000 Ciudad Obregón, Sonora, México.

* Autor responsable (isidro.cruz@itson.edu.mx)

³ Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. 56230 Montecillo, estado de México.

maíz de teja, etc., es una planta herbácea, cultivada como oleaginosa y ornamental, de la familia de las Asteráceas. Su nombre común se debe a que su inflorescencia gira con el sol; en efecto, *Helianthus*, en griego significa flor que gira con el sol. El girasol es nativo de América, recientemente Lentz *et al.* (2008) mencionan que existen evidencias, de que el girasol se cultivaba en México, alrededor del año 2600 a. C., lo que contradice la creencia general de que el girasol fue domesticado inicialmente sólo en la parte oriental de Estados Unidos de Norteamérica hace aproximadamente 3000 años, en el valle del Mississippi (Arkansas, Missouri, Tennessee e Illinois). Los españoles lo llevaron, en semillas naturales y figuras de oro, a Europa a principios del siglo XVI (Heiser, 1955). Francisco Pizarro lo encontró en Tahuantinsuyo (Perú), donde los nativos veneraban una imagen de girasol como símbolo de su dios solar.

Las inflorescencias del girasol crecen en la punta de un tallo que tiene pocas hojas; los pétalos pueden ser amarillos, marrones, naranjas y de otros colores y la planta puede alcanzar varios metros de altura. Existen diversos tipos de girasoles: oleaginosos, de confitería, de alto contenido de ácido oleico y ornamental. Los aquenios o semillas de girasol pueden ser consumidas tras un leve tostado y en ocasiones, un leve salado; se consideran saludables porque son muy ricas en dextro α -tocoferol (vitamina E natural) y minerales.

La época de siembra para el cultivo de temporal dura aproximadamente un mes a partir del inicio del verano. Se dice que es un cultivo poco exigente con el tipo de suelo, aunque se anota que prefiere los suelos arcillo-arenosos, ricos en materia orgánica y con buen drenaje. La germinación de las semillas de girasol depende de la temperatura y de la humedad del suelo, la profundidad de siembra varía de 5 a 9 cm y está en función de la temperatura, la humedad, tipo de suelo y las condiciones de siembra. (Cardinale y Orioli, 1993; Zaffaroni y Schneider, 1991). La floración del cultivo inicia de los 25 a 35 días, la antesis de los 50 a los 60 días; el ciclo promedio de este cultivo es de 100 a 150 días, según los genotipos, fecha de siembra, latitud y disponibilidad de agua y nutrientes. Los requerimientos nutricionales de N-P-K-Ca-Mg-S en kg por tonelada de semilla de girasol son 26-4-6-1-2-2 (Zaffaroni y Schneider, 1991), y los requerimientos de los elementos menores Bo, Cu, Fe, Mn, y Mo; varían de 10 a 50 g por tonelada de semilla de girasol.

El girasol se cultiva principalmente para la producción de aceite y es un cultivo de importancia mundial, destacan en superficie cultivada la Federación Rusa, Argentina, la Unión Europea, y los Estados Unidos de Norteamérica con superficies aproximadas de 7, 3, 2 y 1.2 millones de hectáreas respectivamente, la producción promedio de estos países varía de 0.92 a 1.74 kg ha⁻¹. El aceite de girasol virgen, aunque no posee las cualidades del aceite de oliva, sí posee cuatro veces su cantidad de vitamina E natural; el aceite de girasol también se puede utilizar para producir biodiesel (Schneider, 1992), la harina que queda como residuo de la extracción del aceite, puede servir como alimento para el ganado (Ortegón *et al.*, 1993).

El rendimiento del girasol, como el de cualquier cultivo, es función de la interacción genotipo-ambiente que depende tanto del material genético como de las prácticas de cultivo. El mejoramiento genético del girasol se ha dirigido a incrementar el rendimiento y el contenido de aceite; Haro *et al.* (2007) reportaron que en las variedades cultivadas el contenido promedio de aceite es de 35.7%, y de 28% en la población silvestre e identificaron que el contenido de aceite es un carácter determinado predominantemente por el genotipo materno; Lozano *et al.* (2010) subrayaron que los esfuerzos prosiguen para la obtención de líneas prometedoras. Con respecto a las prácticas culturales, Aguilar *et al.* (2002) reportaron que el rendimiento y el contenido de aceite aumentaron al incrementarse la densidad de población de 25 a 75 mil plantas ha⁻¹. Escalante (1999) indicó que genotipos de ciclo corto mostraron mayor repuesta al nitrógeno que los genotipos de ciclo largo y Vega *et al.* (2001) encontraron que el girasol responde a combinaciones adecuadas de nitrógeno y densidad de población.

El objetivo general de este trabajo es incrementar la rentabilidad económica del cultivo del girasol en el sur de Sonora por medio de la generación de tecnología para producción, los objetivos específicos fueron la selección del calendario de riego, genotipo, control de insectos y dosis óptimas económicas de nitrógeno, fósforo y densidad de plantas. La hipótesis de trabajo fue que con la tecnología de producción óptima, el cultivo de girasol representa una alternativa para el agricultor residente porque su producción actual está limitada por deficiencias nutrimentales y aspectos del manejo como son uso del agua, control de insectos, densidad de población utilizada y genotipo empleado.

Cuadro 1. Características importantes del suelo en el sitio experimental.

Característica	Método utilizado	Unidades	Profundidad del suelo en cm	
			0-60	60-200
Potasio asimilable	Pech	kg ha ⁻¹	560	560
Fósforo aprovechable	Bray P1	kg ha ⁻¹	20	25
Materia orgánica	Walkley	%	0.85	0.35
pH	Potenciómetro	-Log[H]	7.8	7.8
Humedad a capacidad de campo	Olla de presión	%	39	36
Humedad aprovechable	Diferencia	%	20	
Densidad aparente	Campo	g cm ⁻³	1.28	1.25

pH = potencial de hidrógeno.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se estableció en la manzana 611, DDR-148 del valle del Yaqui, Sonora, durante el ciclo de invierno 2004-2005; en suelos con una pendiente general de 0.5%, ricos en potasio, moderados en su contenido de fósforo y extremadamente pobres en materia orgánica y en consecuencia en nitrógeno; estas características sugieren que el cultivo puede responder a la fertilización nitrogenada y fosfórica. El suelo del sitio experimental, cuyas características más importantes se muestran en el Cuadro 1, es de textura arcillosa (24% arena, 21% limo y 55% arcilla), conocido en la región como Barrial Profundo y que corresponde a la categoría de Verticxerofluvert, en el Sistema de Taxonomía de Suelos de la USDA (USDA-NRCS, 2006). El clima

según la clasificación de Köppen modificado por García corresponde a semiárido tropical con sequía invernal bien definida, simbólicamente representado por "Bs h".

El Cuadro 2 presenta algunas variables climáticas de interés, en él se observa que la precipitación anual promedio de 55 años es de 278 mm, en los meses de julio, agosto y septiembre se acumula el 67% de la lluvia anual. La humedad relativa en promedio, es superior al 75% a las 7 de la mañana, siempre inferior al 50% a las 14 horas y varía entre el 50 y el 80% a las 21 h. Debido a que la precipitación acumulada en el ciclo del cultivo, que comprende de noviembre a mayo, es únicamente de 63 mm, en promedio, y la evaporación total promedio en ese periodo alcanza los 1087 mm (de una evaporación anual promedio de 2413 mm), la aplicación de riegos es indispensable para el girasol en el valle del Yaqui.

Cuadro 2. Promedios de 55 años de algunas variables climáticas en el sitio experimental.

Mes	Temperatura		Precipitación	Evaporación	Humedad relativa		
	Máxima	Mínima			7 h	14 h	21 h
	°C		mm		%		
Enero	23.1	7.3	19.1	84	93.4	46.9	87.5
Febrero	24.0	7.0	8.8	95	93.6	42.7	85.8
Marzo	27.2	7.3	2.7	117	92.6	30.4	81.1
Abril	31.0	11.2	0.5	285	86.8	29.5	65.9
Mayo	34.5	14.6	0	244	74.0	28.1	58.2
Junio	34.0	19.4	5.1	316	82.4	40.4	69.0
Julio	36.0	24.5	55.4	300	90.4	53.3	79.1
Agosto	35.4	24.1	74.5	259	93.9	56.6	88.1
Septiembre	32.3	18.6	57.9	262	92.7	48.5	84.6
Octubre	30.8	16.1	22.2	190	90.7	39.1	76.9
Noviembre	26.2	10.8	6.7	148	88.4	37.1	79.9
Diciembre	21.7	7.9	25.1	113	92.4	45.9	87.2
Suma			278	2413			
Media	29.7	14.1					

El Cuadro 3 presenta las temperaturas máximas y mínimas promedio durante el ciclo del cultivo (ligeramente superiores a los promedios históricos) y la precipitación acumulada, de 139.7 mm, que fue el doble del promedio, sin embargo, este hecho tiene poca importancia porque el experimento se estableció en condiciones de riego.

El diseño experimental fue parcelas divididas, en las parcelas grandes se estudiaron los factores que por su manejo agronómico requieren de superficies grandes: calendarios de riegos, que se seleccionaron con criterio agronómico para disminuir el número de factores en estudio, y en los cuales están incluidos la lámina de riego y la oportunidad de aplicación; los genotipos, cuya siembra se efectuó en forma mecanizada para reproducir las condiciones reales de siembra; y el control de insectos, donde para evitar la contaminación entre parcelas adyacentes se dejó una distancia de cinco metros entre los tratamientos. En parcelas grandes (PG) se asignaron dieciséis tratamientos formados por las combinaciones de cuatro calendarios de riego: 1 (0-60), 2 (0-50-30), 3 (0-40-30-20) y 4 (0-35-25-20-15), el número cero indica el riego de presembrado de 15 cm, y los números posteriores los días transcurridos para la aplicación de riegos de auxilio de 12 cm (el número del calendario indica el número de riegos de auxilio); dos genotipos de girasol: DO-730 y Madero-91 y dos métodos de control de insectos (con y sin control). En parcelas chicas se estudiaron las combinaciones de cuatro dosis de N: 0, 60, 120 y 180 kg de N ha⁻¹, cuatro dosis de fósforo: 0, 30, 60 y 90 kg de P₂O₅ ha⁻¹ y cuatro densidades de población: 25, 50, 75 y 100 mil plantas ha⁻¹, de las 64 combinaciones factoriales, se eligieron 12 tratamientos con base en la matriz Plan Puebla I

Cuadro 3. Temperatura máxima y mínima promedio y precipitación acumulada durante el ciclo de cultivo.

Mes	Temperatura		Precipitación
	Máxima	Mínima	
	----- °C -----		mm
Noviembre	28.1	11.2	18.3
Diciembre	26.2	8.7	5.9
Enero	25.7	10.4	59.8
Febrero	25.4	10.1	55
Marzo	29.2	9.1	0
Abril	33.0	11.1	0
Mayo	35.2	15.7	0.7
			139.7

propuesta por Turrent (1978), estos tratamientos corresponden a los tratamientos de parcela chica descritos en cuadros posteriores. El diseño experimental en parcelas grandes fue completamente al azar con dos repeticiones, este número puede parecer reducido para experimentos agronómicos, sin embargo para este diseño, el número de tratamientos de parcela chica (PCH) funge como repeticiones para las comparaciones entre tratamientos de PG, así como el número de tratamientos de PG funge también como repeticiones para las comparaciones entre tratamientos de PCH. Las doce PCH se asignaron al azar en cada PG. Las parcelas chicas constaron de seis surcos de 0.75 m de ancho por 6 m, de largo, de éstas se cosecharon los 4 m intermedios de los cuatro surcos centrales. Se registraron las siguientes variables: altura de las plantas, área de la inflorescencia, número de granos y rendimiento de grano. Se presenta el análisis de la variable más importante, el rendimiento en grano (el rendimiento de grano no se ajustó con el área de inflorescencia y el número de granos como covariables, por que estas características dependen del genotipo que es un factor en el experimento). El análisis estadístico se efectuó con el programa SAS (2004).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de la varianza para el rendimiento en grano, en donde se muestra la descomposición de las sumas de cuadrados en parcelas grandes (PG), parcelas chicas (PCH) y la interacción de estos factores, se presenta en el Cuadro 4. En él se observa que de los factores estudiados en PG, únicamente los calendarios de riegos y el control de insectos resultaron significativos ($\alpha = 0.05$).

Con respecto a los tratamientos de PCH, los tratamientos de fertilización y densidad de población resultaron estadísticamente significativos a un $\alpha = 0.05$. Sin embargo, debido a que las interacciones Cal \times PCH, Insect \times PCH y Cal \times Gen \times PCH resultaron significativas, es necesario efectuar el análisis de los tratamientos de PCH para combinaciones específicas de los tratamientos de PG. Para simplificar el Cuadro 4, se excluyeron las interacciones no significativas, subrayando que las conclusiones que se obtienen de este cuadro no cambian si las interacciones no significativas se incorporan a los errores apropiados, en PG porque los valores no significativos del estadístico de prueba, la F calculada, son muy pequeños, y en PCH porque el error

Cuadro 4. Resumen de los resultados del análisis de varianza del rendimiento del girasol con factores productivos de parcelas grandes y chicas.

Fuentes de variación	Grados de libertad	Cuadrados medios	F _{Calculada}	P [†]
Parcela grande (PG)	15			
Calendario riego (Cal)	3	14 042 167	29.493	0.0000
Control de insectos (Insec)	1	4 935 627	10.366	0.0054
Genotipo (Gen)	1	985	0.002	0.9643
IPG NS [‡]	10			
Error (A)	16	476 118		
Parcela chica (PCH)	11	956 271	7.740	0.0000
PG × PCH	165			
Cal × PCH	33	198 156	1.604	0.0291
Insec × PCH	11	266 288	2.155	0.0189
IPCH NS [§]	121			
Error (B)	176	123 556		
Total	383	308 805		

[†] P (F > F_α); [‡] Interacciones de PG no significativas (Cal × Insec, Cal × Gen, Insec × Gen, Cal × Insec × Gen); [§] Interacciones de PCH no significativas (Gen × PCH, Cal × Insec × PCH, Cal × Gen × PCH, Insec × Gen × PCh, Cal × Insec × Gen × PCH).

tiene 176 grados de libertad y la adición de grados de libertad adicionales prácticamente no modifica los valores críticos.

Debido a que la diferencia entre los genotipos no fue significativa a un $\alpha = 0.05$ (el promedio de rendimiento del genotipo DO-730 es $\bar{y} = 3083 \text{ kg ha}^{-1}$ y el del genotipo Madero-91 es $= 3079 \text{ kg ha}^{-1}$), cualquiera de estos genotipos es recomendable. Con respecto al factor control de de insectos, la diferencia de 227 kg ha^{-1} , entre controlar ($= 3195 \text{ kg ha}^{-1}$) y no controlar insectos ($= 2968 \text{ kg ha}^{-1}$) aunque es estadísticamente significativa no se justifica económicamente con el precio actual del girasol de aproximadamente \$4500 tonelada. El costo de las dos aplicaciones del producto, comunes en la región, es aproximadamente \$1600 por ha, que es superior al beneficio obtenido por éstas que es de \$1021.50 por ha. Es necesario aclarar, sin embargo, que la plaga más importante del cultivo, la palomilla del capítulo, no se presentó en este trabajo, y como la presencia de esta plaga es fácil de detectar, la recomendación que se emite es no efectuar aplicaciones de insecticidas, a menos que se detecte la presencia de la palomilla del capítulo.

Con respecto a los calendarios de riego, que es el factor de PG que tuvo mayor influencia en el rendimiento del girasol; el Cuadro 5 muestra que el rendimiento se incrementa hasta el tercer riego y disminuye al cuarto riego de auxilio. La interacción Cal × PCH se debe a los cambios de orden en los rendimientos de los tratamientos

de fertilización y densidad de plantas al cambiar el calendario de riego; por ejemplo, para los calendarios 3 y 4, el mayor rendimiento de girasol se obtuvo con el tratamiento 8; pero para los calendarios 1 y 2, los tratamientos con mayor rendimiento fueron los tratamiento 7 y 6 respectivamente. La diferencia de lámina de riego entre los tratamientos extremos, es de 36 cm y el incremento en la producción fue cercano a los 700 kg ha^{-1} (Cuadro 5), lo cual indica que el girasol respondió al riego y a su oportunidad de aplicación, estos resultados aparentemente contradicen a Dahiphale y Pawar (1993) y a Olalde *et al.* (2000) que mencionan poca respuesta del girasol al riego, sin embargo, estos autores trabajaron en temporales abundantes, Olalde *et al.* (2000) reportan un precipitación de 725 mm durante el desarrollo del cultivo que es más del doble de la precipitación anual del sitio experimental de este trabajo en donde se encontró respuesta al riego.

Si los calendarios de riego se comparan como tratamientos cualitativos, se selecciona el calendario tres con una lámina de riego de 51 cm. Para justificar esta selección, se obtuvo el calendario de riego óptimo, por medio del ajuste de una superficie de respuesta a las láminas de riego; en esta superficie, no es posible incluir los tiempos entre los riegos porque se estudiaron cuatro tratamientos de riego que proporcionan únicamente tres grados de libertad y porque los tiempos y las láminas de riego están confundidos. El Cuadro 5 presenta los rendimientos promedios de los calendarios de riego

Cuadro 5. Rendimiento promedio (kg ha⁻¹) de girasol (de ocho parcelas: 2 repeticiones, 2 niveles de control de plagas y 2 genotipos) por calendario de riego, para los 12 tratamientos de fertilización y densidad.

PCH	N	P	D	Calendarios (C) y láminas de riego (l)			
				C1, l=27	C2, l=39	C3, l=51	C4, l=63
	kg ha ⁻¹		plantas ha ⁻¹	cm			
1	60	30	50 000	2550	2900	3429	3380
2	60	30	75 000	2556	3238	3596	3207
3	60	60	50 000	2629	2674	3329	3253
4	60	60	75 000	2611	2896	3589	3453
5	120	30	50 000	2721	2862	3244	3467
6	120	30	75 000	2641	3082	3599	3597
7	120	60	50 000	2839	3022	3313	3195
8	120	60	75 000	2656	2750	3797	3731
9	0	0	25 000	2226	2660	2736	2709
10	180	60	75 000	2627	2994	3503	3343
11	120	90	75 000	2719	2895	3424	3639
12	120	60	100 000	2749	2891	3627	3359
\bar{y}				2627	2905	3432	3361

que se utilizaron para ajustar el modelo cuadrático sin ordenada al origen (modelo más lógico que el modelo con ordenada porque estima un rendimiento igual a cero cuando no se aplican riegos), el modelo estimado fue:

$$Y = 121 l - 1.08 l^2 \quad (1)$$

Donde Y es el rendimiento del girasol en kg ha⁻¹ y l es la lámina de riego en cm.

La Ecuación explica el 99.8% de la suma de cuadrados no corregida de calendarios e indica que el rendimiento máximo fisiológico del girasol se obtiene con una lámina de riego de 56.01 cm. Considerando que el costo de aplicación de una lámina de riego de 1 cm, es de \$50, la lámina de riego óptima económica es de 56 cm (observe que las láminas óptima fisiológica y económica son prácticamente iguales debido al reducido costo del agua). Este análisis justifica que se recomiende el calendario 3 (0-40-30-20), que tiene una lámina de 51 cm, la más cercana a la lámina óptima económica.

La significancia estadística ($\alpha = 0.05$) de la triple interacción entre calendarios de riego, genotipos y tratamientos de PCH, dejó de tener importancia al seleccionar el calendario 3. La significancia estadística ($\alpha = 0.05$) de la interacción de los tratamientos de PCH con genotipos, significa que los genotipos tienen una respuesta diferencial a los tratamientos de fertilización y densidad de población. La respuesta diferencial, debido

al carácter cuantitativo de los tratamientos de PCH, indica que las superficies de respuesta para los genotipos son diferentes y que es necesario ajustar una superficie de respuesta para cada genotipo con el calendario de riego 3 seleccionado (Cuadro 6).

Se ajustó el modelo cuadrático completo con interacciones dobles de los factores N, P y D, a cada uno de los dos genotipos, eliminando posteriormente

Cuadro 6. Rendimiento promedio de girasol en kg ha⁻¹, para el calendario de riego tres, por genotipos (de cuatro parcelas: 2 repeticiones y 2 niveles de control de plagas), para los 12 tratamientos de fertilización y densidad de plantas.

PCH	N	P	D	Genotipo		\bar{y}
				DO730	Madero	
	kg ha ⁻¹		plantas ha ⁻¹	kg ha ⁻¹		
1	60	30	50 000	3147	2982	3065
2	60	30	75 000	3233	3066	3150
3	60	60	50 000	2896	3047	2972
4	60	60	75 000	3079	3196	3138
5	120	30	50 000	3143	3005	3074
6	120	30	75 000	3122	3337	3230
7	120	60	50 000	3118	3066	3092
8	120	60	75 000	3213	3254	3234
9	0	0	25 000	2462	2703	2583
10	180	60	75 000	3176	3058	3117
11	120	90	75 000	3239	3100	3170
12	120	60	100 000	3170	3143	3157

los factores e interacciones no significativas, que para ambos genotipos fueron el fósforo (P y P²) y sus interacciones (NP y DP) y la interacción del nitrógeno con la densidad de población (ND).

Para el genotipo D0-730, la superficie de respuesta seleccionada, con un coeficiente de determinación R² = 88.8%, es:

$$Y = 1992 + 5.33 N + 23.1 D - 0.0213 N^2 - 0.148 D^2$$

Donde Y es el rendimiento del girasol en kg ha⁻¹, N es la dosis de nitrógeno kg ha⁻¹ y D es la densidad de plantas en miles de plantas por ha.

Esta ecuación indica que el máximo rendimiento fisiológico del girasol se obtiene con una dosis de 125 kg de N ha⁻¹ y una densidad de 78 000 plantas por ha. Considerando que el precio de 1 kg de girasol es de \$ 4.50, el costo total de aplicar 1 kg de N es \$13.63, y el costo de 1000 plantas es de \$1.19. La dosis óptima económica para N es de 54 kg ha⁻¹ y la densidad óptima es de 77 000 plantas por ha.

Para el genotipo Madero, la superficie de respuesta obtenida, con un coeficiente de determinación R² = 79.4%, es:

$$Y = 2319 + 3.05 N + 16.5 D - 0.0150 N^2 - 0.0947 D^2$$

Esta ecuación indica que el rendimiento máximo fisiológico del girasol se obtiene con una dosis de 101 kg de N ha⁻¹ y una densidad de 87 000 plantas por ha. Considerando los costos antes anotados, la dosis óptima económica para N es de 0 kg ha⁻¹ y la dosis óptima económica para la densidad es de 86 000 plantas por ha. La dosis óptima económica de 0 kg para N se explica porque la relación de precios de N con el girasol es de 3.03, que es casi igual al coeficiente de respuesta lineal, esto es, al máximo rendimiento (3.05 kg) obtenido por la aplicación de un kg de nitrógeno. El genotipo Madero respondió al nitrógeno en forma limitada como lo señalan Steer *et al.* (1986); Escalante y Rodríguez (1994) y Escalante *et al.* (1998).

En las superficies de respuesta anteriores, no se consideran las interacciones de calendarios de riego, insecticidas y genotipos porque el ajuste de las ecuaciones se efectuó para cada genotipo, con los datos del calendario 3 y sin control de insectos. Se observó que para los dos genotipos, las dosis óptimas económicas

para N son mucho menores a las dosis máximas fisiológicas debido al elevado costo de la aplicación de nitrógeno. Los ingresos netos para los dos genotipos con sus dosis óptimas económicas, permiten recomendar la utilización del genotipo Madero, sin aplicación de nitrógeno, ni fósforo, con el calendario 3 y sin control de insectos.

CONCLUSIONES

- El calendario de riego, según el análisis de varianza, es el factor que tuvo mayor influencia en el rendimiento del girasol en los tratamientos de parcela grande (PG). El calendario 3 (0-40-30-20), con una lámina de riego de 51 cm, es el calendario que se recomienda porque produjo el máximo rendimiento y la máxima ganancia económica, su selección se justificó con el modelo cuadrático. Estos resultados aparentemente contradicen a Dahiphale y Pawar (1993) y a Olalde *et al.* (2000), que mencionan que el girasol no responde al riego, sin embargo, estos autores trabajaron en regiones con temporales abundantes que contrastan con la zona árida en donde se estableció este experimento en donde el riego es indispensable para la producción de girasol.
- La aplicación de insecticidas fue significativa ($\alpha = 0.05$), sin embargo, no se justifica económicamente.
- Los genotipos no difieren significativamente ($\alpha = 0.05$) en su rendimiento.
- Para el genotipo D0-730, las dosis óptimas económicas son: 0 kg ha⁻¹ para fósforo, 54 kg ha⁻¹ para N y 77 000 plantas por ha, considerando que el costo total de aplicar 1 kg de N es \$13.63, y el costo de 1000 plantas es de \$1.19. Para el genotipo Madero, las dosis óptimas económicas son: 0 kg ha⁻¹ para fósforo, 0 kg ha⁻¹ para N y 85 000 plantas por ha.
- Las dosis óptimas económicas de fertilizantes y densidad de población se obtuvieron para los dos genotipos, por la respuesta diferencial de los genotipos a los fertilizantes [señalada por la significancia de la interacción entre genotipos y tratamientos de parcelas chicas (PCH)], las dosis se determinaron para el calendario de riego 3 seleccionado, y sin la aplicación de insecticidas (por su falta de significancia económica); con este procedimiento dejó de tener importancia la significancia de la triple interacción entre los calendarios de riego, genotipos y tratamientos de PCH.
- Los ingresos netos para los dos genotipos con sus dosis óptimas económicas, permiten recomendar la utilización del genotipo Madero con el calendario de riego 3, sin

fertilización, con una densidad de población de 85 000 plantas por ha, y sin control de plagas; de esta forma, se cumplió el objetivo general de este trabajo que fue generar tecnología de producción para el cultivo del girasol en el sur de Sonora.

LITERATURA CITADA

- Aguilar-García, L., J. A. Escalante E., M. T. Rodríguez-González y L. Fucikovsky-Zak. 2002. Materia seca, rendimiento y corriente geofitoeléctrica en girasol. *Terra* 20: 277-284.
- Cardinali, F. J. y G. A. Orioli. 1993. Influencia de la densidad de siembra y las condiciones ambientales en la emergencia del girasol. *Turrialba* 43: 189-195.
- Dahiphale, V. V. and K. R. Pawar. 1993. Effects of irrigation schedules on dry matter production and biometric growth parameters of rabi sunflower. *J. Maharashtra Agric. Univ.* 18: 358-360.
- Escalante-Estrada, J. A. 1999. Área foliar, senescencia y rendimiento del girasol de humedad residual en función del nitrógeno. *Terra* 17: 149-157.
- Escalante-Estrada, J. A. y M. T. Rodríguez. 1994. Mayor eficiencia en el uso del nitrógeno en girasol mediante el manejo del cultivo. pp. 345-347. *In: J. Pérez Moreno y R. Ferrera Cerrato (eds.). Nuevos horizontes en agricultura: Agroecología y desarrollo sostenible.* Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.
- Escalante-Estrada, J. A., M. T. Rodríguez, A. De Haro, and E. Fereres. 1998. Acquisition, partitioning and remobilization of nitrogen and their relationship to seed yield in Mediterranean sunflower. *Helia* 21: 81-94.
- Haro-Ramírez, P. A., M. C. Julia-García y M. H. Reyes-Valdés. 2007. Determinación materna del contenido de aceite en semillas de girasol. *Rev. Fitotec. Mex.* 30: 39-42.
- Heiser, C. B. 1955. Origin and development of the cultivated sunflower. *Am. Biol. Teacher* Vol. 17: 161-167.
- Lentz, D. J., M. Pohl, J. L. Alvarado y R. Bye. 2008. El cultivo del girasol en América, 4000 años antes de lo creído. *Revista en línea: El pasado.* www.el-pasadocom (Consulta: febrero 12, 2011).
- Lozano-Cavazos, C. J., M. H. Reyes-Valdés, F. Castillo-Reyes, J. Rodríguez de la Paz, O. Martínez de la Vega y A. P. García-Villanueva. 2010. Localización de QTLs para caracteres relacionados con la domesticación del girasol. *Rev. Fitotec. Mex.* 33: 315-321.
- Olalde-Gutiérrez, V. M., J. A. Escalante-Estrada, P. Sánchez-García, L. Tijerina-Chávez, E. M. Engleman y A. A. Mastache-Lagunes. 2000. Eficiencia en el uso del agua, nitrógeno y rendimiento del girasol, en función del nitrógeno y densidad de población en clima cálido. *Terra* 18: 51-59.
- Ortegón M., A. S., A. Escobedo M., J. Loera G., A. Díaz F. y E. Rosales R. 1993. *El girasol.* Trillas. México, D. F.
- SAS Institute. 2004. *SAS User's Guide. Statistics.* SAS Institute. Cary, NC, USA.
- Schneiter, A. A. 1992. Production of semidwarf and dwarf sunflower in Northern Great Plains of the United States. *Field Crops Res.* 30: 391-401.
- Soil Survey Staff. 2006. *Claves para la Taxonomía de Suelos.* USDA-NRCS (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos - Servicio de Conservación de los Recursos Naturales). Washington, DC, USA.
- Steer, B. T., P. D. Coaldrake, C. J. Pearson, and C. P. Canty. 1986. Effects of nitrogen supply and population density on plant development and yield components of irrigated sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Field Crops Res.* 13: 99-115.
- Turrent-Fernández, A. 1978. El método gráfico-estadístico para la interpretación económica de experimentos conducidos con la Matriz Plan Puebla I.- Escritos sobre la metodología de la investigación en productividad de agrosistemas Núm. 5. Colegio de Postgraduados. Chapingo. México.
- Vega-Muñoz, R., J. A., Escalante-Estrada, P. Sánchez-García, C. Ramírez-Ayala y E. Cuenca-Adame. 2001. Asignación de biomasa y rendimiento de girasol con relación al nitrógeno y densidad de población. *Terra* 19: 75-81.
- Zaffaroni, E. and A. A. Schneiter. 1991. Sunflower production as influenced by plant type, plant population, and row arrangement. *Agron. J.* 83: 113-118.