

Uso eficiente del agua y producción óptima en maíz, con el uso de cuatro dosis de nitrógeno

Efficient water use and optimal production in corn, using four doses of nitrogen

Dr.C. Tomás Díaz Valdés^I, Dr.C. Leopoldo Partidas Ruvalcaba^I, Dr.C. Yolanda E. Suárez Fernández^{II},
M.C. Ramón Lizárraga Jiménez^I, M.C. Ángel López López^{III}

^IUniversidad Autónoma de Sinaloa, Sinaloa, México.

^{II}Universidad Agraria de La Habana, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba.

^{III} Instituto de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma de Baja California, México.

RESUMEN. La producción intensiva de maíz en zonas semiáridas se sustenta principalmente el agua y la fertilización nitrogenada, se busca hacer un manejo eficiente del agua y óptimo del nitrógeno (N), con la finalidad de mejorar el ingreso del productor y reducir la contaminación de las aguas subordinadas a las áreas agrícolas. El objetivo de este estudio fue determinar la eficiencia del uso del agua y la dosis óptima de nitrógeno mediante la aplicación de cuatro dosis de N en maíz. El experimento se llevo en Sinaloa, México. El diseño experimental fue un bloque completo al azar con cuatro repeticiones. Los tratamientos fueron control (0), 150, 300, 450 y 600 kg de N·ha⁻¹. Las variables evaluadas fueron: eficiencia en el uso del agua (EUA) índice de cosecha (IC) y rendimiento de grano (Yg). En las dosis de 300 y 450 kg de N·ha⁻¹ provocaron un efecto significativo en la EUA, IC y Yg. La dosis óptima de N fue de 477 kg de N·ha⁻¹, que ocasionó un rendimiento máximo de 9,89 Mg·ha⁻¹. La dosis óptima económica de N fue de 341 kg de N·ha⁻¹, con esta se obtuvo un rendimiento de 9,44 Mg·ha⁻¹.

Palabras clave: Zea Mays L., índice de cosecha, rendimiento óptimo.

ABSTRACT. Intensive corn production in semiarid areas is mainly based on water and nitrogen fertilization in order to increase the income for producers and to reduce the pollution of the waters which belong to agricultural areas. This paper is aimed at determining the water use efficiency and the optimal dose of nitrogen through the use of four doses of nitrogen in corn. The experiment was carried out in Sinaloa, Mexico. The experimental design was a randomize block with four repetitions. There were several treatments as control (0), 150, 300, 450 and 600 kg of N·ha⁻¹. The evaluated variables were water use efficiency (WUE), harvest index (HI), and grain yield. In doses of 300 kg and 450kg of N·ha⁻¹ there was a positive effect as to WUE, HI and grain yield. The optimal dose of N was 477 kg N·ha⁻¹, which caused a maximum yield of 9, 89 Mg·ha⁻¹. The optimal economic dose was 341 kg N·ha⁻¹, with a yield of 9, 44 Mg·ha⁻¹.

Keywords: Zea Mays L., harvest index, yield optimum.

INTRODUCCIÓN

En Sinaloa, México, la mayor superficie de maíz se cultiva en las zonas áridas y semiáridas, durante el ciclo agrícola otoño-invierno 2009-2010 se sembraron 471 mil hectáreas en la zona de riego, donde el rendimiento medio fue de 10,52 Mg·ha⁻¹ (SIAP, 2010). El maíz se cultiva de forma intensiva en Sinaloa, México, con una gran dependencia de fertilizantes nitrogenados y agua. El uso intensivo de los fertilizantes nitrogenados en la agricultura moderna está motivada por una alta producción de grano (Khan *et al.*, 2007). En las zonas áridas o semiáridas el agua es el factor más importante en la producción agrícola, por

lo que el aumento en la eficiencia del agua permite un manejo sostenible del recurso (Morison *et al.*, 2008). Las dosis altas de nitrógeno (N) usadas en la producción de maíz y la fuerte presión por el uso del agua debido a las características agroclimáticas áridas y semiáridas en Sinaloa, requiere de cuantificar la recuperación del N y la eficiencia en el uso del agua mediante el estudio de diferentes dosis de N, factores que están muy relacionados con la mejora en la economía de los productores y la calidad del agua subordinada a las áreas agrícolas.

El N, después del agua es un factor limitante para el desarrollo de las plantas en sistemas intensivos de producción

(Witcobe *et al.*, 2008; Hammad *et al.*, 2011), donde inducen marcados incrementos en el rendimiento de grano (Fiel *et al.*, 2005). En la actualidad las estrategias de manejo del N a nivel mundial en los sistemas de producción de cereales se caracterizan por una baja eficiencia en la recuperación del N y alta contaminación ambiental (Shanahan *et al.*, 2008). La eficiencia de recuperación del N (ERN) en cereales a nivel mundial es de 33% (Raun y Johnson, 1999), sin embargo Tonitto *et al.* (2006), consideran que más del 50% del N en los países agrícolas no es aprovechado por el cultivo. Donde la ENR es afectada por la época de aplicación y la forma en que se distribuye el N; de acuerdo a la demanda del cultivo y la capacidad fisiológica (Raun y Johnson, 1999; Castro-Luna *et al.*, 2005; Shanahan *et al.*, 2008).

Los productores agrícolas no tienen claro la dosis óptima de N, por lo que a menudo aplican un exceso de N elevando los costos de producción (Dellinger *et al.*, 2008). Para reducir éstos costos y mitigar la contaminación por N, es necesario contar con estrategias que mejoren el aprovechamiento del N (Arregui *et al.*, 2008), y que contribuya a optimizar el uso de los fertilizantes, ya que la contaminación con N no es solamente una relación de números, ya que para mantener niveles adecuados de productividad es necesario conocer la dosis óptimas económicas de nitrógeno, por el efecto positivo que tienen en la producción agrícola intensiva (Overman y Scholtz III, 2002), como la reducción de costos agrícolas y la mitigación ambiental.

El objetivo del presente estudio fue determinar el efecto de cuatro dosis de N en la eficiencia en el uso del agua, el índice de cosecha, índice de área foliar, rendimiento de grano, y la dosis óptima económica de N en maíz.

MÉTODOS

La investigación se realizó en la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Sinaloa, localizada a 24° 48' 30" latitud norte y 117° 24' 30" longitud oeste, con una altura de 38 m sobre el nivel del mar. El clima es semiá-

rido con lluvias en verano y una precipitación media anual de 800 mm (García, 1988).

Las propiedades físicas y químicas del suelo en el estrato de 0 a 60 cm se muestran en la Tabla 1. Se sembró el maíz híbrido Pioneer 30P49 el 31 de enero de 2009 y se cosechó el 24 de julio del 2010 ajustándose la humedad del grano al 14%. La densidad de siembra fue de 87 500 plantas·ha⁻¹ con una separación entre surcos de 0,8 m. Se aplicaron cuatro riegos: uno de presembrado y tres de auxilio, la lámina de riego aplicada se cuantificó con un medidor volumétrico marca ARAD, serie 1070253, con gasto nominal de 40 m³·h⁻¹. El diseño experimental fue bloques completos al azar con cuatro repeticiones, la unidad experimental fue de 20 m·8 m, la superficie evaluada fue 8,0 m² de la parte central de la unidad experimental. La aplicación de fertilizante químico se realizó en banda, usando urea y ácido fosfórico, como fuente de N y fósforo, respectivamente. La distribución del nitrógeno para cada uno de los tratamientos fue 30% de N se aplicó en presembrado y el 70% se aplicó en la etapa vegetativa de octava hoja, todo el fósforo se aplicó en presembrado (90 kg de P₂O₅·ha⁻¹).

TABLA 1. Propiedades físicas y químicas del suelo del sitio experimental

Características	Unidades	Profundidad, en cm	
		0-30	30-60
Materia orgánica	%	1,05	0,86
pH (agua)	-----	7,92	8,12
C.E.	dS m ⁻¹	0,63	0,61
N-NO ₃	mg kg ⁻¹	15,95	12,68
P-PO ₄ (Olsen)	mg kg ⁻¹	28,65	26,23
Da	Mg m ⁻³	1,24	1,27
Tamaño de partículas			
Arcilla	%	43,26	45,26
Limo	%	17,78	10,96
Arena	%	38,96	43,78
Textura	-----	Arcillosa	Arcillosa

Se determinó la biomasa aérea total de la planta, la materia seca se llevo a una estufa de aire forzado a una temperatura de 70 °C durante 48 horas a peso constante. El índice de cosecha (IC) se calculó mediante la fórmula: IC= Yg/B_{AT}, donde B_{AT}= biomasa aérea total kg ha⁻¹. El índice de área foliar (IAF) se determinó de acuerdo a la metodología propuesta por (Hunt, 1978), la formula usada fue: IAF= L_A/P: donde L_A= área foliar (m²) modelo (L_A = Largo x Ancho x 0,75) propuesto por Mendoza *et al.* (1984), y P= área ocupada por la planta en m². La eficiencia en el uso del agua (EUA) se determinó con la formula: EUA= Yg/L; donde L= lámina total de agua aplicada en cm y EUA se expresa en kg·ha⁻¹·cm⁻¹ (Al-Kaisi *et al.*, 2003). Las variables de respuesta se analizaron estadísticamente utilizando PROC GLM de SAS (SAS Institute, 1996). La separación de medias se hizo con la prueba de Tukey (α≤0,05). Para determinar la dosis óptima de producción (DOP), dosis óptima económica (DOE), rendimiento máximo y rendimiento óptimo económico de N, se aplicó el criterio económico de capital ilimitado con la restricción de la tasa de retorno mínimo del 50%, para la respuesta al rendimiento por efecto del N se uso un modelo cuadrático (Campillo *et al.*, 2010)

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Eficiencia en el uso del agua

En la Figura 1, se puede apreciar como fluctuó la EUA en el cultivo de maíz, con el uso de diferentes dosis de N. En el Análisis de Varianza realizado quedó demostrado que existen diferencias altamente significativas (P≤0,01) entre los tratamientos, el rango de variación de la EUA estuvo entre 81,64 y 168,54 kg·ha⁻¹·cm⁻¹. El tratamiento que logró estadísticamente la mayor EUA fue 450 kg de N·ha⁻¹ resultando igual al nivel de N de 300 kg·ha⁻¹, sin embargo éste fue superior estadísticamente al testigo y las dosis de 150 y 600 kg de N·ha⁻¹. Se puede apreciar que los valores de EUA en todos los casos fueron superiores

al testigo, lo cual demuestra que el N tiene un efecto positivo en mejorar la EUA. Sin embargo la EUA con la dosis de 600 kg de N·ha⁻¹ decrece 9,54% respecto a la dosis de 450 kg de N·ha⁻¹. Aunque existe una respuesta favorable del N a la EUA, pero si se excede en la dosis de N esta afecta la actividad fisiológica y productiva de la planta, provocando una disminución EUA. En forma general los resultados obtenidos en este estudio, donde se aplicó una lámina de 60,32 cm coinciden con la tendencia obtenida por Al-Kaisi y Yin (2003), quienes con una lámina de riego aplicada de 64 cm y cuatro dosis de N (30, 140, 250 y 360 kg·ha⁻¹) obtuvieron de un promedio de tres años un comportamiento positivo en la EUA (160.9, 172.10, 188.43 y 191,77 kg ha⁻¹·cm⁻¹), respectivamente.

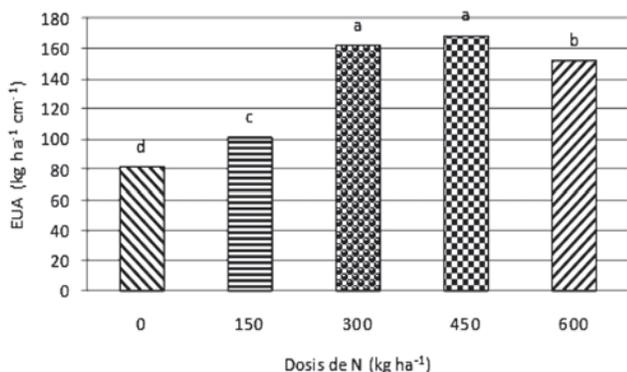


FIGURA 1. Valores promedios de la eficiencia en el uso del agua.

Índice de cosecha

Los resultados del análisis estadístico para el IC mostraron diferencia altamente significativa ($P \leq 0,01$) debido a las dosis de N. Las dosis de $N \geq 300$ kg de N·ha⁻¹ aumentaron significativamente los valores del IC, en cambio el IC para los tratamientos de $N \leq 150$ kg de N·ha⁻¹ fueron estadísticamente iguales (Figura 2). La respuesta en la producción de biomasa y grano se vio superada con las dosis de $N \geq 300$ kg de N·ha⁻¹, demostrando que la planta responde favorablemente a la fertilización nitrogenada, sin embargo la mayor expresión del IC se obtuvo con la dosis de 300 kg de N·ha⁻¹, declinando los valores de IC por abajo y por encima de dicha dosis. El efecto en la reducción del IC en las dosis de $300 < N < 300$ kg de N·ha⁻¹ se genera cuando la planta se sub o sobre fertiliza afectando la producción biomasa y de grano, De Juan-Valero (2005), en un estudio realizado con dosis N encontraron que para rendimientos de 7,21, 14,95 y 16,70 Mg·ha⁻¹ el IC fue de 48, 55 y 54% con dosis de 0,130 y 300 kg de N·ha⁻¹, respectivamente. Por otra parte Hammad *et al.* (2011), encontraron que con 250 kg de N·ha⁻¹ se obtuvo el máximo IC (42,72%). Las variaciones en el IC van relacionado con el material genético, las variables climáticas y la nutrición vegetal. Cano *et al.* (2001) encontraron que para la dosis de fertilización de nitrógeno-fósforo-potasio (NPK) de 184-69-0 kg·ha⁻¹ y rendimiento de 6,38 Mg·ha⁻¹ el IC fue 44,6%, en cambio cuando a la fertilización se le adiciono potasio (184-69-30) la respuesta del rendimiento fue un ligeramente mayor (6,41 Mg·ha⁻¹), y el valor del IC fue menor (37,3%).

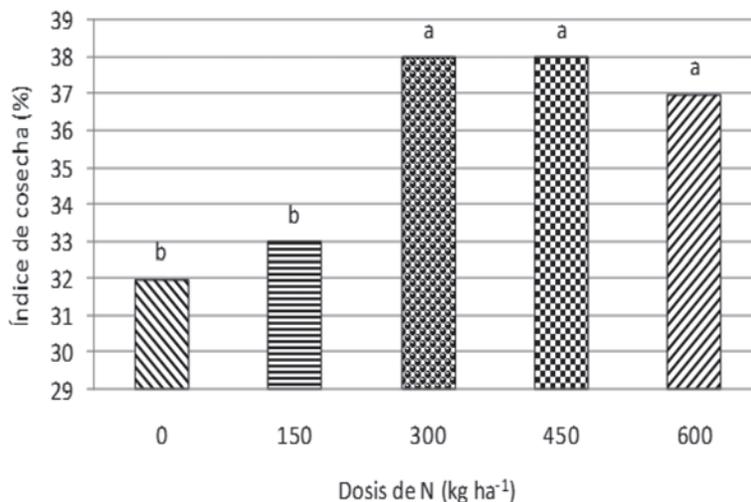


FIGURA 2. Valores promedios del índice de cosecha por dosis aplicada de nitrógeno.

Índice de área foliar

El nitrógeno indujo un efecto altamente significativo en el índice de área foliar ($P \leq 0,01$), la dosis de 450 kg de N·ha⁻¹ fue el que estimuló un mayor aumento en el IAF (Figura 3). La tendencia lograda por el incremento de 150 a 450 kg de N·ha⁻¹ fue positiva en el IAF, sin embargo con la dosis 600 kg de N·ha⁻¹ el IAF decreció un 10% respecto a la dosis de 450 kg·ha⁻¹ de N. El menor valor de IAF fue observado en el testigo. De Juan-Valero *et al.* (2005), encontraron que un incremento sostenible de N de 0 a 300 kg ha⁻¹ permite obtener valores máximos de IAF de 3,9 a 5,5 m²·m⁻² y esto se logra debido a un mayor alargamiento de las hojas, lo cual contribuye a un mayor porcentaje de intersección de la radiación solar, con efectos favorables a la producción de biomasa y grano (Dwyer y Stewart, 1986; Dwyer *et al.*, 1992; De Juan-Valero *et al.*, 2005) factores que están relacionados con el IC, que se emplean en la predicción de

rendimiento. Los valores de IAF para el rango máximo de acuerdo a lo anterior se obtuvieron con las dosis de N de 300 y 450 kg·ha⁻¹, con 3,97 y 4,11 m²·m⁻², respectivamente, contribuyendo a los máximos valores de IC. El comportamiento en el IAF con el aumento de N aplicado coincide con los resultados de Amado-Álvarez y Ortiz-Franco (1998), aunque estos autores lo obtuvieron en un rango de 250 a 550 kg de N·ha⁻¹ con una densidad de población de 98 mil plantas·ha⁻¹.

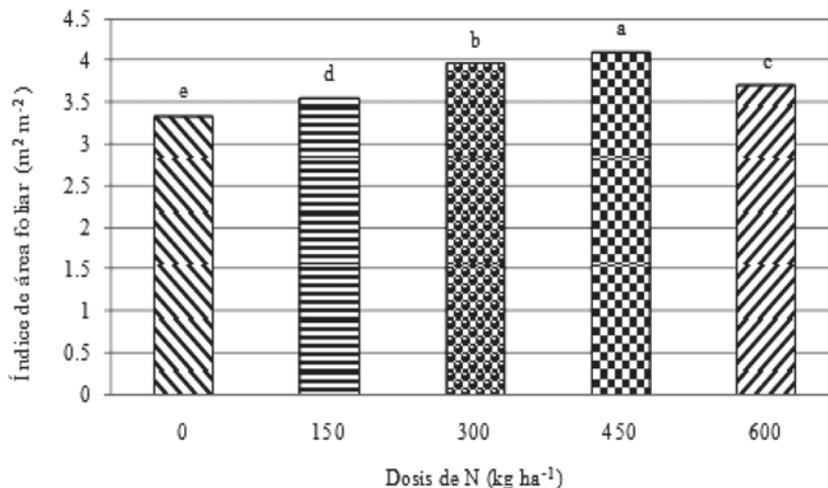


FIGURA 3. Valores promedios del índice de área foliar.

Rendimiento de grano y análisis económico

Hubo efecto significativo con la dosis del fertilizante nitrogenado sobre el rendimiento de grano unitario ($P \leq 0.01$). El incremento del rendimiento conforme se acrecentó las dosis de N presentó un patrón cuadrático. Dosis de 300 y 450 kg de N ha⁻¹ causaron el mismo efecto (Figura 4).

El rendimiento de grano ocurrió con diferencias altamente significativas ($P \leq 0,01$) y la comparación de medias indicó que en la parcela testigo obtuvo la menor cantidad de grano por unidad de superficie (4,92 Mg·ha⁻¹); mientras que los tratamientos de 300 y 450 kg de N·ha⁻¹ indujeron efectos similares entre sí (Figura 4), los tratamientos de 600 y 150 kg de N·ha⁻¹ aunque fueron superior al testigo los rendimientos decrecieron de 0,96 a 4,06 Mg·ha⁻¹, respectivamente en relación al tratamiento de 450 kg de N·ha⁻¹.

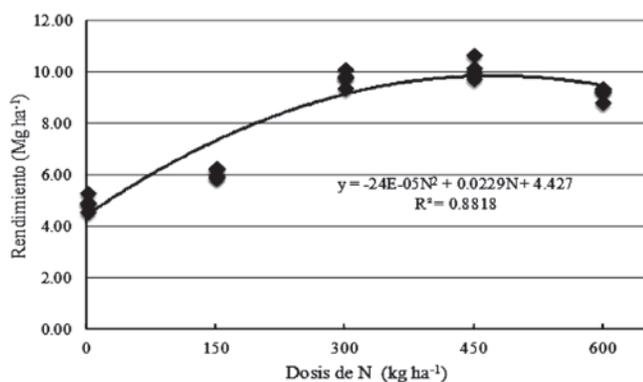


FIGURA 4. Rendimiento de grano del maíz en relación a la dosis de nitrógeno.

Resultados similares obtuvieron Varvel *et al.* (2007), quienes observaron que el máximo rendimiento de grano en un pe-

riodo de diez años varió de 10,44 a 13.63 Mg·ha⁻¹, en la mayoría de los años el rendimiento máximo de grano se produjo entre 150 y 200 kg de N·ha⁻¹. En general, la respuesta del rendimiento a la dosis de nitrógeno presenta un valor máximo, para después disminuir debido a un posible desequilibrio nutricional que se presentan en el suelo.

Para el cálculo de la dosis de N óptima (DOP) y económica (DOE), se asumió un costo por unidad de N de \$18.26 y un valor de \$2 787.00 por tonelada de maíz, se calculó la relación precios insumo/producto, y mediante el modelo de regresión cuadrático ($Y = 4.427 + 0.0229 \cdot N - 0.000024 \cdot N^2$) la dosis óptima de producción fue de 477 kg de N·ha⁻¹, donde el rendimiento máximo fue 9,89 Mg·ha⁻¹, en cambio la DOE fue de 341 kg de N·ha⁻¹, con un rendimiento óptimo de 9.44 Mg·ha⁻¹. La variante de estos resultados depende del sitio y la temporada (Varvel *et al.*, 2007), pero además del precio de los fertilizante y del valor de la cosecha (Blumenthal *et al.*, 2003).

CONCLUSIONES

- Las variable de eficiencia en el uso del agua, índice de cosecha y índice de área foliar mostraron su mayor respuesta con las dosis de 450 y 300 kg de N·ha⁻¹.
- La dosis óptima de nitrógeno fue de 477 kg de nitrógeno·ha⁻¹, en cambio la óptima económica fue de 341 kg de nitrógeno·ha⁻¹, con un rendimiento óptimo económico de 9,44 Mg ha⁻¹.

AGRADECIMIENTOS

Nuestro más sinceros agradecimientos a los colegas Dr. Teresa de Jesús Velázquez Alcaraz y Dr. Marino Valenzuela López, por su colaboración en esta investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AL-KAISI, M. M. & X. YIN: "Effects of nitrogen rate, irrigation rate, and plant population on corn yield and water use efficiency". *Agron. J.*, 95: 1475–1482, 2003.
2. AMADO-ALVAREZ, J. P.; P. ORTÍZ-FRANCO: "Respuesta del maíz de riego a humedad del suelo, nitrógeno y densidad de población en Cuauhtémoc, Chihuahua". *Terra*, 16: 239-245, 1998.
3. ARREGUI, L. M. and M. QUEMADA: "Strategies to improve nitrogen use efficiency in winter cereal crops under rainfed conditions". *Agron. J.*, 100:277–284, 2008.
4. BLUMENTHAL, J. M.; D. J. LYON & W. W. STROUP: "Optimal Plant Population and Nitrogen Fertility for Dryland Corn in Western Nebraska". *Agron. J.* 95:878–883, 2003.
5. CANO, O.; O. H. TOSQUY; M. SIERRA; F. A. RODRÍGUEZ: "Fertilización y densidad de población en genotipos de maíz cultivados bajo condiciones de temporal". *Agronomía Mesoamericana*, 12: 199-203, 2001.
6. CASTRO-LUNA, I.; F. GAVI-REYES; J. J. PEÑA-CABRIALES; R. NÚÑEZ-ESCOBAR; J. D. ETCHEVERS-BARRA: "Eficiencia de recuperación de N y K de tres fertilizantes de lenta liberación", *Terra Latinoamericana* 24: 277-282, 2005.
7. DE JUAN-VALERO, J. A.; M. MATURANO; A. ARTIGAO-RAMÍREZ; J. M. T. MARTÍN-BENITO & J. F. ORTEGA-ÁLVAREZ: "Growth and nitrogen use efficiency of irrigated maize in a semiarid region as affected by nitrogen fertilization", *Span. J. Agric. Res.*, 3(1), 134-144, 2005.
8. DELLINGER, A. E.; J. P. SCHMIDT & D. B. BEEGLE: "Developing Nitrogen Fertilizer Recommendations for Corn Using an Active Sensor". *Agron. J.*, 100:1546–1552, 2008.
9. DWYER, L. M. & D. W. STEWART: "Leaf area development in field-grown maize". *Agron. J.* 78: 334-343, 1986.
10. DWYER, L. M.; D. W. STEWART; R. I. HAMILTON & L. HOUWING: "Ear position and vertical distribution of leaf areal in corn". *Agron. J.*, 84: 430-438, 1992.
11. GARCÍA, ENRIQUETA: *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*, Instituto de Geografía, 217pp., UNAM, México, 1988.
12. HAMMAD, H. M.; A. AHMAD; F. AZHAR; T. KHALIQ; A. WAJID; W. NASIM & W. FARHAD: "Optimizing water and nitrogen requirement in maize (*Zea Mays* L.) Under semi arid conditions of Pakistan", *Pak. J. Bot.*, 43(6): 2919-2923, 2011.
13. KHAN, S. A.; R. L. MULVANEY; T. R. ELLSWORTH & C. W. BOAST: "The myth of nitrogen fertilization for soil carbon sequestration". *J. Environ. Qual.* 36:1821–1832, 2007.
14. MORISON, J. I. L.; N. R. BAKER; P. M. MULLINEAUX and W. J. DAVIES: "Improving water use in crop production". *Phil. Trans. R. Soc. B.* 363:639–658, 2008.
15. OVERMAN, A. R. & R. V. SCHOLTZ III: "Corn response to irrigation and applied nitrogen". *Soil Sci. Plant Anal.* 33: 3609-3619, 2002.
16. RAUN, W.R. & G.V. JOHNSON: "Improving nitrogen use efficiency for cereal production", *Agron. J.* 91: 57–351, 1999.
17. SHANAHAN, J. F.; N. R. KITCHEN; W. R. RAUN and J. S. SCHEPERS: "Responsive in season nitrogen management for cereals". *Comput. Electron. Agric.*, 61:51–62, 2008.
18. SIAP: "Servicio de Información y Estadística Agroalimentaria y Pesquera", SAGARPA. México., [en línea] 2010, Disponible en: http://www.siap.gob.mx/index.php?option=com_wrapper&view=wrapper&Itemid=351 [Consulta: abril 5 2013].
19. TONITTO, C.; M. B. DAVID & L. E. DRINKWATER: "Replacing bare fallows with cover crops in fertilizer-intensive cropping systems: A meta-analysis of crop yield and N dynamics". *Agric. Ecosyst. Environ.*, 112: 58–72, 2006.
20. VARVEL, G. E.; W. W. WILHELM; J. F. SHANAHAN & J. S. SCHEPERS: "An Algorithm for Corn Nitrogen Recommendations Using a Chlorophyll Meter Based Sufficiency Index". *Agron. J.*, 99:701–706, 2007.

Recibido: 10 de julio de 2012.

Aprobado: 5 de septiembre de 2013.

Tomás Díaz Valdés, Profesor e Investigador de la Universidad Autónoma de Sinaloa, Sinaloa, México, Correo electrónico: tdiaz10@hotmail.com