

Efecto de la sustitución del nitrógeno inorgánico por nitrógeno orgánico contenido en el compost sobre la productividad de biomasa y azúcar de dos variedades de sorgo dulce

Rolando Cifuentes¹, Julio Rosales¹, Roberto de León², Ana Luisa Mendizábal de Montenegro² & Carlos Rolz²

¹Centro de Estudios Agrícolas y Forestales, ²Centro de Ingeniería Bioquímica, Instituto de Investigaciones, Universidad del Valle de Guatemala
rcifuen@uvg.edu.gt / ldeleon@uvg.edu.gt / mendiza@uvg.edu.gt / carlosrolz@uvg.edu.gt

RESUMEN: El nitrógeno es el nutriente que generalmente limita el crecimiento de las plantas tanto en la naturaleza como en los sistemas productivos agrícolas. En los cultivos agrícolas, el nitrógeno se adiciona al suelo generalmente en formulaciones químicas conteniendo N, P y K, mezclado con otros elementos químicos esenciales. Con el objetivo de disminuir el consumo de dichos productos, es común agregar al suelo enmiendas de naturaleza orgánica. Entre ellas se encuentra el compost, usualmente elaborado por medio de la oxidación biológica acelerada de la materia orgánica contenida en residuos agroindustriales y urbanos. El objetivo general de este trabajo fue cuantificar el efecto de la adición de compost sobre la productividad de biomasa y sobre el contenido de azúcar en dos diferentes variedades de sorgo dulce. La estrategia empleada consistió en la sustitución paulatina del nitrógeno inorgánico por nitrógeno orgánico contenido en el compost. Las pruebas se llevaron a cabo empleando tres niveles de nitrógeno total. Los resultados experimentales mostraron que la adición de compost benefició la producción de sorgo dulce. No solo aumentó la productividad en el campo sino que, en la mayoría de los casos, originó un mayor contenido de azúcares totales en el jugo prensado del tallo. Es decir, mejoró la cantidad y la calidad del producto agrícola.

PALABRAS CLAVE: Sorgo dulce, Fertilización, Compost, Productividad de biomasa, Producción de azúcares.

Compost addition effects upon the biomass productivity and the sugar content of two sweet sorghum varieties

ABSTRACT: Nitrogen availability generally limits plant growth in nature and also in intensive agriculture. In the latter case, nitrogen is usually added in balanced chemical formulations. In order to reduce consumption of such chemicals, organic amendments are usually added. Among them compost usage is common. The experimental results presented and discussed below were done in order to find out the effects of compost additions on biomass

productivity and the stalk sugar content of two sweet sorghum varieties, employing a partial substitution strategy of inorganic nitrogen by organic nitrogen from compost, and three levels of total nitrogen. Results showed positive effects due to compost additions. Biomass productivity increased, and, in most cases, sugar content in the stalk also increased. In other words, compost additions improved the crop quantity and quality.

KEY WORDS: Sweet Sorghum, Fertilization, Compost, Biomass productivity, Sugar production

Introducción

El nitrógeno es el nutriente que generalmente limita el crecimiento de las plantas tanto en la naturaleza como en los sistemas productivos agrícolas. La mayoría de las plantas en la naturaleza obtienen el nitrógeno por medio de bacterias fijadoras de nitrógeno y de la descomposición natural en el suelo del material vegetal y animal. En los cultivos agrícolas, el nitrógeno se adiciona al suelo generalmente en formulaciones químicas conteniendo N, P y K, mezclado con otros elementos químicos esenciales. La adición de fertilizantes químicos en la agricultura dirigida tiene como objeto proporcionar el nitrógeno necesario para acelerar el crecimiento y ha sido la causa del éxito en la producción de alimentos en el mundo entero. Sin embargo, el exceso de nitrógeno inorgánico adicionado al suelo ha causado: a) una pérdida paulatina de la materia orgánica y b) daños al ecosistema, por ejemplo la emisión de óxidos de nitrógeno a la atmósfera y la contaminación de aguas superficiales con N y P causando la eutrofización.

La alternativa sostenible más sensata es la de incorporar al suelo diversas enmiendas orgánicas. Dentro de estas enmiendas sobresale el compost por ser una fuente de materia orgánica estabilizada (Termorshuizen et al, 2004). El contenido de nitrógeno del compost es relativamente bajo, entre 0.5 y 2.0 %, y su mineralización es lenta. Este proceso consiste en etapas

consecutivas en las cuales intervienen microorganismos y que son: a) producción de amonio, el N a NH_4^+ , b) nitrificación, el NH_4^+ a NO_3^- , y c) producción de nitrógeno gaseoso, el NO_3^- a N_2 (Sikora y Szmids, 2001; Amlinger et al, 2003; Elharradi et al, 2005). Las pérdidas gaseosas del nitrógeno en el compost adicionado al suelo se dan mayoritariamente en forma de N_2 , aunque puede desprenderse también NH_3 si la etapa de nitrificación está inhibida (Sikora y Szmids, 2001). Las pérdidas son relativamente más bajas que cuando se agregan enmiendas directamente al suelo, tal el caso del estiércol fresco, y es por eso que conviene elaborar compost de cualquier estiércol.

La adición de compost al suelo resulta en la mejora de su fertilidad física, química y biológica, debido principalmente a que mejora la estabilidad de las partículas evitando la erosión, la conservación de la humedad, aumenta la porosidad, la aireación y la diversidad de la población microbiana, y disminuye la densidad (Diacono y Montemurro, 2010;). Debido a la mineralización lenta del N, el efecto positivo sobre el rendimiento de los cultivos es acumulativo y se obtiene cuando se emplean altas tasas con adiciones periódicas; persistiendo dicho efecto por varios años (Diacono y Montemurro, 2010; Martínez-Blanco et al, 2013). No solo el rendimiento del cultivo mejora, sino que existen casos en donde la calidad también lo hace, por ejemplo el aumento en el contenido de proteína en algunos cereales (Diacono y Montemurro, 2010; Martínez-Blanco et al, 2013). También se ha reportado en la literatura resultados en donde el rendimiento es igual o menor al logrado con fertilizantes inorgánicos, ver por ejemplo (Weber et al, 2014). Debe tomarse en cuenta que el compost es un material heterogéneo y que diversos desechos orgánicos se emplean en su manufactura incidiendo con esto en la variabilidad de su composición química y propiedades biológicas.

También se le ha conferido al compost la capacidad de suprimir o minimizar el daño hacia los cultivos de microorganismos patógenos del suelo (Bonanomi et al, 2010) y, por otro lado, contribuye a la fijación del carbono y a la reducción de la emisión de gases de invernadero asociadas a la agricultura intensiva (Favoino y Hogg, 2008; Martínez-Blanco et al, 2013).

Se conoce desde hace algunos años que cuando se emplean mezclas de compost con fertilizantes inorgánicos se provee más nitrógeno a la planta que cuando se usan en forma separada, ya que pareciera que el fertilizante estimula la mineralización del nitrógeno en el compost (Sikora y Szmids, 2001; Diacono y Montemurro, 2010). Los efectos positivos se han reportado en diversos estudios, por ejemplo, empleando mezclas de compost manufacturado de desechos sólidos municipales, MSW, con fertilizantes NPK en cultivos de arroz-trigo y algodón-trigo (Akram Qazi et al, 2009), de tomate (Montemurro et al, 2005), de remolacha (Montemurro y Maiorana, 2007), de trigo de invierno (Montemurro, 2009). Compost de MSW enriquecido con P aumentó el rendimiento de la espinaca (Maftoun et al, 2004). Compost elaborado de MSW y lodos activos de una planta de tratamiento de aguas negras, mezclado con fertilizantes NPK, mejoró el rendimiento del apio (Mylavarapu et al, 2009). Compost elaborado de bagazo de caña y cachaza, mezclado

con fertilizantes NPK, mejoró el rendimiento del tomate (Meunchang et al, 2006). También en informes recientes de cultivos tropicales como la caña de azúcar, al emplear compost mezclado con caliza fosfatada (Díaz et al 2010) y compost y urea (Chauhan et al, 2008), aumentó la productividad.

No se ha logrado identificar referencias en las cuales se haya evaluado la adición de compost al suelo, solo o en mezclas NPK, en la fertilización del sorgo dulce. Solamente en una referencia reciente, se informa del efecto de agregar lodos activados (provenientes del tratamiento secundario de aguas servidas) sobre la productividad de la biomasa (Sakellariou-Makrantonaki y Dimakas, 2013). Los autores informaron que al agregar 5 Mg/ha de lodos activados se incrementó la biomasa en un 15.4 % en base húmeda y un 13.2 % en base seca.

Por otro lado, existe una cantidad apreciable de trabajos publicados sobre el efecto de la tasa de fertilización inorgánica sobre la productividad de biomasa y del contenido de azúcar en diferentes variedades de sorgo dulce. Se estima que la tasa de fertilización óptima estaría entre 90 a 110 kg de N por ha y de 15 a 20 kg de P por ha (Erickson et al 2012). Por arriba de estos valores no se observa un incremento significativo en la biomasa o en el contenido de azúcares. Varios autores han opinado en forma similar (Barbanti et al, 2006; Almodares et al, 2007; Wortmann et al, 2010; Tamang et al, 2011; Cosentino et al, 2012; Russo y Fish, 2012; Sun y Yamana, 2012). Otros han mostrado algún efecto positivo en el rendimiento con respecto a la tasa de fertilización (Amaducci et al, 2004; Almodares et al, 2008; Kumar et al, 2008; Han et al, 2012; Holou y Stevens, 2012; Ramos et al, 2012; Serrao et al, 2012). El efecto positivo de la fertilización generalmente se ha observado cuando se ha adicionado cantidades menores de 100 kg de N por ha particularmente en suelos pobres en materia orgánica y arcillosos.

El objetivo general de este trabajo fue cuantificar el efecto de la adición de compost sobre la productividad de biomasa y sobre el contenido de azúcar en dos diferentes variedades de sorgo dulce. La estrategia empleada consistió en la substitución paulatina del nitrógeno inorgánico por nitrógeno orgánico contenido en el compost. Las pruebas se llevaron a cabo empleando tres niveles de nitrógeno total.

Metodología

Las pruebas se iniciaron en Campo Sur en Febrero del 2012 con las variedades Top 76-6 y Umbrella. Se empleó un diseño experimental de parcelas sub-divididas con distribución en bloques completos al azar, utilizando tres réplicas por tratamiento. La densidad de plantas fue la misma informada por aparte (Rolz et al, 2014). La cosecha de los tallos se llevó a cabo a los 108 días cuando el grano se observó maduro y suave. El retoño se colectó en el mes de septiembre 2012. En total el ciclo de producción duró 210 días. Se utilizó una irrigación por aspersión con una frecuencia de tres veces a la semana durante todo el período experimental. El Cuadro 1 muestra el análisis del suelo.

Cuadro 1. Análisis del suelo en Campo Sur

Parámetro	Valor
pH	5.6
CE (dS-m)	0.3
Materia Orgánica (%)	5.1
ClCe(meq/100 ml suelo)	6.2
Sat K (%)	7.3
Sat Ca (%)	78.8
Sat Mg (%)	13.2
Sat H + Al (%)	0
P (mg/L suelo)	< 10
K (mg/L suelo)	176.5
Ca (mg/L suelo)	987.8
Mg (mg/L suelo)	98.5
S (mg/L suelo)	31.5
Cu (mg/L suelo)	2.4
Fe (mg/L suelo)	50
Mn (mg/L suelo)	4
Zn (mg/L suelo)	1.8

Cuadro 2. Análisis del compost empleado

Parámetro	Valor
pH	7.6
Salinidad (dS/m)	1.6
Materia Orgánica (%)	31
Nitrógeno total (%)	1.5
Fósforo total (P ₂ O ₅) (%)	2.9
Potasio total (K ₂ O) (%)	0.6
Calcio total (Ca) (%)	4.5
Magnesio total (MgO) (%)	0.6
Boro (B ₂ O ₃) (ppm)	147.1
Cobre (Cu) (ppm)	43.3
Hierro (Fe) (ppm)	6906.1
Manganeso (Mn) (ppm)	331.4
Zinc (Zn) (ppm)	111.4

Se emplearon tres niveles de fertilización: 50, 100 y 150 kg de N por ha, espaciadas en un tercio después de dos semanas de plantados, un tercio a los 30 días y un tercio a los sesenta días. Además, se agregaron 50 kg de P₂O₅ y 50 kg de K₂O por ha, en una sola aplicación a las dos semanas de plantado. Este protocolo se aplicó también al primer retoño. En el diseño experimental se contempló la sustitución del nitrógeno inorgánico por compost empleando los siguientes niveles de sustitución 0, 25, 50, 75 y 100%. Las cantidades de compost en Mg por ha en base seca equivalentes fueron las siguientes, para el nivel de 50 kg de N por ha, 0.817, 1.634, 2.451, y 3.268. Para los niveles de 100 y 150 kg de N por ha, se multiplican las cantidades anteriores por dos y tres respectivamente. El compost empleado fue previamente elaborado a partir de una mezcla de caña de desecho colectada de las carreteras y cachaza de los ingenios

de azúcar y preparado de acuerdo con Cifuentes et al (2013). El Cuadro 2 muestra un análisis del compost empleado.

Las muestras obtenidas a lo largo de los experimentos consistieron en cuatro a cinco tallos escogidos al azar de diferentes filas; se removió la panoja y luego el follaje y la hoja naciente adherida al tallo en forma manual. Esta operación se repitió 3 veces. Se registró el peso del tallo limpio (*Balanza Tecnipesa Clase IIII Series 1-66*), se identificaron por sitio y variedad en una muestra compuesta y se enviaron el mismo día del corte al Campo Central de la UVG en donde se almacenaron a - 10 °C (*Congelador Horizontal Whirpool*).

Los tallos congelados se dejaron a temperatura ambiente por 12 horas. Para obtener la humedad del tallo y la cantidad de azúcares solubles y los grados Brix del jugo, se procedió de la manera siguiente: a) en forma manual, empleando una cuchilla se cortaron segmentos entre el segundo y cuarto nodo empezando de la punta inferior, b) los segmentos se seccionaron en cuatro y se pulverizaron en un molino de alta velocidad de laboratorio (*IKA Works A11*), c) aproximadamente 5 g del material pulverizado se colocaron en un horno (*Fisher Scientific Isotemp Incubator*) a 65 °C hasta peso constante para determinar humedad, d) el resto de los tallos se prensaron en un molino piloto de tres rodos de acero inoxidable (*Vencedora Maqtron Modelo 721*) accionado por un motor de 2 HP, en el líquido se determinaron los grados Brix y el contenido de azúcares.

El contenido de azúcares en el jugo extraído se cuantificó en un cromatógrafo líquido de alta presión (*Agilent 1100*), con un detector de índice de refracción, una columna *Zorbax NH2*, de 25 cm de longitud, 4.6 mm de diámetro interno, empleando como solvente una mezcla de acetonitrilo en agua (70-30), Los grados Brix se midieron en el jugo extraído con un refractómetro digital (*Sper Scientific Ltd Modelo 300034*).

Resultados

Productividad del tallo

El Cuadro 3 presenta la productividad del tallo fresco del primer corte en Mg/ha para todas las condiciones ensayadas.

El Cuadro 4 presenta la productividad del tallo fresco del retoño en Mg/ha para todas las condiciones ensayadas.

En la Gráfica 1 se compara el promedio de la productividad del tallo en base seca del primer corte cuando se empleó el 100 % de fertilizante inorgánico y el 100% de compost. La Gráfica 2 muestra la misma comparación para los datos del retoño.

Se obtuvo tanto en el primer corte como en el retoño una mayor productividad cuando se adicionó 100 % de compost. Además, las dos variedades mostraron una mayor productividad en el retoño.

Cuadro 3. Productividad del tallo fresco del primer corte en función del nivel total de N, el % de sustitución del N inorgánico por N orgánico para las dos variedades

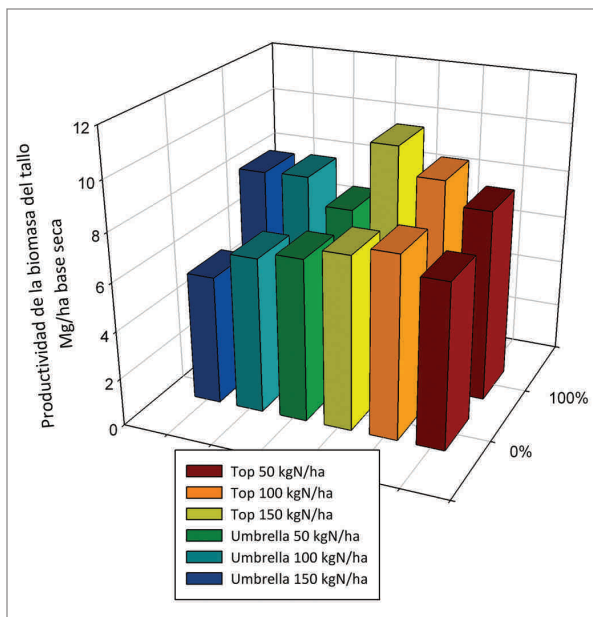
Nivel de N total	N orgánico %	Top 76-6			Umbrella		
50	0	31.352	30.341	32.364	41.364	42.398	36.193
	25	38.432	38.432	38.432	41.364	41.364	38.261
	50	34.386	34.386	48.545	42.398	45.500	44.466
	75	34.386	36.409	37.420	44.466	42.398	38.261
	100	34.386	38.432	36.409	41.364	43.432	42.398
100	0	33.375	34.386	36.409	39.295	36.193	39.295
	25	33.375	35.398	39.443	40.330	42.398	41.364
	50	35.398	39.443	37.420	41.364	41.364	42.398
	75	35.398	33.375	32.364	47.568	46.534	40.330
	100	39.443	42.477	40.455	50.670	49.636	46.534
150	0	35.398	31.352	32.364	31.023	33.091	31.023
	25	40.455	44.500	42.477	39.295	45.500	47.568
	50	41.466	45.511	36.409	41.364	48.602	41.364
	75	41.466	40.455	39.443	43.432	43.432	44.466
	100	42.477	48.545	46.523	45.500	50.670	49.636

Cuadro 4. Productividad del tallo fresco del retoño en función del nivel total de N, el % de sustitución del N inorgánico por N orgánico para las dos variedades

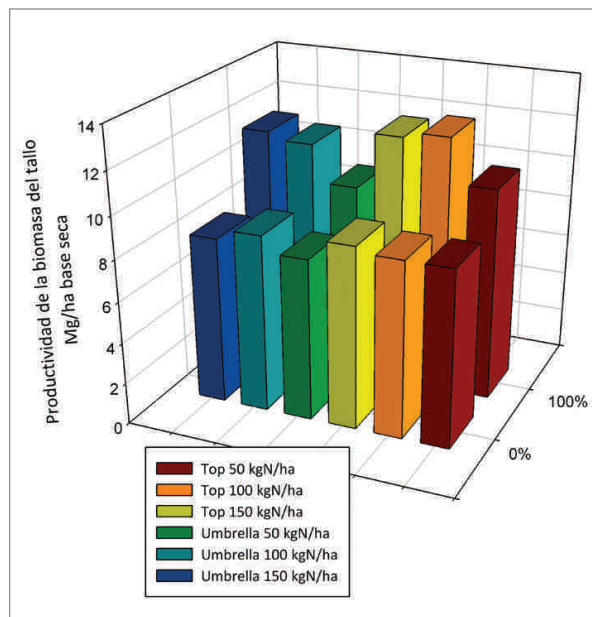
Nivel de N total	N orgánico %	Top 76-6			Umbrella		
50	0	31.352	35.398	28.318	33.375	30.341	30.341
	25	33.375	36.409	30.341	35.398	37.420	31.352
	50	36.409	39.443	33.375	35.398	39.443	30.341
	75	37.420	40.455	34.386	33.375	39.443	34.386
	100	38.432	41.466	34.386	36.409	40.455	36.409
100	0	30.341	35.398	29.330	36.409	36.409	30.341
	25	35.398	41.466	35.398	40.455	40.455	30.341
	50	35.398	36.409	35.398	40.455	44.500	38.432
	75	35.398	47.534	40.455	41.466	45.511	35.398
	100	37.420	49.557	50.568	40.455	47.534	46.523
150	0	34.386	38.432	25.284	40.455	36.409	20.227
	25	35.398	40.455	37.420	40.455	38.432	32.364
	50	41.466	41.466	38.432	40.455	42.477	42.477
	75	41.466	45.511	42.477	40.455	38.432	32.364
	100	43.489	44.500	46.523	41.466	51.580	45.511

En las Gráfica 3 y 4 se visualizan las tendencias del cambio de la productividad en función de la sustitución del nitrógeno inorgánico por nitrógeno orgánico contenido en el compost a tres diferentes niveles de nitrógeno total. Se pueden diferenciar varios comportamientos: a) un aumento progresivo de la productividad conforme el porcentaje de compost aumentaba, b) una variación leve de la productividad en los tres niveles de sustitución y c) en dos casos, un aumento al 50 % de sustitución.

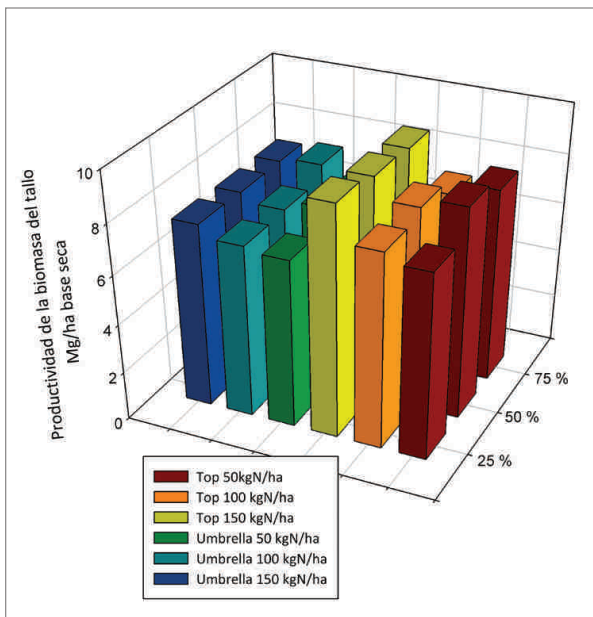
El análisis de variancia N-lateral (ANDEVA) para las muestras del corte, teniendo como variable dependiente la productividad de la biomasa del tallo y como factores: el nivel de N total empleado, la variedad de sorgo dulce, y la sustitución del nitrógeno inorgánico por nitrógeno orgánico contenido en el compost, incluyendo el 0 y el 100 % de sustitución, mostró que los tres factores, nivel de nitrógeno total ($P=0.0003$), variedad ($P=0.0000$) y la sustitución del nitrógeno inorgánico ($P=0.0000$)



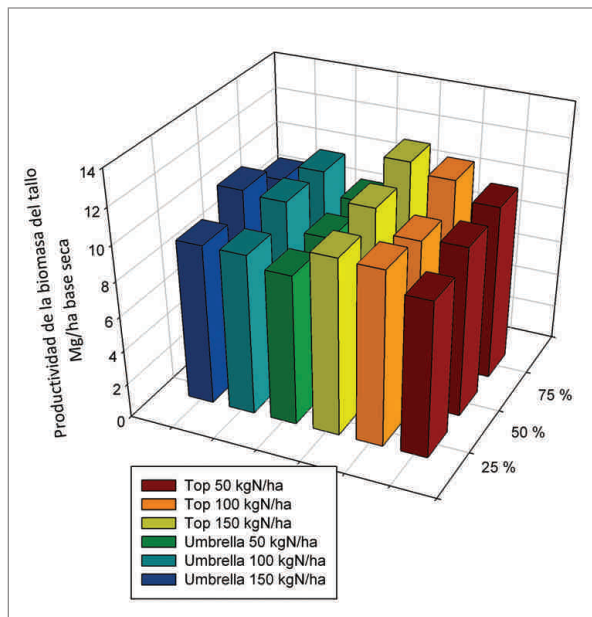
Gráfica 1. Comparación del promedio de la productividad de la biomasa del tallo en base seca del primer corte entre 0 % y 100 % de compost.



Gráfica 2. Comparación del promedio de la productividad de la biomasa del tallo en base seca del retoño entre 0 % y 100 % de compost.



Gráfica 3. Efecto sobre la productividad de la biomasa del tallo del primer corte por una sustitución del nitrógeno inorgánico por nitrógeno orgánico contenido en el compost a una tasa de nitrógeno total de 50 kg/ha.



Gráfica 4. Efecto sobre la productividad de la biomasa del tallo del retoño por una sustitución del nitrógeno inorgánico por nitrógeno orgánico contenido en el compost a una tasa de nitrógeno total de 100 kg/ha.

fueron significativos. Además, las dos primeras interacciones fueron significativas ($P=0.0009$) y ($P=0.0003$). La única no significativa fue la interacción entre variedad y sustitución del

nitrógeno ($P=0.6248$). El Cuadro 5 muestra los resultados del análisis.

Cuadro 5. Andeva de la productividad del tallo seco para el primer corte y las variedades Top 76-6 y Umbrella a tres niveles de N total y a cinco substituciones del nitrógeno inorgánico por nitrógeno orgánico contenido en el compost (Software: Stata Versión 9)

Observaciones: 90 Cuadrado medio: 0.569
 R^2 : 0.776 R^2 ajustado : 0.707

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado Medio	F	P
Modelo	76.380	21	3.637	11.22	0.0000
Nivel de N	5.939	2	2.969	9.16	0.0003
Variedad	24.982	1	24.982	77.09	0.0000
Substitución	28.533	4	7.133	22.01	0.0000
Nivel de N*Variedad	59.030	2	29.515	7.76	0.0009
Nivel de N*Substitución	11.046	8	1.381	4.26	0.0003
Variedad* Substitución	0.850	4	0.213	0.66	0.6248
Residuo	22.036	68	0.324		
Total	98.416	89	1.106		

Cuadro 6. Andeva de la productividad del tallo seco para el retoño y las variedades Top 76-6 y Umbrella a tres niveles de N total y a cinco substituciones del nitrógeno inorgánico por nitrógeno orgánico contenido en el compost (Software: Stata Versión 9)

Observaciones: 90 Cuadrado medio: 1.069
 R^2 0.609 R^2 ajustado : 0.488

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado Medio	F	P
Modelo	121.063	21	5.765	5.04	0.0000
Nivel de N	21.767	2	10.883	9.52	0.0002
Variedad	13.082	1	13.082	11.45	0.0012
Substitución	74.145	4	18.536	16.22	0.0000
Nivel de N*Variedad	1.255	2	0.628	0.55	0.5800
Nivel de N*Substitución	7.062	8	0.883	0.77	0.6282
Variedad* Substitución	3.752	4	0.938	0.82	0.5165
Residuo	77.720	68	1.143		
Total	198.782	89	2.234		

El análisis anterior indica que las variedades mostraron diferente productividad, la cual dependió del valor de la substitución del nitrógeno inorgánico por nitrógeno orgánico contenido en el compost y del nivel de N total.

El análisis de variancia N-lateral (ANDEVA) para las muestras del retoño, teniendo como variable dependiente la productividad de la biomasa del tallo y como factores: el nivel de N total empleado, la variedad de sorgo dulce, y la substitución del nitrógeno inorgánico por nitrógeno orgánico contenido en el compost mostró que los tres factores, nivel de nitrógeno total ($P=0.0002$), variedad ($P=0.0012$) y la substitución del nitrógeno inorgánico ($P=0.0000$) fueron significativos. Por el contrario, todas las interacciones entre factores fueron no significativas. El Cuadro 6 muestra los resultados del análisis.

El análisis anterior indica un comportamiento similar al observado con las muestras del corte, con la diferencia que las dos primeras interacciones, nivel de N y variedad y nivel de N y substitución no fueron significativas.

Contenido de azúcares en el jugo prensado

En el Cuadro 7 para la variedad Top 76-6 y en el Cuadro 8 para la variedad Umbrella, se listan los valores de los azúcares totales en el jugo prensado de los tallos del primer corte y las proporciones de sacarosa, glucosa y fructosa en función de los niveles de N total y los valores de substitución del nitrógeno inorgánico por nitrógeno orgánico del compost.

Cuadro 7. Azúcares del jugo prensado de los tallos del primer corte de la variedad Top 76-6 en los tres niveles de N total y los cinco valores de sustitución con compost y las proporciones de sacarosa, glucosa y fructosa

Fertilización	Azúcares g/100mL jugo	Sacarosa %	Glucosa %	Fructosa %
50-0	8.09	74.04	15.96	10.00
50-25	7.99	74.68	15.96	9.36
50-50	8.95	74.09	15.81	10.10
50-75	8.22	74.48	15.46	10.06
50-100	10.42	71.54	17.29	11.17
100-0	8.53	72.55	16.72	10.73
100-25	9.83	82.70	10.70	6.60
100-50	12.90	83.57	10.48	5.95
100-75	9.91	79.47	12.95	7.58
100-100	9.51	81.26	11.63	7.12
150-0	5.89	64.84	20.78	14.38
150-25	9.24	75.66	15.17	9.17
150-50	9.12	81.99	11.25	6.76
150-75	8.57	79.00	13.48	7.52
150-100	9.16	78.36	13.48	8.16

Cuadro 8. Azúcares del jugo prensado de los tallos del primer corte de la variedad Umbrella en los tres niveles de N total y los cinco valores de sustitución con compost y las proporciones de sacarosa, glucosa y fructosa

Fertilización	Azúcares g/100mL jugo	Sacarosa %	Glucosa %	Fructosa %
50-0	8.47	47.88	31.51	20.61
50-25	10.00	53.25	31.41	15.34
50-50	7.85	57.83	27.84	14.34
50-75	10.06	56.64	29.47	13.89
50-100	9.01	64.03	24.30	11.67
100-0	9.38	57.38	29.21	13.42
100-25	11.73	70.15	20.82	9.03
100-50	9.74	59.56	28.02	12.42
100-75	6.78	47.60	36.47	15.93
100-100	11.23	64.05	24.26	11.70
150-0	9.36	62.73	23.89	13.38
150-25	10.40	62.68	24.00	13.32
150-50	11.28	67.49	20.89	11.61
150-75	7.54	50.52	32.20	17.28
150-100	11.54	75.58	17.62	6.80

En el Cuadro 9 para la variedad Top 76-6 y en el Cuadro 10 para la variedad Umbrella, se listan los valores de los azúcares totales en el jugo prensado de los tallos del retoño y las

proporciones de sacarosa, glucosa y fructosa en función de los niveles de N total y los valores de sustitución del nitrógeno inorgánico por nitrógeno orgánico del compost.

Cuadro 9. Azúcares del jugo prensado de los tallos del retoño de la variedad Top 76-6 en los tres niveles de N total y los cinco valores de sustitución con compost y las proporciones de sacarosa, glucosa y fructosa

Fertilización	Azúcares g/100mL jugo	Sacarosa %	Glucosa %	Fructosa %
50-0	8.92	65.93	18.37	15.70
50-25	9.97	72.59	16.07	11.34
50-50	7.84	62.81	21.61	15.58
50-75	14.20	71.35	18.12	10.53
50-100	10.26	69.91	18.50	11.59
100-0	11.94	68.29	18.63	13.08
100-25	8.68	70.42	16.27	13.31
100-50	9.78	76.34	13.39	10.27
100-75	7.87	61.77	22.56	15.67
100-100	10.65	70.37	17.91	11.72
150-0	10.90	64.76	19.97	15.27
150-25	11.50	75.70	13.62	10.69
150-50	8.88	71.15	16.67	12.18
150-75	11.47	69.52	18.26	12.22
150-100	9.60	66.93	20.05	13.02

Cuadro 10. Azúcares del jugo prensado de los tallos del retoño de la variedad Umbrella en los tres niveles de N total y los cinco valores de sustitución con compost y las proporciones de sacarosa, glucosa y fructosa

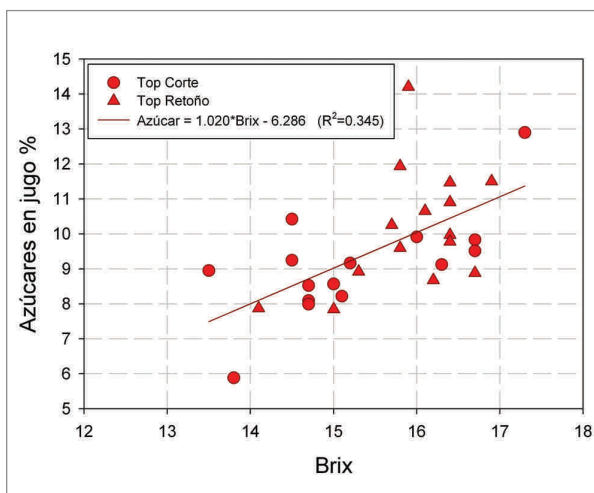
Fertilización	Azúcares g/100mL jugo	Sacarosa %	Glucosa %	Fructosa %
50-0	9.53	52.95	29.70	17.36
50-25	9.28	67.56	21.15	11.29
50-50	9.13	68.54	20.01	11.45
50-75	6.56	52.79	34.02	13.19
50-100	8.58	25.45	48.43	26.12
100-0	9.31	49.99	32.32	17.69
100-25	9.62	58.59	25.55	15.87
100-50	7.06	59.41	25.30	15.29
100-75	9.04	57.09	28.50	14.41
100-100	6.43	68.44	19.87	11.69
150-0	6.09	61.89	27.29	10.82
150-25	7.69	63.48	23.73	12.79
150-50	8.76	66.25	21.80	11.95
150-75	8.82	50.96	32.10	16.94
150-100	8.78	66.11	22.74	11.15

Relación entre el contenido de azúcares y el Brix en el jugo prensado

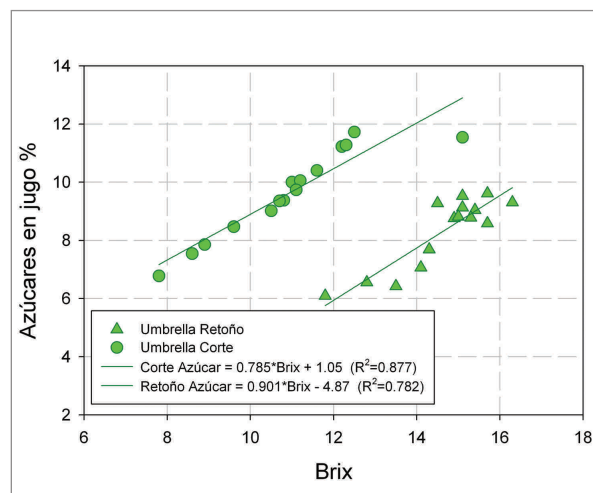
Fue posible establecer modelos lineares entre el contenido de azúcar y los grados Brix del jugo obtenido por prensado del tallo de las variedades Top 76-6 y Umbrella. Los resultados para la variedad Top 76-6 se presentan en la Gráfica 5.

El modelo desarrollado se aplica tanto al corte como al retoño y explica el 34.5 % de la variación de los datos experimentales.

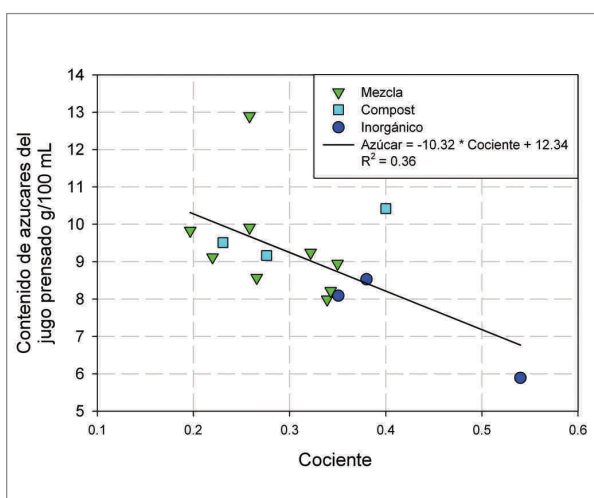
Los resultados para la variedad Umbrella se muestran en la Gráfica 6. Se nota que las muestras del corte y las muestras del retoño tuvieron un modelo con parámetros diferentes. El modelo del corte explica el 87.7 % de la variación y el modelo del retoño explica el 78.2 % de la variación.



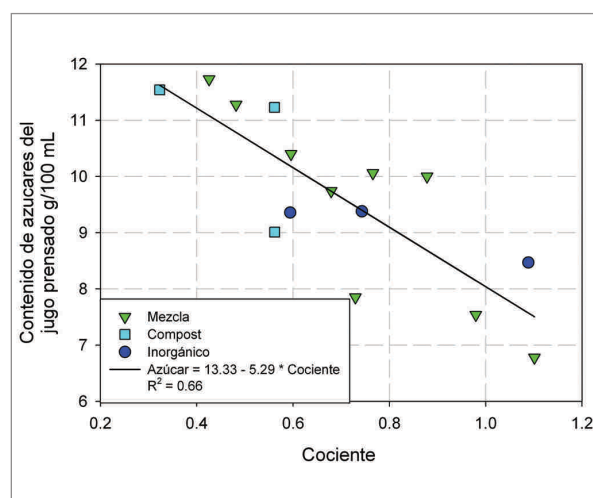
Gráfica 5. Modelo lineal de la relación entre el contenido de azúcares y los grados Brix del jugo obtenido por prensado del tallo del corte y del retoño de la variedad Top 76-6.



Gráfica 6. Modelos lineares de la relación entre el contenido de azúcares y los grados Brix del jugo obtenido por prensado del tallo del corte y del retoño de la variedad Umbrella.



Gráfica 7. Modelo lineal entre el contenido de azúcares del jugo prensado y el cociente para muestras del corte de la variedad Top 76-6. Los círculos azules identifican muestras fertilizadas en forma inorgánica. Los cuadrados celestes muestras fertilizadas solo con compost. Los triángulos verdes las muestras con fertilización mezclada.



Gráfica 8. Modelo lineal entre el contenido de azúcares del jugo prensado y el cociente para muestras del corte de la variedad Umbrella. Los círculos azules identifican muestras fertilizadas en forma inorgánica. Los cuadrados celestes muestras fertilizadas solo con compost. Los triángulos verdes las muestras con fertilización mezclada.

Relación entre el contenido de azúcares y la proporción de los diferentes azúcares en el jugo prensado

En la Gráfica 7 se presenta el modelo lineal obtenido entre el contenido de azúcar en el jugo y el cociente obtenido al dividir la suma de las proporciones de glucosa y fructosa sobre la proporción de la sacarosa (denominado cociente en adelante) de las muestras del corte de la variedad Top 76-6. El modelo fue significativo ($R^2 = 0.36$; $F = 7.31$ y $P = 0.0180$). En la gráfica la presencia de posibles puntos extremos es obvia. Se procedió a efectuar una regresión lineal robusta, pero los resultados mostraron que el efecto de los puntos extremos sobre el valor de los parámetros del modelo fue insignificante.

En la Gráfica 8 se presenta información similar para las muestras del corte de la variedad Umbrella. El modelo lineal fue significativo ($R^2 = 0.66$; $F = 25.79$ y $P = 0.0002$).

Discusión de resultados

Los resultados obtenidos indicaron que la productividad variaba significativamente según la variedad, el % de sustitución de nitrógeno inorgánico por nitrógeno orgánico del compost y por el nivel de nitrógeno total. Puede observarse en las Gráficas 1-4 que la variedad Top 76-6, tanto en el corte como en el retoño, mostró las mayores productividades a 100 % de sustitución, es decir empleando solo compost como fuente de nitrógeno y

cuando el nivel de nitrógeno total fue de 100 y de 150 kg N/ha. Los valores obtenidos fueron de 12.38 y 12.11 Mg/ha en base seca. Las cifras anteriores sobrepasaron en un 62 y un 67 % a la productividad obtenida con solo fertilizante inorgánico a los niveles de nitrógeno especificados. También sobrepasaron en aproximadamente un 15 % a las encontradas con anterioridad para Top 76-6 en el mismo sitio experimental, en dos años consecutivos, con fertilización inorgánica, a un nivel de 150 kg N/ha (Rolz et al, 2014).

La variedad Top 76-6 mostró una consistencia de la relación lineal entre el Brix, el cual cuantifica las sustancias solubles, con el contenido de azúcar, tanto para el jugo del corte como del retoño, ver Gráfica 5. Esto no sucedió con la variedad Umbrella, ver Gráfica 6, en donde el corte y el retoño mostraron modelos lineares con diferentes parámetros. Los resultados indican que el retoño no logró un desarrollo satisfactorio lo cual incidió en niveles de azúcares totales relativamente bajos. Modelos lineares entre estas variables han sido reportadas previamente (Tsuchihashi y Goto, 2004; Kawahigashi et al, 2013) aunque no necesariamente con parámetros similares, sugiriendo que dicha relación es particular a la variedad del sorgo dulce que se trate, a la latitud en donde se siembre y la práctica agrícola empleada.

El modelo lineal mostrado en las Gráficas 7 y 8 entre el contenido de azúcares en el jugo prensado y el cociente, se ha encontrado y reportado previamente (Rolz et al, 2014; Cifuentes et al, 2014). Es conocido que el tallo del sorgo dulce contiene menos sacarosa y más azúcares reductores que el tallo de la caña de azúcar, ambos maduros a punto de corte (Lingle et al, 2012). Se ha reportado una variación natural entre las proporciones de los azúcares en el sorgo dulce (Teetor et al, 2011). Por ejemplo, se ha informado que la sacarosa puede variar entre 57 a 87% del total de los azúcares, mientras que la glucosa, que siempre es mayor que la fructosa, ha variado entre 13 y 28% (Curt et al, 1995; Amaducci et al, 2004; Sipos et al, 2009). Por lo tanto, es natural esperar cambios en el valor del cociente. Ahora bien, la acumulación del azúcar en el tallo del sorgo dulce está regulada por un sistema enzimático (Qazi et al, 2012; Yang et al, 2013). Todo indica que una actividad baja de la enzima invertasa ácido soluble (SAI) acoplada con una alta actividad de la sacarosa fosfatasa sintasa (SPS), promueven un alto contenido de azúcar en el tallo. Se ha encontrado un modelo lineal significativo entre el contenido de glucosa más fructosa y SAI en diferentes variedades, así como, entre el contenido de sacarosa y la diferencia entre SPS y SAI (Yang et al, 2013). Este razonamiento ofrece un apoyo parcial básico para justificar el modelo lineal encontrado entre el contenido de azúcares en el jugo prensado y el cociente.

Los resultados experimentales mostraron que la adición de compost benefició la producción de sorgo dulce. No solo aumentó la productividad en el campo sino que, en la mayoría de los casos, indujo a un cociente bajo de los azúcares y por lo tanto originó un mayor contenido de azúcares totales en el jugo prensado del tallo. Es decir, mejoró la cantidad y la calidad

del producto agrícola. Como se mencionó en la introducción, se conoce desde hace algunos años que cuando se emplean mezclas de compost con fertilizantes inorgánicos se provee más nitrógeno a la planta que cuando se usan en forma separada, ya que pareciera que el fertilizante estimula la mineralización del nitrógeno en el compost. Lo anterior podría entonces explicar los resultados obtenidos cuando se empleó mezclas de compost con fertilizantes inorgánicos. Sin embargo, no explica el mejor resultado obtenido cuando se empleó solamente compost. Resultados recientes podrían ofrecer una explicación posible. La mayoría de plantas establecen relaciones en sus raíces con hongos denominados micorrizas; en la interacción simbiótica, las plantas proporcionan al hongo compuestos simples como azúcares que impulsan el crecimiento del hongo, el cual a su vez, libera enzimas que descomponen la materia orgánica del suelo, liberando en el proceso nitrógeno que la planta utiliza (Bradford, 2014). Por otro lado, Averill y colaboradores (2014) encontraron que las ecto micorrizas (EM) eran más eficientes para aprovechar el nitrógeno orgánico del suelo que las micorrizas arbusculares (AM) y también que los microorganismos libres existentes en el propio suelo. Al agregar nitrógeno inorgánico al suelo, se estimula el crecimiento de la población microbiana existente y la proliferación de micorrizas (AM) (Bradford, 2014). Por otro lado, Atalay y Favi (2013) presentaron resultados preliminares en donde semillas de cuatro variedades de sorgo dulce fueron inoculadas con micorrizas, y las plantas mostraron mejor desarrollo que el control. Lo anterior permite especular que la mayor productividad del sorgo dulce obtenida en las pruebas se debió a la colonización de las raíces por micorrizas (EM), y por lo tanto, una mayor disponibilidad del nitrógeno orgánico del suelo y del compost. En cambio, al emplear solo fertilización inorgánica, el nitrógeno disponible estimuló el crecimiento de la flora microbiana natural disminuyendo la disponibilidad del mismo para la planta. El cultivo se llevo a cabo en un suelo rico en materia orgánica y es posible que en suelos más pobres la respuesta a la adición de compost difiera.

Conclusiones

Los resultados experimentales mostraron que la adición de compost benefició la producción de sorgo dulce. No solo aumentó la productividad en el campo sino que, en la mayoría de los casos, indujo a un cociente bajo de los azúcares y por lo tanto originó un mayor contenido de azúcares totales en el jugo prensado del tallo. Es decir, mejoró la cantidad y la calidad del producto agrícola.

Las variedades mostraron diferente productividad, la cual dependió del valor de la sustitución del nitrógeno inorgánico por nitrógeno orgánico contenido en el compost y del nivel de N total. La variedad Top 76-6, tanto en el corte como en el retoño, mostró las mayores productividades a 100 % de sustitución, es decir empleando solo compost como fuente de nitrógeno y cuando el nivel de nitrógeno total fue de 100 y de

150 kg N/ha. Los valores obtenidos fueron de 12.38 y 12.11 Mg/ha en base seca. Las cifras anteriores sobrepasaron en un 62 y un 67 % a la productividad obtenida con solo fertilizante inorgánico a los niveles de nitrógeno especificados.

El contenido de azúcar total y la distribución de la sacarosa, glucosa y fructosa en el jugo prensado variaron entre las muestras. Fue posible establecer un modelo lineal entre el azúcar total en el jugo y el Brix. También se establecieron modelos lineales entre el azúcar total en el jugo y el cociente de azúcares reductores sobre sacarosa. En la mayoría de los casos, la presencia de compost indujo a un cociente bajo de los azúcares y por lo tanto originó un mayor contenido de azúcares totales en el jugo prensado del tallo.

Agradecimientos

El trabajo experimental fue financiado en parte por el Programa USDA Food for Progress 10 y por el proyecto FODECYT 09-2011 del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT).

Bibliografía

- Akram Qazi M, Akram M, Ahmad N, Artiola JF, Tuller M (2009) *Economical and environmental implications of solid waste compost applications to agricultural fields in Punjab, Pakistan* Waste Manag **29**(9): 2437-2445
- Almodares A, Darany SMM (2006) *Effects of planting date and time of nitrogen application on yield and sugar content of sweet sorghum* J Environ Biol **27**(3): 601-605
- Almodares A, Hadi MR, Ranjbar M, Taheri R (2007) *The effects of nitrogen treatments, cultivars and harvest stages on stalk yield and sugar content in sweet sorghum* Asian J Plant Sci **6**(2): 423-426
- Almodares A, Taheri R, Chung M, Fathi M (2008) *The effect of nitrogen and potassium fertilizers on growth parameters and carbohydrate contents of sweet sorghum cultivars* J Environ Biol **29**(6): 849-852
- Amaducci S, Monti A, Ventur G (2004) *Non-structural carbohydrates and fibre components in sweet and fibre sorghum as affected by low and normal input techniques* Ind Crops Prod **20**(1): 111-118
- Amlinger F, Götz B, Dreher P, Geszti J, Weissteiner C (2003) *Nitrogen in biowaste and yard waste compost: dynamics of mobilisation and availability—a review* Eur J Soil Biol **39**(3): 107-116
- Atalay A, Favi FD (2013) *Salt tolerance of mycorrhiza sweet sorghum* Water, Food, Energy and Innovation for a Sustainable World, American Society of Agronomy-Crop Science Society of America-Soil Science Society of America, Poster 901, Tampa, Florida
- Averill C, Turner BL, Finzi AC (2014) *Mycorrhiza-mediated competition between plants and decomposers drives soil carbon storage* Nature **505**: 543-545
- Barbanti L, Grandi S, Vecchi A, Venturi G (2006) *Sweet and fibre sorghum, energy crops in the frame of environmental protection from excessive nitrogen loads* Eur J Agron **25**: 30-39
- Bonomi G, Antignani V, Capodilupo M, Scala F (2010) *Identifying the characteristics of organic soil amendments that suppress soilborne plant diseases* Soil Biol Biochem **42**: 136-144
- Bradford MA (2014) *Good dirt with good friends* Nature **505**: 486-487
- Cifuentes R, de León R, Porres C, Rolz C (2013) *Windrow Composting of Waste Sugar Cane and Press Mud Mixtures* Sugar Tech **15**(4): 406-411
- Cifuentes R, Bressani R, Rolz C (2014) *The potential of sweet sorghum as a source of ethanol and protein* Energ Sustain Dev, in press

- Cosentino SL, Mantineo M, Testa G (2012) *Water and nitrogen balance of sweet sorghum (Sorghum bicolor moench (L.) cv. Keller under semi-arid conditions* Ind Crops Prod **36**(1): 329-342
- Curt MD, Fernández J, Martínez M (1995) *Productivity and water use efficiency of sweet sorghum (Sorghum bicolor (L.) Moench) cv. Keller in relation to water regime* Biomass Bioenerg **8**(6): 401-409
- Chauhan N, Singh MP, Singh A, Singh AK, Chauhan SS, Singh SB (2008) *Effect of biocompost application on sugarcane crop* Sugar Tech **10**(2): 174-176
- Diacono M, Montemurro F (2010) *Long-term effects of organic amendments on soil fertility. A review* Agron Sustain Dev **30**: 401-422
- Díaz B, Barreto B, Cairo P, Pineda E, Mas R, Acosta F, Becerra E, Clavelo B, Quiñonez R (2010) *La aplicación de fertilizantes orgánicos y minerales naturales en el cultivo de la caña de azúcar (parte II): efecto a largo plazo sobre el rendimiento y la calidad del suelo* Centro Azúcar **37**(1): 35-42
- Elherradi E, Soudi B, Chiang C, Elkacemi K (2005) *Evaluation of nitrogen fertilizing value of composted household solid waste under greenhouse conditions* Agron Sustain Dev **25**: 169-175
- Erickson JE, Woodard KR, Sollenberger LE (2012) *Optimizing Sweet Sorghum Production for Biofuel in the Southeastern USA Through Nitrogen Fertilization and Top Removal* Bioenerg Res **5**: 86-94
- Favoino E, Hogg D (2008) *The potential role of compost in reducing greenhouse gases* Waste Manag Res **26**: 61-69
- Holou RAY, Stevens G (2012) *Juice, sugar, and bagasse response of sweet sorghum (Sorghum bicolor (L.) Moench cv. M81E) to N fertilization and soil type* GCB Bioenergy **4**: 302-310
- Kawahigashi H, Kasuga S, Okuizumi H, Hiradate S, Yonemaru J (2013) *Evaluation of Brix and sugar content in stem juice from sorghum varieties* Grassland Sci **59**(1): 11-19
- Kumar SR, Shrotria K, Deshmukh JP (2008) *Characterizing Nutrient Management Effect on Yield of Sweet Sorghum Genotypes* Wrlld J Ag Sci **4**(6): 787-789
- Lingle SE, Tew TL, Rukavina H, Boykin DL (2012) *Post-harvest Changes in Sweet Sorghum I: Brix and Sugars* Bioenerg Res **5**: 158-167
- Maftoun M, Moshiri F, Karimian N, Ronaghi AM (2004) *Effects of Two Organic Wastes in Combination with Phosphorus on Growth and Chemical Composition of Spinach and Soil Properties* J Plant Nutr **27**(9): 1635-1651
- Martínez-Blanco J, Lazzano C, Christensen TH, Muñoz P, Rieradevall J, Møller J, Antón A, Boldrin A (2013) *Compost benefits for agriculture evaluated by life cycle assessment. A review* Agron Sustain Dev **33**: 721-732
- Meunchang S, Supamard P, Weaver RW (2006) *Tomato growth in soil amended with sugar mill by-products compost* Plant Soil **280**: 171-176
- Montemurro F (2009) *Different Nitrogen Fertilization Sources, Soil Tillage, and Crop Rotations in Winter Wheat: Effect on Yield, Quality, and Nitrogen Utilization* J Plant Nutr **32**: 1-18
- Montemurro F, Convertini G, Ferri D, Maiorana M (2005) *MSW Compost Application on Tomato Crops in Mediterranean Conditions: Effects on Agronomic Performance and Nitrogen Utilization* Compost Sci Utilization **13**(4): 234-242
- Montemurro F, Maiorana M (2007) *Nitrogen Utilization, Yield, Quality and Soil Properties In a Sugarbeet Crop Amended With Municipal Solid Waste Compost* Compost Sci Utilization **15**(2): 84-92
- Mylavarapu RS, Zinati GM (2009) *Improvement of soil properties using compost for optimum parsley production in sandy soils* Sci Horticult **120**(3): 426-430
- Qazi HA, Paranjpe S, Bhargava S (2012) *Stem sugar accumulation in sweet sorghum – Activity and expression of sucrose metabolizing enzymes and sucrose transporters* J Plant Physiol **169**(6): 605-613
- Ramos TB, Castanheira NL, Goncalves MC, Fernández ML, Janeiro MI, Lourenco ME, Pires FP, Martins JC (2012) *Effect of Combined Use of Brackish Water and Nitrogen Fertilizer on Biomass and Sugar Yield of Sweet Sorghum* Pedosphere **22**(6): 785-794
- Rolz C, de León R, Mendizábal de Montenegro AL, Cifuentes R (2014) *Ethanol from sweet sorghum in a year-round production cycle* Biomass Conv Bioref, in press

- Russo VM, Fish WW (2012) Biomass, extracted liquid yields, sugar content or seed yields of biofuel feedstocks as affected by fertilizer *Ind Crops Prod* **36**: 555–559
- Sakellariou-Makrantonaki M, Dimakas DS (2013) Effects of biosolids application on sweet sorghum biomass, water use efficiency and ethanol production *Fresenius Environ Bull* **22**(3a): 914
- Serrão MG, Menino MR, Martins JC, Castanheir N, Lourenco ME, Januario I, Fernandes ML, Goncalves MC (2012) Mineral Leaf Composition of Sweet Sorghum in Relation to Biomass and Sugar Yields under Different Nitrogen and Salinity Conditions *Comm Soil Sci Plant Anal* **43**: 2376–2388
- Sikora LJ, Szmidt RAK (2001) Nitrogen sources, mineralization rates, and nitrogen nutrition benefits to plants from composts. In: *Compost utilization in Horticultural cropping systems* PJ Stoffella, Kahn BA (Eds) Lewis Publishers.
- Sipos B, Reczey J, Somorai Z, Kadar Z, Dienes D, Reczey K (2009) Sweet Sorghum as Feedstock for Ethanol Production: Enzymatic Hydrolysis of Steam-Pretreated Bagasse *Appl Biochem Biotechnol* **153**(1): 151-162
- Sun XZ, Yamana N (2012) Determining effects of sowing time and nitrogen fertilizer rate on Brix of sweet sorghum using a gear type extractor *Trans ASABE* **55**(4): 1589-1594
- Tamang PL, Bronson KF, Malapati A, Schwartz R, Johnson J, Moore-Kucera J (2011) Nitrogen requirements for ethanol production from sweet and photoperiod sensitive sorghums in the Southern High Plains *Agron J* **103**(2): 431-440
- Teetor VH, Duclous DV, Wittenberg ET, Young KM, Chawhuaymak J, Riley MR, Ray DT (2011) Effects of planting date on sugar and ethanol yield of sweet sorghum grown in Arizona *Ind Crops Prod* **34**(2): 1293-1300
- Termorshuizen AJ, et al. (2004) The value of compost *Rev Environ Sci Bio/Technology* **3**: 343–347
- Tsuchihashi N, Goto Y (2004) Cultivation of sweet sorghum and determination of its harvest time to make us the raw material for fermentation, practice during rainy season of dry land of Indonesia *Plant Prod Sci* **7**(4): 442-448
- Weber J, Kocowicz A, Beker J, Jamroz E, Tyska R, Debicka M, Parylak D, Kordas L (2014) The effect of a sandy soil amendment with municipal solid waste (MSW) compost on nitrogen uptake efficiency by plants *Eur J Agron* **54**: 54-60
- Wortmann CS, Liska AJ, Ferguson RB, Lyon DJ, Klein RN, Dweikat I (2010) Dryland Performance of Sweet Sorghum and Grain Crops for Biofuel in Nebraska *Agron J* **102**(1): 319-326
- Yang L, Dun B, Zhao X, Yue M, Lu M, Li G (2013) Correlation analysis between key enzymes activities and sugar content in sweet sorghum stems at physiological maturity stage *Aus J Crop Sci* **7**(1): 84-92