

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA
COLEGIO DE CIENCIAS AGROPECUARIAS
MAESTRÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS



TESIS

**USO EFICIENTE DEL NITRÓGENO, EL AGUA, Y
PRODUCCIÓN DE MAÍZ CON CINCO DOSIS DE
NITRÓGENO**

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARA OBTENER EL
GRADO DE MAESTRA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS**

**PRESENTA
ROSARIO CELENE BANDA PEREA**

**DIRECTOR DE TESIS
DR. TOMÁS DÍAZ VALDÉS**

**CO-DIRECTOR
M.C. MARINO VALENZUELA LÓPEZ**

CULIACÁN, SINALOA, ENERO DE 2011

ESTA TESIS FUE REALIZADA POR ROSARIO CELENE BANDA PEREA, BAJO LA DIRECCIÓN DEL CONSEJO PARTICULAR QUE SE INDICA; Y HA SIDO APROBADA POR EL MISMO COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS

CONSEJO PARTICULAR

DIRECTOR DE TESIS


DR. TOMÁS DÍAZ VALDÉS

CO-DIRECTOR DE TESIS


M.C. MARINO VALENZUELA LÓPEZ

ASESOR


DR. LEOPOLDO PARTIDA RUVALCABA

ASESORA


DRA. TERESA DE JESÚS VELÁZQUEZ ALCARAZ

CULIACÁN, SINALOA, ENERO DE 2011

AGRADECIMIENTOS

A Dios por haberme dado la vida y permitirme lograr mis propósitos guiando mi camino.

A la Universidad Autónoma de Sinaloa, Facultad de Veterinaria y Zootecnia, Facultad de Agronomía y Departamento de postgrado, por darme la oportunidad de realizar mis estudios de maestría.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por el apoyo brindado y otorgamiento de beca durante mis estudios de maestría.

Al Dr. Tomás Díaz Valdés, por su conocimiento, por su confianza, paciencia y amistad brindada a lo largo de mi trabajo. Muchas gracias.

Al M.C. Inocente Domínguez Calderón por su gran amistad, por apoyarme y darme animo cuando se han presentado momentos difíciles y principalmente por su apoyo durante mis estudios de postgrado.

A la Dra. Soila, Dra. Teresa de Jesús y al Dr. Leopoldo Partida, por su gran apoyo durante mis estudios de postgrado y por su gran disposición para ayudarme.

A los miembros del Comité Particular, por brindarme atención y dedicación durante la revisión y redacción de este trabajo.

A mis compañeros y amigos de maestría Gloria, Marco Antonio, Jesús y Miguel, por brindarme su amistad y por haberlos conocido.

A mi suegra la Sra. María Teresa Cota y a mi cuñada Teresita por ayudarme cuando tuve que moler las muestras de suelo y por todas sus atenciones. Muchas Gracias...

A mis Amigos Elodia Castro Silvas y Jorge Rabago por apoyarme durante todos estos años que tenemos de conocernos.

Muchas gracias a todos...

PARA TI MAMÁ

Este logro lo comparto contigo, ya que nunca has dejado de apoyarme y estar a mi lado, **gracias** madre por tu dedicación y fortaleza. Gracias a esto hoy me encuentro culminando mis estudios de maestría y este logro es también tuyo, ya que somos un equipo que logra vencer las adversidades y hoy hemos logrado cumplir con una meta más que fue terminar la maestría.

Muchas Gracias Mamá...

A MI ESPOSO

Gracias por tu comprensión y apoyo, por ayudarme sin esperar nada a cambio y porque comprendiste que tenía que dejarte solo algunas veces para poder superarme. Es por eso y muchos motivos más que formas parte importante en este logro y más en mi vida.

Gracias Amor....

ÍNDICE

	Pág.
AGRADECIMIENTOS	i
ÍNDICE DE CUADROS	ii
ÍNDICE DE FIGURAS	iii
RESUMEN	iv
I. INTRODUCCION	1
II. PROBLEMA CIENTÍFICO	3
III. HIPÓTESIS	3
IV. OBJETIVOS	4
V. REVISIÓN DE LITERATURA	5
5.1. Situación agroalimentaria	5
5.2. Importancia del maíz en México	6
5.3. Impacto Ambiental, económico y social de la agricultura	7
5.4. El impacto ambiental en Sinaloa por el uso de las tecnologías en el cultivo de maíz	8
5.5. Importancia del agua	12
5.6. El riego y su efecto en la producción de maíz en México	12
5.7. El riego, los fertilizantes nitrogenados, y su efecto medio ambiental	16
5.8. Influencia del riego y el nitrógeno en el crecimiento de la planta de maíz	23
5.9. La fertilización nitrogenada en la producción de maíz en México	27
5.10. Rentabilidad del maíz por el uso del nitrógeno	31
5.11. La importancia del nitrógeno en la agricultura y su ciclo	33

5.11.1. El nitrógeno en el suelo	34
5.11.2. La eficiencia de aplicación del fertilizante nitrogenado y su efecto en la planta	38
5.11.3. Funciones específicas del nitrógeno en la planta	40
5.11.4. Importancia del nitrógeno en la planta	41
VI. MATERIALES Y MÉTODOS PARA LA INVESTIGACIÓN	
EXPERIMENTAL	43
6.1. Descripción de las condiciones del sitio del experimento	43
6.2. Caracterización del sitio de estudio.	43
6.3. Técnicas de riego empleada en la investigación.	43
6.3.1. Técnica de riego por surcos	43
6.4. Muestreo inicial para determinar las características hidrofísicas, y químicas del suelo	44
6.5. Diseño experimental	46
6.6. Tecnología para el cultivo	46
6.6.1. Preparación del terreno	46
6.6.2. Siembra	47
6.6.3. Control de plagas	47
6.6.4. Fertilización	47
6.6.5. Cosecha	48
6.7. Variables de estudio	48
6.7.1. Análisis de crecimiento	48
6.7.2. Indicador de eficiencia del agua en la planta	49

6.7.3. Indicador de eficiencia en el uso del nitrógeno en la planta	49
6.8. Análisis económico	50
6.9. Análisis estadísticos	50
VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	51
7.1. Altura de planta	51
7.2. Diámetro de tallo	51
7.3. Peso de 1000 granos	52
7.4. Índice de área foliar	52
7.5. Índice de cosecha	54
7.6. Eficiencia en el uso del agua	55
7.7. Eficiencia de recuperación del nitrógeno	56
7.8. Eficiencia en el uso del nitrógeno	57
7.9. Rendimiento del grano y análisis económico	58
VIII. CONCLUSIONES	60
IX. BIBLIOGRAFÍA	61
ANEXO	81

ÍNDICE CUADROS

	Página
Cuadro 5.1. Dosis de nitrógeno, rendimiento de maíz en zonas agrícolas de riego en Culiacán y Los Mochis, Sinaloa.	30
Cuadro 5.2. Influencia de las variables analizadas en la producción de maíz en algunas regiones del Norte de Sinaloa para suelos arcillosos (Mendoza <i>et al.</i> , 1998).	31
Cuadro 6.1. Propiedades físicas y químicas del suelo del sitio experimental.	46
Cuadro 6.2. Tratamientos y dosificación del nitrógeno en maíz.	47
Cuadro 7.1. Resultados de la comparación de medias de las variables fenotípicas.	51

ÍNDICE FIGURAS

	Página
Figura 5.1. Comportamiento de la superficie sembrada y rendimiento del maíz en el ciclo agrícola otoño-invierno en el Estado de Sinaloa de 1980 a 2005. (Fuente: SIAP, 2006.).	9
Figura 6.1. Determinación de densidad aparente en el área experimental, por el método del cilindro.	44
Figura 6.2. Determinación de materia orgánica	45
Figura 7.1. Valores promedios del índice de área foliar por dosis aplicada de nitrógeno.	54
Figura 7.2. Valores promedios del índice de cosecha por dosis aplicada de nitrógeno	52
Figura 7.3. Valores promedios de la eficiencia en el uso del agua.	56
Figura 7.4. Porcentaje de la eficiencia de recuperación del nitrógeno (ERN) y eficiencia en el uso del nitrógeno (EUN).	57
Figura 7.5. Rendimiento de grano del maíz en relación a la dosis de nitrógeno.	58

RESUMEN

La producción intensiva de maíz en zonas semiáridas se sustenta principalmente en dos factores la fertilización nitrogenada y uso del agua. El estudio de dosis de nitrógeno (N) conlleva a estrategias para disminuir los excesos de N con el objetivo de hacer más eficiente su uso y del agua, y mejorar el ingreso del productor. El objetivo de este estudio fue determinar el efecto en el crecimiento, desarrollo, producción, uso eficiente del nitrógeno y el agua debido a cinco dosis de nitrógeno en maíz. El diseño experimental utilizado fue bloques completos al azar con cuatro repeticiones. Los tratamientos fueron 0, 150, 300, 450 y 600 kg de N ha⁻¹. Las variables evaluadas fueron: altura de planta, diámetro de tallo y peso de 1000 granos, índice de cosecha (IC), índice de área foliar (IAF), eficiencia en el uso del agua (EUA), eficiencia de recuperación del nitrógeno (ERN), eficiencia en el uso del nitrógeno (EUN) y rendimiento de grano. En general las dosis de 300 y 450 kg de N ha⁻¹ provocaron un efecto significativo en el IC, IAF, EUA y rendimiento de grano. El incremento en la dosis de N provocó una reducción significativa en la ERN. La dosis de 300 kg de N ha⁻¹ ocasionó la mayor EUN. La dosis óptima fue de 477 kg de N ha⁻¹, que ocasionó un rendimiento máximo de 9.89 Mg ha⁻¹. La dosis óptima económica fue de 341 kg de N ha⁻¹, con esta se obtuvo un rendimiento óptimo económico de 9.44 Mg ha⁻¹.

Palabras clave: *Zea mays L., rendimiento óptimo, máximo rendimiento.*

RESUMEN

La producción intensiva de maíz en zonas semiáridas se sustenta principalmente en dos factores la fertilización nitrogenada y uso del agua. El estudio de dosis de nitrógeno (N) conlleva a estrategias para disminuir los excesos de N con el objetivo de hacer más eficiente su uso y del agua, y mejorar el ingreso del productor. El objetivo de este estudio fue determinar el efecto en el crecimiento, desarrollo, producción, uso eficiente del nitrógeno y el agua debido a cinco dosis de nitrógeno en maíz. El diseño experimental utilizado fue bloques completos al azar con cuatro repeticiones. Los tratamientos fueron 0, 150, 300, 450 y 600 kg de N ha⁻¹. Las variables evaluadas fueron: altura de planta, diámetro de tallo y peso de 1000 granos, índice de cosecha (IC), índice de área foliar (IAF), eficiencia en el uso del agua (EUA), eficiencia de recuperación del nitrógeno (ERN), eficiencia en el uso del nitrógeno (EUN) y rendimiento de grano. En general las dosis de 300 y 450 kg de N ha⁻¹ provocaron un efecto significativo en el IC, IAF, EUA y rendimiento de grano. El incremento en la dosis de N provocó una reducción significativa en la ERN. La dosis de 300 kg de N ha⁻¹ ocasionó la mayor EUN. La dosis óptima fue de 477 kg de N ha⁻¹, que ocasionó un rendimiento máximo de 9.89 Mg ha⁻¹. La dosis óptima económica fue de 341 kg de N ha⁻¹, con esta se obtuvo un rendimiento óptimo económico de 9.44 Mg ha⁻¹.

Palabras clave: *Zea mays L.*, rendimiento óptimo, máximo rendimiento.

SUMMARY

The intensive production of maize in semiarid areas is mainly based two factors of nitrogen fertilization and water use. The study dose of nitrogen (N) leads to strategies to reduce excess N with the objective of making more efficient use of N and water, and improve income producer. The objective of this study was to determine the effect on growth and development, production, efficient use of nitrogen and water by five dose of nitrogen applied in maize. The experimental design was randomized complete block four replications. The treatments were 0, 150, 300, 450 and 600 kg N ha⁻¹. The variables evaluated were: plant height, stem diameter, thousand grain weight, harvest index (HI), leaf area index (LAI), efficiency water use (EUA), recovery efficiency nitrogen (ERN), efficiency use nitrogen (EUN) and grain yield. In Generally doses of 300 and 450 kg N ha⁻¹ caused a significant effect in the IC, LAI, EUA and grain yield. The increase in the dose of N caused a significant reduction in ERN. The dose of 300 kg N ha⁻¹ caused the greatest EUN. The optimum dose of N was 477 kg N ha⁻¹, which caused a maximum yield of 9.89 Mg ha⁻¹. The economic optimum dose of N was 341 kg N ha⁻¹, was obtained with this economic optimum performance 9.44 Mg ha⁻¹.

Key words: *Zea mays L., economic optimum, maximum yield.*

I. INTRODUCCION

En Sinaloa, México, la mayor superficie de maíz se cultiva en las zonas áridas y semiáridas, durante el ciclo agrícola otoño-invierno 2008-2009 se sembraron 469 mil hectáreas en la zona de riego, donde el rendimiento medio fue de 10.5 Mg ha⁻¹ (SIAP, 2009). El uso intensivo de los fertilizantes nitrogenados en la agricultura moderna está motivada por una alta producción de grano (Khan *et al.*, 2007). El nitrógeno (N) es uno de los factores que provoca alteraciones en las variables fenotípicas del cultivo de maíz, el atraso o adelanto en el comportamiento de estas variables provoca modificaciones en el peso de grano, contribuyendo en algunos casos en reducción en el rendimiento.

Amanullah *et al.* (2009) realizaron un estudio con densidades de población de maíz y tres dosis de N (60, 120 y 180 kg de N ha⁻¹) aplicado en forma espacial en el tiempo, y determinaron que la calendarización y aplicación del N tuvo un efecto significativo en las variables fenológicas. Por otra parte, Eck (1984) trabajaron con seis dosis de N (0, 70, 140, 210, 280 y 350 kg ha⁻¹), y encontraron que el peso de grano se incrementó con el aumento de la dosis de N.

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, así como el ahorro y la calidad del agua subordinada a las áreas agrícolas.

Olalde-Gutierrez *et al.* (2000), determinaron que el N tiene un efecto positivo en la eficiencia del uso del agua. Por otra parte Escalante-Estrada (2001), señala que algunas

prácticas agrícolas, como la fertilización nitrogenada pueden mejorar la eficiencia en el uso del agua y aumentar la producción.

El N es el principal factor limitante para el desarrollo de las plantas en muchos suelos en sistemas intensivos de producción (Witcobe *et al.*, 2008), 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 y 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).

Para reducir los costos de inversión y mitigar la contaminación por N es necesario contar con estrategias que mejoren la ERN (Arregui *et al.*, 2008). La mitigación no es solamente una relación de números, ya que para mantener niveles adecuados de productividad es necesario conocer la dosis de nitrógeno, por el efecto positivo que tienen en la producción agrícola (Overman y Scholtz III, 2002), como la reducción de costos agrícolas y la mitigación ambiental.

II. PROBLEMA CIENTÍFICO

La producción de maíz en Sinaloa es a través de un sistema intensivo, el logro de rendimientos rentables se basa en niveles elevados de N y altos requerimiento de agua, lo que se puede caracterizar por bajas eficiencias en la recuperación del N y del agua, contribuyendo a efectos negativos al medio ambiente y bajo ingresos económicos de los productores.

III. HIPÓTESIS

El aumento en la dosis de nitrógeno en el cultivo de maíz reduce la eficiencia en el uso del N a través de una menor eficiencia fisiológica pero aumenta la eficiencia en el uso del agua.

IV. OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Determinar el efecto en el crecimiento, desarrollo, producción, uso eficiente del nitrógeno y el agua debido a cinco dosis de nitrógeno aplicado en el cultivo de maíz.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar el efecto de cinco niveles de nitrógeno en el crecimiento y desarrollo del maíz.
- Calcular la eficiencia de recuperación del nitrógeno y del agua en la planta de maíz por efecto de cinco niveles de nitrógeno.
- Evaluar el efecto en el rendimiento debido a cinco niveles de nitrógeno.
- Determinar el óptimo económico y fisiológico de la producción de maíz por efecto de cinco niveles de nitrógeno

V. REVISIÓN DE LITERATURA

5.1. Situación Agroalimentaria.

El hambre y las enfermedades han afectado a la humanidad desde los albores de la historia y durante muchos siglos, hasta alrededor de 1800, el rendimiento promedio de grano fue alrededor de 800 kg ha^{-1} , el suministro de alimentos era sólo para unos pocos, y los principales problemas fueron la baja fertilidad y las pérdidas de rendimiento debido a enfermedades y plagas de los cultivos (FAO, 2006).

Hace más de 100 años nadie habría pronosticado que la agricultura mundial podría producir suficientes alimentos y otros productos agrícolas para 3.75 veces más habitantes que existía en el año de 1900 (1'600 millones habitantes), esto parecía inalcanzable pero, se ha logrado a través de una combinación de varios factores tecnológicos, como los sistemas de riego, fertilizantes y nuevas variedades de plantas cultivadas con mayor potencial de producción, resistente a plagas y enfermedades, siendo este el factor que más avances se ha hecho en la producción de alimentos (FAO, 2006).

El sector primario en México enfrenta serios problemas sociales y ambientales; la pobreza y la desigualdad dentro del campo, además del déficit en la producción de maíz, el cual es de aproximadamente tres millones de toneladas al año, así como la deforestación, salinización, erosión, contaminación en la mayoría de las cuencas hidrográficas, pesticidas y nutrientes (Escalante y Escalante, 2008).

La agricultura sostenible enfrenta grandes desafíos en el futuro para el logro de alimentar una creciente población entre los retos según Yu-Kui *et al.* (2009), está el aumentar los rendimiento y mejorar la calidad de las plantas cultivadas, esto está

acompañado de una alta tasa de uso de fertilizantes nitrogenados con la finalidad de aumentar los rendimientos y mejorar el contenido proteínico de los productos agrícolas, sin embargo existe poca evidencia que el aumento de las tasa de N puede mejorar la composición mineral en el maíz.

La agricultura, desde siempre ha sido la base fundamental de las civilizaciones modernas y en países en desarrollo, su crecimiento se sustenta en la curva de aprendizaje durante años en la producción de cultivos y el uso de tecnologías, lo cual ha contribuido a salvaguardar la seguridad alimentaria y promover el desarrollo regional de los países en lo económico, comercial e industrial (Mustieles, 2008).

5.2. Importancia del maíz en México.

El maíz es el producto agrícola más importante en México; es base de una gran cultura; es simiente de la civilización de Indo-América, como el trigo lo es del Medio Oriente y de Europa, el arroz de Asia y la papa de los países Sajones y Nórdicos. Al ser el principal alimento de los mexicanos, dio origen a alimentos sui generis como la tortilla y numerosos derivados de consumo cotidiano que nutren a nuestro pueblo (PRONASE, 1977). La producción de maíz en México representa más de dos tercios del valor neto de la producción agrícola, además, abarca la mitad del total de la superficie de todos los cultivos; prácticamente tres millones de personas trabajan en el cultivo de maíz (más del 40 % de la fuerza de trabajo del sector agrícola) o cerca de un 8 % del total de la fuerza laboral en México (18 millones de personas), aproximadamente el 68 % de todo el maíz se utiliza directamente como alimento humano, por lo que el consumo *per cápita* en México es de 127 kg (Blanco *et al.*, 2005; Inzunza *et al.*, 2005, Guzmán *et al.*, 2009).

5.3. El impacto ambiental, económico y social de la agricultura.

La contaminación agrícola a provocado efectos en la salud humana (Ongley, 1997). Según informes de la Organización Mundial de la Salud (OMS), la presencia de nitratos y de nitritos en el agua se ha asociado a la metahemoglobina, especialmente en infantes criados con biberón; el nitrato se puede presentar por el excesivo uso de los fertilizantes o lixiviado de las aguas residuales o desperdicios orgánicos dentro de las aguas superficiales o subterráneas (World Health Organization, 2006). Nyamangara *et al.*, (2003) plantean que el exceder el límite de 11 mg L^{-1} de $\text{NO}_3\text{-N}$ genera un riesgo para el ser humano, las normas de salud ambiental de agua para uso y consumo humano de México (Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, 2000), la Agencia de Protección del Medio Ambiente de Estados Unidos (USEPA, 2003) y la Organización Mundial de la Salud (World Health Organization, 2006), señalan que la concentración máxima permisible de $\text{NO}_3\text{-N}$ en el agua potable es de 10 mg L^{-1} y para $\text{NO}_2\text{-N}$ es de $\leq 1.0 \text{ mg L}^{-1}$. Por otra parte, de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana la concentración de nitrógeno amoniacal ($\text{NH}_4\text{-N}$), para consumo humano es de 0.50 mg L^{-1} . Además, aunque no se ha podido demostrar claramente las relaciones causales, la ingesta de nitratos y nitritos en el agua para consumo contaminada puede inducir metahemoglobina en humanos (Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, 2000).

La contaminación con nitratos a las aguas subterráneas sigue siendo una de las principales preocupaciones de todos y estas preocupaciones son mayores en áreas donde el agua subterránea está cerca de la superficie del suelo y en zonas que tienen cultivos de regadío con altas necesidades de fertilizante nitrogenado (Varvel *et al.*, 1997).

La situación económica y social del campo en México, presenta un panorama desolador frente al inicio de este siglo, el crecimiento de la población, la dependencia alimentaria con Estados Unidos de América, las necesidades globales de alimento, el cambio climático que se debe al deterioro ambiental y sus efectos en la incidencia de sequías e inundaciones, crea un panorama de incertidumbre (López, 2003). El mejoramiento en la productividad de los agroecosistemas agrícolas ha contribuido al deterioro ambiental de las áreas subordinadas a las zonas agrícolas.

En efecto, los problemas ambientales que ocasiona la agricultura, tienen que ver con la modernización del campo, la manera en la que se expande la frontera agropecuaria y las formas de supervivencia campesina que dan lugar a la sobreexplotación de los recursos naturales (Karam y Beraud, 2003).

5.4. El impacto ambiental en Sinaloa por el uso de las tecnologías en el cultivo de maíz

El uso intensivo de los fertilizantes nitrogenados en la agricultura moderna está motivada por una alta producción de grano (Khan *et al.*, 2007). El uso de esta tecnología en la producción de maíz se traduce en un rendimiento promedio de ocho a doce $t\ ha^{-1}$ (Aguilar, 2004). La superficie sembrada de maíz blanco en Sinaloa se incrementó significativamente de 1990 al 2005 (Figura 5.1), pasando de 42 291 a 434 564 ha, respectivamente, su producción se incrementó de 233 150 a 3 974 871 t, respectivamente, de esta actividad productiva dependen cerca de 25 mil productores; la producción promedio en el ciclo agrícola 2005-2006 fue de 4,2 millones de toneladas, con un rendimiento promedio de $9,8\ t\ ha^{-1}$ (SAGARPA, 2006).

Así mismo en el ciclo agrícola 2008-2009 fue de 4 920 424 de toneladas obtenidas con un rendimiento de $10,43\ t\ ha^{-1}$ incrementándose muy poco en el ciclo 2009-2010 con una producción de 4 988 393 toneladas con un rendimiento de $10,57\ t\ ha^{-1}$ respectivamente

(SIAP, 2010). Sin embargo, el comportamiento de la superficie agrícola sembrada, así como el mejoramiento de la producción media del sistema de agricultura intensiva, se puede atribuir a un elevado uso de fertilizantes, insecticidas y pesticidas, además del uso de semillas híbridas y al riego (Beraud, 2001; de Ita, 2003), por lo que la liberación comercial comprometida con el TLCAN presiona a los productores comerciales de granos básicos de Sinaloa, a obtener niveles de productividad similares a los productores de Estados Unidos, lo cual ha generado las mismas limitaciones ambientales de los países desarrollados por la misma tecnología empleada (de Ita, 2003).

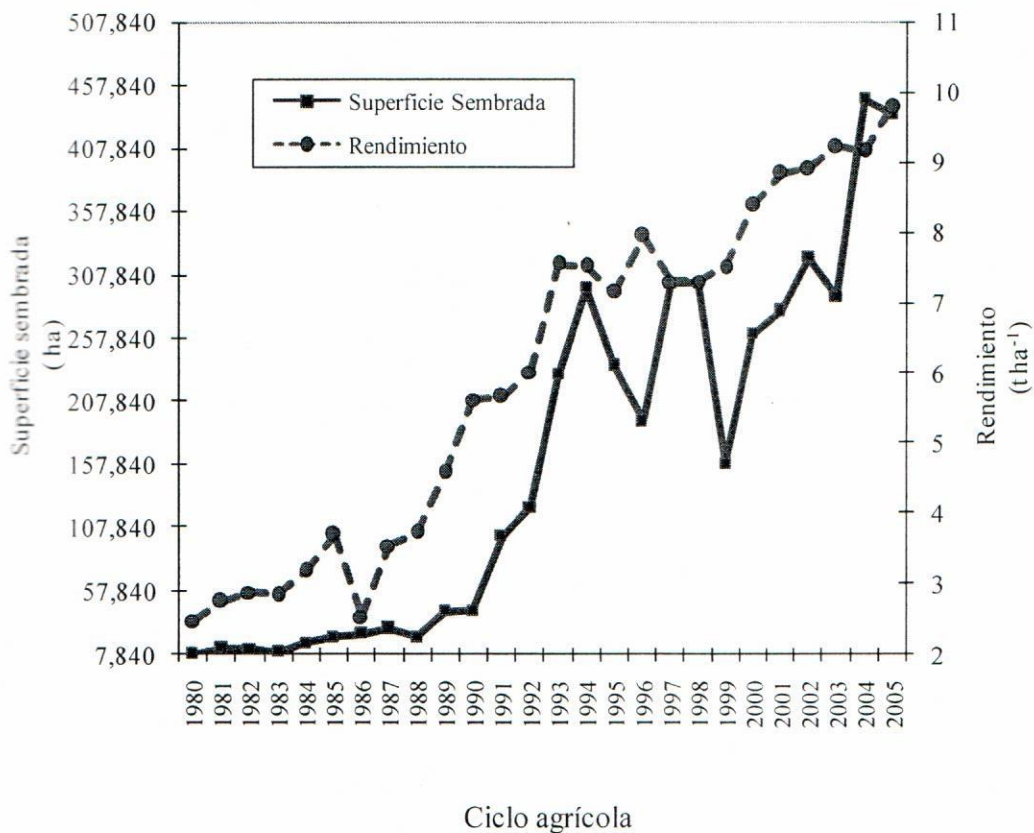


Figura 5.1. Comportamiento de la superficie sembrada y rendimiento del maíz en el ciclo agrícola otoño-invierno en el Estado de Sinaloa de 1980 a 2005. (Fuente: SIAP, 2006.)

Por tanto, no es sorprendente que los impactos negativos en el medio ambiente de Estados Unidos por la producción industrial del maíz (elevado uso de sustancias químicas y uso de agua a niveles no sustentables en plantación sometida a un intenso regadío), sean un fiel reflejo en Sinaloa (Blanco *et al.*, 2005).

Además del empobrecimiento de suelos que provoca la agricultura intensiva en Sinaloa, también resulta preocupante la contribución contaminante de esta actividad en los cuerpos de agua, debido a los residuos de nitratos, entre otros nutrientes (Karam y Beraud, 2003).

La productividad del suelo depende de diversos factores; sin embargo, para mantener la productividad del cultivo de maíz es necesario proporcionar una fertilización adecuada, que sea lo más balanceada posible, lo cual es una práctica poco común, ya que un uso excesivo de fertilizante puede generar toxicidad en las plantas y generar un desequilibrio entre los nutrientes, además las malas prácticas de fertilización, principalmente por nitrógeno en el caso del maíz, han contribuido en la contaminación de los cuerpos de agua subordinados a las áreas agrícolas en el estado de Sinaloa, además de provocar problemas de intoxicación a la planta de maíz por exceso de nitrógeno que se aplica; esto causa una disminución en los rendimientos, incremento en los costos de producción y afecta el bolsillo de los agricultores (Díaz *et al.*, 2008).

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). El agua es un recurso natural estratégico que escasea en Sinaloa, que ha limitado que sólo se siembre una vez al año en la mayor parte de los distritos de riego del Estado (de Ita, 2003; Karam y Beraud, 2003; Garrido, 1996).

Además, el desarrollo social y económico, así como la estabilidad política de México,

dependen de mantener los "servicios esenciales" que aportan los ecosistemas, siendo el agua para uso agrícola uno de los más importantes (Karam y Beraud, 2003).

Por tanto, ya que la agricultura de Sinaloa depende directamente de la disponibilidad de agua, la preocupación del gobierno deberá ser de invertir en investigación sobre tecnologías que reduzcan el uso de químicos y energía, e impulse políticas que estimulen el uso de tecnologías sustentables (de Ita, 2003; Karam y Beraud, 2003). Los estímulos a los productores agrícolas pueden promover la adopción de tecnologías innovadoras, que sean menos dañinas para el ambiente o que tengan un impacto ambiental general positivo, tales como sistemas de riego por goteo diseñados para reducir el gasto de agua, o tecnologías similares (Mayrand *et al.*, 2003).

Flores y Sarandón (2002), mencionan que los sistemas agrícolas sustentables deben mantener constante el capital natural, donde, la selección de las diferentes tecnologías agrícolas se sigue haciendo mediante un análisis costo-beneficio simplificado, que tiende a sobreestimar la rentabilidad de algunos sistemas de producción y puede incentivar la degradación del capital natural porque no incluye los costos ecológicos generados por la actividad productiva.

La sustentabilidad de los sistemas considera, entre otros aspectos, la prevención de la contaminación de fuentes de agua por nitratos provenientes de los fertilizante aplicados o producto de la mineralización del nitrógeno orgánico, busca garantizar la conservación de las propiedades físicas del suelo que están asociadas al movimiento de agua y nutrientes para reducir las pérdidas de suelo y nutrientes por erosión hídrica (Torres *et al.*, 2005).

eran determinar los factores que afectan la absorción de agua y la capacidad de campo en condiciones de temporal, así como la necesidad de realizar investigación sobre las técnicas de riego, y el mejoramiento de variedades con mayor potencial productivo y eficientes en el aprovechamiento del agua. Además Kjine (2003), señala que la productividad del agua en maíz se ha visto reflejado en los últimos 30 años, por los cambios tecnológicos generados en el mejoramiento genético del maíz, la cual se ha basado en una evaluación cuidadosa de las características de la planta, generando híbridos de alto rendimiento.

Según Coronel (1977), en suelos de textura arcillosa se recomienda aplicar de cuatro a siete riegos de auxilio; la planta no debe sufrir deficiencias de humedad durante los periodos críticos de su crecimiento inicial y desarrollo, como la germinación, floración (masculina y femenina) y madurez lechosa. Sin embargo, CEVACU (1985) recomienda seis riegos para variedades de maíz de ciclo corto y cuatro o cinco para variedades precoces. No obstante, la recomendación de riego en la zona del Valle de Culiacán, San Lorenzo y El Carrizo en Sinaloa, México es de seis riegos de auxilio, para que la planta se desarrolle satisfactoriamente (INIFAP, 1990; Mendoza *et al.*, 1998).

En general se le da poca importancia al uso y manejo del agua, ya que se dan más riegos de los necesarios; experimentalmente se ha visto que con seis o siete riegos de auxilio el maíz produce altos rendimientos, a la vez que se tiene mayor eficiencia en el uso del agua (Mendoza, 1993).

Los recursos hídricos de México se encuentran mal distribuidos, mientras que en el sureste hay una disponibilidad de más del 67 %, en el centro es aproximadamente del 21%, en tanto que, en el norte se tiene en promedio del 12 % de la disponibilidad del agua a nivel nacional, además en el país se utiliza el 15 % del volumen de disponibilidad natural media del agua (476 456 hm³); sin embargo en el norte de México se utiliza más

del 40 % de la disponibilidad, lo que se considera por la Organización de las Naciones Unidas (ONU) como fuerte presión por el recurso hídrico (CNA, 2004). El agua está entre los factores relevantes del medio que tienen relación con la producción de cosechas (Larque, 1989).

A través de estudios realizados en México sobre el efecto producido por el agua en el rendimiento de maíz, se conoce que esta planta es muy sensible a la deficiencia de humedad; sin embargo, esta deficiencia reduce más el rendimiento de grano cuando ocurre durante el espigamiento (floración), y la primera parte de la formación de grano conocida como jiloteo (Fernández y Laird, 1958; Hernández y Laird, 1958; Wellhausen, 1960; Myren, 1970; Peraza *et al.*, 1998; Mendoza *et al.*, 2003; CEVACU, 2003; Ojeda *et al.*, 2006; CNA, 2004; Montemayor *et al.*, 2006).

El riego tiene como propósito fundamental aumentar el rendimiento de las cosechas, mediante el suministro oportuno y suficiente de agua de acuerdo a las necesidades fisiológicas de la planta, así como por la distribución de los fertilizantes solubles (Rojas, 1981).

La técnica de riego por surcos, a nivel parcelario, ha logrado un gran avance en las últimas dos décadas, sin embargo, esto no ha repercutido en el estado actual de riego en México, ya que en la mayoría de los estudios realizados se han registrado problemas de excesos y déficit de agua, cuantificando índices de eficiencia que difícilmente superan el 60 %, a pesar de que se tienen evidencias experimentales que muestran que se pueden lograr niveles de eficiencia superiores al 90 %, mediante un buen diseño y manejo del riego (Catalán, 1995; Ojeda *et al.*, 2006).

Durante muchos años se ha venido regando en forma empírica y sin cuantificar el agua aplicada en la mayoría de las zonas de riego en México; el agricultor proporciona las láminas de agua según costumbre y criterio, con la tendencia a dar un máximo de riegos, en base a la creencia de que de esa forma obtendrá mayores rendimientos unitarios,

generando con ello desperdicios importantes de agua por sobrerriego, cuyos efectos por seguir de este modo son: disminución de la superficie total bajo riego y la salinización progresiva de los suelos (Palacios, 1978), sin embargo, existen otros efectos importantes, como la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas por nutrientes y pesticidas.

El requerimiento de agua en maíz de 500 mm, se logra con la aplicación de cinco riegos de auxilio con láminas de diez cm, recomendando longitudes de surcos no mayores de 200 m (Mendoza, 1997). Aunque, en el Valle del Fuerte, Sinaloa, México, Ojeda *et al.* (2006) obtuvo un consumo total de agua de 44 cm para maíz, donde, muestra una demanda máxima promedio de 5,4 mm d⁻¹, por lo que, el promedio del consumo de agua en todo el ciclo fue 2,7 mm d⁻¹.

El INIFAP (2003) menciona que el número total de riegos depende de las condiciones climáticas y del tipo de suelo, sugiere de cuatro a cinco riegos de auxilio en suelos de textura arcillosa, en surcos con longitud de 200 a 250 m, para evitar estrés hídrico a la planta, sobre todo, en los períodos críticos de su desarrollo.

Sin embargo, a pesar de ciertas preocupaciones sobre la ineficiencia técnica del uso del agua en la agricultura, su productividad se incrementó por lo menos en 100 por ciento entre los años 1961 y 2001, el principal factor responsable por este incremento ha sido el aumento de los rendimientos, pero los datos de productividad de agua por unidad es muy variante, ya que está afectado por el ambiente donde se desarrollan las plantas y los distintos tipos de manejo del cultivo (Kijne, 2003).

Considerando que la agricultura de riego es el principal factor de desarrollo de zonas áridas y semiáridas de México, y dado que las sequías recurrentes y la competencia por el agua son la principal amenaza al desarrollo en estas zonas; por tanto, la agricultura de riego debe disminuir los volúmenes aplicados sin una merma significativa en los rendimientos, aplicando una estrategia integral de su manejo para incrementar

rendimientos en condiciones de baja disponibilidad y alta competencia por agua (Ojeda *et al.*, 2006).

Los estímulos a los productores agrícolas pueden promover la adopción de tecnologías innovadoras, que sean menos dañinas para el ambiente o que tengan un impacto ambiental general positivo, tales como sistemas de riego por goteo diseñados para reducir el gasto de agua, o tecnologías similares (Mayrand *et al.*, 2003).

Los lixiviados de nitrógeno procedentes de los campos sembrados con maíz (*Zea mays* L.) debido a la excesiva aplicación de fertilizantes nitrogenados en el Suroeste de Michigan en los E.E.U.U., constituyen una amenaza constante para la calidad del agua, aún cuando muchos agrónomos han recomendado reducir la cantidad de fertilización nitrogenada para contener un riesgo ambiental (Rasse *et al.*, 2000).

5.7. El riego, los fertilizantes nitrogenados, y su efecto medio ambiental.

Ningún ser humano tiene derecho a desperdiciar el agua que otros de sus semejantes puedan necesitar, teniendo presente que constituye un recurso escaso (Israelsen y Hansen, 1965), y que en la producción agrícola en zonas áridas y semiáridas, el riego es la fuente más importante de agua para las plantas, por lo que los problemas de escasez, implican la realización de un uso más eficiente del agua, de aquí que, de acuerdo a la fuente antes mencionada, el rendimiento debido a la distribución de agua representa una medida para comparar sistemas de riego, para determinar su efecto en la producción de la planta y su impacto que genera en el ambiente.

De acuerdo a Henry y Heinke (1999), la gran demanda de agua por parte de la agricultura nos ha hecho poner atención en las prácticas del pasado, por lo que, en el futuro un uso provechoso del agua dependerá del empleo de nuevos métodos sociales, técnicos, económicos y políticos en el manejo y administración del agua.

Pereira *et al.* (2000) indican que el agua es un factor importante en la producción agrícola, el cual debe ser usado como un recurso natural escaso en cantidad y calidad. El balance de agua es una técnica adecuada de manejo del agua para riego. Asimismo, que el lavado de nitratos se ha vuelto una preocupación importante para las aguas superficiales y subterráneas.

Existe una relación directa entre la fertilidad, el movimiento y contenido de agua en el suelo; también existe entre la fertilidad, y la calidad del agua y como resultado la eficiencia en su manejo. El agua y su calidad han pasado a ser factores limitantes. La calidad del agua "usada" en agricultura, se cuantifica por parámetros como la salinización, la eutrofización y por la posible contaminación con bioplaguicidas y fertilizantes (Romero, 2005).

Según Manoliadis (2001), el desarrollo sustentable de la agricultura, como un objetivo deseado en el manejo del riego, es resultado de la reciente conciencia social por la escasez de agua para la producción de alimentos.

La producción de alimentos y fibras a través del sector agrícola es un componente esencial y estratégico de cualquier sociedad, donde el fertilizante ha sido el factor crítico en la agricultura para alcanzar el éxito en la producción de alimentos y fibras. Sin embargo, los efectos colaterales indeseables sobre la calidad ambiental han sido correlacionados con el desarrollo de los sistemas de producción modernos (Kiely, 1999).

Prakasa y Puttanna (2000); Singh (2000), coinciden en que la actividad agrícola en la India, representa un problema ambiental serio, ya que a través de ésta actividad el hombre ha contribuido al deterioro de la calidad del agua superficial y subterránea por nitratos.

Los impactos de la contaminación con nitratos y fósforo, entre otros productos, se deben principalmente a las formas de producción intensiva a través del uso excesivo de fertilizantes (Nemeth *et al.*, 1998; Cambardella *et al.*, 1999; Deng y Tabatabai, 2000; He

et al., 2000; Paramasivam *et al.*, 2001; Carlson y Osiensky, 2001; McLay *et al.*, 2001; Altom *et al.*, 2002; Costa *et al.*, 2002; Dinnes *et al.*, 2002; Krusekopf *et al.*, 2002; Langeveld *et al.*, 2007; Semaan *et al.*, 2007).

Sharmasarka *et al.* (2001); Rasse *et al.* (2000), Plantean que una mala administración de los fertilizantes nitrogenados ha causado serios problemas de contaminación con nitratos (NO_3) en la región oeste de los E.E. U.U., que se riega por surcos o inundación, donde consideran que las prácticas de manejo de riego de bajo volumen, como el riego por goteo, pueden ofrecer una alternativa de aprovechamiento para controlar los lixiviados y el uso del agua en la agricultura.

Las mayores fugas de N (lixiviación y desnitrificación) se encuentran estrechamente ligados con el manejo del agua (Peña *et al.*, 2002). De tal manera que el manejo deficiente de la fertilización nitrogenada y del agua, está ligado al deterioro del recurso agua y al aumento de los costos de producción (Monroy *et al.*, 2002).

Ongley (1997) considera que los suelos que mantienen un uso intensivo de los fertilizantes en la producción de las plantas de maíz, suelen tener grandes pérdidas de nutrientes, en comparación con los suelos dedicadas a los pastos con usos menos intensivos, además, las prácticas agrícolas en la producción de plantas cultivadas inadecuadas son causa de erosión, y pérdidas significativas de nutrientes.

El manejo de los fertilizantes nitrogenados tiene un impacto importante en la producción vegetal, ya que el nitrógeno es el factor más limitante para el desarrollo de la planta en muchos suelos, donde los fertilizantes nitrogenados inducen marcados incrementos en el rendimiento de grano (Fiel *et al.*, 2005). Sin embargo, dicho manejo también genera impactos negativos, ya que la fertilización nitrogenada en exceso constituye una importante fuente de contaminación difusa, que contribuye al aumento de la concentración de nitratos en las aguas superficiales y subterráneas (Arauzo *et al.*, 2003).

Por lo tanto, para elevar la productividad es necesario conocer cómo interactúan los diversos factores implicados en la producción de las especies vegetales, por lo que el estudio de la aplicación y dosis de nitrógeno, y del agua, es importante por el efecto positivo que tienen éstos factores en la producción de las plantas (Overman y Scholtz III, 2002).

Páez (2001) considera que para lograr la sustentabilidad económica y social, es fundamental garantizar la sustentabilidad ambiental que busca el mejoramiento del hombre, protegiendo y conservando la funcionabilidad de los ecosistemas naturales.

Para lograr sistemas de producción agrícolas intensivos y sostenibles, que permitan incrementos de la producción y generación de ganancias económicas, es necesario desarrollar o adecuar las tecnologías para el manejo del agua, suelo y planta. Dentro de las cuales se deben considerar la eficiencia de utilización de fertilizantes, conservación del suelo y agua, así como el desarrollo de métodos mejorados de riego (Zapata, 2002).

De confirmarse, el crecimiento mundial de la población humana alcanzará 8 500 millones de habitantes en el año 2025, por lo que se requerirá una expansión en la producción de alimentos de aproximadamente el 40-50 % en los próximos 30-40 años (Ongley, 1997; Jiménez y Lamo, 1998).

Lo anterior, sólo podrán alcanzarse con tasas de expansión del regadío del orden del 2,3 % anual. Sin embargo, la tasa actual de expansión es inferior al 1 %, debido a elevados costos de transformación del riego, al fracaso relativo de un buen número de nuevos regadíos, y a que los suelos más aptos para el riego ya están siendo utilizados (Jiménez y Lamo, 1998).

Mateo (1999) menciona que para lograr una buena eficiencia en la aplicación de agua en la parcela es imprescindible una elevada uniformidad en la distribución, de lo contrario se producen abundantes pérdidas de agua, las cuales ocurren por infiltración profunda, sobre todo en la cabeza de la parcela o por escorrentía.

La aplicación de altas dosis de fertilizantes incrementa los costos de producción y contamina el agua del subsuelo, por lo cual es importante que se evalúe esta variable en diferentes aspectos, a fin de tener más claridad sobre el manejo de la misma (Mendoza *et al.*, 1998).

En los sistemas agrícolas, la aplicación excesiva del fertilizante nitrogenado puede producir desplazamientos de NO_3^- a las capas más profundas del suelo, que puede impactar en las aguas subterráneas (Quiñónez *et al.*, 2007).

El riego y la fertilización generan grandes cambios en la hidrología y la química del agua subterránea en zonas agrícolas. Los efectos ocasionados dependen localmente de muchas variables, incluyendo las diferentes fuentes de agua para riego, el diseño y sistema de distribución del agua de riego, los fertilizantes, y el ajuste hidrogeológico (Kart *et al.*, 2007).

La contaminación de aguas subterráneas por nitratos, es un problema global y comúnmente es asociado con orígenes difusos procedentes de la agricultura intensiva (Spalding y Exner, 1993).

Cadía (2005) considera que la agricultura moderna es una de las principales contribuidoras a los problemas medioambientales actuales. La agricultura se considera una de las principales fuentes de contaminación por nutrientes (eutrofización de las aguas dulces y marinas, incremento en las concentraciones de nitratos en las aguas subterráneas y superficiales).

Altas cantidades de N son regularmente adicionadas en los suelos de los sistemas de producción agrícola en Norteamérica y Europa occidental, ha conducido a considerables problemas ambientales; como eutrofización de aguas terrestres y costeras, y a una disminución de la capa de ozono en la estratosfera, estos problemas tienen como meta principal en la agricultura reducir las emisiones nocivas de N a un mínimo, para ello, es

necesario comprender los procesos de transformación del N, y también la cantidad de interacciones de los componentes del ciclo del N (Ritter y Bergstrom, 2001).

Cao *et al.* (2003) consideran que las pérdidas de nitrógeno y fósforo de la producción agrícola en China, han tenido efectos cada vez más negativos en la agricultura, y han contribuido a la degradación de la calidad del agua superficial, subterránea y de los estuarios.

En el noroeste de México, se estima que las áreas de humedales poseen una extensión de 236 000 ha, los cuales han experimentado alteraciones significativas en las últimas cinco décadas por las actividades antropogénicas; como la agricultura, procesos industriales, desarrollo urbano y acuacultura, el sistema lagunar Altata-Ensenada del Pabellón, localizado en el Estado de Sinaloa, asociado a los escurrimientos del valle de Culiacán, Sinaloa, ha sido especialmente afectado por la entrada de nutrientes, derivados de más de 130 000 ha de tierras de cultivo, por lo que actualmente el sistema lagunar muestra una tendencia a la eutrofización (Soto *et al.*, 2003).

De acuerdo con Páez (2001), las zonas agrícolas del noroeste que están alterando los ecosistemas costeros, a través de la contribución de la carga de nutrientes, corresponden a los valles de Mexicali, B. C., del Yaquí y del Mayo, en Sonora; el Carrizo, El Fuerte y Culiacán, en Sinaloa; estos tres últimos se localizan en la zona norte y centro del Estado de Sinaloa, además de otras áreas pequeñas en que se practica la agricultura intensiva. El mismo autor también considera que el aporte de nitrógeno proveniente de la agricultura constituye una carga total anual de 20 920 y 28 436 t para Sinaloa y Sonora, respectivamente.

Comúnmente muchas aguas superficiales y áreas costeras muestran signos de eutrofización en Europa (Jansons *et al.*, 2003; Wolf *et al.*, 2005). En el oeste de Europa, la intensificación de la agricultura y ganadería ha venido acompañada del aumento en el uso de los fertilizantes inorgánicos, donde el incremento de la entrada de nutrientes, vía fertilizantes y estiércol, excede a la salida vía la absorción de los nutrientes por las

plantas, este desbalance genera serios problemas de contaminación a las aguas subterráneas y superficiales, contribuyendo con más del 50 % de la carga total de N hacia las aguas superficiales (Oenema *et al.*, 1998).

Los balances de nitrógeno son calculados y utilizados como una herramienta para monitorear las pérdidas regionales y nacionales de N hacia el ambiente. En los países bajos de Europa, el 70 % de las pérdidas de N proviene de la agricultura, durante un periodo de diez años (1986-1996), se determinó que la pérdida promedio de N fue de 274,45 kg/ha/año, donde el rango de variación fluctuó de 252-306 kg de N/ha/año (Van Eerd y Fong, 1998).

La contaminación de aguas subterráneas y sub superficiales, a partir de nitratos, ha sido incrementada en el sur de Ontario, Canadá, en un período de tres años, el promedio de las pérdidas de nitrato acumuladas en la capa superficial del suelo, que va a dar a las aguas de drenaje, se calculó en 83,9 kg de N ha⁻¹, esto ha conducido en Canadá a revisar y crear nuevas prácticas de manejo de la agricultura (Tan *et al.*, 2002), tendencias que se están planteando, para asegurar una producción estable de alimentos y que sea acorde con la calidad ambiental (Altieri y Nicholls, 2000).

López *et al.* (2006a) consideran que en suelos ferralíticos rojos compactados, las pérdidas de agua y nitratos pueden llegar a ser considerablemente grandes en dependencia de la humedad procedentes del riego y los ingresos totales de agua y fertilizante al perfil del suelo, debido fundamentalmente al comportamiento de la conductividad hidráulica en los mismos. Esto significa que el riego tiene una gran influencia en la movilidad del N, ya que de acuerdo a Quiñónez *et al.* (2007) la respuesta a las aplicaciones de N está influenciada por el manejo del riego, frecuencia de aplicación del N, el momento de aplicación, así como los procesos del suelo como la nitrificación, desnitrificación, inmovilización, volatización y lixiviado.

Además, las prácticas de riego pueden influir en la concentración de nitratos en las aguas superficiales poco profundas y las aguas subterráneas en los suelos agrícolas, como

ocurrió en la cuenca de Willamette, localizada al noroeste de Oregon, Estados Unidos, donde las concentraciones de nitratos fueron de $<0,05$ a $2,80 \text{ mg L}^{-1}$ (Nolan y Stoner, 2000). También las dosis empleadas de N influyen en los lixiviados de nitratos, ya que en un estudio realizado por Nyamangara *et al.* (2003) señalan que a medida que se incrementa la dosis de fertilizante nitrogenado los lixiviados de nitratos aumentan.

Estrada *et al.* (2002) realizaron un estudio para determinar el balance de nitrógeno en una parcela con drenaje subterráneo en un suelo de textura arcillosa, y encontraron que la máxima concentración de N-NO_3 en el agua de escurrimiento superficial fue $2,2 \text{ mg L}^{-1}$ y en el drenaje subterráneo fue $2,7 \text{ mg L}^{-1}$, donde, en ambos casos la concentración fue menor a la permisible para el consumo humano (10 mg L^{-1}); respecto al N-NH_4 la máxima concentración en el escurrimiento superficial encontrada fue $6,8 \text{ mg L}^{-1}$ y en el drenaje subterráneo fue $1,7 \text{ mg L}^{-1}$, superando el límite permisible para el consumo humano de $0,4 \text{ mg L}^{-1}$, de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994.

Spalding *et al.* (2001) Señalan que la tecnificación del riego disminuye el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas, ya que en estudios realizados encontraron que el manejo de la fertilización del maíz mediante el sistema de pivote central (fertirriego) la concentración de N-NO_3 de las aguas subterráneas se mantuvo en 13 mg L^{-1} , en tanto, la técnica convencional de riego en surcos y riego intermitente la concentración de N-NO_3 fue de 30 mg L^{-1} .

5.8. Influencia del riego y el nitrógeno en el crecimiento de la planta de maíz.

El rendimiento del maíz está determinado principalmente por el número final de granos logrados por unidad de superficie, el cual es función de la tasa de crecimiento de las plantas alrededor del período de floración (Andrade *et al.*, 1996). Por lo que, García (2002) considera que para alcanzar altos rendimientos, el maíz debe lograr un óptimo estado fisiológico en floración, cobertura total del suelo y alta eficiencia de conversión de radiación interceptada en biomasa, además, la adecuada disponibilidad de nutrientes

disponibles en la solución del suelo, especialmente a partir de que éstos son requeridos en mayor cantidad, que es cuando la planta tiene de 5 a 6 hojas, le permite asegurar un buen crecimiento foliar y una alta eficiencia de conversión de la radiación interceptada, razón por lo cual es necesario conocer los requerimientos de las plantas, así como la oferta del suelo para determinar las necesidades de fertilización, donde la absorción dependerá del contenido hídrico del suelo y el campo de exploración del sistema de raíces durante el crecimiento y desarrollo de la planta de maíz. Por lo tanto, esto dependerá de la técnica de riego empleada, ya que el riego por goteo puede mantener un nivel adecuado de humedad y niveles de concentración de nitrógeno alrededor del sistema de raíces durante su crecimiento en las diferentes etapas de su desarrollo de la planta de maíz, provocando un óptimo crecimiento de la planta en comparación de la técnica de riego por surcos.

Montemayor *et al.* (2006) encontraron que la eficiencia en el uso del agua en la producción de forraje de maíz con riego por goteo superó significativamente al sistema de riego por surcos.

Con el objetivo de definir estrategias óptimas de manejo del agua, mediante un modelo de simulación (STICS), se determinó que el máximo rendimiento ($5,22 \text{ t ha}^{-1}$) para el cultivo de maíz se obtuvo con una evapotranspiración total (Et) óptima de 480 mm, esto se logra cuando en la fase de establecimiento se consume el 15% de la Et , en la fase de floración-fructificación se debe consumir el 54 % de la Et total y el 21 % se consume en la fase de maduración-cosecha. Lo anterior permitió establecer la siguiente norma de riego: 2,9 mm diarios ó 20,3 mm semanales en los primeros 25 días del cultivo; de 3,5 mm diarios o 24,5 mm semanales entre los 25 y los 100 días y en la etapa final una norma de 2,5 mm diarios o 17,5 mm semanales hasta los 120 días del cultivo, donde se suspende el riego, los resultados permitieron definir láminas de riego total y parcial con lo que se logran alcanzar rendimientos máximos, con una eficiencia óptima del recurso agua y energía (López *et al.*, 2006b).

Según Castellanos *et al.* (2000), la eficiencia de aplicación del N varía en función de la tecnificación del riego, en el riego por gravedad la eficiencia oscila entre el 40 al 65 %, en aspersión del 60 a 70 % y en goteo puede ser superior al 70 %.

Para Pérez *et al.* (2000), el N es el elemento que más restringe el crecimiento de las plantas, y la importancia de éste es un hecho reconocido universalmente que no requiere de mayores justificaciones. Este hecho fue confirmado por Barrancos y Díaz (2005) en la región de la Pampa Arenosa, donde consideran que la producción está parcialmente limitada por la oferta de N en el suelo. Aunque Barbieri *et al.* (2003) determinaron que las elevadas respuestas en el rendimiento de grano de las plantas de maíz se deben a la fertilización con nitrógeno y fósforo.

Navarro (2000) señala que la forma de asimilación del N (nitríca o amoniacal), depende en gran parte de la edad y de la especie de la planta, del pH del suelo, de su composición, e incluso de la pluviometría anual. Asimismo, el maíz se desarrolla en forma satisfactoria en suelos privados de nitratos, utilizando sólo nitrógeno amoniacal. Nitrógeno que, según Andrade *et al.* (1996), se acumula en la parte aérea de la planta de maíz, en cantidades que oscilan de 240 a 300 kg ha⁻¹, con tasa máxima de 3,7 kg ha⁻¹ día⁻¹, que se mantiene prácticamente constante entre los 25 y los 100 días después de la emergencia.

De acuerdo con Ferrer *et al.* (2003), señalan que valores por encima el umbral crítico de 210 kg de N-NO₃ ha⁻¹ (45 mg de N-NO₃ kg⁻¹ de suelo) en el espesor de suelo de 0-30 cm se pueden obtener rendimientos de maíz de 14 t de grano ha⁻¹, sin necesidad de aplicar fertilización suplementaria, sin embargo, cuando los valores están por abajo del crítico (210 kg de N-NO₃ ha⁻¹) se recomienda la adición de fertilización nitrogenada hasta llegar al nivel crítico para lograr rendimientos cercanos a las 14 t de grano ha⁻¹. Además, consideran que para obtener un rendimiento objetivo de 14 t de grano ha⁻¹ el nivel crítico

de contenido de N en el grano debe ser de 1.2 kg de N·100 kg⁻¹ de semilla, para lo cual se requiere mínimamente 300 kg de N ha⁻¹ en el suelo.

Villar *et al.* (2000) citado por Ferrer *et al.* (2003), señalan que para una expectativa de rendimiento en maíz de 10 t de grano ha⁻¹ se puede lograr con niveles críticos de N-NO₃ en el suelo (0-30 cm) entre 94-142 kg de N ha⁻¹ (21 a 32 mg de N-NO₃ kg⁻¹ de suelo).

Según Sainz *et al.* (2000), para el logro de rendimientos de maíz de 9 t de grano ha⁻¹ los niveles críticos de N-NO₃ disponibles en el suelo (0-30 cm) se situaron entre 15 a 17 mg de N-NO₃ kg⁻¹, en cambio para obtener rendimientos de 15 t de grano ha⁻¹ los umbrales críticos oscilaron entre 24 a 27 mg de N-NO₃ kg⁻¹ de suelo.

Soto *et al.* (2002) encontraron que al aumentar la cantidad de N en el suelo existe un efecto positivo en el rendimiento de la producción de biomasa y el contenido de proteína en la planta de maíz. Por otra parte, Amado y Ortíz (1998) determinaron que con 400 kg de N ha⁻¹, un déficit de humedad del suelo del 60 % y una densidad de población de 101 300 plantas ha⁻¹; se logra un rendimiento de grano de 13,5 t ha⁻¹, sin embargo, la mejor alternativa económica la obtuvieron con un rendimiento de 13,2 t ha⁻¹, el cual fue obtenida con un déficit de humedad del 30 %, 250 kg de N ha⁻¹ y 89 000 plantas ha⁻¹.

Soto *et al.* (2004), a través de un estudio comparativo entre dos híbridos de maíz y cinco dosis (no parcializadas) de fertilizante nitrogenado: 0 (testigo), 100, 200, 300 y 400 kg de N ha⁻¹, determinaron que el fertilizante nitrogenado no originó efecto significativo sobre la altura de las plantas; sin embargo, mediante otro estudio donde se parcializó la aplicación del fertilizante se observó un efecto significativo, siendo el nivel de 400 kg de N ha⁻¹ el mejor tratamiento; no obstante, con los niveles de 200 ó 400 kg de N ha⁻¹ la altura de planta fue superior a la que alcanzaron aquellas que no fueron fertilizadas (testigo).

Meléndez *et al.* (2001), estudiando el efecto que produce el fertilizante nitrogenado en dos variedades de maíz, luego de sufrir una inundación durante el crecimiento de las

plantas, encontraron que no existieron diferencias significativas entre el peso seco del vástago de la planta, durante el periodo de recuperación de 15 días, entre las poblaciones de plantas fertilizadas y las no fertilizadas, relacionando la falta de efecto a que el periodo de recuperación no fue lo suficiente largo para detectar cambios en el peso seco. Al-Kaisi y Yin (2003) consideran que la absorción de N en la planta de maíz tiene respuesta positiva al riego, niveles de N, y a la densidad de población de plantas, lo cual tiene relación con lo observado por Overman y Scholtz III (2002), quienes mencionan que el rendimiento de maíz es muy dependiente de la disponibilidad del agua y del nitrógeno aplicado.

La comprensión del destino de nitrógeno (N) en los suelos agrícolas, cuando es afectado por la absorción de la planta, es importante para desarrollar prácticas de manejo que maximicen la eficiencia en la absorción del N para minimizar las pérdidas de N (Quiñónez *et al.*, 2007).

5.9. La fertilización nitrogenada en la producción de maíz en México.

Además del agua, Páez *et al.*, (2007), considera que el nitrógeno (N) es el nutriente más importante para los seres vivos y uno de los elementos clave que limitan los cultivos agrícolas y acuícolas y la cría y engorda de animales. Dada su importancia para la agricultura, enormes cantidades de nitrógeno son suministradas a los suelos y en cantidades moderadas es añadido a la acuicultura.

La fertilización constituye uno de los principales factores que limitan la producción agrícola, pues los cultivos absorben sólo una fracción del fertilizante aplicado que oscila entre 10 y 60% (Peña-Cabriales *et al.*, 2001).

A su vez Hofman y Van (2005); Fuentes (2002); Fiel *et al.*, (2005), coinciden que el nitrógeno (N) es un factor limitante en el crecimiento de las plantas, siendo éste el

nutriente más importante en el crecimiento y desarrollo de las plantas cultivadas, porque se requiere en cantidades altas, comparado con los otros nutrientes esenciales (fósforo, potasio, calcio, etc.).

Por otra parte, Domínguez (1997) considera que es importante la comprensión del crecimiento y desarrollo de la planta, como respuesta de la interacción entre los caracteres particulares impresos en los genes y la influencia que sobre ellos ejercen factores externos a lo largo del ciclo vegetativo de la planta. Además, considera que la disminución del rendimiento por la competencia entre plantas, ya sea por luz, agua, nutrientes, y otros factores ambientales que potencialmente limitan el rendimiento, es una condición necesaria para entender la interacción suelo, planta y medio ambiente, así como para provocar en las plantas un aprovechamiento óptimo de los nutrientes (Modarres *et al.*, 1998; Havlin, *et al.*, 1999).

Las malas prácticas del uso de los fertilizantes nitrogenados en la producción de maíz ha contribuido a la contaminación de los cuerpos de agua subordinados a las áreas agrícolas en Sinaloa, provocando disminución en los rendimientos y incremento en los costos de producción (Díaz *et al.*, 2008). Por lo que, al seleccionar la dosis, la fuente y el método de aplicación del nitrógeno, se refleja en una adecuada rentabilidad y en mitigar el efecto de la contaminación de N por la agricultura (Cerrato y Blackmer, 1990).

Fernández y Laird (1958) determinaron que en condiciones de cero sequía y fertilización con 150 kg de N ha⁻¹ se obtuvo el máximo rendimiento de grano (5,2 t ha⁻¹). Por otra parte Hernández y Laird (1958) estudiaron la influencia de la humedad del suelo y niveles de nitrógeno, donde la mayor producción de grano (7,58 t ha⁻¹) se obtuvo con un contenido de humedad del suelo sobre base seca del 61 % en promedio, durante todo el

ciclo vegetativo y una dosis de 240 kg de N ha⁻¹; sin embargo, la mayor producción de paja o rastrojo (10,39 t ha⁻¹) se consiguió con un contenido promedio de humedad de 78% en todo el ciclo del cultivo y con una dosis de 240 kg de N ha⁻¹; por otra parte, respecto a la altura media de la planta debido a los diferentes tratamientos no presentó diferencias significativas; no obstante, el contenido de proteína en grano fue mayor con las dosis de 160 y 240 kg de N ha⁻¹, con valores absolutos de 8,86 y 10,24 %, respectivamente.

Puente *et al.* (1963) estudiaron las prácticas de fertilización y población óptima para siembras de maíz en las regiones tropicales de Veracruz, incluyendo diversos tipos de texturas que variaron desde arenas a arcillas, pH de 5,5 a 7,9 y contenido de materia orgánica de 1,35 a 9,94 %. Los rendimientos de maíz en mazorca del testigo variaron de 0,3 a 6,8 t ha⁻¹. Estos rendimientos aumentaron significativamente (88 %) mediante la aplicación de nitrógeno en forma de fertilizante inorgánico. Del 60 % de los experimentos donde se aplicó 50 % ó 33 % del nitrógeno al momento de la siembra, y el resto en una aplicación de cobertera (aplicación de fertilizantes a lo largo de las hileras de plantas, justamente antes de una escarda, cuando la planta se encontraba en pleno desarrollo) produjeron rendimientos más altos que las tratada con todo el nitrógeno al momento de la siembra; además, se concluyó que la aplicación de todo el nitrógeno al momento de la siembra fue menos eficaz, debido a que las malas hierbas absorben parte de dicho elemento.

Wellhausen (1960) consideraba hace más de cuatro décadas, que dentro de los problemas importantes que deberían recibir atención en la producción de maíz para las futuras demandas en relación a la fertilidad están el mejoramiento de las condiciones de fertilidad en los terrenos de temporal, realizar más investigación sobre el mejoramiento de la fertilidad del suelo, y utilizar métodos eficientes para divulgar los resultados de la investigación, para hacer que los agricultores adopten las nuevas técnicas, que les traerán mayores beneficios a las tierras bajo su control.

En el Cuadro 5.1, se presentan las dosis de N empleadas y el rendimiento en maíz para la zona agrícola de Sinaloa, México.

La fórmula de fertilización para el cultivo de maíz, recomendada por el CEVACU-CIRNO de acuerdo a Palacios *et al.* (1993) para suelos arcillosos en el Valle de Culiacán, Sinaloa, México, fue 250 kg de N ha⁻¹, mientras que para el Valle de San Lorenzo, Sinaloa, México, fue 250 kg de N ha⁻¹ y 50 kg de P ha⁻¹. Además, en suelos arcillosos y delgados se sugiere incrementar la dosis de N a 350 kg ha⁻¹; aplicando el 50 % en presiembra y el resto en el primer riego de auxilio (Palacios *et al.*, 1993).

Cuadro 5.1. Dosis de nitrógeno, rendimiento de maíz en zonas agrícolas de riego en Culiacán y Los Mochis, Sinaloa.

Lugar	Textura del suelo	Población,	Dosis de N,	Rendimiento,	Referencia
		Número de planta ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	t ha ⁻¹	
Culiacán	Arcilla	-	100-130	2,22	Coronel (1977)
Culiacán	Arcilla	-	120	3,69	CEVACU (1985)
Culiacán	Arcilla	70 000	120	4,57	CEVACU (1988)
Culiacán	Arcilla	-	120	5,60	INIFAP (1990)
Los Mochis	-	-	200-350	10	Mendoza (1997)
Culiacán	Arcilla		250-350	10	INIFAP (2003)

Mendoza *et al.* (1998) muestran en el Cuadro 5.2, los resultados de un estudio diagnóstico realizado en dos regiones del Norte del Estado de Sinaloa, con el objetivo de identificar las variables relevantes de manejo de suelo y clima que afectan la producción del maíz en suelos de textura arcillosa.

La extracción unitaria de N por la planta de maíz (cantidad de nitrógeno que requiere la población para producir una tonelada de grano) es un valor que oscila de 20 a 29 kg de

N t⁻¹ de grano. Este valor incluye el N que se acumula en el grano (15 kg de N t⁻¹) y el que se acumula en la paja (7,5 kg t⁻¹), lo que en total suma 22,5 kg de N t⁻¹ de biomasa (INIFAP, 2005).

Cuadro 5.2. Influencia de las variables analizadas en la producción de maíz en algunas regiones del Norte de Sinaloa para suelos arcillosos (Mendoza *et al.*, 1998).

Región	Variable	Unidades	Valores		
			Media	Mínimo	Máximo
Valle del Fuerte	Dosis de N	kg ha ⁻¹	315	164	462
	Dosis de P	kg ha ⁻¹	34	0	78
	Densidad	Plantas m ⁻¹	7.29	5.5	9
	No. de riegos		5.3	4	7
	pH				
	C.E.	dS m ⁻¹	0.8	0.4	2.5
	M.O.	%	1.06	0.5	2.2
	Rendimiento	t ha ⁻¹	10.18	7	13.48
Valle del Carrizo	Dosis de N	kg ha ⁻¹	360	243	440
	Dosis de P	kg ha ⁻¹	42	0	78
	Densidad	Plantas m ⁻¹	7.5	7	8
	No. de riegos		5.7	5	7
	pH		7.3	6.6	7.8
	C.E.	dS m ⁻¹	1.0	0.2	1.9
	M.O.	%	0.9	0.8	1.2
	Rendimiento	t ha ⁻¹	8.08	6.3	10.4

Según Míguez y Bollero (2006), la evaluación de las características eco fisiológicas de maíz bajo cultivos de cobertura de invierno puede conducir a una mejora de decisiones de gestión que maximicen los efectos positivos y minimicen los efectos negativos asociados con el uso de los cultivos de cobertura. Además en el futuro, esto puede promover una mayor aceptación entre los agricultores que pueden necesitar reducir el

uso de fertilizantes, reducir la erosión del suelo, y además reducir el uso de otros productos agroquímicos.

5.10. Rentabilidad del maíz por el uso de nitrógeno

García (2008) Indica que en el maíz, los umbrales críticos de disponibilidad de N a la siembra (N-nitratos suelo, 0-60 cm, + N fertilizante) constituyen el método más difundido para determinar las necesidades de N. Estos umbrales varían según la zona y el nivel de rendimiento objetivo. Evaluaciones de resultados experimentales más recientes indican que disponibilidades de 150-170 kg N ha⁻¹, según el potencial de rendimiento, maximizan el beneficio económico de la fertilización nitrogenada.

Así mismo Green and Blackmer (1995), mencionan que las tasas de fertilización con N que se necesitan para alcanzar los máximos rendimientos de maíz (*Zea mays* L.) por lo general son menos para el maíz producido después de la soya [*Glycine max* (L.) Merr.] mientras que para el maíz cultivado después de sembrar maíz, pero la razón de la diferencia en el requerimiento de fertilizante N no ha sido claramente establecido. Así que realizaron un estudio para conocer la causa de las diferencias en las necesidades de fertilizante nitrogenado, encontrando que debido a que la soya produce menos residuos en condiciones de campo, los resultados sugieren que las diferencias en requerimiento de fertilizante nitrogenado se explican mejor por diferencias en las cantidades de N inmovilizado durante la descomposición de residuos que por mineralización de N fijado biológicamente relacionados con la soya.

Myren (1970) señala que los agricultores han tratado de obtener los máximos rendimientos, sin considerar los costos de producción; en el caso del maíz esto significa, entre otras cosas, poner especial atención al uso adecuado del fertilizante por encima de

las necesidades normales, y aplicarlo a intervalos para asegurar en todo momento una disponibilidad óptima, durante las etapas de crecimiento y desarrollo del cultivo.

5.11. La importancia del nitrógeno en la agricultura y su ciclo.

El nitrógeno es el nutriente más importante en la agricultura (Henry, 1997; Prakasa y Puttanna, 2000). Debido a que la atmósfera contiene 78 % de nitrógeno, vivimos materialmente en un océano de este elemento, a pesar de ello, el nitrógeno es tal vez el elemento más limitante del crecimiento de las plantas en todo el mundo, por lo general no está disponible de manera directa para las plantas u otros organismos (Henry, 1997). El nitrógeno es distribuido rápidamente por la hidrología y los procesos del transporte atmosférico (Hofman y Van, 2005).

Loomis y Connor (2002) señalan que la atmósfera ofrece un suministro ilimitado de gas di-nitrógeno para la nutrición vegetal y animal, donde el aprovechamiento de éste para uso agrícola depende de la manipulación de los estados de oxidación-reducción para que pueda estar disponible bajo formas minerales aprovechables para las plantas.

En muchos ecosistemas, el movimiento del nitrógeno del suelo a la planta y de la planta al suelo se debe a la biomasa microbiana, éste sufre muchas transformaciones, que todas son incluidas en el ciclo del nitrógeno, en ecosistemas naturales, este ciclo es más o menos cerrado; es decir, las entradas de N están en equilibrio con las pérdidas del mismo, sin embargo, en los ecosistemas agrícolas el ciclo es perturbado por la exportación de grandes cantidades de N por las plantas (Hofman y Van, 2005).

De acuerdo a Navarro (2000); Hofman y Van (2005) las transformaciones y flujos de una forma a otra constituyen la base del ciclo de N del suelo, el cual está altamente influenciada por tres grandes procesos, cada uno de los cuales depende, a su vez, de un conjunto de secuencias íntimamente ligadas entre sí, la distribución de estos procesos puede resumirse en la forma siguiente:

- Ganancias de nitrógeno por el suelo

- Transformaciones del nitrógeno en el suelo
- Pérdidas de nitrógeno en el suelo

5.11.1. El nitrógeno en el suelo.

Las principales formas del N en el suelo son NH_4^+ , NO_3^- y compuestos orgánicos que contienen N, el N inorgánico en el suelo es solamente una pequeña fracción del N total del suelo, mucho del N en la superficie del suelo está presente como N orgánico; éste consiste de proteína (20 a 40 %), azúcares aminados, como las monosacárido-aminas (5 a 10 %), purina y derivados de pirimidina (≤ 1 %), y compuestos complejos no identificados formados por la reacción de NH_4^+ con lignina, polimerización de quinonas con compuestos de N y condensación de azúcares y aminas, estas diferentes fracciones de N son susceptibles a varios procesos de transformación (Hofman y Van, 2005).

Navarro (2000) indica que el nitrógeno del suelo no proviene de la degradación de la roca madre. Todo el que normalmente se encuentra en el suelo deriva, en última instancia, del que existe en la atmósfera terrestre a través de los distintos procesos de fijación, fundamentalmente de tipo biológico.

Navarro (2000) y Heckman (2003) señalan que cuando la materia orgánica se descompone en el suelo, los productos simples que resultan de la descomposición son CO_2 , H_2O , NH_3 , etcétera, y según Heckman (2003), en suelos cálidos con pH de 6,0-6,5, las concentraciones del amonio (NH_4^+) son típicamente bajas, porque éste se convierte rápidamente en nitrato (NO_3^-), y se considera que el nitrato es la principal forma del N tomada por muchas plantas.

Mineralización e inmovilización. Dentro del suelo, el N continuamente pasa de las formas inorgánicas a orgánica o viceversa, este ciclo es mediado por la flora y fauna del suelo, por eso los factores que afectan la actividad biológica del suelo tienen una influencia en la tasa de transformación del N (Hofman y Van, 2005).

La biomasa microbiana propia del suelo representa una cantidad de N en el suelo del orden de 50 a 100 kg ha⁻¹, donde los microorganismos del suelo mineralizan lentamente las sustancias orgánicas a NH₄⁺ o NO₃⁻, no obstante, el abastecimiento de N mineral a partir de la descomposición de la materia orgánica es del orden de 0,5 a más de 1,0 kg de N ha⁻¹ día⁻¹, dependiendo del tipo de suelo, del residuo anterior y diversos factores ambientales (Hofman y Van, 2005).

Hofman y Van (2005) consideran que la inmovilización del N mineral puede ocurrir rápidamente, en la mayoría de las veces, por la incorporación de materia orgánica, dependiendo del coeficiente de humificación o del contenido de materia orgánica efectivo y la relación carbono: nitrógeno (C:N), donde los valores de 25 a 30 es considerado como el rango del punto crítico entre la inmovilización y mineralización del N, por otra parte, Domínguez (1997) considera que el clima, las condiciones fisico-químicas del suelo, la relación C:N y la flora microbiana del suelo, produce una tasa de mineralización neta del N entre 0,5 al 2,0 % del N total.

En ciertos ambientes, el N disponible en el suelo puede ser bajo debido a pérdidas por volatilización, desnitrificación y, en general, por lixiviación después de una excesiva lluvia o riego (Hofman y Van, 2005). Sin embargo, la tasa de mineralización depende de la historia del uso del suelo; es decir, de los cultivos anteriores, el manejo de los residuos y la fertilización (FAO-IFA, 2000).

De acuerdo a Kiely (1999), el N orgánico es el mayor depósito en el suelo, ya que un suelo mineral típico en climas templados contiene de 3 000 a 5 000 kg de N ha⁻¹ en el perfil de suelo de 0,3 a 0,5 m. Las plantas no pueden utilizar el nitrógeno orgánico; sin embargo, este N se mineraliza o se cambia a formas inorgánicas por medio de las bacterias del suelo a una velocidad aproximada del 2 al 3 % anual.

Nitrificación. La nitrificación es un proceso de dos pasos, el primero el NH₄⁺ es convertido a nitrito (NO₂⁻) por un grupo de bacterias autotróficas obligatorias del género

Nitrosomona, el segundo paso se lleva a cabo por el mismo grupo de bacterias autotróficas obligatorias (Nitrobacter), donde el NO_2^- es convertido a NO_3^- (Hofman y Van, 2005).

La nitrificación es un proceso aeróbico que requiere de O_2 , y como el agua del suelo reduce la difusión del aire, el contenido de humedad del suelo tiene una gran influencia en la tasa de nitrificación, el suelo a saturación (0 kPa), el contenido de aire reduce, y cesa la nitrificación debido a la falta de oxígeno, en esta condición, el suelo puede acumular N-NH_4^+ (Hofman y Van, 2005).

La nitrificación es más rápida cerca de capacidad de campo (-33 kPa en un suelo de textura media a pesada, y a -10 kPa en suelos ligeramente arenosos), también la nitrificación disminuye en los suelos muy secos (Hofman y Van, 2005). Además, la temperatura tiene un efecto marcado en la amonificación, donde su óptimo se alcanza aproximadamente a los 50°C , y sobre la nitrificación alcanzando su óptimo a 26°C , la nitrificación es lenta bajo condiciones de acidez, y ésta se incrementa bajo condiciones ligeramente alcalinas, donde el pH óptimo es considerado entre 6,9 y 7,5 (Mengel y Kirkby, 1987; Navarro, 2000; Hofman y Van, 2005).

Volatilización y desnitrificación. El N del amonio (N-NH_4^+) en el suelo es formado por la mineralización orgánica del N del suelo y por el N orgánico aplicado, o después de la hidrólisis de la urea, el NH_4^+ puede sufrir varios procesos, como adsorción sobre los coloides del suelo, fijación por los minerales de arcilla, nitrificación, fijación por microorganismos o volatilización (Hofman y Van, 2005).

El N puede perderse del suelo en forma gaseosa, las pérdidas por volatilización aumentan con pH alcalinos, y pueden presentar una gran variabilidad, ya que pueden oscilar de 5 a 70 % en fertilizantes que contienen NH_4^+ (Mengel y Kirkby, 1987).

Por otra parte, FAO-IFA (2004) señalan que el uso de fertilizante mineral nitrogenado supone una pérdida de NH_3 del 14 %, lo cual se considera que es mayor en países en

desarrollo, las pérdidas por volatilización de N por la urea cuando es aplicado al voleo fluctúa del 15 al 20 %, en cambio cuando la urea es enterrado en el suelo la tasa de volatilización del NH_3 es de un 5 a 15 %.

La desnitrificación se presenta por una elevada humedad, el pH neutro y las altas temperaturas, bajo nivel de difusión de O_2 , así como por la presencia de materia orgánica soluble y nitratos (Mengel y Kirkby, 1987).

La disponibilidad de oxígeno en el suelo es un factor limitante de la actividad microbiana, ya que por encima del 60 % del espacio aéreo del suelo lleno de agua, los procesos aeróbicos disminuyen más rápidamente favoreciendo los procesos anaeróbicos (Hofman y Van, 2005).

Las tasas promedio de pérdidas de N_2 y N_2O se deben en un 81,4 % a desnitrificación y un 18,6 % a nitrificación, lo cual está relacionado positivamente con el contenido de materia orgánica (Grageda *et al.*, 2000).

Según Grageda *et al.* (2004), la magnitud de las pérdidas de nitrógeno mineral está en función de la temporalidad debido a los factores del clima, ya que los resultados obtenidos muestran, que durante la estación del año primavera-verano las pérdidas fueron de hasta un 20 % del N, en cambio en la estación otoño-invierno las pérdidas de N fueron 13 %, donde la diferencia del 7 % se atribuye a que la temperatura del suelo en otoño-invierno fueron menores, y la descomposición de los residuos fue más lenta, disminuyendo con ello la disponibilidad de carbono (Grageda *et al.*, 2004).

Mora *et al.* (2005) consideran que el riego por surcos contribuye en mayor medida en la emisión de óxido nitroso (N_2O) en relación al sistema de riego por goteo, esto se atribuye a que la lámina de riego empleada en el riego convencional es pesada, propiciando condiciones anaeróbicas que favorecen la desnitrificación.

Mengel y Kirkby (1987) señalan que las pérdidas por desnitrificación pueden ser más de lo que generalmente se asume, y que en suelos arenosos bien aireados las tasas de

desnitrificación son generalmente más bajas (11 a 25 % del N aplicado) que en suelos arcillosos (16 a 31 % del N aplicado).

5.11.2. La eficiencia de aplicación del fertilizante nitrogenado y su efecto en la planta.

Un punto particularmente importante de la fertilización mineral es la eficiencia de su aplicación, ya que una fertilización eficiente es sinónimo de minimización de la pérdida de nutrientes en el ambiente, sin sacrificar los rendimientos de las plantas, por lo que una fertilización desequilibrada significa exceso de fertilización (contaminación) o subfertilización (pérdida de rendimiento y/o calidad), por lo tanto, la fertilización correcta debe ser acompañada de prácticas agrícolas adecuadas (FAO-IFA, 2000).

La evaluación de la fertilidad del suelo es útil para determinar su potencial productivo, elucidar los factores edáficos que pueden limitar dicho potencial, y establecer el efecto de diversas prácticas de manejo en la dinámica nutrimental edáfica (Vergara *et al.*, 2005).

La mayor parte de los vegetales obtienen casi la totalidad de sus nutrientes minerales vía raíces, pero cuando las plantas crecen en condiciones de cultivos intensivos, el suelo se empobrece de nutrientes esenciales, especialmente de nitrógeno, fósforo y potasio (Gil, 1995).

Según Mengel y Kirkby (1987); Navarro y Navarro (2000), los nutrientes para que sean considerados como esenciales de las plantas deben satisfacer las tres condiciones siguientes:

- 1) Una deficiencia de este elemento hace imposible que la planta complete su ciclo vital.
- 2) La deficiencia es específica para el elemento en cuestión.

- 3) El elemento está directamente implicado en la nutrición de la planta. Por ejemplo, como constituyente de un metabolito esencial requerido para la acción de un sistema enzimático.

Según Gros y Domínguez (1992), el nitrógeno es un factor que determina los rendimientos, y es la base del abonado, por lo que, una planta bien provista de nitrógeno adquiere un gran crecimiento y desarrollo foliar. Al respecto, Loomis y Connor (2002), consideran que las hojas son las unidades funcionales de la fotosíntesis, su eficiencia en la captación y utilización de energía solar en conjunción con el suministro adecuado de agua y nutrientes determinan la productividad de las plantas cultivadas.

Domínguez (1997) señala que el método más eficaz es el de estimar la evolución en el tiempo del nitrógeno mineral en el suelo, en función del balance resultante de entradas y salidas de este producto en cada período de tiempo, ésta se puede representar mediante la siguiente fórmula:

$$F=[(P*E)/C]*(Nm+Nr+Ne-Np) \quad (1.1)$$

donde: F-cantidad de nitrógeno que es necesario aplicar, kg ha^{-1} ; P- producción estimada de la población de plantas cultivadas, kg ha^{-1} ; E-extracción de nitrógeno por unidad de producción, kg ha^{-1} ; C-coeficiente de eficacia, decimal; Nm-nitrógeno mineralizado de la materia orgánica estable (humus), kg ha^{-1} ; Nr-nitrógeno mineralizado de residuos de la cosecha anterior, kg ha^{-1} ; Ne-nitrógeno derivado de las enmiendas orgánicas aplicadas anteriormente al cultivo, kg ha^{-1} y Np-nitrógeno que se pierde por lavado o desnitrificación, kg ha^{-1} .

El factor de más importancia para calcular la dosis de nitrógeno es la eficiencia de uso de nitrógeno. Este factor varía, de forma general, entre el 40 a 80 %; debido a ello, la dosis de fertilización requerida puede variar enormemente (INIFAP, 2005).

5.11.3. Funciones específicas del nitrógeno en la planta.

De los elementos más abundantes en la planta, el nitrógeno ocupa el cuarto lugar, detrás del carbono, oxígeno e hidrógeno. Juega un papel esencial como constituyente de proteínas, ácidos nucleicos, clorofila y hormonas del crecimiento. El nitrógeno es un elemento producido naturalmente; es esencial para el crecimiento, desarrollo y producción de la planta (Randall y Mulla, 2001).

Aunque teóricamente, las plantas prefieren el N en forma amoniacal (NH_4^+) sobre el NO_3^- , ya que el NH_4^+ no necesita ser reducido para su incorporación dentro de la planta (Prasad y Power, 2000; Hofman y Van, 2005); sin embargo, la mayor parte de las plantas dependen absolutamente, para su crecimiento, del nitrógeno inorgánico absorbido del suelo en forma de iones nitrato o amonio (Wild, 1992). Según la FAO-IFA (2000), la aplicación de N produce efectos rápidos y evidentes en la planta.

Navarro (2000) indica que el nitrógeno es un constituyente de la clorofila y enzimas del grupo de los citocromos, núcleo porfirínico; indispensable para la fotosíntesis y respiración, además forma parte de las estructuras de todas las proteínas y de moléculas tan importantes como las purinas y las pirimidinas, es componente de los ácidos nucleicos (ADN y ARN), y básico para la síntesis proteica.

Wild (1992) menciona que incrementando el nitrógeno, se produce un aumento de compuestos aminados solubles y proteínas; al mismo tiempo, al aumentar su contenido proteico, las hojas crecen más y se incrementa la superficie foliar para la fotosíntesis, pero también el incremento del aporte de nitrógeno genera otros efectos positivos sobre la hoja; tomando un color verde muy oscuro y la maduración se retrasa, además del aumento en el crecimiento de la planta.

En la mayoría de los suelos cultivados, las plantas superiores absorben el nitrógeno del suelo, fundamentalmente en forma de nitrato, esta preferencia es comprensible si se tiene en cuenta, aparte de la reacción, el poder adsorbente del suelo, los coloides pueden

fijar ampliamente los iones amonio, mientras que los nitratos conservan su completa movilidad, esto trae como consecuencia una menor utilización del nitrógeno amoniacal y una mayor posibilidad de absorción del nitrógeno nítrico, salvo en suelos muy húmedos, en los que suele haber pérdidas importante de nitratos por lixiviación (Navarro, 2000).

Según Gros y Domínguez (1992), en la primera fase de su vida las plantas muestran preferencia por el nitrógeno amoniacal que utilizan más rápidamente en los procesos de síntesis de proteínas.

5.11.4. Importancia del nitrógeno en la planta.

Generalmente, la materia seca de las plantas contiene entre 1 a 4 % de N, pero las plantas leguminosas tienen un contenido ligeramente superior, alrededor de un 5 %, por lo que, dependiendo del contenido de N en la planta y su producción, los requerimientos de N pueden variar sobre una base anual, entre menor de 100 kg a más de 400 kg de N ha⁻¹ (Hofman y Van, 2005), por otra parte Domínguez (1997), señala que el contenido de N en materia seca de la planta puede variar del 2 a 4 %.

En la mayoría de suelos bien drenados, la oxidación del amonio es rápida y, en consecuencia, el NO₃⁻ está presente en el suelo en concentraciones más altas que el NH₄⁺, además, la relativa facilidad del movimiento de NO₃⁻ a través del suelo facilita la absorción de éste anión por la planta, razón por la que muchas plantas tienen mejor crecimiento con NO₃⁻ (Prasad y Power, 2000; Hofman y Van, 2005); aunque también se ha demostrado que el crecimiento y desarrollo de la planta puede ser mejorado con un suministro equilibrado de NH₄⁺ y NO₃⁻ (Hofman y Van, 2005).

La eficiencia del fertilizante nitrogenado, está determinada por la producción de la biomasa y la absorción de N por la planta, por lo tanto, todos los factores que afectan la producción de biomasa y la concentración del N en los órganos de la planta afectarán la eficiencia del uso de N, éstos factores se pueden clasificar ampliamente en cinco grupos:

factores del suelo, factor de la cosecha, factores ambientales, prácticas agronómicas y manejo del fertilizante (Prasad y Power, 2000).

Las aplicaciones reiteradas de fertilizantes nitrogenados son necesarias para el crecimiento y desarrollo de las plantas, sin embargo, una parte del N es absorbido por las plantas, pero otra parte importante de este nutriente se pierde por percolación, desnitrificación y volatilización (FAO-IFA, 2000).

VI. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1. Descripción de las condiciones del sitio del experimento.

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 (García, 1988).

6.2. Caracterización del sitio de estudio.

El clima es semiárido con lluvias en verano y una precipitación media anual de 800 mm, temperatura media anual de 24,8 °C, presentándose la máxima de 41 °C en verano y la mínima de 3 °C en invierno (García, 1988).

La caracterización general del suelo de estudio de acuerdo a las normas de la FAO, realizadas por Parra (1995), lo define como un vertisol crómico, caracterizado por tener una estructura columnar formando grietas profundas de hasta 60 cm, su textura es arcillosa, pH alcalino, coloración en seco gris oscuro y drenaje superficial medianamente deficiente.

6.3. Técnica de riego empleada en la investigación.

6.3.1. Técnica de riego por surcos.

Para el establecimiento del sistema de riego por surcos se utilizó la instalación de la tubería principal del sistema de riego por goteo, la instalación fue subterránea para la conducción del agua a los hidrantes, la tubería transportable es de PVC de alto intemperismo de diámetro 160 mm, con pequeñas compuertas de PVC. La aplicación y medición del agua en cada riego, se realizó con las bombas empleadas para el riego por goteo.

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 $40 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$.

6.4. Muestreo inicial para determinar las características hidrofísicas, y químicas del suelo.

Características hidrofísicas. El terreno del área de estudio presenta una pendiente de 0,29 %. Las propiedades hidrofísicas del suelo, fueron determinadas en el Laboratorio de Suelos y Agua de la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Sinaloa. A continuación se describen los métodos empleados para las variables hidrofísicas:

Densidad aparente (D_a). Se determinó por el método de la barrena (cilindro o anillos) (Aguilera y Martínez, 1980), ésta se determinó después de la siembra (Figura 6.1).

Textura. Se determinó por el método del hidrómetro de Bouyoucus (Aguilera y Martínez, 1980; Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT- 2000, 2002), ésta se obtuvo previa a la siembra.

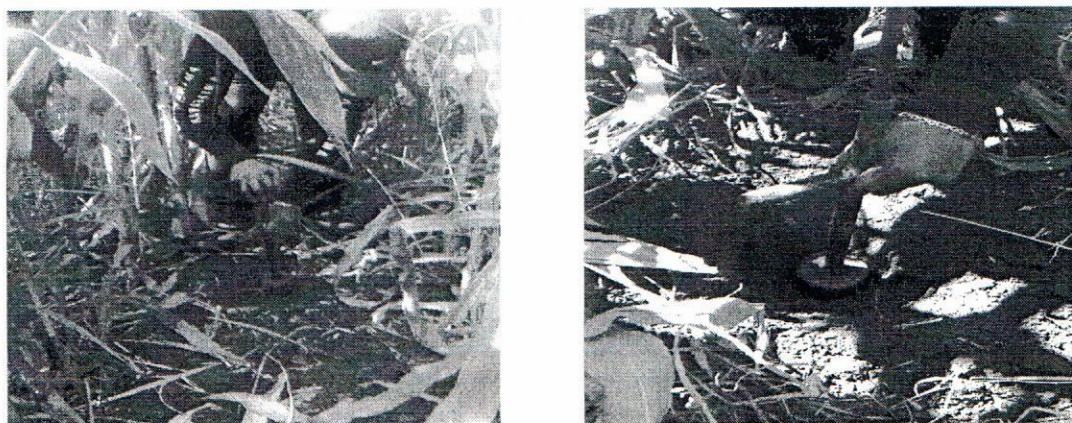


Figura 6.1. Determinación de densidad aparente en el área experimental, por el método del cilindro

Características químicas del suelo. La determinación de las características químicas se realizó previa a la siembra, en el Laboratorio de Suelos y Agua de la Facultad de

Agronomía de la Universidad Autónoma de Sinaloa. Las profundidades de muestreo para determinar las propiedades químicas del suelo fueron de 0-30 y 30-60 cm. Las muestras de suelo se secaron a temperatura ambiente, se molieron y se tamizaron utilizando una malla No. 10 (orificio de 2 mm). A continuación se describen los métodos empleados para las variables químicas:

Materia orgánica (Figura 6.2). Se determinó por el método propuesto por Walkley y Black (Jackson, 1964; Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT- 2000, 2002).

Conductividad eléctrica (C.E.) y pH. La determinación de la conductividad eléctrica se obtuvo del extracto de saturación en una relación 1:2 suelo y agua (Aguilar *et al.*, 1987; Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT- 2000, 2002), la determinación se realizó con un conductímetro modelo Soul-Brigde. El pH se determinó con potenciómetro, utilizando la solución de CaCl_2 0,01 M (Aguilar *et al.*, 1987; Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT- 2000, 2002).

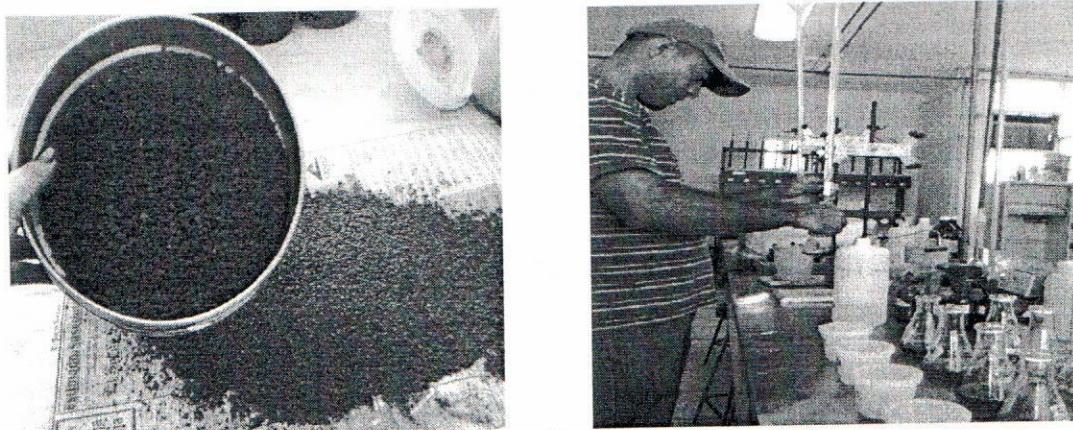


Figura 6.2. Determinación de materia orgánica

Las propiedades físicas y químicas del suelo en el estrato de 0 a 60 cm se muestran en el Cuadro 6.1.

Cuadro 6.1. 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

6.5. Diseño experimental.

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, tomándose dos submuestras por tratamiento.

6.6. Tecnología para el cultivo.

6.6.1. Preparación del terreno.

La preparación del terreno consistió en voltear el suelo con un barbecho, se aplicaron dos rastreos con una rastra de discos, se trazaron surcos a 0.8 m de distancia entre sí, se procedió a realizar un riego y cuando dio punto se realizó la siembra. Al tener las plantas una altura de 40 cm se realizó el paso de cultivadora y levantado de surcos.

6.6.2. Siembra.

La siembra del maíz (*Zea mays* L.) se realizó el 31 de enero de 2009 en húmedo o tierra avenida, el híbrido utilizado fue 30P49 de la compañía semillera Pioneer y la densidad de siembra fue de 87 500 plantas ha⁻¹.

6.6.3. Control de plagas.

El manejo y control de plagas se realizó de acuerdo a las recomendaciones de la Guía técnica para el cultivo de maíz en el Valle de Culiacán (CEVACU, 2003).

6.6.4. Fertilización.

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 se muestra en el Cuadro 6.2, el 30% de N se aplicó en presembrado y el 70% se aplicó en la etapa vegetativa de sexta a octava hoja, todo el fósforo se aplicó en presembrado (90 kg de P₂O₅ ha⁻¹).

Cuadro 6.2. Tratamientos y dosificación del nitrógeno en maíz.

Tratamientos N (kg ha ⁻¹)	Dosificación de N (kg ha ⁻¹)	
	Presembrado	Etapa V6-V8
0	0	0
150	45	105
300	90	210
450	135	315
600	180	420

6.6.6. Cosecha.

La cosecha se realizó el 24 de julio del 2010 ajustándose la humedad del grano al 14%. Se cosecharon 35 plantas (4 m²), se cortaron las mazorcas de la planta, se cortaron las plantas y se pusieron en bolsas de papel, se desgranaron las mazorcas manualmente, se determinó el peso de grano por unidad de superficie cosechada, se ajustó el peso de grano al 14% de humedad y el peso se cálculo en kg ha⁻¹.

6.7. Variables de estudio

6.7.1. Análisis de crecimiento.

a) Biomasa aérea (W). Se determinó al momento de la cosecha, para su evaluación se cuantificaron 10 plantas, las plantas completas se empacaron en bolsas de papel y posteriormente se introdujeron en estufa de circulación de aire forzado a 70 °C durante 48 horas para el secado a peso constante.

b) Índice de cosecha (IC). Se calculó mediante la fórmula: $IC = Yg/B_{AT}$, donde B_{AT} = biomasa aérea total kg ha⁻¹.

c) 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 ($L_A = \text{Largo} \times \text{Ancho} \times 0.75$) propuesto por Mendoza *et al.* (1984), y P = área ocupada por la planta en m².

Área foliar (L_A). Para la determinación del área foliar se midieron 10 plantas, ésta se obtuvo mediante la fórmula (Mendoza *et al.*, 1984):

$$L_A = L \times A \times 0.75$$

Donde: L_A , m²; L-largo de la lámina foliar, m; A-ancho de la lámina foliar, m; 0.75 es el coeficiente empleado para maíz (Mendoza *et al.*, 1984).

6.7.2. Indicador de eficiencia del agua en la planta.

Agua usada en la producción del rendimiento de grano (T). Se determinó con la siguiente ecuación:

$$T = L + R$$

Donde: L-Lámina de agua aplicada en el periodo, mm; R- lluvia observada o real durante el periodo de desarrollo de la planta, mm.

La eficiencia en el uso del agua (EUA) se determinó con la formula: $EUA = Y_g/L$; donde L= lámina total de agua aplicada en cm y EUA se expresa en $kg\ ha^{-1}\ cm^{-1}$ (Al-Kaisi *et al.*, 2003).

6.7.3. Indicador de eficiencia en el uso del nitrógeno en la planta.

Análisis de nitrógeno en biomasa aérea. La absorción de nitrógeno total en los órganos de la planta se obtuvo mediante la metodología empleada para la determinación de nitrógeno total por micro-Kjeldahl modificado para incluir nitratos (Bremner, 1965). El método fue validado por medio del material de referencia (Standard reference material 2781, domestic sludge, NIST, http://www.nist.gov/public_affairs/siteindex.htm), cuya recuperación fue de 98.5 %, el coeficiente de variación fue de 1.8 %.

La eficiencia de recuperación del N (ERN) y la eficiencia en el uso del N (EUN) se estimó con la metodología propuesta por (Ferrer *et al.*, 2003; Castro-Luna *et al.*, 2005).

La ERN se calculó con la formula: $ERN (\%) = (N_{PF} - N_{PNF} / F_N) \times 100$, donde: N_{PF} =cantidad de N absorbido por la planta del tratamiento fertilizado en $kg\ ha^{-1}$, N_{PNF} = cantidad de N absorbido por el tratamiento sin fertilizar en $kg\ ha^{-1}$ y F_N = cantidad de N aplicado por tratamiento en $kg\ ha^{-1}$. La eficiencia en el uso del N (EUN) se determinó mediante la fórmula: $EUN = Y_g / F_N$; donde: Y_g =rendimiento de grano en $kg\ ha^{-1}$.

6.8. Análisis económico

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 usó un modelo cuadrático (Campillo *et al.*, 2010).

6.9. Análisis estadísticos.

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 ($\alpha \leq 0.05$), cuando existió diferencia significativa entre tratamientos.

VII. RESULTADOS Y DISCUSION

7.1. Altura de planta

Los resultados del análisis estadístico para altura de planta mostraron diferencia altamente significativa ($P \leq 0.01$) debido a las dosis de N (Cuadro 7.1). Las dosis de 600 kg de N ha⁻¹ fue estadísticamente igual al tratamiento de 450 kg de N ha⁻¹, pero superior estadísticamente a las dosis de N ≤ 300 kg de N ha⁻¹. El maíz mostró una mayor respuesta a las dosis de 600 y 450 kg de N ha⁻¹ usadas en el cultivo. Betancour-Yanez *et al.* (1998), encontraron que con dosis mayor a 100 kg de N ha⁻¹ en el segundo año de estudio mostró la mayor altura de planta siendo superior al testigo.

7.2. Diámetro de tallo

En el Cuadro 7.1, se puede apreciar como fluctuó los valores de diámetro de tallo en el maíz, con el uso de diferentes dosis de N. En el Análisis de Varianza realizado quedó demostrado que existen diferencias altamente significativas ($P \leq 0.01$) entre los tratamientos. El tratamiento usado en el cultivo de maíz que logró estadísticamente el mayor diámetro de tallo fue de 450 kg de N ha⁻¹ resultando igual los tratamientos de 300 y 600 kg de N ha⁻¹, sin embargo éste fue superior estadísticamente al testigo y las dosis de 150 kg de N ha⁻¹. El incremento obtenido por el tratamiento de 450 kg de N ha⁻¹ en relación al testigo fue de 15.24%. Betancour-Yanez *et al.* (1998), encontraron que las dosis de 80 y 100 kg de N ha⁻¹ fueron superior estadísticamente al testigo y la dosis de 60 kg de N ha⁻¹. Estos resultados demuestran que la fertilización nitrogenada contribuye a un adecuado crecimiento del diámetro de tallo, lo cual favorece a un mejor transporte

de agua y nutriente para la planta de maíz, así como a un mejor desarrollo y producción de grano.

Cuadro 7.1. Resultados de la prueba de comparación de medias de las variables fenotípicas

Tratamiento kg de N ha ⁻¹	Altura de planta m	Diámetro de tallo cm	Peso de 1000 granos g
0	2.06 d	2.10 b	251.87 c
150	2.15 cd	2.18 b	276.98 b
300	2.19 bc	2.39a	297.50ab
450	2.28ab	2.42a	310.18a
600	2.31 ^a	2.38a	296.61ab

Valores de la misma letras son estadísticamente iguales ($P \leq 0.05$)

7.3. Peso de 1000 granos

El peso de 1000 granos es mayor al aumentar la dosis de N (Cuadro 7.1). El aumento de peso de grano mostró un efecto altamente significativo a las dosis de N ($P \leq 0.01$). El mayor valor se obtuvo con la dosis de 450 kg de N ha⁻¹, siendo esta estadísticamente superior a los tratamientos testigo y 150 kg de N ha⁻¹. El mayor peso de grano se relaciona con el mayor crecimiento y desarrollo de la planta, esto se atribuye a que al existir una mayor área foliar existe una mayor capacidad de intersección de luz, provocando un mayor aumento de asimilados al grano, repercutiendo en el peso final de grano.

7.4. Índice de área foliar

Para esta variable el nitrógeno tuvo un efecto altamente significativo en el índice de área foliar ($P \leq 0.01$), la dosis de 450 kg de N ha⁻¹ superó estadísticamente a resto de los tratamientos (Figura 7.2). El incremento de 150 a 450 kg de N ha⁻¹ provocó un aumento significativo en el IAF, sin embargo con la dosis 600 kg de N ha⁻¹ el IAF decreció un 10% respecto a la dosis de N de 450 kg ha⁻¹. 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.

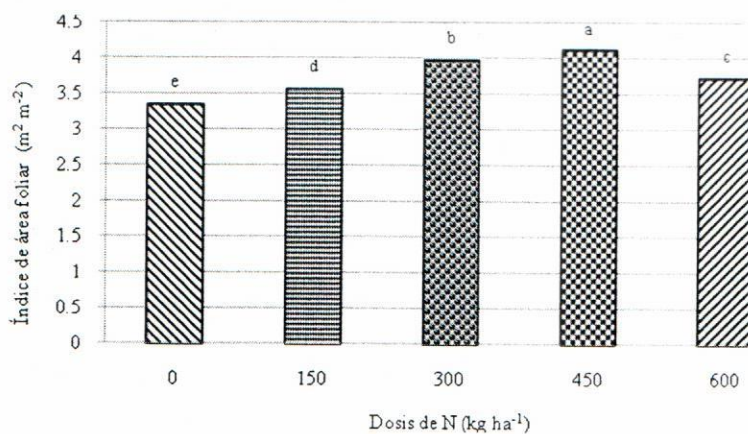


Figura 7.2. Valores promedios del índice de área foliar por dosis aplicada de nitrógeno.

7.5. 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 7.2). 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. Además la variación del IC también va relacionado con un desequilibrio nutricional, 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%).

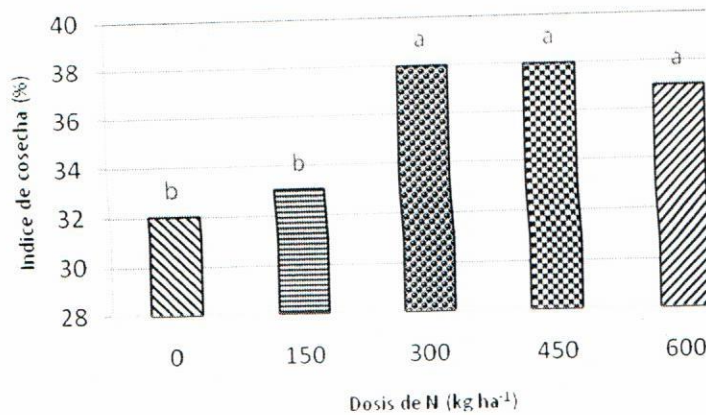


Figura 7.2. Valores promedios del índice de cosecha por dosis aplicada de nitrógeno.

7.6. Eficiencia en el uso del agua

En la Figura 7.3, 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 ($P \leq 0.01$) 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 los obtenidos 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 una tendencia positiva de EUA (160.9, 172.10, 188.43 y 191.77 kg ha⁻¹ cm⁻¹), respectivamente.

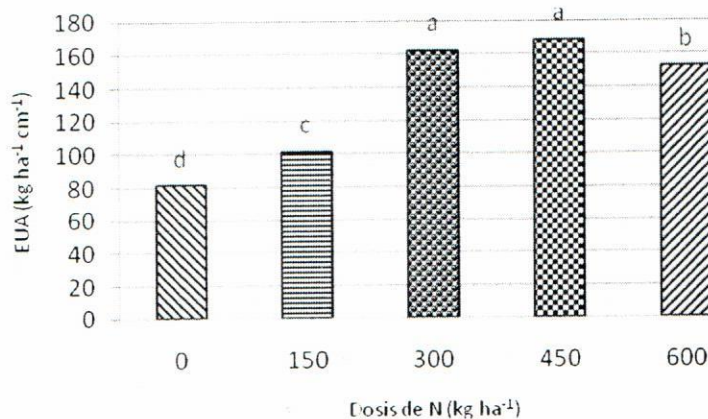


Figura 7.3. Valores promedios de la eficiencia en el uso del agua de nitrógeno.

7.7. Eficiencia de recuperación del nitrógeno

La ERN tiende a decrecer con la dosis de N aplicada (Figura 7.4). La ERN mostró un efecto altamente significativo a las dosis de N ($P \leq 0.01$). La mayor ERN se obtuvo con la dosis de 150 kg de N ha⁻¹, siendo esta estadísticamente superior al resto de los tratamientos. Resultados similares obtuvieron Steves *et al.* (2005), quienes observaron que a medida que se incrementó la dosis de nitrógeno, de 67, 134, 201 y 268 kg de N ha⁻¹, la eficiencia de recuperación del N fue menor (69, 60, 59 y 49%), respectivamente. Respuestas similares obtuvieron Hokmalipour *et al.* (2010), quienes también observaron que a medida que se incrementó la dosis de N de 60, 120 y 180 kg ha⁻¹, la ERN fue menor (18.7, 13.2 y 10.6%), respectivamente.

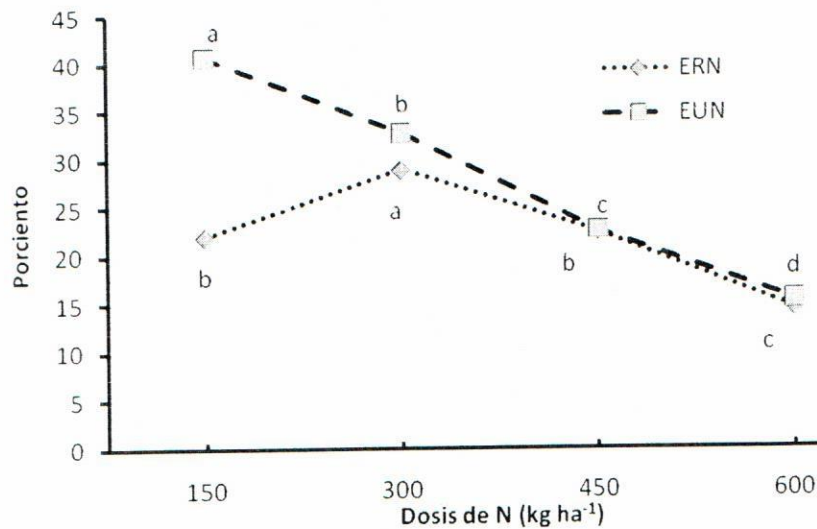


Figura 7.4. Porcentaje de la eficiencia de recuperación del nitrógeno (ERN) y eficiencia en el uso del nitrógeno (EUN).

7.8. Eficiencia en el uso del nitrógeno

La EUN tuvo un efecto significativo debido a la dosis de N ($P \leq 0.01$). En la Figura 7.4, se puede observar que al aumentar la dosis de N la EUN decrece, hasta obtener su menor eficiencia con la dosis de 600 kg de N ha⁻¹. La EUN disminuyó un 62% al aumentar la dosis de N de 150 a 600 kg ha⁻¹, una mayor EUN se da cuando al cultivo se le aplica una menor dosis de N (Cox y Cherney, 2001; Cueto-Wong, 2006). Un exceso de N usado en el cultivo de maíz que sobrepasa los requerimiento de la planta para lograr su rendimiento máximo, conlleva a una menor eficiencia en su uso, lo que provoca un riesgo ambiental muy importante, ya que el N no absorbido por la planta queda en el suelo como nitrato residual, siendo un gran riesgo de contaminante de los cuerpos de agua que se encuentran subordinados a las áreas agrícolas.

7.9. Rendimiento de grano y análisis económico

Hubo efecto significativo 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. La comparación de medias indicó que en la parcela testigo (0 kg de N ha^{-1}) 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 7.5), en cambio el rendimiento obtenido con el tratamiento de 600 kg de N ha^{-1} decreció con respecto a los tratamiento de 300 y 450 kg de N ha^{-1} .

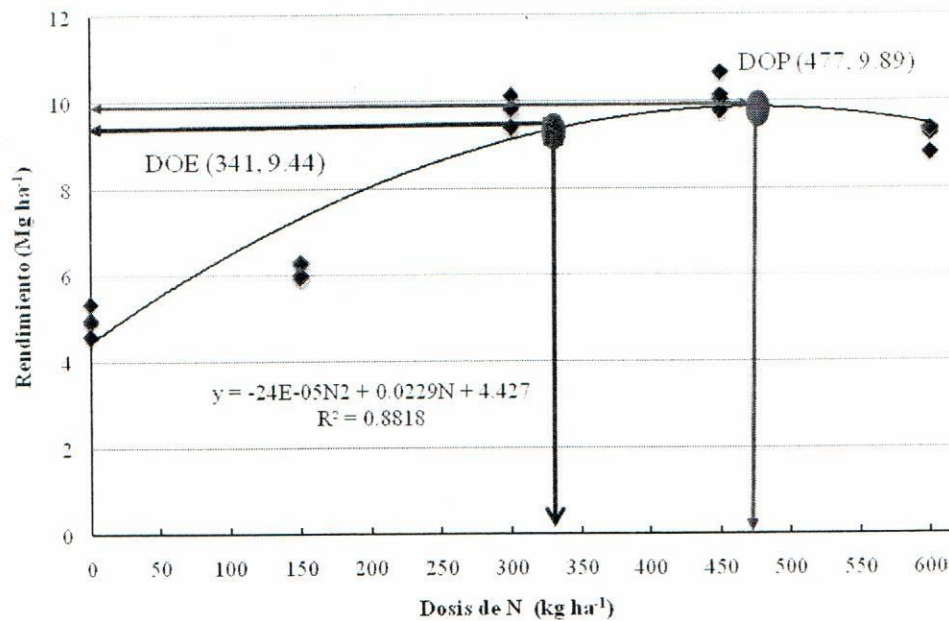


Figura 7.5. Rendimiento de grano del maíz en relación a la dosis de nitrógeno.

Resultados similares obtuvieron Rozas y Echeverría (1998), quienes observaron que a medida que se incrementó la dosis de nitrógeno, de 0 a 70 y de 70 a 210 kg de N ha^{-1} , el rendimiento aumentó, teniendo su máxima expresión con 210 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 de las plantas.

Para el cálculo de la dosis de N óptima (DOP y DOE), se asumió un costo por unidad de N de \$18.26 y un valor de \$2787 por tonelada de maíz, se calculó la relación precios insumo/producto, y mediante el modelo de regresión cuadrático ($Y = 4.427 + 0.0229 * N - 0.00024 * N^2$) se determinó la dosis óptima de N obtenida para DOP en maíz, que fue de 477 kg de N ha⁻¹, alcanzando un rendimiento máximo de 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 (Figura 5). La dosis óptima de N y el rendimiento puede variara dependiendo de los factores como espacio, tiempo y densidad de siembra. Además Ping et al. (2007), consideran que el manejo científico de la buenas prácticas agrícolas en la producción de maíz contribuye al logro del rendimiento potencial, valores altos de EUN y una mayor rentabilidad en sistemas intensivos de producción.

VIII. CONCLUSIONES

El tratamiento de 450 kg de N ha⁻¹ provocó una mejor respuesta a las mayorías de las variables fenotípicas evaluadas.

El aumento del N modificó significativamente el crecimiento y desarrollo del maíz, con la dosis de 450 kg de N ha⁻¹ se obtuvo una mayor eficiencia en el uso del agua, sin embargo, con la dosis de 300 kg de N ha⁻¹ se indujo una mayor eficiencia de recuperación y uso del N.

La dosis de N para la obtención del óptimo fisiológico fue de 477 kg de N ha⁻¹, que produjo un rendimiento máximo de 9.89 Mg ha⁻¹. En cambio con 341 kg de N ha⁻¹ se obtuvo el rendimiento óptimo económico de 9.44 Mg ha⁻¹.

IX. BIBLIOGRAFIA

- Aguilar, S.A., Etchevers, B.J.D. y Castellanos, R.J.Z. 1987. Análisis químicos para evaluar la fertilidad del suelo. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Universidad Autónoma de Chapingo. México. 217 p.
- Aguilar, S.O. 2004. Las élites del maíz. Ed. Universidad Autónoma de Sinaloa. Sinaloa, México. 204 p.
- Aguilera, C.M. y Martínez, R.E. 1980. Relaciones agua suelo planta atmósfera. Depto. de Irrigación, Universidad Autónoma de Chapingo, Chapingo, México. 321 p.
- Al-Kaisi, M.M. and Yin, X. 2003. Effects of nitrogen rate, irrigation rate, and plant population on corn yield and water use efficiency. *Agron. J.* 95:1475-1482.
- Alonso, R.R., Páez, O.O.F. and Cortés, A.R. 2000. Trophic conditions and stoichiometric nutrient balance in subtropical waters influenced by municipal sewage effluents in Mazatlán Bay (SE Gulf of California). *Marine Pollution Bulletin*, 40:331-339.
- Altieri, M. y Nicholls, C.I. 2000. Agroecología. Teoría y práctica para una agricultura sustentable 1ª edición. PNUMA. México. 43 p.
<http://www.agroeco.org/brasil/material/Agro01.pdf> (Consulta: 20 de junio de 2010).
- Altom, W., Rogers, J.L., Raun, W.R. and Thomason, W.E. 2002. Changes in total inorganic profile nitrogen in long-term rye-wheat-ryegrass forage production system. *J. P. Nut.*, 25: 2285-2294.
- Amado, A.J.P. y Ortiz F.P. 1998. Respuesta del maíz de riego a humedad del suelo, nitrógeno y densidad de población en Cuauhtémoc, Chihuahua. *Terra Latinoamericana* 16: 239-245.
- Amanullah, R.A. Khattak and S.K. Khalil. 2009. Plant Density and Nitrogen Effects on Maize Phenology and Grain Yield. *J. P. Nut.*, 32: 246-260.

- Andrade, F., Cirilo A., Uhart, S. y Otegui, M. 1996. Eco fisiología del Cultivo de Maíz. Ed. La Barrosa. Buenos Aires, Argentina. 292 p.
- Arauzo, M., Díez, J.A. y Hernáiz, P. 2003. Estimación de balances hídricos y lixiviación de nitratos en sistemas agrícolas. Investigación de la Zona no Saturada 6:39-44. <http://www.zonanosaturada.com/publics/V6/p039-044.pdf> (Consulta: 27 de febrero 2009).
- Barbieri, P.A., Echeverría H.E. y Sainz R.H.R. 2003. Respuesta del cultivo de maíz irrigado al agregado de nutrientes y zinc y su concentración en planta en Balcarce. RIA. 32: 97-112.
- Barranco, M. y Díaz Z.M. 2005. Momento de fertilización nitrogenada de cultivo de maíz en hapludoles típicos. Ci. Suelo (Argentina) 23: 197-203.
- Beraud, L.J.L. 2001. Condiciones de vida y medio ambiente en las principales ciudades sinaloenses. Universidad Autónoma de Sinaloa. Sinaloa, México. 181 p.
- Blanco, H., Togeiro, de A.L. y Gallagher, K.P. 2005. Globalización y Medio Ambiente. Lecciones desde las Américas. RIDES-GDAE. Santiago de Chile. 250 p.
- Bremner, J.M. 1965. Total nitrogen. In Black, C.A. (Ed.). Method of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties. Ame. Soc. Agron., Madison, Wisconsin. 1149-1178 pp.
- Cadahía, L.C. Fertirrigación. 2005. Cultivos hortícolas, frutales y ornamentales. 3ra ed. Ed. Mundi Prensa. España. 681 p.
- Cambardella, C., Moorman, T.B., Jaynes, D.B., Hatfield, J.L., Parkin, T.B., Simpkins, W.W. and Karlen, D.L. 1999. Water quality in Walnut Creek watershed: Nitrate -nitrogen in soils, subsurface drainage water, and shallow groundwater. : J. Environ. Q. 28: 25-34.

- Campillo, R. R., Jobet C. F. y Pablo U. D. 2010. Optimización de la fertilización nitrogenada para trigo de alto potencial de rendimiento en adisoles de la región de la Araucanía, Chile. *Agricultura Técnica (Chile)* 67 (3): 281-291.
- Cao, W., Hong, H., Yue, S., Ding, Y. and Zhang, Y. 2003. Nutrient loss from an agricultural catchment and landscape modling in Southeast China. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, 71: 761-767.
- Carlson, R. A. and Osiensky, J. L. 2001. Geostatistical based monitoring of soil water NO₃-N: A potential nonpoint source of ground water contamination. *J. Environ.*, 36: 1935-1956.
- Cartagena V. J. R. 2009. El agua en las plantas. http://biologiadelacelula.files.wordpress.com/2009/05/el_agua_en_las_plantas.pdf
(Consultado en línea: 13 de Marzo de 2010).
- Castellanos, J.Z., Uvalle, B. J.X. y Aguilar, S.A. 2000. Manual de interpretación de análisis de suelo y aguas. INCAPA, México. 220 p.
- Castro, L.I., Gavi, R.F., Peña, C.J.J., Núñez, E. R. y Etchevers, B.J.D. 2005. Eficiencia de recuperación de N y K de tres fertilizantes de lenta liberación. *Terra Latinoamericana* 24: 277-282.
- Catalán, V.E.A. 1995. Metodología para la generación de guías de riego superficial parcelario. INIFAP. CENID-RASPA. México. p. 3.
- Cerrato, M. E. and Blackmer. A. M. 1990. Comparison of Models for Describing; Corn Yield Response to Nitrogen Fertilizer. *Agron. J.*, 82: 138-143.
- CEVACU. 1985. El cultivo de maíz para grano en el centro de Sinaloa. INIA-SARH. Folleto para productores No. 21. Culiacán, Sinaloa, México.

- CEVACU. 2003. Guía para la asistencia técnica agropecuaria para el área de influencia del Campo Experimental Valle de Culiacán. Fundación Produce Sinaloa, A.C. Sinaloa, México. 209 p.
- CNA. 2004. Datos de clima periodo 2004-2004 del observatorio climatológico de Culiacán-INIFAP. Culiacán, Sinaloa, México.
- Coronel, E.F. 1977. Tecnología y rentabilidad del cultivo de maíz en el Valle de Culiacán, Sin. INIA-SARH. Publicación técnica CIAS No. 6. Sinaloa, México. 36 p.
- Costa, J.L., Massone, H., Martínez, D., Suero, E.E., Vidal, C.M, and Bedmar, F. 2002. Nitrate contamination of a rural aquifer and accumulation in the unsaturated zone. *Agricultural Water Management*, 57: 33-47.
- Cox, W. J. and Cherney, D. J. R. 2001. Row Spacing, Plant Density, and Nitrogen Effects on Corn Silage. *Agron. J.* 93:597-602.
- Cueto-Wong, J.A., Reta-Sánchez, D.G., Barrientos-Ríos, J.L., González-Cervantes, G. y Salazar-Sosa, E. 2006. Rendimiento de maíz forrajero en respuesta a fertilización nitrogenada y densidad de población. *Rev. Fitotec. Mex.* 29: 97-101.
- de Ita, R. A. 2003. Socioeconomic and Environmental Impacts of the Liberalization of Basic Grains under NAFTA: The Case of Sinaloa. http://www.cec.org/files/PDF/ECONOMY/Impactos-liberalizacion-comercial-Sinaloa_es.pdf (Consultado en línea: 12 de mayo de 2009).
- De Juan-Valero, J. A., M. Maturano, A. Artigao-Ramírez, J. M. T. Martín-Benito and J. F. Ortega-Álvarez. 2005. 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.

- Deng, S.P. and Tabatabai, M.A. 2000. Effect of cropping systems on nitrogen mineralization in soils. *Biology and Fertility of Soils* 31: 211-218.
- Díaz, V. T., M. Valenzuela, L., R. Lizárraga, J., T. Velázquez, A. y L. Partida. 2008. En: II jornada de transferencia de tecnología del cultivo del maíz. Memoria. Fundación Produce Sinaloa A.C., Sinaloa, México. 56 p.
- Díaz, V. T., Pérez, D. N. W., López G. A., Partidas R. L., y Suarez, Y. E. 2008. Manejo sostenible del agua en zonas semiáridas: Evaluación de dos técnicas de riego y fertilización nitrogenada en Sinaloa, México. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*. 17: 53-56.
- Dinnes, D.L., Karlen, D.L., Jaynes, D.B., Kaspar, T.C, Hatfield, J.L., Colvin, T.S. and Cambardella, C.A. 2002. Nitrogen management strategies to reduce nitrate leaching in tile-drained midwestern soils. *Agron. J.*, 94: 153-171.
- Domínguez. V.A. 1997. Tratado de Fertilización. Ed. Mundi Prensa. 3ra edición. Madrid, España. 613 p.
- Eck, H. V. 1984. Irrigated corn yield response to nitrogen and wáter. *Agron. J.* 76: 421-428.
- Escalante E. y. I. y Escalante E. L. E. 2008. Tópicos de una agricultura sustentable. *Revista alternativa*. Volumen 5, número 16. Chilpancingo, Guerrero. 7-12 pp.
- Escalante Estrada, J. A. 2001. Biomasa, rendimiento, eficiencia en el uso del agua y nitrógeno en girasol de humedad residual. *Terra Latinoamericana*, 19 (1): 19-27
- Estrada, B.M.A., Nikolski, G.I., Gavi, R.F., Etchevers, B.J.D. y Palacios, V.O. 2002. Balance de nitrógeno inorgánico en una parcela con drenaje subterráneo en el trópico húmedo. *Terra Latinoamericana*, 20:189-198.

- FAO. 2006. Plant Nutrition For Food Security. A guide for integrated nutrient management. <http://www.fao.org> (Consultado en línea: 22 de Marzo 2010).
- FAO-IFA. 2004. Estimaciones globales de las emisiones gaseosas de NH₃, NO y N₂O provenientes de las tierras agrícolas. FAO. Roma, Italia. 110 p.
- FAO-IFA. 2000. Estrategias en materia de fertilizantes. FAO. Roma, Italia. 106 p.
- Fernández, G.R. y Laird, R.J. 1958. Efecto de la sequía durante el espigamiento en maíz fertilizando con diferentes cantidades de nitrógeno. Folleto técnico No. 30. SAG. México. 28p.
- Ferrer, F., Villar, J.M., Stockle, C.O. Villar, P. y Aran, M. 2003. Use of a pre-sidedress soil nitrate test (PSNT) to determine nitrogen fertilizer requirements for irrigated corn. *Agron. J.* 23:561-570.
- Fiel, B., Moser, S.B., Jampatong, S., and Stamp, P. 2005. Mineral Composition of the Grains of Tropical Maize Varieties as Affected by Pre-Anthesis Drought and Rate of Nitrogen Fertilization. Published in *Crop Sci.* 45:516-523.
- Flores C.C. y Sarandón S.J. 2002. ¿Racionalidad económica versus sustentabilidad ecológica? El ejemplo del costo de la pérdida de fertilidad del suelo durante el proceso de Agro culturización en la Región Pampeana Argentina. *Revista de la Facultad de Agronomía, La plata* 105 (1). Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, UNLP, Argentina. <http://www.agroeco.org/socla/archivospdf/costooculto.pdf>
- Fuentes Y. J. L. 2002. Manual práctico sobre utilización de suelo y fertilizantes. Ministerio de agricultura pesca y alimentación. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España. 159p.
- García O. F. 2008. Las mejores prácticas de manejo de fertilizantes: Desafíos para soja y maíz en la campaña 2008/09. Presentado en la Jornada "Soja con Sustentabilidad: Soja + Maíz

- 2008", organizada en Córdoba el 7 de Agosto de 2008 por Agroverdad y la Sociedad de Acopiadores de Córdoba. Buenos Aires Argentina. 7 pp.
- García, E. 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de Geografía. UNAM, México. 217 p.
- Garrido, V.M.S. 1996. Prácticas Agrarias Compatibles con el Medio Natural: El Agua. Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación. Madrid, España. 362 p.
- Gehl, R.J., Schmidt, J.P., Maddux, L. D. and Gordon, W. B. 2005. Corn Yield Response to Nitrogen Rate and Timing in Sandy Irrigated Soils. *Agron. J.* 97:1230-1238
- Gil, M.F. 1995. Elementos de Fisiología Vegetal. Editorial Mundi-Prensa. Madrid, España. 1147 p.
- Gonzales M. C., Estavillo, A. J. M., Gonzales M. B y Gonzales G. A. 2009. Fertilización nitrogenada y sostenibilidad: contaminación ambiental frente a producción y calidad. Grupo investigador de la UPV/EHU http://www.enpresa.ehu.es/p223content/es/contenidos/informacion/vri_encuentos/es_vri_encu/adjuntos/4_GMurua_L.pdf. (Consultado en línea: 25 de enero de 2010).
- Grageda, C.O.A., Medina, C.T., Aguilar, A.J.L., Hernández, M.M., Solís, M.E., Aguado, S.A. y Peña, C.J.J. 2004. Pérdidas de nitrógeno por emisión de N₂ y N₂O en diferentes sistemas de manejo y con tres fuentes nitrogenadas. *Agrociencia*, 38:625-633.
- Grageda, C.O.A., Vermoesen, A., Cleemput, V.O. y Peña, C.J.J. 2000. Efecto del tipo de suelo, humedad y fuente de nitrógeno en las emisiones de N₂ y N₂O. *Terra* 1: 1-9.
- Green C. J. and Blackmer A. M. 1995. Residue Decomposition Effects on Nitrogen Availability to Corn following Corn or Soybean. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 59, 1065-1070.

- Gros, A. y Domínguez, V.A. 1992. Abonos, Guía Práctica de la Fertilización. Octava Edición. Mundi-Prensa Madrid, España. 560 p.
- Havlin, L. J., Beaton D. J., and Nelson L.W. Soil fertility and fertilizers. 1999. Sixth edition. Prentice-Hall. New Jersey. USA. 499 p.
- He, Z.L., Calvert, D.V., Alva, A.K., Banks, D.J. and Li, Y.C. 2000. Nutrient leaching potential of mature grapefruit trees in a sandy soil. *Soil Science* 165: 748-758.
- Heckman, J.R. 2003. Soil Nitrate Testing as a Guide to Nitrogen Management for Vegetable Crops. New Jersey Agricultural Experiment Station, Rutgers. The State University of New Jersey. <http://www.rcrc.rutgers.edu/pubs/publication.asp?pid=E285> (Consulta: 05 de julio de 2010)
- Henry, D. F. 1997. Fundamento de la Ciencia del Suelo. Ed. CECOSA. México. 531 p.
- Henry, J.G. y Heinke, G. W. 1999. Ingeniería Ambiental. Ed. PRENTICE HALL. México. 778 p.
- Hernández, S. R. y Laird, R. J. 1958. La humedad del suelo en la primera parte del ciclo en relación al rendimiento del maíz. Folleto técnico No. 33. SAG. México. 17p.
- Hofman, G. y Van, C. O. 2005. Soil and Plant Nitrogen. International Fertilizer Industry Association. France. 48 p.
- Hunt, R. 1978. Plant growth analysis. *Studies in Biology* No. 96. Edition Edward, Arnold, London, 67p.
- INIFAP. 2003. Guía para la asistencia técnica agropecuaria para el área de influencia del Campo Experimental del Valle de Culiacán. INIFAP-SAGARPA. Culiacán, Sinaloa, México. 209 p.

- INIFAP. 1990. Guía para cultivar maíz en el Estado de Sinaloa. Centro de Investigaciones Forestales y Agropecuarias de Sinaloa. Folleto técnico No. 31. Culiacán, Sinaloa, México.
- INIFAP. 2005. La fertilización en los cultivos de maíz, sorgo y trigo en México. SAGARPA. Guanajuato, México. 44 p.
- Inzunza, I.M., Villa, C.M., Catalán, V.E A. y Mendoza, M. S. F. 2005. Modelo para estimar el rendimiento de maíz en función de la humedad del suelo. *Terra Latinoamericana* 24: 179-185.
- Israelsen, W.O. y Hansen, V.E. 1965. Principio y aplicaciones del riego. Ed. Reverte, S.A. Barcelona, España. p. 277, 282.
- Jackson, M.L. 1964. Análisis químico de suelos. Ediciones Omega, S.A. Barcelona, España. p. 190-219.
- Jansons, V., Busmanis, P., Dzalbe, I. and Kirsteina, D. 2003. Catchment and drainage field nitrogen balances and nitrogen loss in three agriculturally influenced Latvian watersheds. *E. J. Agron.*, 20: 173-179.
- Jiménez, D. R. M. y Lamo, De E. J. 1998. Agricultura sostenible. Editorial Mundi Prensa. Madrid, España. 616 p.
- Karam, Q. C. y Beraud, L. J. L. 2003. Sinaloa y su ambiente: Visiones del presente y perspectivas. Universidad autónoma de Sinaloa. Sinaloa, México. 362 p.
- Kart, B.J., Verstraeten, I.M. and Kraemer, T.F. 2007. Effects of surface-water irrigation on sources, fluxes, and residence times of water, nitrate, and uranium in an alluvial aquifer. *Applied Geochemistry*, 22: 152-174.
- Chan, SA; RL Mulvaney; TR Ellsworth & CW Boast. 2007. The myth of nitrogen fertilization for soil carbon sequestration. *J. Environ. Qual.* 36: 1821-1832.

- Kiely, G. 1999. Ingeniería Ambiental. Fundamentos, entornos, tecnologías y sistemas de gestión. Ed. Mc Graw Hill. Madrid, España. 1331 p.
- Kijne, W. J. 2003. Descubrir el potencial del agua para la agricultura. FAO, Roma, Italia. <http://www.fao.org/docrep/006/Y4525S/y4525s00.htm#Contents>. (Consultado en línea: 15 de mayo de 2009).
- Kramer P. J. 1987. Relaciones hídricas de suelos y plantas. Una síntesis moderna. Ed. Edutex S.A. México DF. 538p.
- Krusekopf, H.H., Mitchell, J.P., Hartz, T.K., May, D.M., Miyao, E.M. and Cahn, M.D. 2002. Pre-sidedress soil nitrate testing identifies processing tomato fields not requiring sidedress N fertilizer. Hortscience 37: 520-524.
- Langeveld, J.W.A., Verhagen, A., Neeteson, J.J., van Keulen, H., Conijn, J.G., Schils, R.L.M. and Oenema, J. 2007. Evaluating farm performance using agri-environmental indicators: Recent experiences for nitrogen management in The Netherlands. J. Environ. Manag., 82: 363-376.
- Larque, S.A. 1989. El agua en las plantas cultivadas. Colegio de Posgraduados. Chapingo, México. 117 p.
- Loomis, R.S. y Connor, D.J. 2002. Ecología de Cultivos. Productividad y Manejo en Sistemas Agrarios. Editorial Mundi-Prensa. España. 591 p.
- López L. M. 2003. El cultivo de maíz en México y la contribución del fitomejorador para favorecer la autosuficiencia. Revista mexicana de Agronegocios., 12: 596-605 pp.
- López, S.T., González, R.F., Dueñas, G., Cid, L.G., Sierra, J. y Ozier, L.H. 2006b. Modelación del manejo óptimo del agua en suelos Ferralíticos del sur de La Habana. Rev. C. Técn. Agrop. 15: 37-41.

- López, T., Cid, L.G., González, F., Dueñas, G., Ozier, L.H. y Sierra, J. 2006^a. Predicción de pérdidas de agua y lixiviación de nitratos en suelos ferralíticos rojos cultivados bajo riego en el sur de La Habana. Rev. C. Técn. Agrop. 15: 1-6.
- Manoliadis, O. G. 2001. Analysis of Irrigation Systems Using Sustainability-Related Criteria. J. Environ. Qual. 30:1150-1153.
- Martínez G. M., Jasso-Chaverría C. y Andrés Ramiro-Córdova. 2004. Efecto de la aplicación de niveles de fertilización y del acolchado plástico en el rendimiento de chile guajillo VR-91. Primera convención mundial del Chile. 236-241 pp.
- Mateo, B. J. M. 1999. Manual de Prácticas y Actuaciones Agroambientales. Colegio Oficial de Ingenieros Agrónomos de Centro Canarias. Editorial Agrícola Española, S. A. Mundi Prensa. Madrid, España. 310 p.
- Mayrand, K., Dionne, S., Paquin, M., Alanis, O.G., Guadarrama, M. L.F., Muñoz, P.C. y Rivera, P.M. 2003. Los impactos económico y ambiental de los subsidios agrícolas: Una mirada a México y a otros países de la OCDE. Instituto Nacional de Ecología, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. p. 17. http://ine.gob.mx/dgipea/download/impacto_sub_agricolas.pdf (Consultado en línea: 29 de abril de 2009).
- McLay, C.D.A., Dragten, R. Sparling, G. and Selvarajah, N. 2001. Predicting groundwater nitrate concentrations in a region of mixed agricultural land use: A comparison of three approaches. Environ. Pollut. 115: 191-204.
- Meléndez, L., Lisazo, J. y Ramírez, R. 2001. Efecto de la fertilización nitrogenada sobre dos variedades de maíz (*Zea mays* L.) sometidas a exceso de humedad en el suelo. Biagro 13: 111-116.

- Mendoza, O.L.E., González, H.V.A. y Ortiz, C.J. 1984. Factores de conversión y tamaños de muestra en las estimaciones del área foliar en maíz. *Agrociencia*, 58:141-151.
- Mendoza, R. J. L. 1993. Tecnología para producir maíz en los sistemas agrícolas del Valle del Fuerte. Folleto técnico No. 1. INIFAP-SARH. Sinaloa, México.
- Mendoza, R. J. L., Macías, C. J. y Cortez, M. E. 2003. Tecnología para mejorar la productividad del maíz en el Norte de Sinaloa y su impacto económico. Folleto técnico No. 21. INIFAP. Sinaloa, México. 37 p.
- Mendoza, R.J.L. 1997. Alternativa tecnológica para la producción de maíz y su análisis económico. Folleto para productores No. 4. INIFAP. Sinaloa, México.
- Mendoza, R.J.L., Macías, C.J., Villareal, F.E., Quijano, C.J.A. y Paredes, B.R. 1998. Aplicación de un método de diagnóstico para la inducción del cambio tecnológico en el cultivo de maíz en el norte de Sinaloa. Folleto técnico No. 16. INIFAP-CIRNO. Los Mochis, Sinaloa, México. 32 p.
- Mengel, K. y Kirkby, E.A. 1987. Principio de Nutrición Vegetal. Editor Internacional Postash Institute. Suiza. 692 p.
- Miguez, F. E. and Bollero G. A. 2006. Winter Cover Crops in Illinois: Evaluation of Ecophysiological Characteristics of Corn. *Crop Sci.*, 46:1536-1545.
- Modarres, A. M., Hamilton, R. I., Dijak M., Dwyer, L. M., Stewart, D. W., Mather. D. E., and Smith. D. L. 1998. Plant Population Density Effects on Maize Inbred Lines Grown in Short-Season Environments. *Crop Sci.*, 38:104-108.
- Monroy, J., Vera, N.M.A., Carrera, M.A., Grageda, C.O.A. y Peña, C.J.J. 2002. Absorción de nitrógeno (^{15}N) y productividad del agua por el cultivo de fresa (*Fragaria* x ananasa) en "El Bajío", México. *Terra Latinoamericana*, 20:65-69.

- Montemayor, T. J. A., Gómez, M. O., Olague, R. J., Zermeño, G. A., Ruiz, C. E., Fortis, H. M., Salazar, S. E. y Aldaco, N. R. 2006. Efecto de tres profundidades de cinta de riego por goteo en la eficiencia de uso de agua y en el rendimiento de maíz forrajero. *Técnica Pecuaria México* 44:359-364.
- Mora, R.S.G., Sandoval, V.M., Gavi, R.F. y Sánchez, P.G. 2005. Emisión de N₂O con fertilización nitrogenada en fertirriego y fertilización convencional. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 21:23-29.
- Mustieles, I. A. 2008. En: II jornada de transferencia de tecnología del cultivo del maíz. Memoria. Fundación Produce Sinaloa A.C., Sinaloa, México. 56 p.
- Myren, T. D. 1970. Estudio de caso. Los programas sobre maíz y trigo de la Fundación Rockefeller en México: Análisis comparativo de sus enfoques y resultados. CYMMYT. México. 18p.
- Navarro, B.S. y Navarro, G.G. 2000. *Química Agrícola*. Editorial Mundi Prensa. Madrid, España. 488 p.
- Nemeth, T., Pasztor, L. and Szabo, J. 1998. Stochastic modeling of N-leaching using GIS and multivariate statistical methods. *Wat. Sci. Techn.*, 38:191-197.
- Nolan, B.T. and Stoner, J.D. 2000. Nutrients in ground water of the conterminous United States, 1992-1995. *Environ. Sci. Techn.*, 34:1156-1165.
- Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT- 2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudios, muestreos y análisis. *Diario Oficial de la Federación*, Martes 31 de diciembre de 2002.
- Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994. 2000. Salud ambiental. Agua para uso y consume humano. Límites permisibles de calidad y tratamiento a que debe someterse el agua para su potabilización. *Diario Oficial de la Federación*.

- <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/m127sssa14.html> (Consultado en línea: 23 de agosto de 2009).
- Nyamangara, J., Bergström, L.F., Piha, M.I. and Giller, K.E. 2003. Fertilizer use efficiency and nitrate leaching in a tropical sandy soil. *J. Environ. Qual.* 32: 599-606.
- Oenema, O., Boers, P.C.M., van Eerdt, M.M., Fraters, B., van der Meer, H.G., Roest, C.W.J., Schröder, J.J., and Willems, W.J. 1998. Leaching of nitrate from agriculture to groundwater: the effect of policies and measures in the Netherlands. *Environ. Pollut.*, 102: 471-478.
- Ojeda, B. W., Sienfuentes, I. E. y Unland, W. H. 2006. Programación integral del riego en maíz en el norte de Sinaloa, México. *Agrociencias*, 40: 13-25.
- Olalde-Gutierrez, V.M. Escalante-Estrada, J.A., Sánchez-García, P., Tijerina-Chavez, L., Engleman-Clark, E.M. y Mastache-Laguna, A.A. 2000. Eficiencia en el uso del agua y del nitrógeno, y rendimiento del girasol, en función del nitrógeno y densidad de población en clima cálido. *Terra Latinoamericana*. 18 (1): 51-59
- Ongley, E.D. 1997. Lucha contra la contaminación agrícola de los recursos hídricos. Estudio FAO. Riego y Drenaje, 55. Roma. 120 p.
- Opazo *et. al.*, 2008. Factores de suelo y planta para determinar la fertilización nitrogenada en maíz dulce en la zona central de Chile. *IDESIA (Chile)* 26 (2): 53-58.
- Overman, A.R. and Scholtz III, R.V. 2002. Corn response to irrigation and applied nitrogen. *Soil Sci. Plant Anal.* 33: 3609-3619.
- Páez Osuna, F., Ramírez, R.G., Ruíz, F.A.C., Soto J.M.F. 2007. La contaminación por nitrógeno y fósforo en Sinaloa: Flujos, fuentes, efectos y opciones de manejo. Universidad Nacional Autónoma de México. México D.F. 304 p.

- Páez, O.F. 2001. Camaronicultura y medio ambiente. Instituto Ciencias del Mar y Limnología, Programa Universitario de Alimentos y El Colegio de Sinaloa. México. 451 p.
- Palacios, V.E. 1978. Cuánto, cuándo y cómo regar. Memorándum Técnico No. 195. Secretaria de Agricultura y Recursos Hidráulicos. México. 44 p.
- Palacios, V.O., Peraza, M.S. y Bueno, B.O. 1993. El cultivo de maíz de riego para grano en el centro de Sinaloa. Folleto para productores No. 21. CEVACU-CIRNO. Culiacán, Sinaloa, México.
- Paramasivam, S., Alva, A.K. and Fares, A. 2001. Transformation and transport of nitrogen forms in a sandy entisol following a heavy loading of ammonium nitrate solution: Field measurements and model simulations. *J. S. Contamin.* 9: 65-86.
- Peña, C.J.J., Grageda, C.O.A. y Vera, N.J. A. 2002. Manejo de los fertilizantes nitrogenados en México: Uso de las técnicas isotópicas. *Terra Latinoamericana*, 20:51-56.
- Peña-Cabriales J.J., Grageda-Cabrera O.A. y J.A.Vera-Núñez. 2001. Manejo de los fertilizantes nitrogenados en México: Uso de técnicas isotópicas (^{15}N). *Terra* 20: 51-56.
- Peraza, M.S., Macias, C.J. y Mendoza, R.J.L. 1998. Maíz bajo riego en el Norte de Sinaloa. Folleto para productores No. 8. Sinaloa, México. 20 p.
- Pereira, H., Serralheiro, R. and Pereira, R. 2000. Water balance for paddy rice basins. Environmental aspects of rice cropping. *Revista de Ciencias Agrarias* 23: 3-20.
- Pérez, O.M.A., Etchevers B.J.D., Navarro G.H. y Nuñez E.R. 2000. Aporte de los residuos del cultivo anterior al reservorio de nitrógeno en tepetates. *Agrociencia*, 34: 115-125.
- Pizarro F. 1996. Riegos localizados de alta frecuencia: Goteo, Microaspersión y exudación. Ediciones Mundi-Prensa. Barcelona, España. 513 p.

- Prakasa, E.V.S. and Puttanna, K. 2000. Nitrates, agriculture and environment. *Current Science* 79: 1163-1168.
- Prasad, R. and Power, J.F. 2000. *Soil Fertility Management for Sustainable Agriculture*. Lewis Publishers. New York, United States of America. 356 p.
- PRONASE. 1977. Homenaje en memoria del apóstol del maíz. XXX aniversario de la fundación de la Comisión del Maíz. SARH. México. p. 6.
- Puente, F.F., Sánchez, D.N., Chávez, R.S. y Laird, R.J. 1963. Prácticas de fertilización y poblaciones optimas para siembras de maíz en las regiones tropicales de Veracruz. Folleto Técnico No. 45. INIA, S.A.G. México. 53 p.
- Quiñones, A., Martínez, B. and Legaz, F. 2007. Influence of irrigation system and fertilization management on seasonal distribution of N in the soil profile and on N-uptake by citrus trees. *Agricul. Ecosyst. and Environ.*, 122: 399-409.
- Randall, G.W. and Mullan, D.J. 2001. Nitrate nitrogen in surface waters as influenced by climatic conditions and agricultural practices. *J. Environ. Qual.* 30: 337-344.
- Rasse, D.P., Ritchie, J.T. Peterson, W.R., Wei, J. and Smucker, A.J.M. 2000. Rye cover crop and nitrogen fertilization effects on nitrate leaching in inbred maize fields. *J. Environ. Qual.*, 29: 298-304.
- Ritter, W.F. and Bergstrom, L., 2001. Nitrogen and Water Quality. In Ritter, W.F. and Shirmohammadi, A. *Agricultural Nonpoint Source Pollution, Watershed Management and Hydrology*, Lewis, p. 59-89.
- Rojas, M.B. 1981. El riego en surcos. SARH-INIA. Tema didáctico No. 12. México. 23 p.
- Romero, P.I.L. 2005. Estudio de alternativas para la conservación del agua en el suelo en la agricultura urbana. Tesis UNAH. La Habana (Tesis de Master en Ciencias) 78 p.

- Rozas, S. H. y Echeverría, H. E. 1998. Relación entre las lecturas del medidor de clorofila (minolta spad 502) en distintos estadios del ciclo del cultivo de maíz y el rendimiento en grano. *Rev. Fac.de Agron.*, 103: 37-44
- SAGARPA. 2006. Memoria del proyecto conversión del cultivo de maíz blanco a la inducción a maíz amarillo en el estado de Sinaloa, ciclo otoño invierno 2005/2006. Sinaloa, México. p. 7.
- Sainz, R.H., Echeverría, H, Studdert, G. y Dominguez, G. 2000. Evaluation of the presidedress soil nitrogen test for no tillage maize fertilized at planting. *Agron. J.* 92:1176-1183.
- SAS. 1996. Institute The SAS System for Windows, ver. 6.12. SAS. Institute Inc., Cary, NC.
- Scharf, P.C., Brouder, S.M. and Hoef, R.G. 2006. Chlorophyll Meter Readings Can Predict Nitrogen Need and Yield Response of Corn in the North-Central USA. *Agron. J.*, 98: 655-665.
- Semaan, J., Flichman, G., Scardigno, A. and Steduto, P. 2007. Analysis of nitrate pollution control policies in the irrigated agriculture of Apulia Region (Southern Italy): A bio-economic modelling approach. *Agricul. Syst.*, 94: 357-367.
- Sharmasarkar, F.C., Sharmasarkar, S., Miller, S.D., Vance, G.F. and Zhang, R. 2001. Assessment of drip and flood irrigation on water and fertilizer use efficiencies for sugarbeets. *Agricultural. Water Management*, 46: 241-251.
- SIAP. 2006. Servicio de Información y Estadística Agroalimentaria y Pesquera. SAGARPA. México.
- SIAP. 2009. Servicio de Información y Estadística Agroalimentaria y Pesquera. SAGARPA. México.

- SIAP. 2010. Servicio de Información y Estadística Agroalimentaria y Pesquera. SAGARPA. México.
- Singh, R. B. 2000. Environmental consequences of agricultural development: A case study from the Green Revolution state of Haryana, India. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 82: 97-103.
- Soto J.M. F., Páez, O.F., Bojorquez L.H., 2003. Nutrient cycling at the sediment – water interface and in sediments Chiricahueto marsh: a subtropical ecosystem associate with agricultural land uses. *Water Research* 37: 719-728.
- Soto, O.P, Jahn B.E. y Arredondo S.S. 2004. Mejoramiento del porcentaje de proteína en maíz para ensilaje con el aumento y parcialización de la fertilización nitrogenada. *Agricultura Técnica*. 64: 156-162.
- Soto, O.P, Jahn B.E., y Arredondo S.S. 2002. Población y fertilización nitrogenada en un híbrido de maíz para ensilaje en el valle central regado. *Agric. Téc.*, 62: 255-265.
- Spalding, R.F., and Exner, M.E. 1993. Occurrence of nitrate in groundwater: A review. *J. Environ Qual.*, 22: 392-402.
- Spalding, R.F., Watts, D.G., Schepers, J.S., Burbach, M.E., Exner, M.E., Poreda, R.J. and Martin, G.E. 2001. Controlling nitrate leaching in irrigated agriculture. *J. Environ. Qual.* 30:1184-1194.
- Stevens, W. B., R. G. Hoefl, and R. L. Mulvaney. 2005. Fate of nitrogen-15 in a long-term nitrogen rate study:II. Nitrogen uptake efficiency. *Agron. J.* 97:1046–1053.
- Tan, C. S., Drury, C. F., Reynolds, W. D., Groenevelt, P. H., Dadfar, H. 2002. Water and nitrate loss trough tiles under a clay loam soil in Ontario after 42 years of consistent fertilization and crop rotation. *Agr. Ecosyst. Environ.*, 93: 121-130.

- Torres R. D; Florentino A. Y Marisol López. 2005. Perdidas de suelo y nitrógeno por escorrentía en un ultisol degradado bajo diferentes condiciones de cobertura vegetal en Chaguaramas-Guárico. *Agronomía Tropical* 55(4): 475-496.
- USEPA. 2003. National Primary Drinking Water Standards. United Estate Agency Protection Environmental, Office of Water. <http://www.epa.gov/safewater/consumer/pdf/mcl.pdf> (Consulta: 17 de Julio de 2009).
- Van Eerdt, M.M. and Fong, P.K.N. 1998. The monitoring of nitrogen surpluses from agriculture. *Environ. Pollut.*, 102: 227-233.
- Varvel G. E.; Schepers J. S. and Francis D. D. 1997. Ability for In-Season Correction of Nitrogen Deficiency in Corn Using Chlorophyll Meters. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 61:1233-1239.
- Vergara, S.M.A., Etchevers, B.J.D. y Padilla, C.J. 2005. La fertilidad de los suelos de ladera de la sierra norte de Oaxaca, México. *Agrociencia* 39: 259-266.
- Villar P., Villar J.M, Ferrer F, Arán M. 2000. Optimización de la fertilización nitrogenada en maíz en suelos calcáreos del área regada por los canales de Urgell (LLEIDA). *Invest. Agr.: Prod. Prot. Veg.* Vol. 15 (1-2).
- Wellhausen, E.J. 1960. El mejoramiento del maíz en México: Avances actuales y proyección hacia el futuro. *Revista de la Sociedad de Historia Natural*. Tomo XXI. 2: 435-462p.
- Wild, A. 1992. *Condiciones del Suelo y Desarrollo de las Plantas según Russell*. Editorial Mundi Prensa. Madrid, España. 1045 p.
- Wolf, J., Rötter, R. and Oenema, O. 2005. Nutrient emission models in environmental policy evaluation at different scales—experience from the Netherlands. *Agr. Ecosyst. Environ.*, 105: 291-306.

World Health Organization. 2006. *Guidelines for drinking-water quality. Volume I: Recommendations. 3^{ra} ed. Electronic version. 515 p.* http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq0506.pdf. (Consultado en línea: 23 de junio de 2009).

Yu-kui, R., Shi-ling J., Fu-suo Z., Jian-bo S. 2009. Effects of nitrogen fertilizer input on the composition of mineral elements in corn grain. *Agrociencia* 43: 21-27p.

Zapata, F. 2002. Contribución de las técnicas nucleares al desarrollo de prácticas de manejo integrado del suelo, agua y nutrimentos para el incremento de la producción agrícola. *Terra* 20:1-6.

ANEXO

COMPORTAMIENTO FENOTÍPICO DEL MAÍZ DEBIDO A CINCO DOSIS DE NITRÓGENO

Rosario Celene Banda-Perea¹, Tomás Díaz-Valdés¹, Leopoldo Partida-Ruvalcaba¹, Ángel López-López², Teresa de Jesús Velázquez-Alcaraz¹, Ramón Lizárraga-Jiménez¹, Railén Amador-Irure³, Marino Valenzuela-López¹.

¹Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Sinaloa. Carretera Culiacán-Eldorado, km 17.5. Culiacán, Sinaloa, México. ²Instituto de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma de Baja California. Carretera Blvd. Delta s/n, Ejido Nuevo León, Mexicali BC, CP 21705 México. ³Universidad Agraria de la Habana. tdiaz10@hotmail.com. Proyecto apoyado por la PROFAPI-UAS.

Resumen

En este artículo se presentan las respuestas fenotípicas del maíz al uso de cinco dosis de nitrógeno (0, 150, 300, 450 y 600 kg de N ha⁻¹), para las condiciones de riego por surcos. La respuesta a las variables fenotípicas del maíz mostró un efecto altamente significativo al uso de dosis elevadas de nitrógeno (N), donde el tratamiento de 450 kg de N ha⁻¹ en forma general fue el que ocasionó una mejor respuesta a las variables fenotípicas del maíz.

Palabras clave: *Altura de planta, diámetro de tallo, área foliar*

Summary

This article presents the phenotypic responses of maize to use five doses of nitrogen (0, 150, 300, 450 y 600 kg N ha⁻¹) for furrow irrigation conditions. The response to the phenotypic variables maize showed a highly significant effect on the use of high doses of nitrogen (N), the treatment of 450 kg N ha⁻¹ in general was which had better response to maize phenotypic variables.

Key words: *Plant height, stem diameter, leaf area*

Introducción

En Sinaloa, México, la mayor superficie de maíz se cultiva en las zonas áridas y semiáridas, durante el ciclo agrícola otoño-invierno 2008-2009 se sembraron 469 mil hectáreas en la zona de riego, donde el rendimiento medio fue de 10.5 Mg ha⁻¹ (SIAP, 2009). El uso intensivo de los fertilizantes nitrogenados en la agricultura moderna está motivada por una alta producción de grano (Khan *et al.*, 2007). El nitrógeno (N) es uno de los factores que provoca alteraciones en las variables fenotípicas del cultivo de maíz, el atraso o adelanto en el comportamiento de estas variables provoca modificaciones en el peso de grano, contribuyendo en algunos casos en reducción en el rendimiento.

Amanullah *et al.* (2009) realizaron un estudio con densidades de población de maíz y tres dosis de N (60, 120 y 180 kg de N ha⁻¹) aplicado en forma espacial en el tiempo, y determinaron que la calendarización y aplicación del N tuvo un efecto significativo en las variables fenológicas. Por otra parte, Eck (1984) trabajaron con seis dosis de N (0, 70, 140, 210, 280 y 350 kg ha⁻¹), y encontraron que el peso de grano se incrementó con el aumento de la dosis de N.

El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de cinco dosis de N en algunas variables fenotípicas de la planta de maíz.

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

El suelo es de textura arcillosa (44.26%), es de pH alcalino (8.02), pobre en materia orgánica (0.96%), con una conductividad eléctrica de 0.62 dS m⁻¹ y un contenido de NO₃ de 14.32 mg kg⁻¹ de suelo. Se sembró el maíz híbrido Pioneer 30P49 el 31 de enero de 2009 y se cosechó el 24 de julio del 2010. 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 presiembra y tres de auxilio. 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. Los tratamientos y distribución del nitrógeno se muestra en el Cuadro 1, el 30% de N se aplicó en presiembra y el 70% se aplicó en la etapa vegetativa de sexta a octava hoja, todo el fósforo se aplicó en presiembra (90 kg de P₂O₅ ha⁻¹).

Las variables fenotípicas evaluadas fueron altura de planta, diámetro de tallo, peso de 1000 granos y área foliar del maíz de acuerdo a la metodología propuesta por Mendoza *et al.* (1984), la fórmula usada fue: $L_A = \text{Largo} \times \text{Ancho} \times 0.75$, donde L_A = área foliar (m²), L = largo de la hoja en m y A = ancho de hoja en m.

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 ($\alpha \leq 0.05$).

Cuadro 1. Tratamientos y dosificación del nitrógeno en maíz.

Tratamientos N (kg ha ⁻¹)	Dosificación de N (kg ha ⁻¹)	
	Presiembra	Etapas V6-V8
0	0	0
150	45	105
300	90	210
450	135	315
600	180	420

Resultados y Discusión

Altura de planta

Los resultados del análisis estadístico para altura de planta mostraron diferencia altamente significativa ($P \leq 0.01$) debido a las dosis de N (Cuadro 2). Las dosis de 600 kg de N ha⁻¹ fue estadísticamente igual al tratamiento de 450 kg de N ha⁻¹, pero superior estadísticamente a las dosis de N ≤ 300 kg de N ha⁻¹. El maíz encontró una mayor respuesta con las dosis de 600 y 450 kg de N ha⁻¹. Betancour-Yanez *et al.* (1998), encontraron que con dosis mayor a 100 kg de N ha⁻¹ en el segundo año de estudio mostró la mayor altura de planta siendo superior al testigo.

Diámetro de tallo

En el Cuadro 2, se puede apreciar como fluctuó los valores de diámetro de tallo en el maíz, con el uso de diferentes dosis de N. En el Análisis de Varianza realizado quedó demostrado que existen diferencias altamente significativas ($P \leq 0.01$) entre los tratamientos. El tratamiento que logró estadísticamente el mayor diámetro de tallo fue de 450 kg de N ha⁻¹ resultando igual los tratamientos de 300 y 600 kg de N ha⁻¹, sin embargo éste fue superior estadísticamente al testigo y las dosis de 150 kg de N ha⁻¹. El incremento obtenido por el tratamiento de 450 kg de N ha⁻¹ en relación al testigo fue de 15.24%. Betancour-Yanez *et al.* (1998), encontraron que las dosis de 80 y 100 kg de N ha⁻¹ fueron superior estadísticamente al testigo y la dosis de 60 kg de N ha⁻¹. Estos resultados demuestran que la fertilización nitrogenada contribuye a un adecuado crecimiento del diámetro de tallo, lo cual favorece a un mejor transporte de agua y nutriente para la planta de maíz, así como a un mejor desarrollo y producción de grano.

Área foliar

El nitrógeno tuvo un efecto altamente significativo en el área foliar ($P \leq 0.01$), la dosis de 450 kg de N ha⁻¹ superó estadísticamente a resto de los tratamientos (Cuadro 2). El incremento en el área foliar 450 kg de N ha⁻¹ en relación al testigo fue de 21.74%. Todos los tratamientos con N superaron al testigo, lo cual

demuestra que el N provoca un efecto importante en el aumento de la superficie foliar, contribuyendo a una mayor captación de luz, mayor actividad fotosintética y mayor producción de asimilados.

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 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.

Cuadro 2. Resultados de la prueba de comparación de medias de las variables fenotípicas

Tratamiento kg de N ha ⁻¹	Altura de planta m	Diámetro de tallo cm	Área Foliar m ² planta ⁻¹	Peso de 1000 granos g
0	2.06d	2.10b	0.46e	251.87c
150	2.15cd	2.18b	0.49d	276.98b
300	2.19bc	2.39a	0.54b	297.50ab
450	2.28ab	2.42a	0.56a	310.18a
600	2.31a	2.38a	0.51c	296.61ab

Valores de la misma letras son estadísticamente iguales (P≤0.05)

Peso de 1000 granos

El peso de 1000 granos tiende a crecer con la dosis de N aplicada (Cuadro 2). El peso del grano mostró un efecto altamente significativo a las dosis de N (P≤0.01). El mayor valor se obtuvo con la dosis de 450 kg de N ha⁻¹, siendo esta estadísticamente superior a los tratamientos testigo y 150 kg de N ha⁻¹. El mayor peso de grano se relaciona con el mayor crecimiento y desarrollo de la planta, debido a que existe una mayor capacidad de intersección de luz cuando se tiene una mayor área foliar, induciendo a un mayor peso de grano por el incremento de los asimilados en el grano.

Conclusiones

El tratamiento de 450 kg de N ha⁻¹ provocó una mejor respuesta a las mayorías de las variables fenotípicas evaluadas, donde el aumento del N sí modificó significativamente el crecimiento y desarrollo del maíz

Literatura Citada

- Amanullah, R. A. Khattak and S. K. Khalil. 2009. Plant Density and Nitrogen Effects on Maize Phenology and Grain Yield. *Journal of Plant Nutrition*. 32: 246–260.
- Betancourt-Yanez, P., González-Ríos, J., Figueroa-Sandoval, B. y González-Cossio, F. 1998. Cobertura vegetativa y fertilización nitrogenada en la producción de maíz. *Terra*. 3:231-237.
- De Juan-Valero, J. A., M. Maturano, A. Artigao-Ramírez, J. M. T. Martín-Benito and J. F. Ortega-Álvarez. 2005. 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.
- Eck, H. V. 1984. Irrigated corn yield response to nitrogen and water. *Agron. J.* 76:421-428.
- García, E. 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de Geografía. UNAM, México. 217 p.
- Khan, S. A., R. L. Mulvaney, T. R. Ellsworth, and C. W. Boast. 2007. The myth of nitrogen fertilization for soil carbon sequestration. *J. Environ. Qual.* 36:1821–1832.
- Mendoza, O. L. E.; H.V.A. González y C.J. Ortiz. 1984. Factores de conversión y tamaños de muestra en las estimaciones del área foliar en maíz. *Agrociencias*. 58:141-151.
- SIAP. 2009 Servicio de Información y Estadística Agroalimentaria y Pesquera. SAGARPA. México.

INFLUENCIA DEL NITRÓGENO EN EL COMPORTAMIENTO FENOTÍPICO, USO DEL AGUA Y RECUPERACIÓN DEL NITRÓGENO EN MAÍZ

Rosario Celene Banda-Perea¹, Tomás Díaz-Valdés¹, Leopoldo Partida-Ruvalcaba¹, Ángel López-López², Teresa de Jesús Velázquez-Alcaraz¹, Ramón Lizárraga-Jiménez¹, Railén Amador-Irure³, Marino Valenzuela-López¹, Juan Martín Parra Delgado¹, Felipe Ayala-Tafoya¹, Omelio León-Delgado³.

¹Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Sinaloa. Carretera Culiacán-Eldorado, km 17.5. Culiacán, Sinaloa, México. ²Instituto de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma de Baja California. Carretera Blvd. Delta s/n, Ejido Nuevo León, Mexicali BC, CP 21705 México. ³Universidad Agraria de la Habana. tdiaz10@hotmail.com.

RESUMEN

En este artículo se presentan las respuestas fenotípicas, eficiencia en el uso del agua y recuperación del nitrógeno por la planta de maíz mediante el uso de cuatro dosis de nitrógeno (150, 300, 450 y 600 kg de N ha⁻¹), para las condiciones de riego por surcos. La respuesta a las variables fenotípicas del maíz mostró un efecto altamente significativo al uso de dosis elevadas de nitrógeno (N), donde el tratamiento de 450 kg de N ha⁻¹ en forma general fue el que ocasionó una mejor respuesta a las variables fenotípicas y uso eficiente del agua en maíz. El incremento en la dosis de N provocó una reducción significativa en la ERN

Palabras clave: *Altura de planta, diámetro de tallo, área foliar, uso eficiente del agua*

SUMMARY

This article presents the phenotypic responses, efficient water use and nitrogen recovery by corn plant of maize to use four doses of nitrogen (150, 300, 450 y 600 kg N ha⁻¹) for furrow irrigation conditions. The response to the phenotypic variables maize showed a highly significant effect on the use of high doses of nitrogen (N), the treatment of 450 kg N ha⁻¹ in general was which had better response to phenotypic variables and efficient water use in maize. The increase in the dose of N caused a significant reduction in ERN.

Key words: *Plant height, stem diameter, leaf area, efficient water use*

INTRODUCCIÓN

En Sinaloa, México, la mayor superficie de maíz se cultiva en las zonas áridas y semiáridas, durante el ciclo agrícola otoño-invierno 2008-2009 se sembraron 469 mil hectáreas en la zona de riego, donde el rendimiento medio fue de 10.5 Mg ha⁻¹ (SIAP, 2009). El uso intensivo de los fertilizantes nitrogenados en la agricultura moderna está motivada por una alta producción de grano (Khan *et al.*, 2007). El nitrógeno (N) es uno de los factores que provoca alteraciones en las variables fenotípicas del cultivo de maíz, el atraso o adelanto en el comportamiento de estas variables provoca modificaciones en el peso de grano, contribuyendo en algunos casos en reducción en el rendimiento.

Amanullah *et al.* (2009) realizaron un estudio con densidades de población de maíz y tres dosis de N (60, 120 y 180 kg de N ha⁻¹) aplicado en forma espacial en el tiempo, y determinaron que la calendarización y aplicación del N tuvo un efecto significativo en las variables fenológicas. Por otra parte, Eck (1984) trabajaron con seis dosis de N (0, 70, 140, 210, 280 y 350 kg ha⁻¹), y encontraron que el peso de grano se incrementó con el aumento de la dosis de N.

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 es el principal factor limitante para el desarrollo de las plantas en muchos suelos en sistemas intensivos de producción (Witcobe *et al.*, 2008), 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 y 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).

Para reducir los costos de inversión y mitigar la contaminación por N es necesario contar con estrategias que mejoren la ERN (Arregui *et al.*, 2008). La mitigación no es solamente una relación de números, ya que para mantener niveles adecuados de productividad es necesario conocer la dosis de nitrógeno, por el efecto positivo que tienen en la producción agrícola (Overman y Scholtz III, 2002), como la reducción de costos agrícolas y la mitigación ambiental. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de cuatro dosis de N en algunas variables fenotípicas, el uso eficiente del agua y la eficiencia de recuperación del N por la planta de maíz.

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

El suelo es de textura arcillosa (44.26%), es de pH alcalino (8.02), pobre en materia orgánica (0.96%), con una conductividad eléctrica de 0.62 dS m⁻¹ y un contenido de NO₃ de 14.32 mg kg⁻¹ de suelo. Se sembró el maíz híbrido Pioneer 30P49 el 31 de enero de 2009 y se cosechó el 24 de julio del 2010. 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 presiembra y tres de auxilio. 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. Los tratamientos y distribución del nitrógeno se muestra en el Cuadro 1, el 30% de N se aplicó en presiembra y el 70% se aplicó en la etapa vegetativa de sexta a octava hoja, todo el fósforo se aplicó en presiembra (90 kg de P₂O₅ ha⁻¹).

Las variables fenotípicas evaluadas fueron altura de planta, diámetro de tallo, peso de 1000 granos y área foliar del maíz de acuerdo a la metodología propuesta por Mendoza *et al.* (1984), la fórmula usada fue: L_A = Largo x Ancho x 0.75, donde L_A = área foliar (m²), L = largo de la hoja en m y A = ancho de hoja en m. La eficiencia en el uso del agua (EUA) se determinó con la fórmula: 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). El contenido de N de la materia se determinó por el método Kjeldhal (Bremner, 1965). La eficiencia de recuperación del N (ERN) y la eficiencia en el uso del N (EUN) se estimó con la metodología propuesta por (Ferrer *et al.*, 2003; Castro-Luna *et al.*, 2005). La ERN se calculó con la fórmula: ERN (%) = (N_{PF} - N_{PNF} / F_N) x 100, donde: N_{PF} = cantidad de N absorbido por la planta del tratamiento fertilizado en kg ha⁻¹, N_{PNF} = cantidad de N absorbido por el tratamiento sin fertilizar en kg ha⁻¹ y F_N = cantidad de N aplicado por tratamiento en kg ha⁻¹.

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 ($\alpha \leq 0.05$).

Cuadro 1. Tratamientos y dosificación del nitrógeno en maíz.

Tratamientos N	Dosificación de N (kg ha ⁻¹)	
(kg ha ⁻¹)	Presiembra	Etapas V6-V8
0 (testigo absoluto)	0	0
150	45	105
300	90	210
450	135	315
600	180	420

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Altura de planta

Los resultados del análisis estadístico para altura de planta mostraron diferencia altamente significativa ($P \leq 0.01$) debido a las dosis de N (Cuadro 2). Las dosis de 600 kg de N ha⁻¹ fue estadísticamente igual al tratamiento de 450 kg de N ha⁻¹, pero superior estadísticamente a las dosis de N ≤ 300 kg de N ha⁻¹. El maíz mostró una mayor respuesta a las dosis de 600 y 450 kg de N ha⁻¹ usadas en el cultivo. Betancour-Yanez *et al.* (1998), encontraron que con dosis mayor a 100 kg de N ha⁻¹ en el segundo año de estudio mostró la mayor altura de planta siendo superior al testigo.

Diámetro de tallo

En el Cuadro 2, se puede apreciar como fluctuó los valores de diámetro de tallo en el maíz, con el uso de diferentes dosis de N. En el Análisis de Varianza realizado quedó demostrado que existen diferencias altamente significativas ($P \leq 0.01$) entre los tratamientos. El tratamiento usado en el cultivo de maíz que logró estadísticamente el mayor diámetro de tallo fue de 450 kg de N ha⁻¹ resultando igual los tratamientos de 300 y 600 kg de N ha⁻¹, sin embargo éste fue superior estadísticamente al testigo y las dosis de 150 kg de N ha⁻¹. El incremento obtenido por el tratamiento de 450 kg de N ha⁻¹ en relación al testigo fue de 15.24%. Betancour-Yanez *et al.* (1998), encontraron que

las dosis de 80 y 100 kg de N ha⁻¹ fueron superior estadísticamente al testigo y la dosis de 60 kg de N ha⁻¹. Estos resultados demuestran que la fertilización nitrogenada contribuye a un adecuado crecimiento del diámetro de tallo, lo cual favorece a un mejor transporte de agua y nutriente para la planta de maíz, así como a un mejor desarrollo y producción de grano.

Área foliar

El nitrógeno usado en el cultivo provocó en el área foliar de la planta de maíz efecto altamente significativo ($P \leq 0.01$), donde la dosis de 450 kg de N ha⁻¹ superó estadísticamente a resto de los tratamientos para la variable evaluada (Cuadro 2). El incremento en el área foliar con la dosis de 450 kg de N ha⁻¹ en relación al testigo fue de 21.74%. Todos los tratamientos, donde se aplicó N superaron al testigo, lo cual demuestra que el N provoca un efecto importante en el aumento de la superficie foliar, contribuyendo a una mayor captación de luz, actividad fotosintética y producción de asimilados.

De Juan-Valero *et al.* (2005), encontraron que un incremento sostenible de N de 0 a 300 kg ha⁻¹ usados en el cultivo de maíz, permite obtener valores máximos de 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.

Cuadro 2. Resultados de la prueba de comparación de medias de las variables fenotípicas

Tratamiento kg de N ha ⁻¹	Altura de planta m	Diámetro de tallo cm	Área Foliar m ² planta ⁻¹	Peso de 1000 granos g
0	2.06d	2.10b	0.46e	251.87c
150	2.15cd	2.18b	0.49d	276.98b
300	2.19bc	2.39a	0.54b	297.50ab
450	2.28ab	2.42a	0.56a	310.18a
600	2.31a	2.38a	0.51c	296.61ab

Valores de la misma letras son estadísticamente iguales ($P \leq 0.05$)

Peso de 1000 granos

El peso de 1000 granos tiende a crecer con el aumento de la dosis de N aplicada (Cuadro 2). El aumento de peso de grano mostró un efecto altamente significativo a las dosis de N ($P \leq 0.01$). El mayor valor se obtuvo con la dosis de 450 kg de N ha⁻¹, siendo esta estadísticamente superior a los tratamientos testigo y 150 kg de N ha⁻¹. El mayor peso de grano se relaciona con el mayor crecimiento y desarrollo de la planta, debido a que existe una mayor capacidad de intersección de luz cuando se tiene una mayor área foliar, induciendo a un mayor peso de grano por el incremento de los asimilados en el grano.

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 ($P \leq 0.01$) 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 los obtenidos 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 una tendencia positiva de EUA (160.9, 172.10, 188.43 y 191.77 kg ha⁻¹ cm⁻¹), respectivamente.

Eficiencia de recuperación del nitrógeno

La eficiencia en la recuperación del N tiende a decrecer con el aumento de N aplicada (Figura 2). La ERN mostró un efecto altamente significativo a las dosis de N ($P \leq 0.01$). La mayor ERN se obtuvo con la dosis de 150 kg de N ha⁻¹, siendo esta estadísticamente superior al resto de los tratamientos. Resultados similares obtuvieron Steves *et al.* (2005), quienes observaron que a medida que se incrementó la dosis de nitrógeno (67, 134, 201 y 268 kg de N ha⁻¹),

la eficiencia de recuperación del N fue menor (69, 60, 59 y 49%), respectivamente. Respuestas similares obtuvieron Hokmalipour *et al.* (2010), quienes también observaron que a medida que la dosis de N aumento (60, 120 y 180 kg ha⁻¹), la ERN obtenida fue menor (18.7, 13.2 y 10.6%), respectivamente.

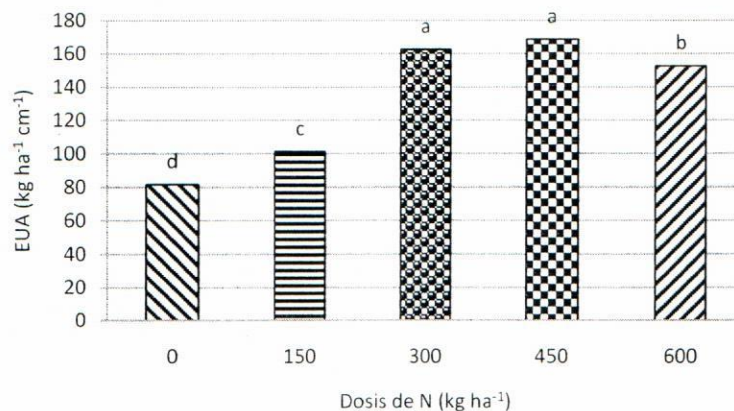


Figura 1. Valores promedios del la eficiencia en el uso del agua de nitrógeno.

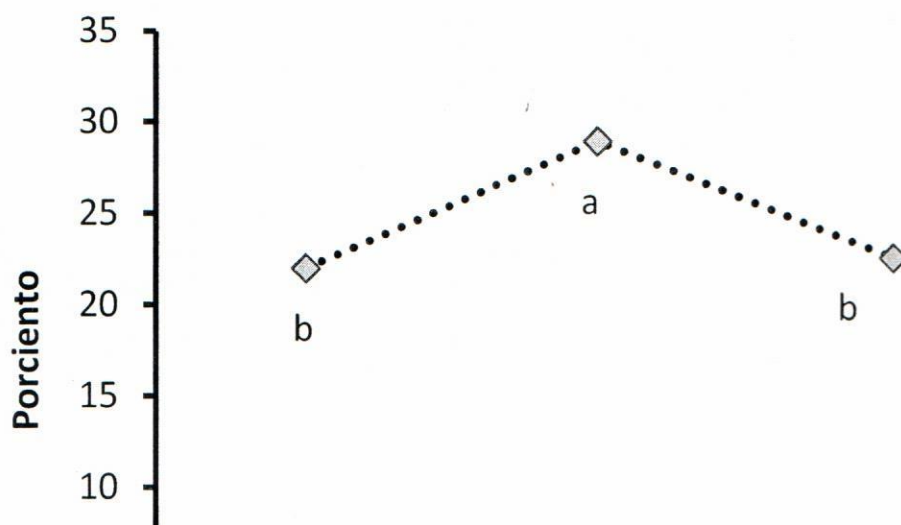


Figura 2. Porcentaje de la eficiencia de recuperación del nitrógeno (ERN).

CONCLUSIONES

El tratamiento de 450 kg de N ha⁻¹ provocó una mejor respuesta a las mayorías de las variables fenotípicas evaluadas, se observó que el aumento del N sí modificó significativamente el crecimiento y desarrollo del maíz, y mediante esta dosis se obtuvo una mayor eficiencia en el uso del agua, sin embargo la dosis usada en el cultivo de 300 kg de N ha⁻¹ indujo una mayor eficiencia de recuperación del N.

AGRADECIMIENTOS

Mi reconocimiento a la Universidad Autónoma de Sinaloa por el financiamiento otorgado para la realización de la presente investigación, apoyado a través del Programa de Fortalecimiento y Apoyo a Proyectos de Investigación (PROFAPI) de la convocatoria 2009, número de registro PROFAPI 2009/053.

LITERATURA CITADA

Al-Kaisi, M. M. and X. Yin. 2003. Effects of nitrogen rate, irrigation rate, and plant population on corn yield and water use efficiency. *Agron. J.* 95:1475–1482

- Amanullah, R. A. Khattak and S. K. Khalil. 2009. Plant Density and Nitrogen Effects on Maize Phenology and Grain Yield. *Journal of Plant Nutrition*. 32: 246–260.
- Arregui, L. M. and M. Quemada. 2008. Strategies to improve nitrogen use efficiency in winter cereal crops under rainfed conditions. *Agron. J.* 100:277–284.
- Betancourt-Yanez, P., González-Ríos, J., Figueroa-Sandoval, B. y González-Cossio, F. 1998. Cobertura vegetativa y fertilización nitrogenada en la producción de maíz. *Terra*. 3:231-237.
- Castro-Luna, I., Gavi-Reyes, F., Peña-Cabriales, J.J., Núñez-Escobar, R. Etchevers-Barra, J.D. 2005. Eficiencia de recuperación de N y K de tres fertilizantes de lenta liberación. *Terra Latinoamericana* 24:277-282.
- De Juan-Valero, J. A., M. Maturano, A. Artigao-Ramírez, J. M. T. Martín-Benito and J. F. Ortega-Álvarez. 2005. 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.
- Eck, H. V. 1984. Irrigated corn yield response to nitrogen and water. *Agron. J.* 76:421-428.
- Ferrer, F., J. M. Villar, C. O. Stockle, P. Villar and M. Aran. 2003. Use of a pre-sidedress soil nitrate test (PSNT) to determine nitrogen fertilizer requirements for irrigated corn. *Agron. J.* 23: 561–570.
- García, E. 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de Geografía. UNAM, México. 217 p.
- Hokmalipour, S., M. Shiri-e-Janagard, M. H. Darbandi, F. Peyghami-e-Ashenaee, M. Hasanzadeh, M. N. Seiedi and R. Shabani. 2010. Comparison of Agronomical Nitrogen Use Efficiency in Three Cultivars of Corn as Affected by Nitrogen Fertilizer Levels. *World Appl. Sci. J.* 8: 1168-1174.
- Khan, S. A., R. L. Mulvaney, T. R. Ellsworth, and C. W. Boast. 2007. The myth of nitrogen fertilization for soil carbon sequestration. *J. Environ. Qual.* 36:1821–1832.
- Mendoza, O. L. E.; H.V.A. González y C.J. Ortiz. 1984. Factores de conversión y tamaños de muestra en las estimaciones del área foliar en maíz. *Agrociencias*. 58:141-151.
- Overman, A.R. and R.V. Scholtz III, 2002. Corn response to irrigation and applied nitrogen. *Soil Sci. Plant Anal.* 33: 3609-3619.
- Raun, W.R., G.V., Johnson 1999. Improving nitrogen use efficiency for cereal production. *Agron. J.* 91: 57–351.
- Shanahan, J.F., N.R. Kitchen, W.R. Raun, and J. S. Schepers. 2008. Responsive in season nitrogen management for cereals. *Comput. Electron. Agric.* 61:51–62.
- SIAP. 2009 Servicio de Información y Estadística Agroalimentaria y Pesquera. SAGARPA. México.
- Stevens, W. B., R. G. Hoefl, and R. L. Mulvaney. 2005. Fate of nitrogen-15 in a long-term nitrogen rate study:II. Nitrogen uptake efficiency. *Agron. J.* 97:1046–1053.
- Witcombe, J.R., P.A. Hollington, C. J. Howarth, S. Reader and K. A. Steele. 2008. Breeding for abiotic stresses for sustainable agriculture. *Phil. Trans. R. Soc. B.* 363: 703–716.