



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

ESCUELA DE BIOLOGÍA

VARIACIÓN FENOTÍPICA EN LA ARQUITECTURA RADICAL
DE MAÍZ (*Zea mays* L.): INDICADORES DE EFICIENCIA A
NITRÓGENO EN ETAPA DE CRECIMIENTO DE LA
PLÁNTULA

TESIS QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
LICENCIADA EN BIOLOGÍA

PRESENTA:
ANA KAREN CAMACHO GALLARDO

DIRECTOR:
DR. JENARO REYES MATAMOROS



PUEBLA, PUE., MARZO DE 2016

AGRADECIMIENTOS

A la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla por el apoyo brindado durante mi formación profesional.

A la Escuela de Biología por la formación académica en esta carrera para seguir adelante.

A mi familia por estar conmigo en todo momento y no dejarme caer, por darme las fuerzas para salir adelante.

Al Dr. Jenaro gracias por su tiempo, consejos y enseñanzas recibidas durante la realización de este trabajo.

DEDICATORIA

En especial a mis padres José Luis Camacho y Berta Gallardo: por darme la vida, por todo el apoyo brindado y por enseñarme que no hay caída de la que no pueda levantarme para seguir adelante.

A mis hermanos Italia, Lima y José Manuel, a ti Luis, por estar conmigo en los buenos y malos momentos y por todo el apoyo que me han brindado.

A mi hija Camila Esmeralda por la esperanza que me da para luchar y seguir adelante.

A mis amigos por su valiosa e inigualable amistad.

CONTENIDO

	Pág.
LISTA DE CUADROS	6
LISTA DE FIGURAS	7
LISTA DE APÉNDICES	10
RESUMEN	11
ABSTRACT	12
I INTRODUCCIÓN	13
II ANTECEDENTES	15
2.1 Importancia del maíz en México	20
2.1.1 El cultivo de maíz	20
2.1.2 Comportamiento de la producción nacional	21
2.1.3 Consumo nacional de maíz	23
2.2 Biología del maíz	24
2.2.1 Clasificación y descripción botánica	24
2.2.2 Fenología	26
2.3 Nitrógeno en suelo y planta	28
2.3.1 Funciones del nitrógeno en las plantas	28
2.3.2 Formas de nitrógeno en el suelo	29
2.3.3 Formas de aplicación de nitrógeno	31
2.3.4 Pérdidas de nitrógeno	31
2.4 Fertilización en maíz	32
2.4.1 Nutrimientos esenciales para las plantas	32
2.4.2 Fertilización con nitrógeno	34

2.4.3	Uso eficiente de nitrógeno en maíz	36
III	JUSTIFICACIÓN	38
IV	OBJETIVO GENERAL	39
4.1	4.1 Objetivos particulares	39
V	HIPÓTESIS	39
VI	MATERIALES Y MÉTODOS	40
6.1	Localización	40
6.2	Material vegetal	40
6.3	Método rollo de papel	42
6.4	Sistema de raíz flotante	43
6.5	Variables evaluadas	45
VII	RESULTADOS	47
XIII	DISCUSIÓN	85
IX	CONCLUSIONES	89
X	BIBLIOGRAFÍA	91
XI	APÉNDICE	97

LISTA DE CUADROS

		Pág.
Cuadro 1	Etapas de crecimiento del maíz.	27
Cuadro 2	Cultivares de maíz utilizado en los ensayos de 14, 21, 28 y 35 días de crecimiento aplicando la técnica de rollo de papel.	40
Cuadro 3	Cultivares de maíz utilizado en el ensayo de 42 días de crecimiento aplicando la técnica de raíz flotante.	40
Cuadro 4	Variedad, color del grano y características climatológicas de la localidad en la que se desarrollan las poblaciones del maíz nativo colectadas para el estudio.	42
Cuadro 5	Solución nutritiva modificada de Hoagland y Arnon (1950).	43
Cuadro 6	Parámetros evaluados en las plántulas de maíz.	45

LISTA DE FIGURAS

		Pág.
Figura 1	Ciclo ontogénico del cultivo de maíz (Ritchie y Hanway, 1982).	26
Figura 2	Municipios del estado de Puebla donde fueron colectadas las semillas de maíz utilizadas en el estudio.	41
Figura 3	Sistema de raíz flotante en maíz.	44
Figura 4	Partes de la raíz visible en las plántulas de maíz.	46
Figura 5	1 – Papel de filtro utilizado como papel germinación, 2 – Semillas de los cultivares de maíz, 3 – Esterilización de semillas con hipoclorito de sodio, 4 – Retiro del cloro y enjuagado de las semillas, 5 – Humectación del papel germinación y 6 – Colocación de las semillas en el papel germinación.	48
Figura 6	7 – Preparación de los rollos de papel, 8 – Supervisión de los rollos de papel, 9 – Rollos de papel con semillas, 10 – Rollos de papel con semillas en matraces de 1l, 11 – Germinación de las plántulas de maíz y 12 – Plántulas de maíz de 14 días cultivadas en bajo y alto N en la solución nutritiva de Hoagland y Arnon (1950).	49
Figura 7	13 – Plántulas de maíz, 14 – Selección de plántulas sanas de maíz, 15– Medición del tallo y raíz con una regla, 16– Peso fresco de raíz y plántula medidas con una báscula de precisión, 17– Colocación de las muestras durante 24 horas a 70 °C en la estufa de secado, 18 - Medición del peso seco de la raíz y plántula.	50
Figura 8	1 – Aplicación de la solución nutritiva de Hoagland y Arnon (1950), 2 – Instalación de bombas de aire con un temporizador para programar el tiempo de aeración, 3 – Soporte de las plántulas con vasos de plástico y esponja de	51

polietileno, 4 – Trasplante de las plántulas de maíz, 5 – Plántulas de maíz cultivadas en bajo y alto N en la solución nutritiva de Hoagland y Arnon (1950), 6 – Plántulas colocadas en las plataformas de espuma de polietileno.

Figura 9	Longitud de mesocótilo (cm).	52
Figura 10	Longitud de la raíz primaria (cm).	53
Figura 11	Número de raíces secundarias.	54
Figura 12	Longitud de raíces secundarias (cm).	56
Figura 13	Número de raíces adventicias.	57
Figura 14	Longitud de raíces adventicias (cm).	58
Figura 15	Longitud de la plántula (cm).	60
Figura 16	Peso fresco de la plántula (g).	61
Figura 17	Peso fresco de la raíz (g).	62
Figura 18	Peso seco de la plántula (g).	63
Figura 19	Peso seco de la raíz (g).	65
Figura 20	Relación raíz-plántula (cm).	66
Figura 21	Plántulas de maíz cultivadas en solución nutritiva de Hoagland y Arnon (1950), En cada imagen, del lado izquierdo se muestran las plántulas cultivadas en 10% de N, y del lado derecho las plántulas en 100% de N. Las plántulas a los 14 días de crecimiento: 1 – Variedad SB 302 Berentsen, 2 – Criollo blanco, 3 – Criollo azul y 4 – Criollo rojo. Las plántulas a los 21 días de germinación: 5 – Variedad SB 302 Berentsen, 6 – Criollo blanco, 7 – Criollo azul y 8 – Criollo rojo.	68
Figura 22	Plántulas de maíz cultivadas en solución nutritiva de Hoagland y Arnon (1950), En cada imagen, del lado izquierdo se muestran las plántulas cultivadas en 10% de N, y del lado derecho las plántulas en 100% de N. Las plántulas a los 28 días de crecimiento: 9 – Variedad SB 302 Berentsen, 10 – Criollo blanco, 11 – Criollo azul y 12 –	69

Criollo rojo. Las plántulas a los 35 días de germinación: 13 – Variedad SB 302 Berentsen, 14 – Criollo blanco, 15 – Criollo azul y 16 – Criollo rojo.

Figura 23	Longitud de mesocótilo (cm).	70
Figura 24	Longitud de la raíz primaria (cm).	71
Figura 25	Número de raíces secundarias.	72
Figura 26	Longitud de raíces secundarias (cm).	73
Figura 27	Número de raíces adventicias.	74
Figura 28	Longitud de raíces adventicias (cm).	75
Figura 29	Longitud de la plántula (cm).	76
Figura 30	Peso fresco de la plántula (g).	77
Figura 31	Peso fresco de la raíz (g).	78
Figura 32	Peso seco de la plántula (g).	79
Figura 33	Peso seco de la raíz (g).	80
Figura 34	Relación raíz-plántula (cm).	81

LISTA DE APÉNDICES

	Pág.
Apéndice 1 Semillas de maíz utilizadas en los ensayos de 14, 21, 28 y 35 días de crecimiento aplicando la técnica de rollo de papel.	97
Apéndice 2 Semillas de maíz utilizadas en el ensayo de 42 días de crecimiento aplicando la técnica de raíz flotante.	98
Apéndice 3 Desviación estándar y coeficiente de variación de los cultivares de maíz a los 14 días de crecimiento.	99
Apéndice 4 Desviación estándar y coeficiente de variación de los cultivares de maíz a los 21 días de crecimiento.	100
Apéndice 5 Desviación estándar y coeficiente de variación de los cultivares de maíz a los 28 días de crecimiento.	101
Apéndice 6 Desviación estándar y coeficiente de variación de los cultivares de maíz a los 35 días de crecimiento.	102
Apéndice 7 Desviación estándar y coeficiente de variación de los cultivares de maíz a los 42 días de crecimiento.	103

RESUMEN

El objetivo del estudio fue analizar el grado de variación fenotípica en el crecimiento y morfología radical en maíz (*Zea mays* L.) en etapa de plántula en diferentes condiciones de disponibilidad de nitrógeno. En calidad de material vegetal fueron estudiados 4 cultivares de maíz: SB 302 Berentsen, criollo blanco (Tecamachalco), criollo azul (Tecamachalco) y criollo rojo (Tecamachalco) por medio de ensayos de 14, 21, 28 y 35 días de crecimiento de las plántulas usando el método de rollo de papel descrito por Woll *et al.* (2005). Asimismo, se evaluaron 5 cultivares de maíz: SB 302 Berentsen, criollo azul (Atlixco), criollo rosado (Atempan), criollo amarillo (Hueyapan) y criollo blanco (Hueyapan) mediante ensayos de 42 días de desarrollo de las plántulas aplicando la técnica de raíz flotante. Los experimentos fueron de dos factores con un diseño completamente al azar. Las plántulas se cultivaron en condiciones controladas bajo niveles contrastantes de nitrógeno usando la solución nutritiva de Hoagland y Arnon (1950). En la solución nutritiva se evaluaron las concentraciones de 10% y 100% de nitrógeno. Las variables medidas fueron las siguientes: longitud de mesocótilo, longitud de la raíz primaria, número de raíces secundarias, longitud promedio de raíces secundarias, número de raíces adventicias, longitud promedio de raíces adventicias, longitud de la plántula, peso fresco de la raíz, peso fresco de la plántula, peso seco de la raíz, peso seco de la plántula y relación raíz-plántula. A los datos obtenidos se les aplicó el análisis de varianza. Los resultados muestran que las plántulas de maíz cultivadas bajo la influencia de 10% y 100% de nitrógeno revelaron un nivel significativo de variación fenotípica en su arquitectura. Entre las plántulas de maíz cultivadas durante 14, 21, 28 y 35 días, el criollo azul (Tecamachalco) presentó la mejor respuesta a la aplicación de 10% de nitrógeno. Mientras que el criollo blanco (Tecamachalco) mostró el mejor resultado para 100% de nitrógeno. Entre las plántulas cultivadas de maíz a los 42 días de crecimiento, el criollo amarillo (Hueyapan) registró la mejor respuesta a la aplicación de 10% de nitrógeno. En tanto que el criollo rosado (Atempan) tuvo el mejor resultado para 100% de nitrógeno.

ABSTRACT

The aim of the study was to analyze the degree of phenotypic variation in growth and radical morphology in maize (*Zea mays* L.) at seedling stage in different conditions of nitrogen availability. As a plant material were studied 4 corn cultivars: SB 302 Berentsen, white creole (Tecamachalco), blue creole (Tecamachalco) and red creole (Tecamachalco) by traits of 14, 21, 28 and 35 days of seedling growth using the method of paper roll culture described by Woll *et al.* (2005). Also, were studied five corn cultivars: SB 302 Berentsen, blue creole (Atlixco), pink creole (Atempan), yellow creole (Hueyapan) and white creole (Hueyapan) by testing of 42 days of seedling growth using the floating root technique. The two-factor experiments were a completely randomized design. The seedlings were cultivated in controlled conditions under contrasting levels of nitrogen using the nutrient solution of Hoagland and Arnon (1950). Nutrient solutions in concentrations of 10% and 100% of nitrogen were evaluated. The variables measured were: mesocotyl length, primary root length, seminal roots number, average seminal roots length, crown roots number, average crown roots length, seedling length, root fresh weight, seedling fresh weight, root dry weight, seedling dry weight and root-shoot ratio. The data obtained were applied the analysis of variance. The results show that corn seedlings grown under the influence of 10% and 100% of nitrogen revealed a significant phenotypic variation in the level of its architecture. Among corn seedlings grown for 14, 21, 28 and 35 days, the blue creole (Tecamachalco) presented the best response to application of 10% of nitrogen. While white creole (Tecamachalco) showed the best result for 100% of nitrogen. Between cultivated maize seedlings at 42 days of growth, the yellow creole (Hueyapan) recorded the best response to application of 10% of nitrogen. While pink creole (Atempan) had the best result for 100% of nitrogen.

I INTRODUCCIÓN

El maíz es un cereal que se adapta ampliamente a diversas condiciones ecológicas y edáficas (Basantes, 2011), por eso se cultiva en todo el mundo. En México el maíz es el grano más importante para la alimentación humana y destaca entre todos los cultivos por sembrarse anualmente en casi 8,000,000 ha, que producen alrededor de 21,000,000 ton, con un rendimiento promedio de 2.63 ton/ha. Aun siendo México el centro de origen de esta gramínea, su producción y rendimientos son ampliamente superados por otros países productores como son Estados Unidos y China. Se estima que la demanda anual en México es de alrededor de 28,000,000 ton, lo cual representa un déficit anual de 7,000,000 ton, lo que obliga a la importación, principalmente de Estados Unidos (SAGARPA, 2007).

El maíz es un cultivo clave para México, con un consumo promedio diario per cápita de 343 gramos, 72% del total de cereales consumidos en el país. (FAOSTAT, 2010). La siembra estimada de maíz en México para 2010 fue de 7.86 millones de hectáreas, 36% del área total cultivable del país. De ella, 82% se sembró en condiciones de temporal y el volumen de producción total fue 24.4 millones de toneladas (SIAP, 2011).

El maíz es el principal cultivo en México, participa con el 18% del valor de producción del sector agrícola (88 mil mdp en 2012 y 78 mil en 2013) y concentra el 33% de la superficie sembrada en el territorio nacional (7.5 millones de hectáreas). El volumen de producción de maíz en 2012 alcanzó 22.1 millones de toneladas y se estima que para 2013 se alcanzaron 22.7 millones. Mientras que la superficie de temporal ocupa el 74% de la superficie, aporta únicamente el 40% del valor generado (SIAP, 2014).

De acuerdo con Thompson (2011), en México las importaciones de maíz crecen más rápido que su producción, lo que alternativamente requiere de rendimientos

más altos para satisfacer las necesidades de la población. Así, para la década 2011-2020, se proyectan indicadores promedios de siembra, producción y rendimientos de 7,300,000 ha, con una producción de 25,800,000 ton, y un rendimiento de 3.7 ton/ha, respectivamente; sin embargo, comparativamente en los Estados Unidos, para el mismo periodo 2011-2020, tienen una expectativa de producción de 34,100,000 ha sembradas, con una producción de 365, 500,000 ton, y 10.7 ton/ha de rendimiento. Estos datos comparativos son un reflejo del rezago que México tiene y tendrá al 2020 con respecto al principal productor mundial, lo cual hace todavía más urgente el establecer estrategias sólidas para revertir o al menos atenuar ese proceso (SAGARPA, 2007).

Entre los estados con mayor superficie sembrada se encuentra Puebla, San Luis Potosí y Morelos, con una superficie sembrada de 15,393, 8,996 y 7,976 hectáreas respectivamente (SIAP, 2014). El estado de Puebla ocupa el décimo lugar a nivel nacional en la producción de maíz con 851,089 ton en una superficie sembrada de 565,054.00 has, obteniendo un rendimiento de 1.899 ton/ha (SIAP, 2013). Aún con esta producción, no se alcanza a satisfacer la demanda del mercado, ya que la población consume anualmente 560,000 ton, en tanto que la industria y la ganadería demandan respectivamente 145,000 ton de grano blanco y 545,000 ton de grano amarillo.

Debido a estas cantidades de demanda, las plantas necesitan una mayor producción sin incrementar la superficie sembrada, es por ello que una de las alternativas es el uso de nutrientes esenciales tales como el nitrógeno (N) que se utiliza actualmente, como fertilizante, es un elemento importante para lograr rendimientos satisfactorios, sin embargo, el uso indiscriminado de N ha traído cambios negativos en el ambiente, principalmente en la atmósfera, mantos acuíferos y sistemas lagunares, entre otros componentes de los ecosistemas, adicionalmente el alto costo energético hace necesario incrementar la eficiencia en el uso de N, una de las alternativas es el uso de variedades que absorban y metabolicen el N de manera más eficiente. Entre los elementos minerales esenciales, el N es el que con más frecuencia limita el crecimiento y el rendimiento

del maíz. Esta condición ocurre porque las plantas requieren cantidades relativamente grandes de N (de 1.5 a 3.5% de peso seco de la planta) y porque la mayoría de los suelos no tienen suficiente N en forma disponible para mantener los niveles deseados de producción. Debido a que la deficiencia de N puede disminuir el rendimiento y la calidad del grano, es necesario tomar medidas para asegurar que niveles adecuados de N estén disponibles para las plantas. Estimativos globales sugieren que los fertilizantes nitrogenados cubren el 80% del costo total de fertilizantes y el 30% de toda la energía asociada con la producción agrícola moderna de maíz (Below, 2002).

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

Es por ello que el propósito del presente trabajo fue evaluar la respuesta morfológica de 9 cultivares de maíz en condiciones hidropónicas bajo niveles contrastantes de N, lo que permitirá cuantificar el crecimiento de las plántulas con diferentes concentraciones nutrimentales para así tener parámetros de crecimiento para cada cultivar y poder cuantificar el porcentaje en que cada cultivar requiera nitrógeno para su crecimiento.

II. ANTECEDENTES

El nitrógeno es el nutriente que limita en mayor medida el desarrollo de las plantas, es un constituyente básico para los aminoácidos, ácidos nucleicos y la

clorofila (Dobermann y Fairhurst, 2000). Promueve el rápido crecimiento, que se ve reflejado en un porte más robusto (hojas más grandes y suculentas) y contribuye a la formación y llenado de grano. En consecuencia, el N afecta todos los parámetros que impactan al rendimiento, además es el elemento de mayor costo y uno de los menos aprovechados por parte de las plantas, debido a su alta movilidad que se traduce en pérdidas por volatilización y lixiviación (Thompson y Throe, 2002); es por ello, que cada mejora en la eficiencia de uso del nitrógeno que implica una reducción en las pérdidas del mismo y un incremento en la absorción, repercute proporcionalmente en el retorno económico (González y Guzmán, 1999). El efecto positivo del nitrógeno se observa en el aumento de rendimiento del grano, en el número de semillas por mazorca de maíz y en el peso de cada semilla de los diferentes híbridos de maíz (Yasari *et al.*, 2012). Paliwal *et al* (2001) mencionan que la respuesta en rendimiento del maíz a la fertilización nitrogenada es generalmente positiva y lineal hasta altas dosis cuando se lo compara a otros cultivos.

La reducción del rendimiento del maíz debido a la deficiencia de nitrógeno es más que el de la deficiencia de otros elementos. Se encontró que el mayor rendimiento de grano, el rendimiento biológico, el peso del grano, el número de granos por mazorca, el número de granos por hilera, y el índice de cosecha se obtuvo por 450 kg/ha de consumo de nitrógeno en maíz (Moraditochae *et al.*, 2012).

Numerosos estudios han demostrado que incrementando la tasa del suministro de N resulta en un mayor índice del área foliar (IAF), en la duración del área foliar, en la tasa de fotosíntesis de los cultivos, en la altura de la planta, en el peso de los brotes y en la absorción de N de la planta. Sin embargo, la respuesta del maíz a la fertilización nitrogenada es fuertemente influenciada por las fluctuaciones en el contenido de agua del suelo en la zona de la raíz. Desafortunadamente, los métodos de riego comunes practicados para la producción de maíz en los países en desarrollo permanece el riego por inundación, que se caracteriza por el uso de una gran cantidad de agua disponible para regar los cultivos y que resulta tanto en

la pérdida de agua y la pérdida de nutrientes. Esta situación, a su vez, se traduce en el aumento del costo de fertilizantes y aguas subterráneas contaminadas (Hammad *et al.*, 2012).

Para garantizar la productividad, los productores de cultivos generalmente suministran más N a los campos. El N suministrado en exceso puede causar muchos problemas ambientales, como la emisión de gas de efecto invernadero (N_2O), la contaminación de la superficie y del agua subterránea, entre otros. Bajo condiciones excesivas de agua en el suelo, masas grandes de NO_3^- son lixiviadas debido a su alta movilidad mientras que la eficacia del fertilizante N se reduce y la mineralización del N orgánico del suelo y el transporte de N a raíces se deteriora bajo condiciones de deficiencia de agua del suelo. El exceso o déficit del contenido de agua en el suelo limita el crecimiento de la raíz del cultivo y su desarrollo, lo que conduce a una reducción del área de la raíz y de la capacidad de absorción (Wang *et al.*, 2008).

Muchos estudios han sugerido que la eficiencia del uso del N puede ser mejorada mediante el suministro mínimo de N para satisfacer los requisitos limitados de la cosecha en sus primeras etapas de desarrollo y el ahorro de más N para una aplicación más tarde (fertilizante superficial) justo antes del período rápido crecimiento exponencial de cultivos. En ese último punto en el tiempo, el cultivo en sí puede ser utilizado como un indicador de su necesidad potencial de fertilizante de N, siempre que un parámetro indicativo adecuado puede ser utilizado. En muchos cultivos, el Índice de Nutrición de Nitrógeno (NNI por sus siglas en inglés) se ha demostrado como un indicador adecuado del estado del N para este propósito. El NNI es producto de una medición de la concentración de N de la planta (expresados en materia seca) y una comparación con una importante concentración de N en un nivel de biomasa dado (Chen *et al.*, 2010).

Hernández *et al.* (2003) establecen que la agricultura moderna, basada en los fertilizantes químicos presenta problemas asociados al riesgo de contaminación de

mantos acuíferos, así como un alto consumo de energía para la fabricación de estos insumos.

Bonifas *et al.* (2005) y Li *et al.* (2009) determinaron que en el maíz como en otras gramíneas la deficiencia de nitrógeno conduce a una raíz más grande en relación al tamaño de los brotes. Un estudio realizado recientemente por Sánchez (2012) encontró diferencias en el comportamiento del mesocótilo de plántulas provenientes de tres diferentes regiones ecológicas.

Cruz *et al.* (2002) mencionan que el N es un elemento indispensable para la fotosíntesis. Es decir que las plantas fijen el carbono del aire y para que acumulen materia seca y produzcan rendimientos se requiere de cantidades suficientes de este elemento. Sin embargo, el N es un nutrimento usualmente deficiente para la agricultura. La eficiencia de uso depende del tipo de agroecosistemas, cultivo y fertilizante aplicado, así como de las prácticas de manejo. Cualquier esfuerzo que se realice para conservar el N adicionado y tener la mayor tasa de absorción por las raíces, contribuye a aumentar la eficiencia de uso del fertilizante nitrogenado y se traduce en ahorro para productores y un menor daño al medio ambiente (Gallais y Hired, 2004).

Abdel *et al.* (2013) encontraron que la LRS se correlacionó con el rendimiento de grano tanto en los niveles bajos y altos de N, así como el PSR se correlacionó con el rendimiento de grano en condiciones de alto N. En el mismo estudio se observó que la respuesta de los cultivares, para el parámetro LPI fue mayor en altas dosis de N comparado con la dosis bajas de N.

Blanco *et al.* (2004) estudiaron algunos de los componentes del rendimiento del maíz en función de diferentes disponibilidades de N. Utilizaron el híbrido de maíz Dekalb 639. Los tratamientos fueron tres niveles de N (testigo, 70 y 210 kg/ha de N) combinados con dos momentos de aplicación del fertilizante (a la siembra y con 6 hojas desarrolladas). Concluyendo que el rendimiento en grano, el número de

granos por m² y el peso de 1 000 granos disminuyeron al reducirse la disponibilidad de N. De igual manera encontraron que algunos de los componentes del rendimiento del maíz están en función de diferentes disponibilidades de N, concluyendo que la producción de materia seca se incrementó al aumentar la dosis de nitrógeno.

En otro estudio; Alvarado (2010), evaluó la absorción así como el uso eficiente de nitrógeno (NUE, por sus siglas en ingles), en variedades mejoradas y una criolla (Olotillo); de maíz bajo diferentes condiciones de manejo; encontrando que, la absorción y el NUE están en función de las condiciones ambientales y contenido de N en el suelo; debido a que el NUE fue 25% más alta en suelos con bajo contenido de N; estableciendo esto; como un mecanismo adaptativo de la planta al bajo contenido de nitrógeno.

La mejora en las prácticas culturales puede jugar un papel importante en el aumento del rendimiento del maíz. Para un rendimiento óptimo, la fuente de nitrógeno debe estar disponible de acuerdo con las necesidades de la planta. Las densidades adecuadas de las plantas para el crecimiento óptimo de la hoja mediante el control del agua, los fertilizantes y productos químicos son esenciales para mejorar las variables de crecimiento que son responsables del alto rendimiento (Moraditochae *et al.*, 2012).

La agricultura moderna está basada en la aplicación de fertilizantes químicos, lo que presenta problemas asociados al riesgo de la contaminación del medio ambiente, así como un alto consumo de energía para la fabricación de estos insumos. Uno de los problemas actuales de la nutrición de los cultivos es la eficiencia con la cual las plantas pueden usar los elementos nutrimentales. Es importante que los elementos incorporados al suelo sean usados con eficiencia, tanto por su elevado costo económico como por los impactos ambientales que estos pueden provocar. De este modo, el uso eficiente de los fertilizantes

constituye uno de los factores para mantener la productividad y sostenibilidad de los agroecosistemas.

2.1 Importancia del maíz en México

2.1.1 El cultivo de maíz

El maíz se domesticó en territorio mexicano. Actualmente se siembra en todo el país. La mayoría de las regiones donde se cultiva este grano dependen del temporal y de campesinos cuya producción es destinada al autoconsumo, por lo que su agricultura ha generado y continúa ofreciendo una diversidad genética muy amplia (Kato et al., 2009). En México el uso de la planta del maíz es integral (Castañeda y García, 2007): se aprovechan todas sus partes; la aplicación culinaria, así como los derivados de la misma son infinitos (Castañeda, 2004).

El maíz es un cultivo clave para México, con un consumo promedio diario per cápita de 343 gramos, 72% del total de cereales consumidos en el país (FAOSTAT, 2010).

Dentro de los granos básicos, el maíz presentó mayor incremento en el volumen de producción, pues con una tasa media anual de crecimiento (TMAC) de 2.7%, pasó de 615.8 millones en 1998 a 822.7 millones en el 2008. El 80% de la producción de maíz se concentró en 10 países; Estados Unidos ocupó el 1er lugar con 40%, China el 2° con el 20%, Brasil en el 3° con el 6% y México en 4° con el 3% de la producción. Los otros seis países fueron Argentina, Francia, la India, Indonesia, Italia y Sudáfrica, que en conjunto agruparon el 11% del volumen producido de maíz. Los cambios en volúmenes de producción más acelerados correspondieron a Brasil y la India, cuyas TMAC de 6.5% y 5% implicaron que en 10 años su producción se incrementara en más del 70%; en el caso opuesto Francia e Italia tuvieron una TMAC cercana a cero. Estados Unidos y México tuvieron un comportamiento similar al del promedio mundial, con TMAC de 1.9% y

2.5% respectivamente, que en cada caso representaron incrementos de alrededor del 30% en el volumen de producción entre 1998 y 2008 (FAOSTAT, 2009).

La producción mundial de maíz de 2000 a 2009 registró una tasa de crecimiento media anual (TCMA) de 3,2%, ubicándolo hoy en día como el cereal más producido a nivel mundial. En 2009, el maíz alcanzó las 786,6 millones de toneladas, superando al trigo en 13,3% y en 13,7% al arroz; Estados Unidos fue el principal productor con un 42,3%; le siguieron China (20,7%), Brasil (6,5%), México (2,6%) e Indonesia (2,2%), la TCMA de 2000 a 2009 más alta fue registrada por Indonesia con 6,89% y México la inferior con 1,57% (FAO 2011). En México, la superficie sembrada total de maíz durante 2010 ascendió a 7,861 millones de hectáreas; de las cuales tan sólo un 18,1% se encuentran bajo riego y el resto se siembra bajo temporal (81,9%). La superficie sembrada en temporal, durante el año citado, la concentraron los estados de Chiapas (10,71%), Veracruz (8,87%), Jalisco (8,79%), Oaxaca (8,70%) y Puebla (8,66%), alcanzando en conjunto los 2,943 millones de hectáreas (SIAP, 2011). El maíz se siembra en una gran variedad de regiones agroecológicas que van de altitudes de 0 m hasta cerca de los 4,000 metros (Roberts et al., 1957; Ortega et al., 2003), se cultiva desde el ecuador hasta altas latitudes en los dos hemisferios, se siembra en regiones de precipitación pluvial desde menos de 400 mm hasta los 3,000 mm, en suelos y climas muy variables. De acuerdo a la literatura revisada la mejor producción se logra en climas en donde las temperaturas medias en los meses calurosos varían entre 21 y 27 °C, con un período libre de heladas en el ciclo agrícola variable de 120 a 180 días (Reyes, 1990).

2.1.2 Comportamiento de la producción nacional

La producción de maíz, por tradición, es necesaria para la alimentación de la población rural y urbana del país, para la ganadería y para la creciente industria y su evolución ha sido importante ya que se pasó de ser un país exportador a

importador debido a las crecientes demandas que generan una balanza de producción-consumo desfavorable en los últimos años.

El comportamiento de la producción del maíz se explica ya que a pesar de los bajos rendimientos promedio de maíz (450 kg/ha) que se tenían en los años cuarenta con la superficie sembrada se tenían volúmenes de producción que permitían la alimentación de los mexicanos y existían excedentes para la exportación. A partir de los años setenta, la balanza de producción-consumo de maíz en el país estaba en equilibrio y a partir de los años ochenta se tenía la necesidad de importa este grano, a pesar que de los rendimientos medios de maíz crecieron hasta 1.8 toneladas por hectárea (PROEMAR, 2010).

Entre 1995 a 2007, la producción nacional de maíz (blanco y amarillo) se incrementó 29.7%, mientras la importación (blanco y amarillo) creció 185%. En 1995, el 87.3% del consumo aparente de maíz fue abastecido con producción nacional; en 2007 esa proporción cayó a 75%. En todo el período, la superficie sembrada y cosechada de maíz se redujo 10.7%. No obstante, el rendimiento creció 30% alcanzando 2.8 toneladas de maíz por hectárea en promedio. En los estados del norte, el rendimiento fue de 9 a 14 toneladas por hectárea, es decir, más de cuatro veces el promedio nacional (Suárez y Polanco, 2007).

Durante el ciclo 2006-2007 la producción fue de 6,477,813 toneladas, de las cuales 4,717,683 las aportó Sinaloa (73%), Tamaulipas con 470,973 toneladas (7%); Veracruz con 386,290 (6%); Chiapas con 166,462 (3%) y 682,405 (11%) otros estados (SAGARPA, 2007). En el estado de Sinaloa existe una parte de la producción de maíz amarillo (10.6% de su producción total) que se destina a la demanda del sector pecuario en México, la cual se rige por contratos (Suárez y Polanco, 2007).

En el 2008 México alcanzó una producción de 37,481,648 toneladas de granos básicos, de los cuales el maíz fue el cultivo más importante debido a que aportó el

65.1%, en segundo lugar el sorgo ya que contribuyó con el 17.6%, en tercer lugar el trigo con el 11.2%, con una participación menos importante están el frijol, la cebada, el arroz y por último la avena con una participación de 3%, 2.1%, 0.6% y 0.4%, respectivamente (SAGARPA, 2009).

Para el 2010, México era considerado el décimo país productor de maíz, con una producción de 774,820 toneladas y a su vez, el tercer país en el mundo que lo importaba con una cantidad de 7, 848,998 toneladas. Por otra parte, Estados Unidos era el primer país productor con una producción de 26, 390,352 toneladas y a su vez, el veinteavo país en el mundo que lo importaba con una cantidad de 380,583 toneladas (FAOSTAT, 2011).

Para el año 2012 en México hubo una producción de 1,575,300.48 toneladas de maíz en una superficie sembrada de 556,325.32 hectáreas con un valor de producción de 7,141,338.54. En el año 2014 la producción ascendió a 1, 856,138.09 con una superficie de siembra de 541,671.75 toneladas de maíz pero con menor valor de producción equivalente a 5,841,967.47 miles de pesos (SIAP, 2014).

2.1.3 Consumo nacional de maíz

México es un país orientado a la producción de maíz blanco para el consumo humano e importador neto de maíz amarillo para el abastecimiento de la industria de procesamiento de alimentos balanceados y humano. En el país el cultivo de maíz ocupa 8.07 millones de hectáreas equivalente al 50.3% de la superficie agrícola sembrada. Del total de los productores de maíz, aproximadamente 90% tienen parcelas menores de cinco hectáreas y más de 80% utilizan semilla propia, adaptada a una enorme diversidad de situaciones geoclimáticas (SAGARPA, 2007).

El cultivo del maíz ocupa el 57% de la superficie destinada a los granos básicos y oleaginosas, a él se dedican más de 2.5 millones de agricultores, que aportan más de la mitad de los 18 millones de toneladas producidas. El consumo nacional oscila entre 16 y 20 millones de toneladas, de las cuales se importa alrededor de un 20%. Un 72% de las unidades productivas lo cultivan, proporcionando ocupación a 35-40% de la fuerza de trabajo agrícola y a un 66% de la dedicada a los granos (Salcedo et al., 1993). Genera una tercera parte del valor producido en la agricultura y ocupa más de la mitad de la superficie cosechada. Es un cultivo básicamente de zonas temporales, las cuales aportaron en 1997 el 65% de la producción y el 85% de la superficie total dedicada al maíz (SAGAR, 1997).

2.2 Biología del maíz

2.2.1 Clasificación y descripción botánica

La clasificación botánica de maíz fue descrita por Linnaeus (1753) (Tomado de IPNI, 2014).

Reino: Plantae

Sub Reino: Thacheobionta

División: Magnoliophyta

Clase: Liliopsida

Sub Clase: Commelinidae

Orden: Poales

Familia Poaceae

Sub Familia: Panicoideae

Tribu: Maydeae

Género: *Zea*

Especies: *Zea mays*

El maíz es una planta anual con un gran desarrollo vegetativo, que normalmente alcanza de 2 a 2.5 m de altura, pudiendo llegar hasta los 5 metros. La raíz posee un sistema radicular fasciculado bastante extenso formado por tres tipos de raíces: Las raíces primarias, emitidas por la semilla comprenden la radícula, las raíces secundarias y las raíces adventicias. Las raíces principales o secundarias, que comienzan a formarse a partir de la corona, por encima de las raíces primarias, constituyendo casi la totalidad del sistema radicular. Las raíces aéreas o adventicias, que nacen en el último lugar en los nodos de la base del tallo, por encima de la corona. Los pelos radiculares absorbentes están presentes en grandes cantidades en el sistema radicular del maíz. Estos pelos aprovechan el agua y los nutrientes indispensables para un buen desarrollo de la planta. El tallo es más o menos cilíndrico formado por nodos y entrenudos. Los entrenudos de la base son cortos, y se alargan a medida que se encuentran en posiciones superiores, hasta terminar en el entrenudo más largo, que lo constituye la base de la espiga. Los entrenudos son medulares, es decir, no huecos. Las hojas se desarrollan a partir de las yemas foliares. Al principio el crecimiento es mayormente apical, posteriormente se van diferenciando los tejidos mediante crecimiento en todos los sentidos hasta adquirir la forma característica de la hoja del maíz, o sea, larga, angosta, con venación paralelinervia y constituida por la vaina, la lígula y el limbo. En el maíz existen flores estaminadas y pistiladas, ubicadas en diferentes lugares de la planta. Las flores estaminadas (masculinas) se encuentran dispuestas por parejas en espiguillas, estas últimas se distribuyen en ramas de la inflorescencia conocida comúnmente como espiga. Tienen de seis a diez milímetros. Cada flor tiene tres estambres largamente filamentosos. Las flores pistiladas (hembras) se encuentran en una inflorescencia con un soporte central denominado tusa, cubierto de brácteas foliares. Se dispone de dos en dos, lo cual explica que el número de las mazorcas de una hilera sea siempre par. Sus estilos sobresalen de las brácteas y alcanzan una longitud de 12 a 20 cm, formando su conjunto una cabellera característica que sale por el extremo de la mazorca (barba del maíz). El fruto es clasificado como cariósipide, fruto seco que

no se cae de su soporte. Éste proviene de un ovario compuesto. La cubierta del grano está fuertemente adherida al pericarpio (FDA, 1998).

2.2.2 Fenología

La escala fenológica más utilizada para describir el ciclo del cultivo de maíz es la de Ritchie y Hanway (1982). En esta escala se pueden visualizar dos grandes etapas: la vegetativa (V) y la reproductiva (R) (Figura 1).

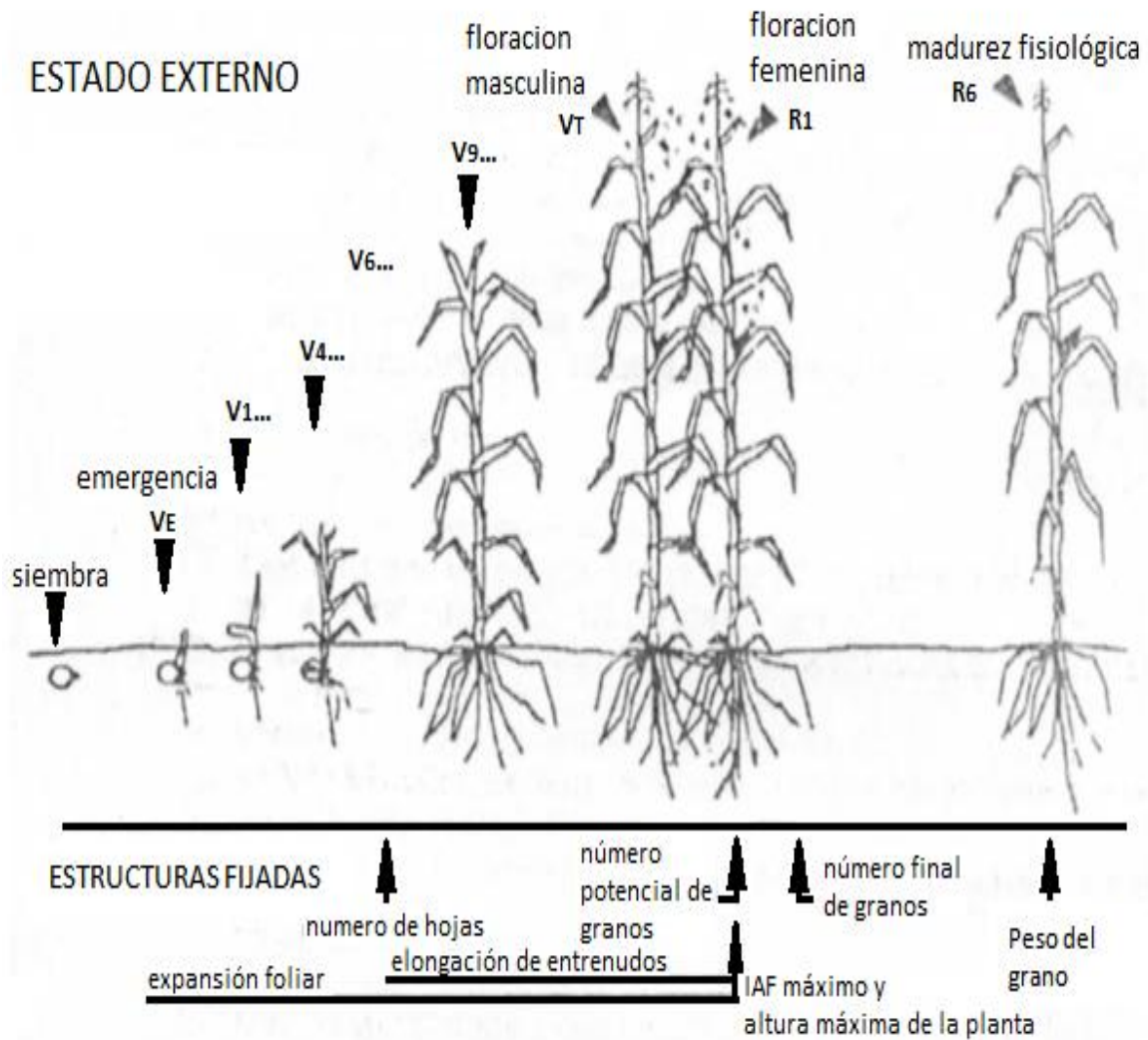


Figura 1. Ciclo ontogénico del cultivo maíz (Ritchie y Hanway, 1982).

Además las etapas de crecimiento se pueden agrupar en cuatro grandes periodos: (Cuadro 1).

1. Crecimiento de las plántulas (Etapas VE y V1).
2. Crecimiento vegetativo (Etapas V2, V3...Vn).
3. Floración y la fecundación (Etapas VT, R0 y R1).
4. Llenado de grano y la madurez (Etapas R2 a R6).

Cuadro 1. Etapas de crecimiento del maíz.

Etapa	DAS*	Características
VE	5	El coleóptilo emerge de la superficie del suelo.
V1	9	Es visible el cuello de la primera hoja.
V2	12	Es visible el cuello de la segunda hoja.
Vn		Es visible el cuello de la hoja número "n". ("n" es igual al número definitivo de hojas que tiene la planta; "n" generalmente fluctúa entre 16 y 22, pero para la floración se habrán perdido las 4 a 5 hojas de más abajo).
VT	55	Es completamente visible la última rama de la panícula.
R0	57	Antesis o floración masculina. El polen se comienza a arrojar.
R1	59	Son visibles los estigmas.
R2	71	Etapa de ampolla. Los granos se llenan con un líquido claro y se puede ver el embrión.
R3	80	Etapa lechosa. Los granos se llenan con un líquido lechoso blanco.
R4	90	Etapa masosa. Los granos se llenan con una pasta blanca. El embrión tiene aproximadamente la mitad del ancho del grano.
R5	102	Etapa dentada. La parte superior de los granos se llena con almidón sólido y, cuando el genotipo es dentado, los granos adquieren la forma dentada. En los tipos tanto cristalinos como dentados es visible una "línea de leche" cuando se observa el grano desde el costado.
R6	112	Madurez fisiológica. Una capa negra es visible en la base del

		grano. La humedad del grano es generalmente de alrededor del 35%.
*DAS: Número aproximado de días después de la siembra en tierras bajas tropicales, donde las temperaturas máxima y mínima pueden ser de 33°C y 22°C, respectivamente. En los ambientes más fríos, se amplían estos tiempos.		

Fuente: CIMMYT, 2013.

2.3 Nitrógeno en suelo y planta

2.3.1 Funciones del nitrógeno en las plantas

El nitrógeno se ha encontrado en las plantas tanto en forma orgánica como en forma inorgánica, combinado con carbono (C), hidrógeno (H) y oxígeno (O) y algunas veces, con azufre (S) formando aminoácidos, amino enzimas, ácidos nucleicos, clorofila, alcaloides y bases purínicas, mientras que el nitrógeno inorgánico puede acumularse en la planta primeramente en tallos y tejidos conductivos en forma de nitrato (NO_3^-), el N orgánico predomina como proteínas de alto peso molecular (Jones, 1998). Influye en el rendimiento y también en la calidad de las cosechas, pues de él depende el contenido de proteínas del grano. Cuando la planta presenta deficiencias de nitrógeno disminuye el vigor, las hojas son pequeñas, las puntas de las hojas toman un color amarillo, que poco a poco se va extendiendo a lo largo de la nervadura central dando lugar a una especie de dibujo en forma de V (Guerrero, 1996).

El N es esencial para el metabolismo de los carbohidratos, estimula el crecimiento radicular y el desarrollo de las plantas así como la asimilación de otros nutrientes (Brady, 1990). También es el componente fundamental de todas las moléculas orgánicas involucradas en los procesos de crecimiento y desarrollo vegetal. Por lo tanto, participa activamente en los principales procesos metabólicos: la fotosíntesis, la respiración, la síntesis proteica. El N es necesario para la síntesis de la clorofila y como parte de la molécula de la clorofila está involucrado en el

proceso de la fotosíntesis, la carencia de N y en consecuencia la carencia de clorofila no permite que la planta utilice la luz solar como fuente de energía en el proceso de la fotosíntesis y la planta pierde la habilidad de ejecutar funciones esenciales como la absorción de nutrientes. El N es un componente de las vitaminas y los sistemas de energía en la planta, es también un componente esencial de los aminoácidos, los cuales forman proteínas, por lo tanto es directamente responsable del incremento del contenido de proteínas.

El N se encuentra en forma libre como componente del aire; en forma orgánica, constituyendo la formación de tejidos y órganos vegetales, animales, desechos y en forma mineral como compuestos simples que se caracterizan por su solubilidad mayor o menor según los distintos medios (Rodríguez, 2001).

De todos los nutrientes minerales de las plantas, el N es a la vez el más importante y el de más difícil manejo, tanto desde el punto de vista agrícola como medioambiental. Como componente esencial de las proteínas, es el nutriente que las plantas necesitan en mayor cantidad, por lo que las respuestas productivas de los cultivos a las aportaciones de nitrógeno suelen ser superiores a las de los restantes nutrientes. Las variadas formas orgánicas y minerales en que se encuentra en los suelos, plantas, aguas y aire presentan importantes riesgos potenciales, tanto para la salud humana y animal (diversas intoxicaciones por nitrato) como para el medio ambiente (contaminación de aguas subterráneas, lluvia ácida, cambio climático, etc.) (Ansorena, 1995).

2.3.2 Formas de nitrógeno en el suelo

El nitrógeno que se halla en el suelo puede ser generalmente clasificado como inorgánico y orgánico, la mayor cantidad se encuentra en gran parte como integrante de los materiales orgánicos complejos del suelo. Las formas orgánicas del nitrógeno del suelo se hallan como aminoácidos y proteínas consolidadas,

aminoácidos libres, amino azúcares y otros generalmente complejos no identificados (Tisdale y Nelson, 1982).

El N es el único de los nutrientes minerales que puede ser absorbida por las plantas en dos formas distintas: como anión nitrato (NO_3^-) o como catión amonio (NH_4^+). Los fertilizantes nitrogenados de uso común contienen relaciones variadas de NO_3^- y NH_4^+ , sin embargo las bacterias del suelo oxidan rápidamente el NH_4^+ a NO_3^- en suelos bien aireados y de buena temperatura que favorecen el crecimiento del maíz. Por esta razón, el NO_3^- es la forma de N absorbida predominantemente por las plantas de maíz, independiente de la fuente de N aplicada.

Además de ser la forma más disponible de N para la planta, el NO_3^- es también responsable por las mayores pérdidas de N en el suelo ya que es susceptible a lixiviación y desnitrificación. También puede ser removido temporalmente de la reserva disponible del suelo a través de la absorción, fijación e inmovilización microbiana. Las implicaciones económicas de estas pérdidas de N son evidentes, especialmente cuando son lo suficientemente grandes para limitar la productividad del cultivo. Estas pérdidas también ayudan mucho a acentuar la incertidumbre asociada con el manejo de fertilizante nitrogenado y con el potencial daño ambiental (Below, 2002). El suplemento de N como una mezcla de NO_3^- y NH_4^+ también puede incrementar la producción. Cuando más próxima sea la aplicación de N a la etapa de mayor requerimiento de la planta mayor es el rendimiento.

Independientemente de la forma como haya sido absorbido, una vez dentro de la planta, el N inorgánico tiene que ser asimilado (incorporado) a formas orgánicas, comúnmente aminoácidos. El N se incorpora en numerosos compuestos esenciales a la planta, pero la mayoría (> 90 %) está presente en las proteínas. A pesar de lo complejo, el impacto del metabolismo del N en el crecimiento y rendimiento del maíz se puede resumir en dos funciones generales: 1) establecimiento y mantenimiento de la capacidad fotosintética y 2) desarrollo y crecimiento de los sumideros reproductivos (Below, 1995).

2.3.3 Formas de aplicación de nitrógeno

Los fertilizantes se deben aplicar o colocar de tal manera que puedan ser alcanzados por las raíces de las plantas. Si el fertilizante nitrogenado se aplica al momento de la siembra, nunca debe estar en contacto con la semilla; debe de colocarse de 5 a 10 cm a un lado y debajo de la semilla (Cooke, 1979).

Se debe realizar un análisis de suelo, de acuerdo con los resultados informados deben definirse las dosis a aplicar de los distintos elementos fertilizantes. Estos deben aplicarse a través de una mezcla que debe contener la cantidad requerida de todos los elementos con que se va a fertilizar. En el caso del nitrógeno, un 20 a 30% de la dosis debe estar contenido en la mezcla que se aplicará a la siembra, mientras que el 70 a 80% restante debe aplicarse al estado de siete hojas del maíz. La parcialización del nitrógeno se realiza para reducir las pérdidas que ocurren por lixiviación y volatilización (Fundación Chile, 2011).

2.3.4 Pérdidas de nitrógeno

El suelo agrícola recibe aportes externos y sufre pérdidas de nitrógeno por distintas vías y en muy variadas formas: sólida (fertilizantes minerales y abonos orgánicos), líquida (agua de lluvia y riego, purines y fertilizantes líquidos) y gaseosa (aire y gases de la atmósfera). En el suelo, las diferentes formas de nitrógeno presentes experimentan cambios en su estado y naturaleza. Una parte de nitrógeno mineral es absorbida por la planta o los microorganismos, y el resto se acumula en el suelo o se pierde, bien en forma gaseosa a la atmósfera o por lavado como nitrato a las aguas subterráneas (Ansorena, 1995).

El N aplicado al suelo en forma de fertilizante, puede perderse principalmente por volatilización y lixiviación. Las pérdidas por volatilización ocurren cuando el gas nitrógeno, óxido nitroso, óxido nítrico y amoníaco son liberados a causa de ciertas

reacciones químicas y biológicas que se verifican en el suelo. Han sido sugeridos tres mecanismos como causa de estas pérdidas.

1. Desnitrificación, que es la reducción bioquímica de los nitratos bajo condiciones anaeróbicas.
2. Reacciones químicas que implican a los nitratos bajo condiciones aeróbicas.
3. Pérdidas volátiles de amoníaco gas (NH_3) de la superficie de los suelos alcalinos (Tisdale y Nelson, 1982).

En condiciones favorables para el crecimiento de las plantas, la mayor parte del nitrógeno del suelo en forma de amonio (NH_4^+), se convierte en nitrato (NO_3^-) por medio de las bacterias nitrificantes, este proceso se denomina nitrificación. Este ion nitrato como tiene carga negativa no es adsorbido por los coloides del suelo cargados negativamente que generalmente dominan en la mayoría de los suelos y consecuentemente se puede perder fácilmente por lixiviación (Brady, 1990). La pérdida de N por volatilización del gas amoníaco (NH_3) puede ser la principal causa de la baja eficiencia de algunos fertilizantes amoniacales. Dichas pérdidas son el resultado de numerosos procesos químicos, físicos y biológicos, cuya magnitud es afectada por factores de ambiente, suelo y manejo tales como temperatura, pH del suelo, capacidad de intercambio catiónico (CIC), materia orgánica, cobertura y calidad de residuos en superficie, viento, tensión de vapor superficial y la dosis y localización del fertilizante (Ferraris *et al.*, 2009).

2.4 Fertilización en maíz

2.4.1 Nutrientes esenciales para las plantas

Los nutrientes de las plantas que se encuentran en forma natural en el suelo, provienen tanto del aire como del agua, o son el resultado de la fijación del nitrógeno y la edafización de las partículas minerales en el suelo. La vegetación absorbe una parte de estos nutrientes, mientras que otra se redistribuye geográficamente a través de las escorrentías y otra porción se pierde a través de

la volatilización, fijación y lixiviación. Los agricultores utilizan el suministro natural de estos nutrientes para sus cultivos y lo redistribuyen en el espacio y tiempo a través del uso y organización de sus sistemas de producción.

En una vegetación natural, la materia orgánica que se acumula en el suelo libera nutrientes a través de su descomposición o cuando se quema. Los nutrientes que yacen en las capas más profundas son tomados por las plantas, convirtiéndolos de esta manera en nutrientes disponibles en las capas superficiales del suelo. Los sistemas de tala y quema explotan estas técnicas de manejo de nutrientes. Cada vez que se cosecha, el suministro local de nutrientes se va agotando progresivamente, por lo que surge la necesidad de dejar de cultivar la tierra a través de barbechos prolongados o de reponer los nutrientes por medio de fuentes externas. La práctica de hacer descansar la tierra arable durante barbechos cortos es otro método de acumular el suministro natural de nutrientes para el período posterior de cultivos. Sin embargo, la cantidad de nutrientes que se acumula durante un barbecho corto es muy pequeña en comparación a la acumulada por 10 años o más en un terreno con vegetación permanente.

El maíz es un cultivo con altas demandas nutricionales. Entre los elementos del suelo que utiliza en mayores cantidades cabe mencionar el N, seguido del potasio (K) y fósforo (P). Estos nutrimentos forman parte de numerosos fertilizantes químicos, ya sea en forma individual o combinados en fórmulas.

Además de N, P y K, las plantas necesitan de otros elementos del suelo, los cuales son requeridos en menor proporción. Entre ellos, los más utilizados son el calcio (Ca), el magnesio (Mg) y azufre (S). El Ca y el Mg pueden formar parte de materiales de encalado, los cuales se recomiendan para suelos ácidos. El magnesio y el azufre también pueden estar presentes en algunas fórmulas y en fertilizantes simples. En su conjunto constituyen los macroelementos. Existen algunos nutrimentos también muy importantes, que la planta utiliza en cantidades mínimas. Estos últimos se denominan microelementos. Entre los más conocidos

están el hierro, el manganeso, el zinc, el cobre, el boro, el molibdeno y el cloro, algunos pueden estar presentes en fertilizantes comunes y en materiales de encalado como impurezas. Debido a las pequeñas cantidades que las plantas requieren de estos mismos son muy populares como componentes de abonos foliares.

La materia orgánica del suelo es un verdadero reservorio natural y es la fuente más equilibrada de elementos nutritivos, los cuales retiene y/o libera lentamente, por lo que es especialmente importante en el caso de los microelementos. Además, mejora la estructura del suelo, aumenta la retención del agua y es fuente de energía para la vida del suelo. Algunos elementos son más propensos a acumularse en el suelo, entre ellos el fósforo; otros, como el nitrógeno, se pierden fácilmente por diferentes vías. La pérdida o la inmovilización de elementos nutritivos están asociadas con algunas características del suelo y el clima. Entre ellas, deben mencionarse la pendiente del terreno, la textura, el tipo de arcilla, el pH, el contenido de materia orgánica y la cantidad e intensidad de las lluvias. El productor puede mejorar, en gran medida, la eficiencia de uso de los fertilizantes por el cultivo a través del empleo de tecnologías apropiadas, acordes con sus conocimientos y experiencia (Dunja, 2000).

2.4.2 Fertilización con nitrógeno

Para elevar los rendimientos del cultivo de maíz se recomienda aplicar fertilizante nitrogenado; este elemento es muy importante como complemento de la fertilidad natural del suelo y que el mismo puede ser suministrado a través de los abonos orgánicos (García, 2001).

La planta de maíz utiliza el N durante todo su ciclo. En la absorción del mismo se distinguen tres fases marcadas, estas son:

1. Desde la emergencia hasta cerca de un mes antes de la aparición de las barbas o inflorescencias femeninas. Al final de ese período se completa cerca de 10% de las necesidades totales del elemento.
2. Desde un mes antes de la aparición de las barbas, con aumentos en la absorción hasta un máximo durante la aparición de las panojas. Este es el período de mayor demanda, de ahí la importancia del reabonamiento nitrogenado oportuno. Para la época de aparición de las barbas las plantas ya han extraído más de 60% de sus necesidades.
3. Fase posterior a la aparición de las barbas. La absorción se hace más lenta, lo que depende, en parte, del material genético. Existen cultivares capaces de continuar la absorción del nitrógeno durante períodos más largos. (Díaz, 2001):

El 50% de Nitrógeno Urea y toda la formula debe aplicarse al momento de la siembra luego entre los 20 y 30 días después de emergido el maíz aplicar el resto de nitrógeno. Sin embargo, la planta de maíz utiliza más eficientemente el Nitrógeno si se aplica en tres fracciones: el 33% al momento de la siembra y los otros dos tercios a los 20 y 40 días, respectivamente.

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

Por su parte, la fijación biológica de nitrógeno la realizan algunos organismos que pueden aprovechar directamente el nitrógeno del aire a través de bacterias, formando nódulos (Taiz, 2006). Algunas plantas establecen una relación estrecha

y persistente con bacterias fijadoras de nitrógeno. Esta simbiosis, que proporciona beneficios durante la vida en común a ambos simbios, se realiza en nódulos radiculares, en los cuales el nitrógeno atmosférico se fija y se proporciona a la planta en forma de compuestos orgánicos nitrogenados. De esta simbiosis la planta obtiene nitrógeno y la bacteria ácido málico en su forma ionizada (malato) y refugio. Las bacterias en simbiosis con una planta hospedante fijan el nitrógeno del aire, es decir, originan compuestos solubles por las plantas, como amoniaco. Con posterioridad, el amoniaco entra en la cadena alimenticia mediante su incorporación a los aminoácidos y proteínas.

2.4.3 Uso eficiente de nitrógeno en maíz

La eficacia de uso depende del tipo de agroecosistema, cultivo y fertilizante aplicado, así como de las prácticas de manejo. El esfuerzo que se realice para conservar el N adicionado y tener una mayor tasa de absorción por las raíces, contribuye a aumentar la eficacia en el uso de fertilizantes nitrogenados y se traduce en ahorro para los productores y un menor daño al medio ambiente (Gallais y Hirel, 2004).

La respuesta productiva del maíz a distintas aplicaciones de fertilizante nitrogenado se ha estimado en múltiples ocasiones, casi siempre para localidades y condiciones ambientales específicas. La dosis y el momento de aplicación de los fertilizantes nitrogenados son dos factores importantes en la eficiencia del nitrógeno (Jokela y Randall, 1989).

La necesidad de incrementar simultáneamente la productividad y eficiencia ha llamado la atención de la industria privada. Monsanto (2008) ha anunciado su compromiso de desarrollar para el año 2030 semillas que puedan duplicar el rendimiento y que utilicen un tercio de los recursos, como N y agua, requeridos para la producción. Dupont (2009) ha indicado que gracias a su esfuerzo global e investigación, Pioneer está trabajando para incrementar el rendimiento de maíz y

soya en 40% para el año 2018, duplicando la actual tasa anual de incremento en rendimiento.

La eficiencia de conversión de fertilizante nitrogenado a forraje de gramíneas forrajeras tropicales puede alcanzar valores promedios de 26 kg/ha por kg de N aplicado.

Las mayores eficiencias se han obtenido con dosis de nitrógeno 150 kg/ha. La respuesta en la producción de forraje a la fertilización con N depende de la especie forrajera, de los niveles de otros nutrientes en el suelo, del manejo del pastoreo y de las características de clima y suelo de la región (Júnior et al., 2004).

La eficiencia en el uso del N proveniente de los fertilizantes está generalmente influenciado por tres factores (Ladha et al., 2005):

1. Suministro de N del suelo, fertilizantes y otras entradas.
2. Adquisición del N por el cultivo.
3. Pérdidas del sistema suelo-planta.

El uso eficiente de nitrógeno requiere de la detección previa de su deficiencia y del potencial de respuesta económica a la aplicación de los fertilizantes (Attanandana y Yost, 2003). El maíz necesita alrededor de 20 a 25 kg de N, para obtener una tonelada de grano producida (Sánchez, 1976).

El uso eficiente de nitrógeno es fundamental en la producción agrícola, dado que esto podría direccionar los problemas económicos y ambientales asociados a la producción de granos. El NUE depende del tipo de agrosistema, cultivo, genotipo, fertilizante aplicado, así como de la práctica de manejo. La tarea es conservar el N adicionado y tener una mayor tasa de absorción por las raíces, lo cual se traducirá en la reducción de costos de producción e impacto sobre el medio ambiente.

III JUSTIFICACIÓN

Los actuales niveles de producción de maíz, no serán suficientes para soportar la demanda de este cereal en las próximas décadas, con serios riesgos para la seguridad alimentaria, debido al uso extensivo de este alimento. En los próximos 40 años, el aumento de la población humana hará que la demanda mundial en la producción de granos sea más del doble, y estará asociada con un aumento de tres veces el uso de fertilizantes nitrogenados, si las prácticas agrícolas y las variedades no cambian (Banzinger *et al.*, 2002).

En los últimos años se han registrado aumentos en la producción agrícola, pero, dado que la población mundial ha crecido al mismo ritmo, en los próximos años se requerirán aumentos aún mayores de esa producción. Los altos rendimientos en el cultivo de maíz están asociados a altas dosis de fertilización nitrogenada. Sin embargo, este concepto es erróneo y conlleva a un excesivo empleo de fertilizantes en la producción de cultivos (Alvarado, 2010).

Uno de los problemas actuales de la nutrición por elementos minerales es la eficiencia con la cual las plantas pueden usar los elementos. Es importante que los elementos incorporados al suelo sean usados con eficiencia, tanto por su elevado costo económico como por los impactos ambientales que estos pueden provocar. De este modo, el uso eficiente de los fertilizantes constituye uno de los factores para mantener la productividad y sostenibilidad de los agroecosistemas (Peña *et al.*, 2001).

El N es el elemento que más limita la producción agrícola por las cantidades requeridas por los cultivos y por la frecuencia con que se observan deficiencias en suelos agrícolas. Este macronutriente participa en la síntesis de proteínas y por ello es vital para toda la actividad metabólica de la planta. Su deficiencia provoca reducciones severas en el crecimiento del cultivo, básicamente por una menor tasa de crecimiento y expansión foliar que reducen la captación de la radiación

fotosintéticamente activa. Generalmente la planta solo utiliza entre el 30% y el 50% del fertilizante nitrogenado inorgánico aplicado. El resto se pierde por, desnitrificación, lixiviación y volatilización, el cual se acumula como NO_3^- en las aguas de arroyos y ríos, lo que supone graves problemas ecológicos, para la salud humana así como un perjuicio económico. Por estos motivos, es preciso que los fertilizantes nitrogenados inorgánicos se empleen lo más eficazmente posible y solo cuando sean necesarios.

IV. OBJETIVO GENERAL

Analizar el grado de variación fenotípica en el crecimiento y morfología radical en maíz (*Zea mays* L.) en etapa de plántula en diferentes condiciones de disponibilidad de nitrógeno.

4.1. Objetivos particulares

- Determinar la respuesta morfológica de maíz a los 14, 21, 28 y 35 días de crecimiento de plántulas cultivadas en solución nutritiva en condiciones de 10% y 100% de nitrógeno.
- Evaluar la respuesta morfológica de maíz a los 42 días de crecimiento de plántulas cultivadas en solución nutritiva en condiciones de 10% y 100% de nitrógeno.

V. HIPÓTESIS

Al menos una de las variables en el crecimiento y morfología radical de maíz cultivado en condiciones controladas es diferente respecto a la concentración de nitrógeno aplicado.

VI MATERIALES Y MÉTODOS

6.1 Localización

Los experimentos se llevaron a cabo en condiciones de invernadero en las instalaciones del Departamento de Investigación en Ciencias Agrícolas de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla ubicada en el Municipio de Puebla.

6.2 Material vegetal

En calidad de material vegetal fueron estudiados diferentes cultivares de maíz sembrados en el estado de Puebla (Cuadros 2 y 3).

Cuadro 2. Cultivares de maíz utilizado en los ensayos de 14, 21, 28 y 35 días de crecimiento aplicando la técnica de rollo de papel.

Número	Cultivar	Localidad
1	SB 302 Berentsen*	Teziutlán
2	Criollo Blanco	Tecamachalco
3	Criollo Azul	Tecamachalco
4	Criollo Rojo	Tecamachalco

*La variedad mejorada se adquirió en esta localidad, no significa que sea originaria de dicho lugar.

Cuadro 3. Cultivares de maíz utilizado en el ensayo de 42 días de crecimiento aplicando la técnica de raíz flotante.

Número	Cultivar	Localidad
1	SB 302 Berentsen*	Teziutlán
2	Criollo Azul	San Pedro Benito Juárez, Atlixco
3	Criollo Rosado	San Nicolás, Atempan
4	Criollo Amarillo	San Miguel, Hueyapan
5	Criollo Blanco	San Miguel, Hueyapan

*La variedad mejorada se adquirió en esta localidad, no significa que sea originaria de dicho lugar.

Las semillas de los cultivares utilizados en el estudio se presentan en el apéndice 1 y apéndice 2. Se evaluaron 7 poblaciones nativas de maíz y una variedad mejorada (Figura 2) originarias de la región Templada subhúmeda del estado de Puebla.

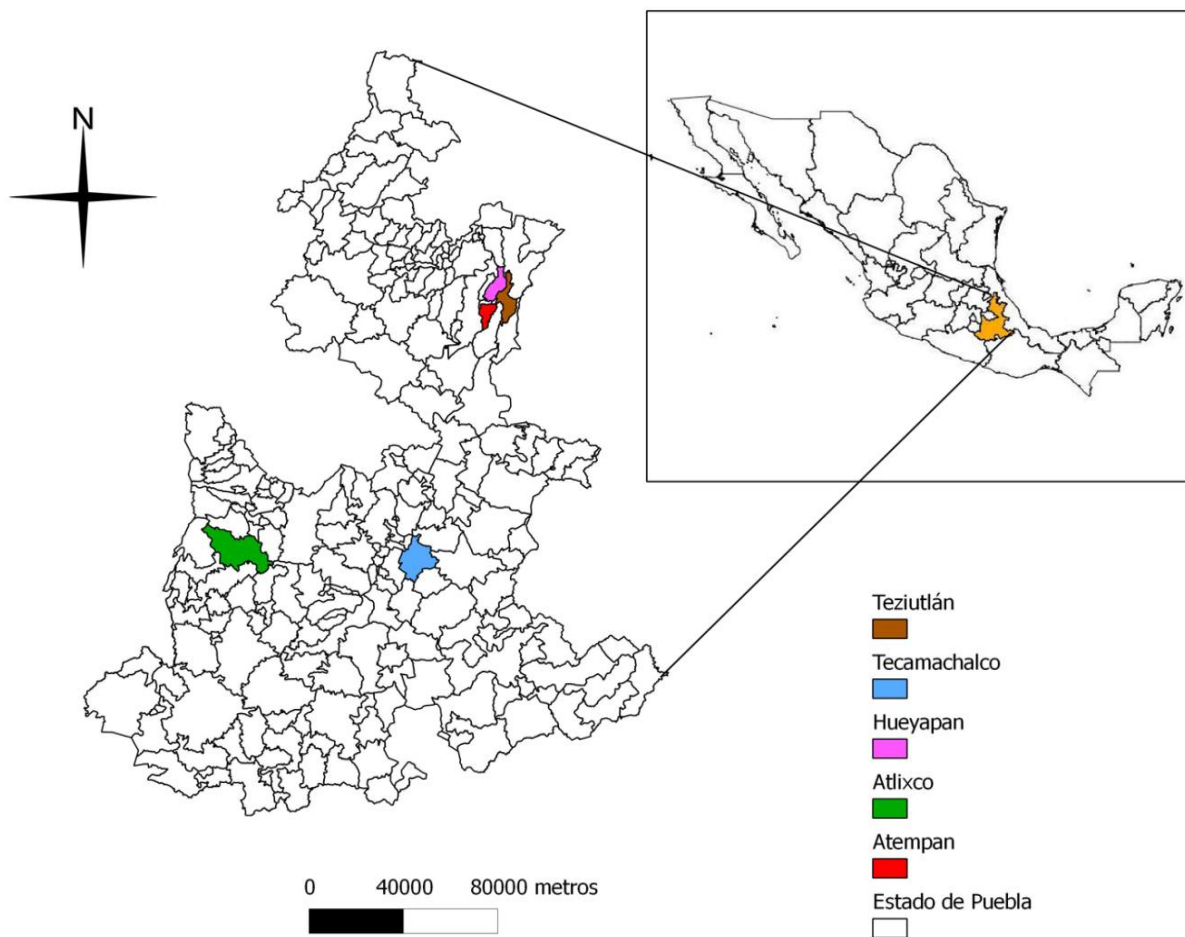


Figura 2. Municipios del estado de Puebla donde fueron colectadas las semillas de maíz utilizadas en el estudio.

Las poblaciones de origen Templado Subhúmedo (Cuadro 4) fueron colectadas de 5 municipios del estado de Puebla; la variación en altura presentó un intervalo de 1880 a 2055 msnm, con una temperatura media anual entre 14 °C a 18 °C, y con una precipitación pluvial de 500 a 2000 mm. El grano predominante fue el grano blanco de la variedad mejorada, dos criollos blancos, seguido del criollo amarillo con un ejemplar, dos criollos azules, un ejemplar rosado, así como un ejemplar rojo.

Cuadro 4. Variedad, color del grano y características climatológicas de la localidad en la que se desarrollan las poblaciones de maíz nativo colectadas para el estudio.

Región Ecológica	Población	Localidad de origen	Altitud (msnm)	T (°C)	pp (mm)	Raza	Color del grano
Templada subhúmeda	Teziutlán	Teziutlán	1990	14-16	1200-1500	Sb 302 Berentsen*	Blanco
Templada subhúmeda	Tecamachalco	Tecamachalco	2055	15-18	500-700	Criollo	Blanco
Templada subhúmeda	Tecamachalco	Tecamachalco	2055	15-18	500-700	Criollo	Azul
Templada subhúmeda	Tecamachalco	Tecamachalco	2055	15-18	500-700	Criollo	Rojo
Templada subhúmeda	Atempan	San Pedro Benito Juárez	1883	16-18	800-1000	Criollo	Rosado
Templada subhúmeda	Hueyapan	San Miguel	1880	16-18	1500-2000	Criollo	Amarillo
Templada subhúmeda	Hueyapan	San Miguel	1880	16-18	1500-1200	Criollo	Blanco
Tropical subhúmeda	Atlixco	San Pedro Benito Juárez	1883	16-18	800-1000	Criollo	Azul

*La variedad mejorada se adquirió en esta localidad, no significa que sea originaria de dicho lugar.

T = Temperatura anual en grados Celsius; pp = Precipitación total anual en milímetros.

Fuente: INAFED, 2014.

6.3 Método rollo de papel

El experimento fue de dos factores con un diseño completamente al azar. En calidad de material vegetal se estudiaron 4 cultivares de maíz (Cuadro 2). Las plántulas fueron cultivadas en condiciones controladas utilizando la solución nutritiva de Hoagland y Arnon (1950) modificada al 10% y 100% de nitrógeno (Cuadro 5). El ciclo de cultivo de las plántulas fue de 14, 21, 28 y 35 días. Las plantas fueron caracterizadas usando el método de rollo de papel descrito por Woll *et al.* (2005).

Cuadro 5. Solución nutritiva modificada de Hoagland y Arnon (1950).

Fuente de Fertilización	Nitrógeno al 100% (g/10l)	Nitrógeno al 10% (g/10l)
Fosfato Monopotásico	1.36	1.36
Nitrato de Potasio	5.06	0.506
Nitrato de Calcio	11.81	1.181
Sulfato de Magnesio	4.93	4.93
Poliquel*Calcio	0.04 ml	0.04 ml

Las semillas fueron primeramente desinfectadas con hipoclorito de Sodio al 6% durante 5 minutos, después se enjuagaron tres veces con agua. Cuatro semillas de maíz fueron colocadas sobre hojas de papel filtro previamente humedecido, y posteriormente enrollado. Se elaboraron cuatro rollos por variedad para cada una de las dosis de N en estudio. Los rollos de papel fueron colocados verticalmente en envases cilíndricos de 21.5 cm de altura y 8 cm de diámetro con solución nutritiva para los ensayos de 14 y 21 días. Para el caso de las plantas cultivadas durante 28 y 35 días los rollos de papel fueron colocados en envases de 32 cm de altura y 24 cm de diámetro. Una vez finalizada cada fecha del ensayo, se seleccionaron al azar seis plántulas sanas de maíz de cada cultivar y dosis de nitrógeno, las cuales fueron consideradas como una unidad experimental.

6.4 Sistema de raíz flotante

El experimento fue de dos factores con un diseño completamente al azar. En calidad de material vegetal fueron estudiados 5 cultivares de maíz del estado de Puebla (Cuadro 3). Las plantas fueron cultivadas en condiciones controladas utilizando la solución nutritiva de Hoagland y Arnon (1950) modificada al 10% y 100% de nitrógeno (Cuadro 5), durante 22 días aplicando el método de rollo de papel descrito por Woll *et al.* (2005).

A continuación, se realizó el trasplante de las plántulas de maíz sobre tinas de plástico rectangulares de 50.0 x 63.0 cm con capacidad de 50 litros, las plantas se terminaron de cultivar hasta los 42 días de crecimiento. Para el soporte de las plántulas se utilizaron plataformas de espuma de polietileno. A las plataformas se les realizaron orificios de 1 pulgada de diámetro, posteriormente se colocaron vasos de plástico de 1 onza con un orificio sobre la base, donde se fijaron las plántulas de maíz enrolladas en tiras de esponja de 4.5 x 14.0 cm, las cuales, sirvieron de soporte para las plantas. La plataforma que sostiene las plantas flota directamente sobre la solución nutritiva. El esquema de plantación en las plataformas fue de 6 x 4 plántulas con una densidad de población de 76.2 plantas/m². Para la oxigenación de las raíces se instalaron dos bombas de aire con un temporizador para programar el tiempo de aeración. Las bombas proporcionaron aire al difusor, el cual permitió que las burbujas originadas en la solución nutritiva de Hoagland y Arnon (1950), suministraran oxígeno a las raíces de las plantas. El temporizador se programó para que el encendido fuera cada 3 horas durante un periodo de 15 minutos (Figura 3).

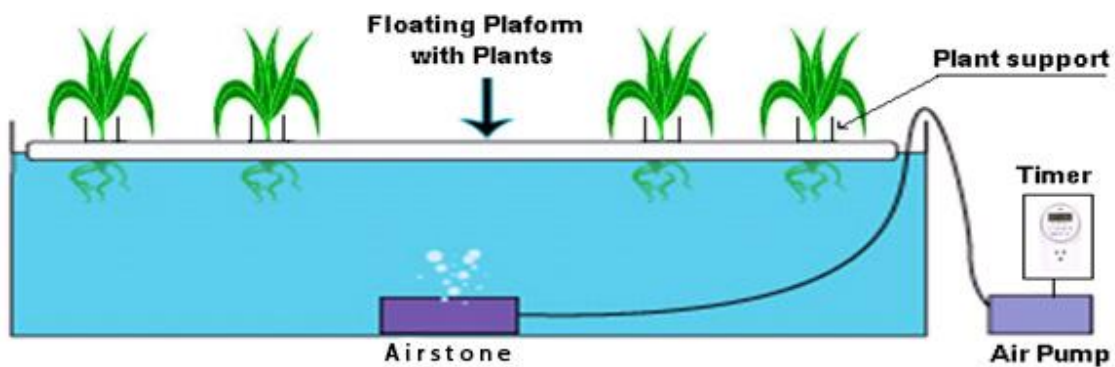


Figura 3. Sistema de raíz flotante.

Una vez finalizado el ensayo, se eligieron al azar 6 plantas sanas de maíz por cada cultivar y tratamiento de nitrógeno, las cuales fueron consideradas como una unidad experimental.

6.5 Variables evaluadas.

Medición de las plántulas de maíz. El ciclo de cultivo de las plántulas fue de 14, 21, 28, 35 y 42 días después de la siembra (d.d.s.). Las mediciones morfométricas realizadas se presentan en el cuadro 6.

Cuadro 6. Parámetros evaluados en las plántulas de maíz.

Variable	Abreviatura
Longitud de mesocótilo	LM
Longitud de la raíz primaria	LRPr
Número de raíces secundarias	NRS
Longitud de raíces secundarias	LRS
Número de raíces adventicias	NRA
Longitud de raíces adventicias	LRA
Longitud de la plántula	LPI
Peso fresco de la raíz	PFR
Peso fresco de la plántula	PFPI
Peso seco de la raíz	PSR
Peso seco de la plántula	PSPI
Relación raíz-plántula	R-RPI

Las variables LM, LRPr, LRS, LRA y LPI fueron medidas de manera manual usando una regla (Figura 4). Particularmente, LPI se midió tomando el nodo marcado por las raíces adventicias, hasta la hoja más larga de la plántula. Los parámetros LRS y LRA representan la longitud promedio de raíces secundarias y adventicias, respectivamente. La variable R-RPI se obtuvo por medio del cociente entre el peso seco de la raíz y el peso seco de la plántula (vástago).

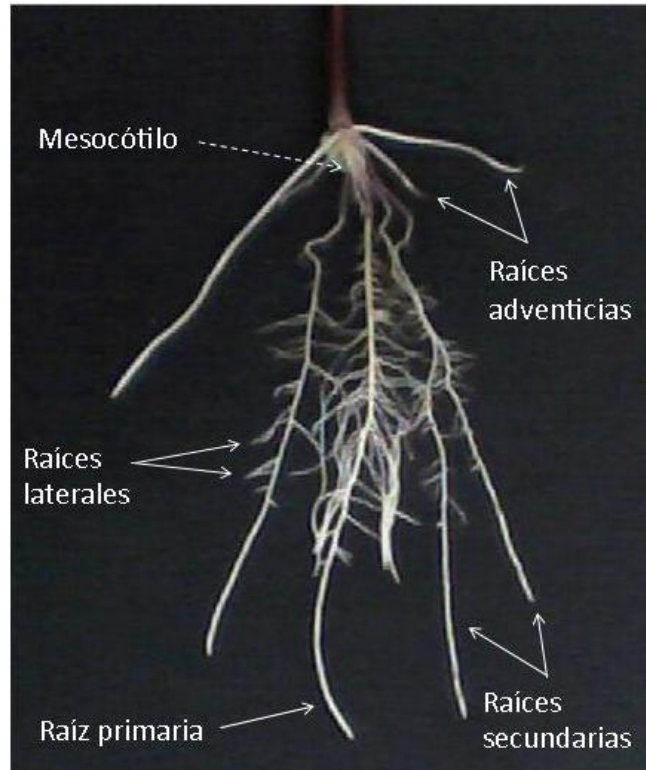


Figura 4. Partes de la raíz visible en las plántulas de maíz.

Las variables PFR y PFPI fueron medidas con una báscula de precisión. El PSR y PSPI fueron medidos después de que las muestras permanecieron 24 horas a 70 °C en la estufa de secado. Una vez obtenidos los datos, con ayuda del paquete estadístico Microsoft Excel se realizó el análisis de varianza a niveles de confianza ($p \leq 0.05$).

VII RESULTADOS

La caracterización morfológica de los cultivares de maíz en plántulas de 14, 21, 28 y 35 días de crecimiento se llevó a cabo mediante experimentos vegetativos en la solución nutritiva de Hoagland y Arnon modificada al 10% y 100% de nitrógeno en condiciones hidropónicas. El procedimiento experimental se muestra en las figuras 5, 6 y 7. Asimismo, la respuesta morfológica de los cultivares de maíz en plántulas de 42 días de crecimiento se realizó por medio de ensayos vegetativos en solución nutritiva de Hoagland y Arnon (1950) modificada al 10% y 100% de nitrógeno en condiciones controladas. El procedimiento metodológico se muestra en la figura 8.

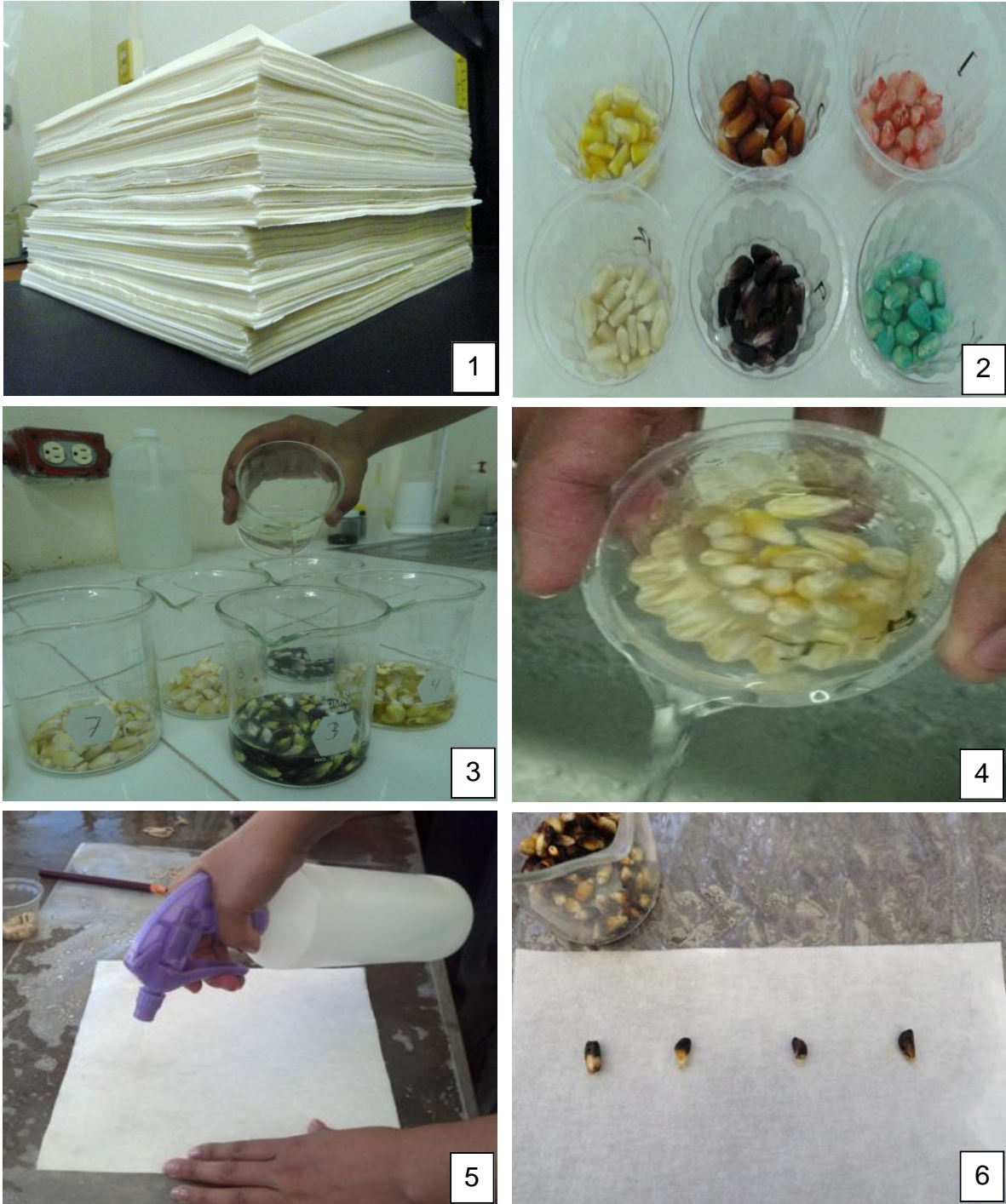


Figura 5. 1 – Papel de filtro utilizado como papel germinación, 2 – Semillas de los cultivares de maíz, 3 – Esterilización de semillas con hipoclorito de sodio, 4 – Retiro del cloro y enjuagado de las semillas, 5 – Humectación del papel germinación y 6 – Colocación de las semillas en el papel germinación.



Figura 6. 7 – Preparación de los rollos de papel, 8 – Supervisión de los rollos de papel, 9 – Rollos de papel con semillas, 10 – Rollos de papel con semillas en matraces de 1l, 11 – Germinación de las plántulas de maíz y 12 – Plántulas de maíz de 14 días cultivadas en bajo y alto N en la solución nutritiva de Hoagland y Arnon (1950).



13



14



15



16



17



18

Figura 7. 13 – Plántulas de maíz, 14 – Selección de plántulas sanas de maíz, 15 – Medición del tallo y raíz con una regla, 16 – Peso fresco de raíz y plántula medidas con una báscula de precisión, 17 – Colocación de las muestras durante 24 horas a 70 °C en la estufa de secado, 18 – Medición del peso seco de la raíz y plántula.



Figura 8. 1 – Aplicación de la solución nutritiva de Hoagland y Arnon (1950), 2 – Instalación de bombas de aire con un temporizador para programar el tiempo de aeración, 3 – Soporte de las plántulas con vasos de plástico y esponja de polietileno, 4 – Trasplante de las plántulas de maíz, 5 – Plántulas de maíz cultivadas en bajo y alto N en la solución nutritiva de Hoagland y Arnon (1950), 6 – Plántulas colocadas en las plataformas de espuma de polietileno.

El análisis de los resultados estadísticos de las variables en estudio de maíz en los ensayos de 14, 21, 28 y 35 días de crecimiento aplicando la técnica de rollo de papel se muestra de la figura 9 a la 20.

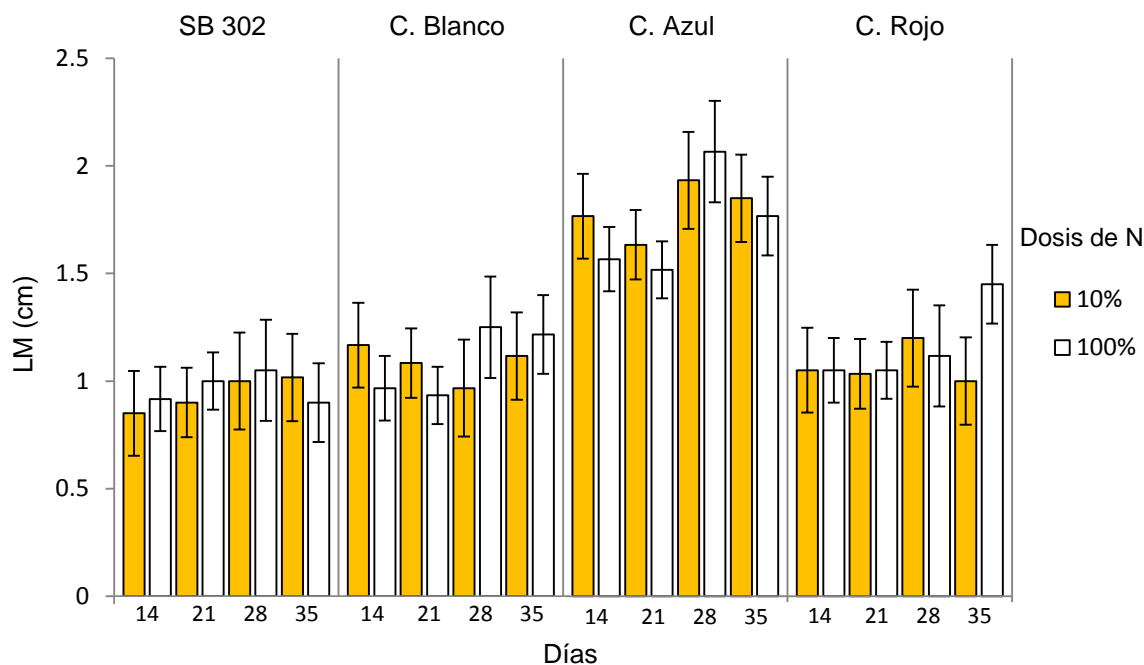


Figura 9. Longitud de mesocótilo (cm).

En la figura 9 se observa que luego de aplicar el ANDEVA para un nivel de significancia del 5% se encontró que existen diferencias significativas para el factor cultivar ($p=0.013$) a los 14 d.d.s. de las plántulas. Mientras que para el factor dosis de N no se registraron diferencias, lo que significa que la respuesta de la longitud de mesocótilo entre los diferentes cultivares fue similar. Los mayores valores los presentaron las plántulas del cultivar criollo azul tanto para 10% como para 100% de N. El menor valor de la longitud de mesocótilo lo presentó el cultivar SB 302 Berentsen para ambas dosis de N.

En relación a los 21 de crecimiento existen diferencias significativas para el factor cultivar ($p=0.013$). Por otro lado, para los valores del factor dosis de N no se mostraron diferencias. Cabe mencionar que el cultivar criollo azul mostró los

mejores valores medios tanto para 10% como para 100% de N en la longitud de mesocótilo.

A los 28 días de las plantas se observaron diferencias significativas para el factor cultivar ($p=0.007$), sin embargo para el factor dosis de N no hubo diferencias. Los mayores valores los exhibieron las plantas del cultivar criollo azul para ambas dosis de N. El menor valor de la longitud de mesocótilo lo presentó el cultivar SB 302 Berentsen para 10% y el cultivar criollo blanco para 100% de N.

Referente a los 35 días de desarrollo de las plantas se advierte que no existen diferencias entre los valores de la longitud de mesocótilo para ninguno de los factores. A pesar de esto se puede señalar que los mejores valores los presentó el cultivar criollo azul tanto para 10% como para 100% de N.

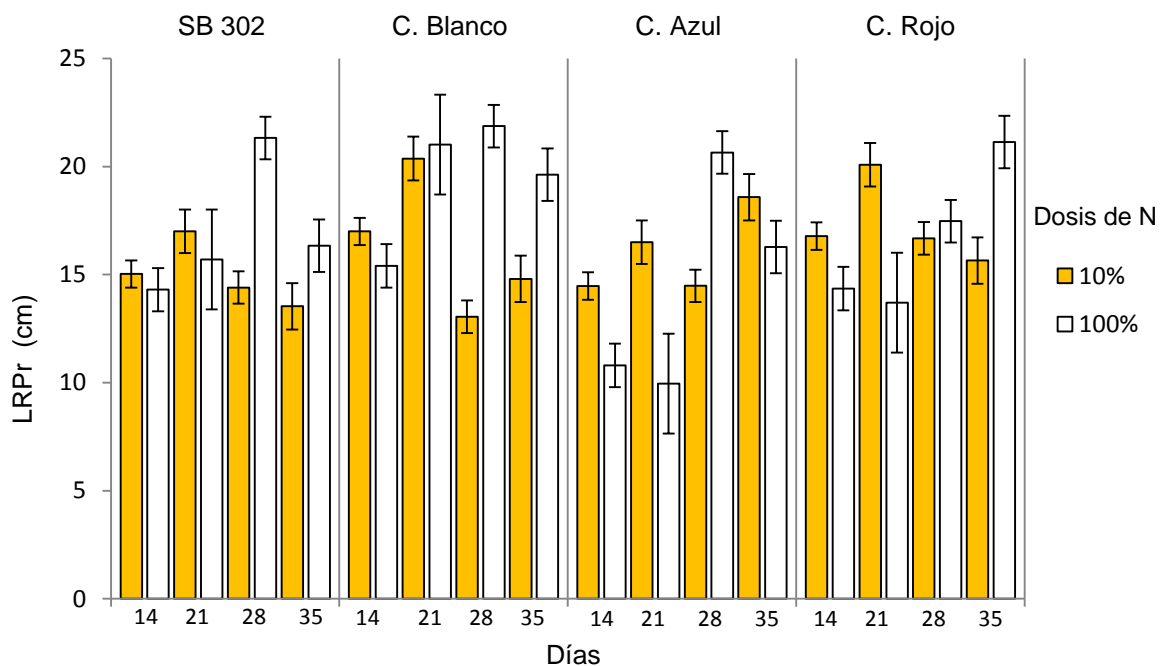


Figura 10. Longitud de la raíz primaria (cm).

En la figura 10 se observa que a los 14 días de las plántulas, solamente existen diferencias significativas ($p=0.043$) para el factor dosis de N entre los valores de la longitud de la raíz primaria. Los mayores valores los presentaron las plántulas del

cultivar criollo blanco tanto para 10% como para 100% de N. El menor valor lo presentó el cultivar criollo azul para ambas dosis de N.

Respecto a los 21 días de crecimiento, se muestra que entre los valores de la longitud de la raíz primaria no se encontraron diferencias para los factores evaluados, lo que significa que la respuesta de la variable estudiada entre los diferentes cultivares fue similar.

En relación a los 28 días de desarrollo de las plantas de maíz se observa que existen diferencias significativas ($p=0.045$) para el factor dosis de N. En cambio, para el factor cultivar no hubo diferencias. Cabe señalar que el cultivar criollo rojo mostró los mejores valores medios para 10% de N.

Acerca de los 35 días de las plantas se observa que entre los valores de la longitud de la raíz primaria no existen diferencias para ninguno de los factores estudiados.

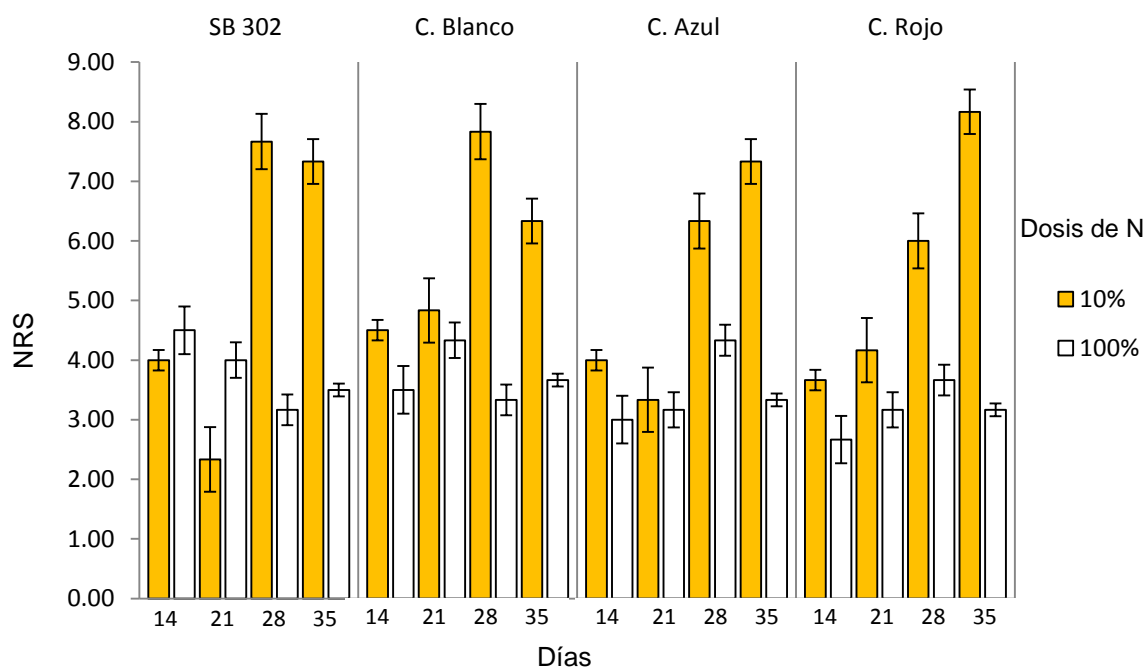


Figura 11. Número de raíces secundarias.

En la figura 11 se distingue que a los 14 días de las plántulas entre los valores del número de raíces secundarias de los diferentes cultivares de maíz no hubo diferencias para los factores evaluados. Además, se observa que los mayores valores los presentaron las plántulas del cultivar criollo rojo para el 10% de N y las plántulas del cultivar SB 302 Berentsen para el 100% de N.

A los 21 días de crecimiento del maíz se observa que no existen diferencias entre los valores medios del número de raíces secundarias para ninguno de los factores estudiados. Cabe mencionar que los mejores valores medios los obtuvo el cultivar criollo blanco para el 10% y 100% de N.

Referente a los 28 días se muestra que existen diferencias significativas ($p=0.016$) entre las plantas para el número de raíces secundarias respecto al factor dosis. De igual manera se demuestra que las plántulas desarrolladas en 10% de N respondieron mejor en comparación con los mismos cultivares por la aplicación de 100% de N. Los cultivares criollo blanco y el cultivar criollo azul respondió de mejor manera a la dosis de 10% y 100% de N, respectivamente. En contraste el cultivar criollo rojo y el criollo blanco mostraron los menores valores medios para este parámetro.

En relación a los 35 días de desarrollo de las plantas de maíz se observa que existen diferencias significativas ($p=0.003$) para el factor dosis de N. Sin cambio, para el factor cultivar no hubo diferencias. Cabe señalar que el cultivar criollo rojo mostró los mejores valores medios para 10% de N, mientras que los menores valores los registró el cultivar criollo blanco para 100% de N.

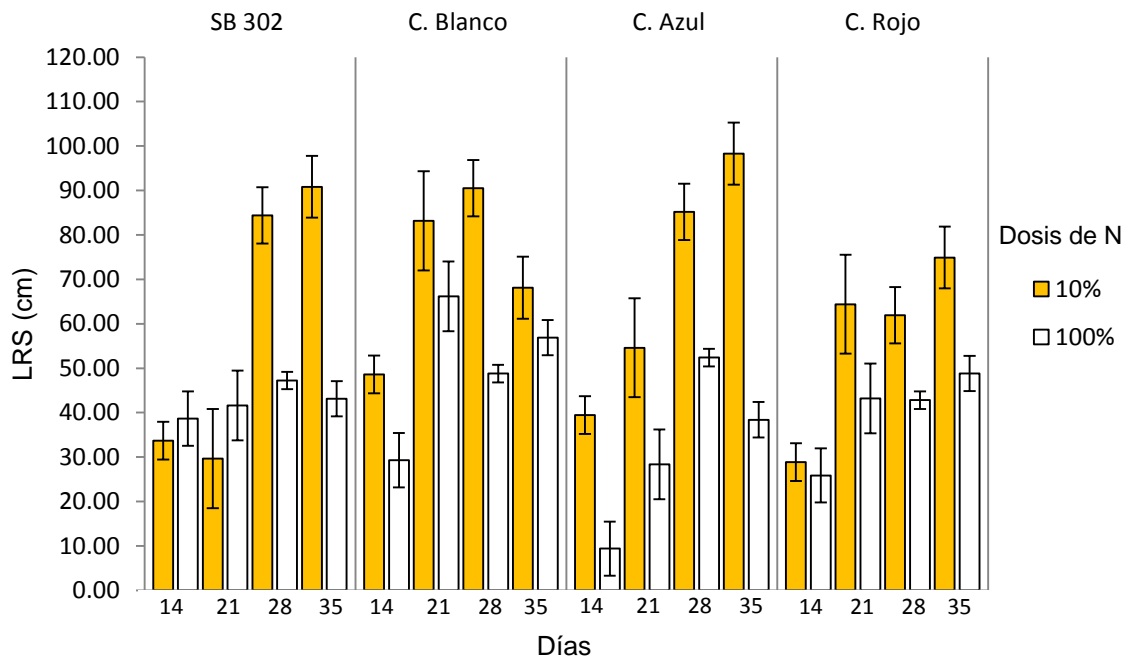


Figura 12. Longitud de raíces secundarias (cm).

En la figura 12 se señala que a los 14 días de crecimiento de las plántulas, no hubo diferencias para ninguno de los factores estudiados. Se indica que los mayores valores los presentaron las plántulas del cultivar criollo blanco para 10% de N y el cultivar SB 302 Berentsen para 100% de N. El menor valor lo presentó el cultivar criollo rojo en 10% de N y el criollo azul en 100% de N.

Respecto a los 21 días de crecimiento, se muestra que entre los valores de la longitud de raíces secundarias no se encontraron diferencias para los diferentes factores. Todos los cultivares al 10% de N se encuentran por encima de los valores de las plántulas bajo la aplicación de 100% de N, a excepción del cultivar SB 302 Berentsen.

Concerniente a los 28 días de desarrollo de las plantas de maíz se observa que entre los valores de la longitud de la raíz primaria existen diferencias significativas ($p=0.006$) para el factor dosis de N. Cabe mencionar que todos los cultivares al

10% de N se encuentran por encima de los valores de las plántulas bajo la aplicación de 100% de N.

Acerca de los 35 días crecimiento del maíz de las plantas se observa que existen diferencias significativas ($p=0.044$) para el factor dosis de N. Sin cambio, para el factor cultivar no hubo diferencias. Cabe resaltar que el cultivar criollo azul y el cultivar criollo blanco respondió mejor al 10% y 100% de N respectivamente. En contraste que los menores valores los registró el cultivar criollo blanco en 10% y el criollo azul en 100% de N.

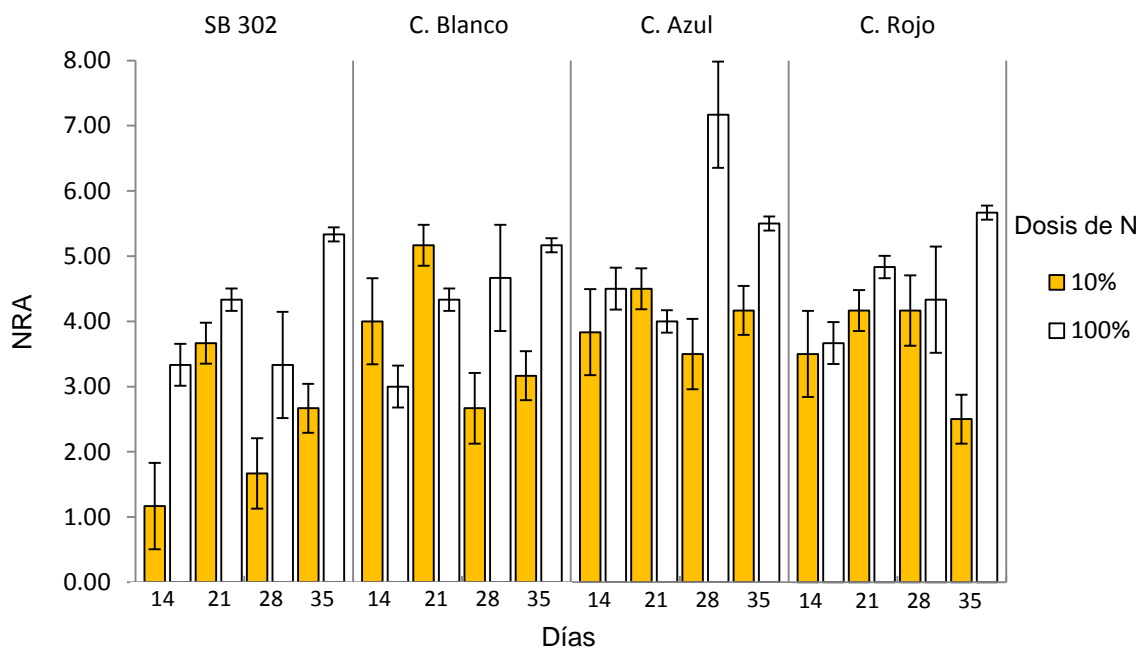


Figura 13. Número de raíces adventicias.

En la figura 13 se observa que a los 14 días de las plántulas entre los valores del número de raíces adventicias de los diferentes cultivares de maíz no hubo diferencias para los factores estudiados. Además, se observa que los mayores valores los presentaron las plántulas del cultivar criollo blanco para el 10% de N y las plántulas del cultivar criollo azul para el 100% de N.

A los 21 días de crecimiento del maíz se observa que no existen diferencias entre los valores del número de raíces adventicias para ninguno de los factores evaluados. Cabe señalar que los mejores valores medios los obtuvo el cultivar criollo blanco para el 10% y el cultivar criollo rojo para el 100% de N.

Después de 28 días de las plantas el número de raíces adventicias no registró diferencias para ambos factores. Los mejores valores medios los presentó el cultivar criollo rojo para el 10% de N, y el criollo azul para el 100% de N.

A los 35 días de desarrollo de las plantas de maíz se observa que hubo diferencias significativas ($p=0.010$) para el factor dosis de N. Sin cambio, para el factor cultivar no hubo diferencias. Cabe señalar que el cultivar criollo azul mostró los mejores valores medios para 10% de N, mientras que los menores valores los registró el cultivar criollo rojo para 100% de N.

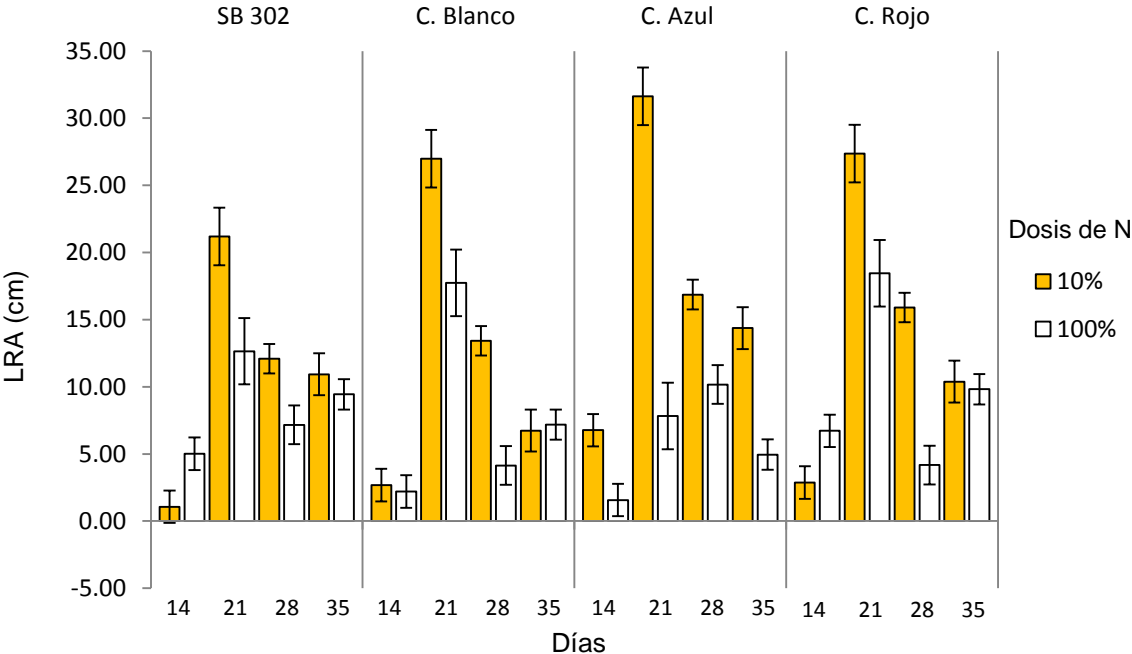


Figura 14. Longitud de raíces adventicias (cm).

En la figura 14 se distingue que a los 14 días de las plántulas entre los valores del número de raíces adventicias de los diferentes cultivares de maíz no hubo

diferencias para los factores evaluados. Además, se observa que los mayores valores los presentaron las plántulas del cultivar criollo azul para el 10% de N y las plántulas del cultivar criollo rojo para el 100% de N.

Al día 21 de crecimiento existen diferencias significativas entre los valores de raíces adventicias para el factor dosis de N ($p=0.042$). Por otro lado, para los valores del factor cultivar de N no se mostraron diferencias. Cabe señalar que los cultivares criollo azul y criollo rojo mostró los mejores valores medios para 10% y 100% de N respectivamente.

A los 28 días de las plantas se observaron diferencias significativas para el factor dosis de N ($p=0.012$), sin embargo para el factor cultivar no hubo diferencias. Los mayores valores los exhibieron las plantas del cultivar criollo azul para ambas dosis de N. El menor valor de la longitud de raíces adventicias lo presentó el cultivar SB 302 Berentsen para 10% y el cultivar criollo blanco para 100% de N.

A los 35 días de desarrollo de las plantas se advierte que no existen diferencias entre los valores de la longitud de raíces adventicias para ninguno de los factores. A pesar de esto se puede señalar que los mejores valores los presentó el cultivar criollo azul tanto para 10% y el criollo rojo para 100% de N.

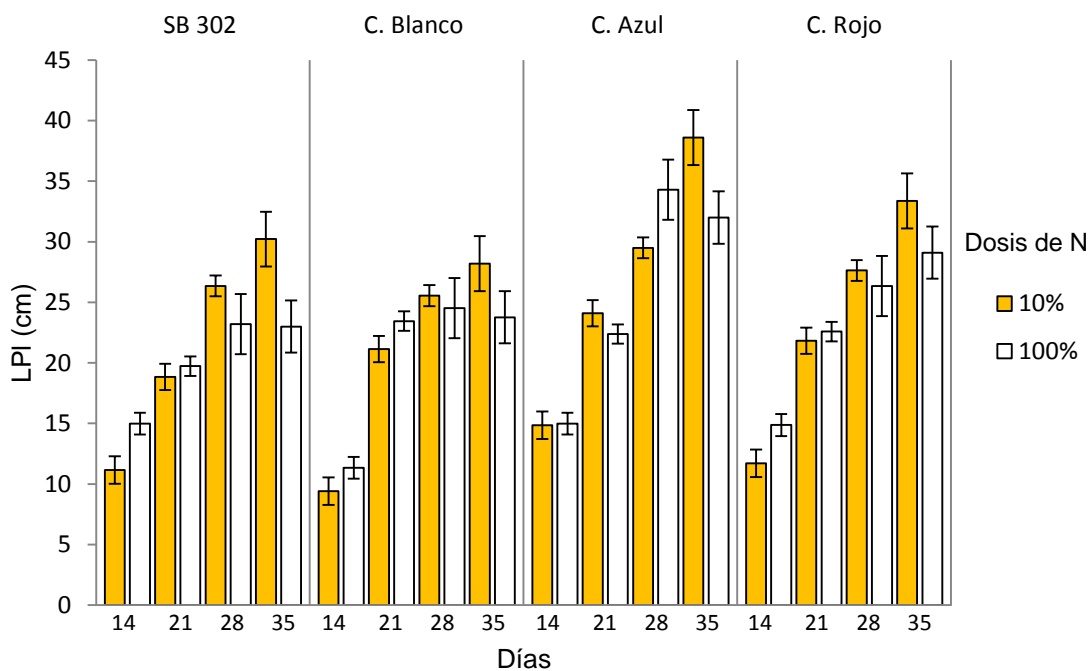


Figura 15. Longitud de la planta (cm).

En la figura 15 se señala que entre los valores de la longitud de la planta no existieron diferencias significativas a los 14 d.d.s. de las plantas. Pese a ello, se puede mencionar que los mejores valores medios al 10% de N lo obtuvo el cultivar criollo azul, mientras que los mejores valores al 100% de N los presentó el cultivar SB 302 Berentsen.

A los 21 días de crecimiento se observa que no existen diferencias entre los valores de la longitud promedio de raíces adventicias de las plántulas para los factores evaluados. La mayoría de las plántulas que se desarrollaron en 100% de N presentaron mejores valores medios.

A los 28 días de desarrollo de las plantas no existen diferencias entre los valores de la longitud de la planta. A pesar de esto, los mejores valores medios en este parámetro los mostraron las plantas del cultivar criollo blanco para las dosis de N.

A los 35 días, la figura muestra que existen diferencias significativas para factor cultivar ($p=0.008$) así mismo para el factor dosis de N ($p= 0.004$) entre los valores de la longitud de la planta. Se observa que los valores de la longitud de la planta de los cultivares desarrollados en 10% de N son mejores en comparación con los valores observados en la dosis de 100% de N. Se advierte que los mejores valores para este parámetro los obtuvo el criollo azul para ambas dosis de N.

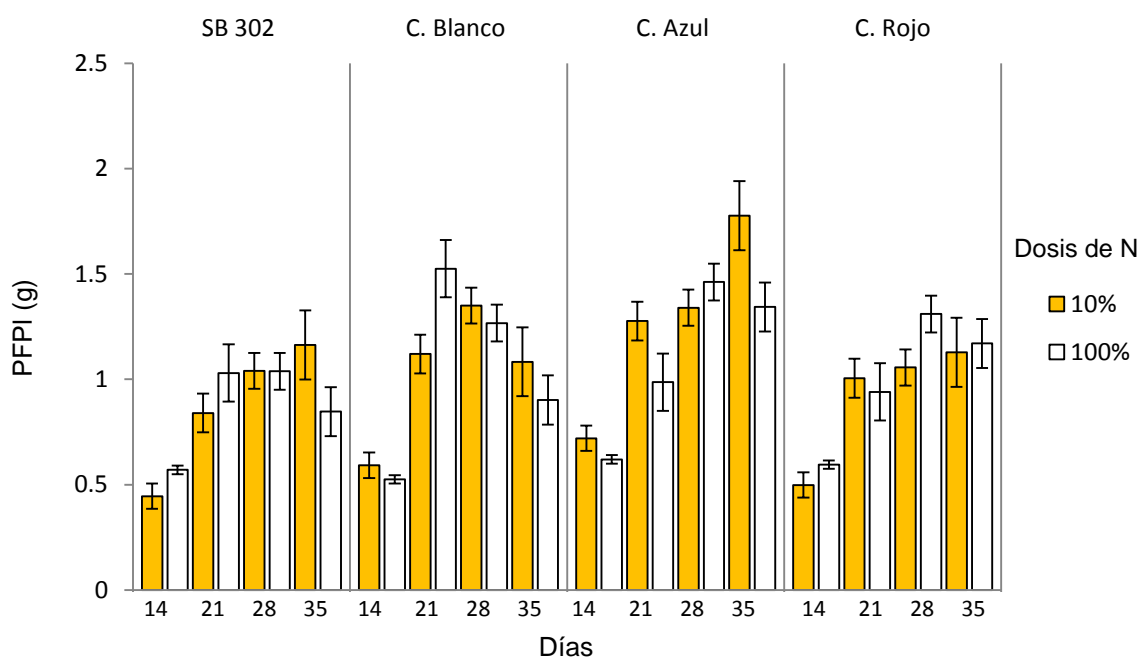


Figura 16. Peso fresco de la plántula (g).

En la figura 16 se observa que no hubo diferencias entre los valores del peso fresco de la plántula a los 14 d.d.s. para los factores evaluados, lo que significa que la respuesta de la variable estudiada entre los diferentes cultivares fue similar. El cultivar criollo azul fue el que mejor respondió en ambas dosis de N. En contraste el menor valor lo presentó el cultivar SB 302 Berentsen y el criollo blanco para 10% y 100% de N respectivamente.

Después de 21 días de crecimiento, se muestra que entre los valores del peso fresco de la plántula no se encontraron diferencias para ambos factores. Cabe

resaltar que el cultivar criollo azul respondió mejor al 10% y el criollo blanco al 100% de N.

En relación a los 28 días de desarrollo de las plantas de maíz se observa que no existen diferencias significativas para los factores estudiados. Cabe señalar que el cultivar criollo blanco mostró los mejores valores medios para 10% de N, mientras que los menores valores los registró el cultivar SB 302 Berentsen para 100% de N.

A los 35 días de las plantas se observa que entre los valores del peso fresco de la planta no presento diferencias. El cultivar criollo azul presentó los mejores valores en ambas dosis de N.

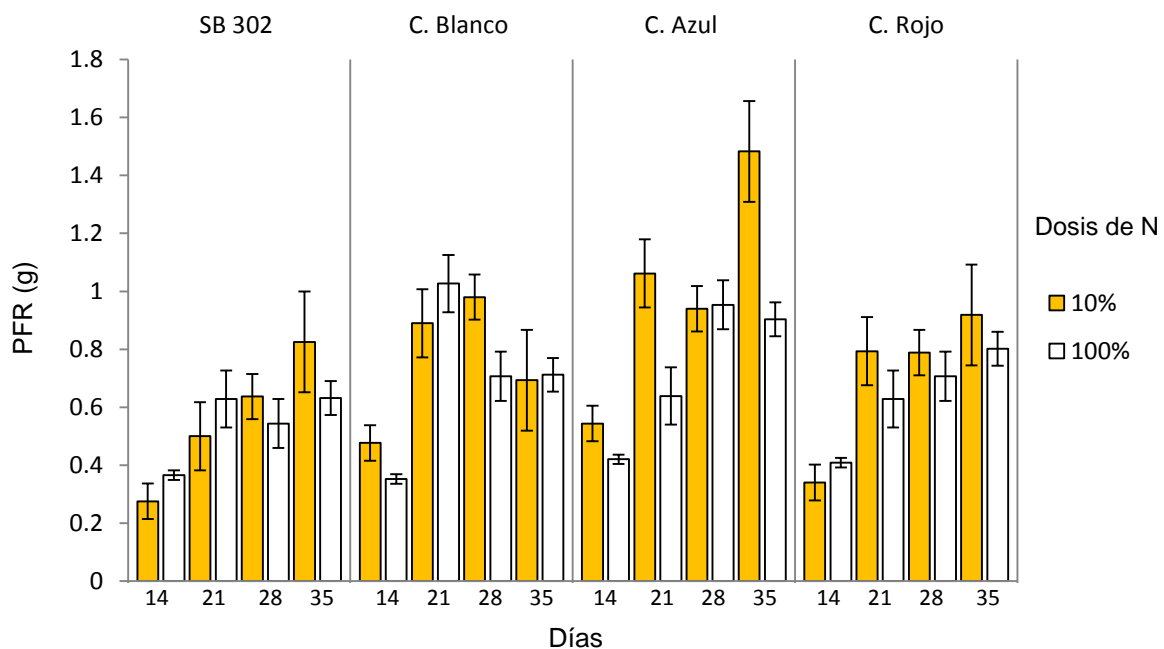


Figura 17. Peso fresco de la raíz (g).

En la figura 17 se muestra que no se presentó diferencias entre los valores del peso fresco de la raíz a los 14 d.d.s. para ambos factores, lo que significa que la respuesta de la variable estudiada entre los diferentes cultivares fue similar. El cultivar criollo azul fue el que mejor respondió en ambas dosis de N. En contraste

el menor valor lo presentó el cultivar SB 302 Berentsen y el criollo blanco para 10% y 100% de N respectivamente.

A los 21 días de crecimiento, se observa que entre los valores del peso fresco de la raíz no se encontraron diferencias para ambos factores. Cabe resaltar que el cultivar criollo azul respondió mejor al 10% y el criollo blanco al 100% de N.

Después de los 28 días de desarrollo de las plantas de maíz se observa que no existen diferencias para los factores estudiados. Cabe señalar que el cultivar criollo blanco mostró los mejores valores medios para 10% de N, mientras que los menores valores los registró el cultivar criollo azul para 100% de N.

A los 35 días de las plantas se observa que entre los valores del peso fresco de la raíz no presento diferencias. El cultivar criollo azul mostro los mejores valores en ambas dosis de N.

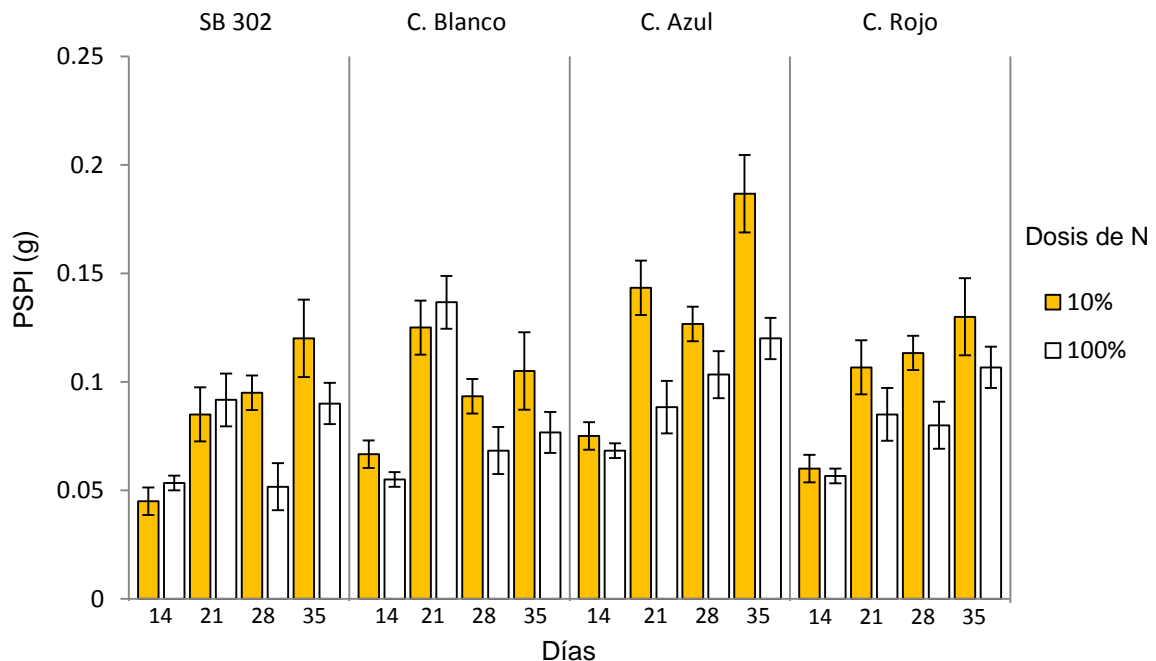


Figura 18. Peso seco de la plántula (g).

En la figura 18 se observa que a los 14 días de las plántulas en el peso seco de la plántula no hubo diferencias para los factores evaluados, lo que significa que la respuesta de la variable estudiada entre los diferentes cultivares fue similar. Los mayores valores los presentaron las plántulas criollo azul tanto para 10% como para 100% de N. El menor valor lo presentó el cultivar SB 302 Beretsen para ambas dosis de N.

A los 21 días de desarrollo, se muestra que entre los valores del peso seco de la plántula no se encontraron diferencias para los factores evaluados. Cabe resaltar que los mejores valores los obtuvo el cultivar criollo azul y el criollo blanco para 10% y 100% de N respectivamente.

Después de los 28 días de crecimiento existen diferencias significativas para el factor cultivar ($p=0.023$) y factor dosis de N ($p=0.006$). Cabe mencionar que las plántulas desarrolladas en 10% de N respondieron mejor en comparación con los mismos cultivares por la aplicación de 100% de N.

A los 35 días de las plantas se observaron diferencias significativas para el factor, dosis de N ($p=0.033$). Los mayores valores los exhibieron las plantas del cultivar criollo azul para ambas dosis de N. De igual manera se demuestra que las plántulas desarrolladas en 10% de N respondieron mejor en comparación con los mismos cultivares por la aplicación de 100% de N. El menor valor del peso seco de la plántula lo presentó el cultivar criollo blanco para ambas dosis de N.

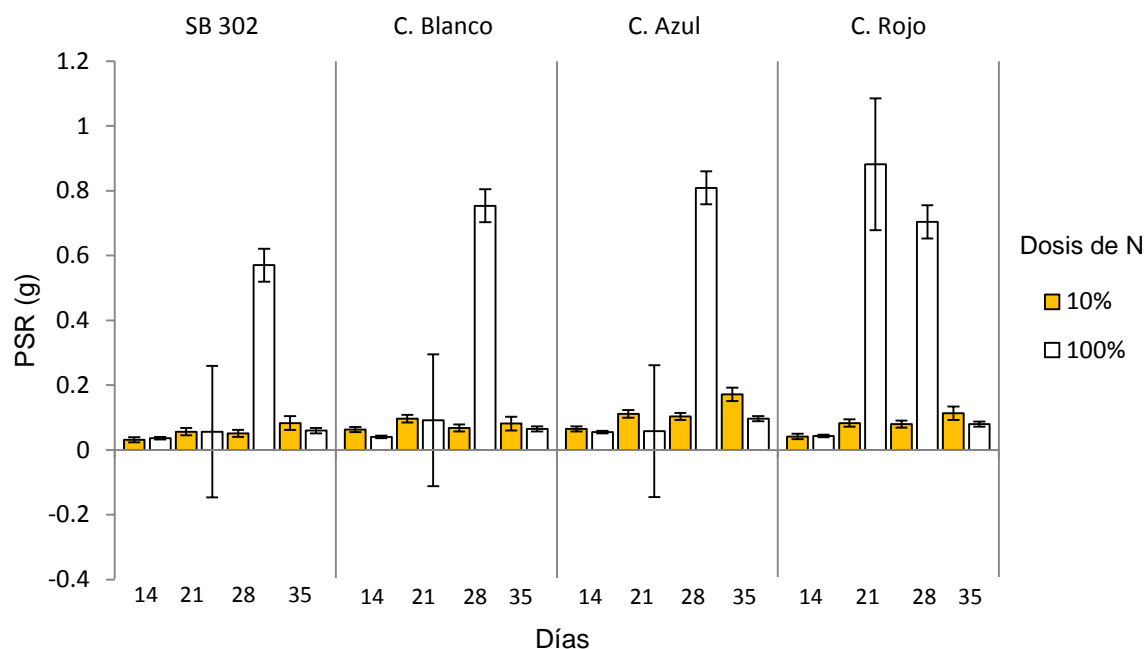


Figura 19. Peso seco de la raíz (g).

En la figura 19 se denota que a los 14 días de las plántulas entre los valores del peso seco de la raíz en los diferentes cultivares de maíz no hubo diferencias para los factores estudiados. Además, se observa que los mayores valores lo presentaron las plántulas del cultivar criollo azul para ambas dosis de N.

A los 21 días de crecimiento del maíz se observa que no presentó diferencias en el peso seco de la raíz para ninguno de los factores evaluados. Cabe señalar que los mejores valores medios los obtuvo el cultivar criollo blanco para las diferentes dosis de N.

A los 28 días de las plantas se observa que existen diferencias significativas ($p=0.000$) para el factor dosis de N. Los mejores valores medios los presentó el cultivar criollo azul para ambas dosis de N.

Después de los 35 días de desarrollo de las plantas de maíz se observa que no hubo diferencias. Cabe indicar que el cultivar criollo azul mostró los mejores valores medios para ambas dosis de N, mientras que los menores valores los

registró el cultivar criollo rojo para 10% de N y el cultivar SB 302 Berentsen para 100% de N.

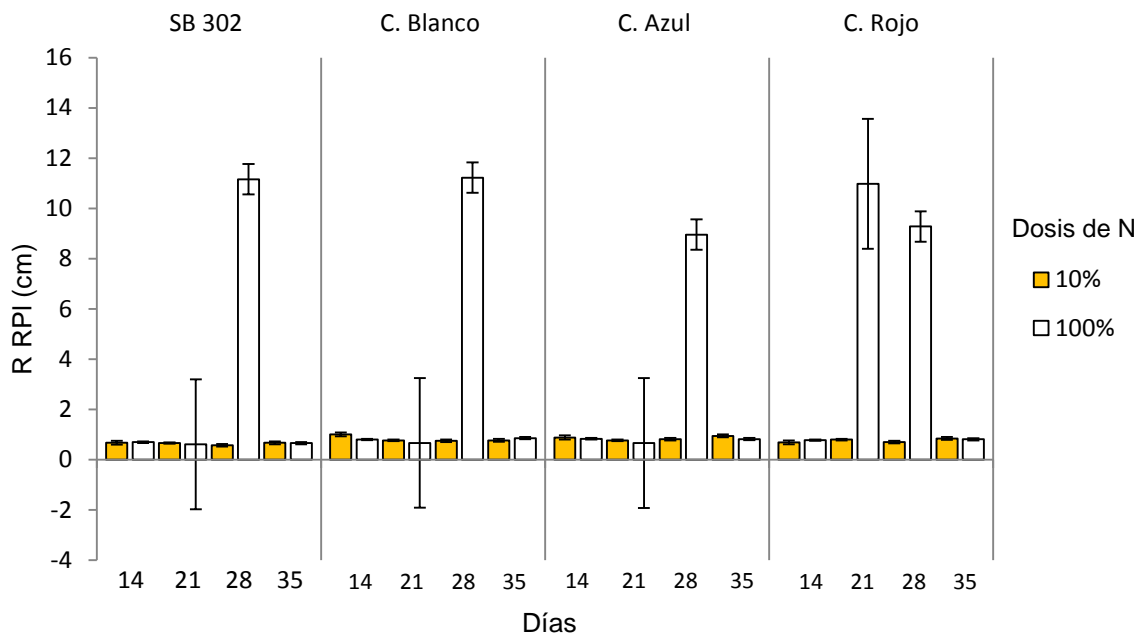


Figura 20. Relación raíz-plántula (g).

En la figura 20 se señala que a los 14 días de crecimiento de las plántulas, no se registró diferencias para ninguno de los factores estudiados. Se indica que los mayores valores los presentaron las plántulas del cultivar criollo blanco para 10% de N y el cultivar SB 302 Berentsen para 100% de N. El menor valor lo presentó el cultivar criollo rojo en 10% de N y el criollo azul en 100% de N.

A los 21 días de crecimiento, se muestra que entre los valores de la relación raíz plántula no se encontraron diferencias para los diferentes factores. Todos los cultivares al 10% de N se encuentran por encima de los valores de las plántulas bajo la aplicación de 100% de N, a excepción del cultivar rojo.

Después de los 28 días de desarrollo de las plantas de maíz se observa que entre los valores de la relación raíz plántula existen diferencias significativas ($p=0.000$) para el factor dosis de N. Cabe mencionar que todos los cultivares al 100% de N

se encuentran por encima de los valores de las plántulas bajo la aplicación de 10% de N.

A los 35 días crecimiento del maíz de las plantas se muestra que no existen diferencias para ninguno de los factores estudiados. Cabe resaltar que el cultivar criollo azul respondió mejor al 10% y al 100% de N. En contraste que los menores valores los registró el cultivar criollo rojo en 10% y el cultivar SB 302 Berentsen en 100% de N.

Se calculó la desviación estándar (σ) lo cual según Mendenhall y Reinmuth (1981), se utiliza para cuantificar un intervalo de confianza o límite de dispersión, dentro del cual los Xi incluidos se consideran cercanos a la media mientras que fuera de éste se les considera alejado.

Así mismo, se obtuvo el coeficiente de variación (CV), el cual, es una medida que representa la dispersión relativa de un conjunto de datos, que se calcula dividiendo la desviación estándar del conjunto de datos entre su media aritmética y se expresa generalmente en términos porcentuales (Suarez, 2010). Estas dos medidas de variabilidad se utilizaron para el análisis de los experimentos de rollo de papel a los 14, 21,28 y 35 días, y se encuentran en los apéndices 3, 4, 5, 6 respectivamente.

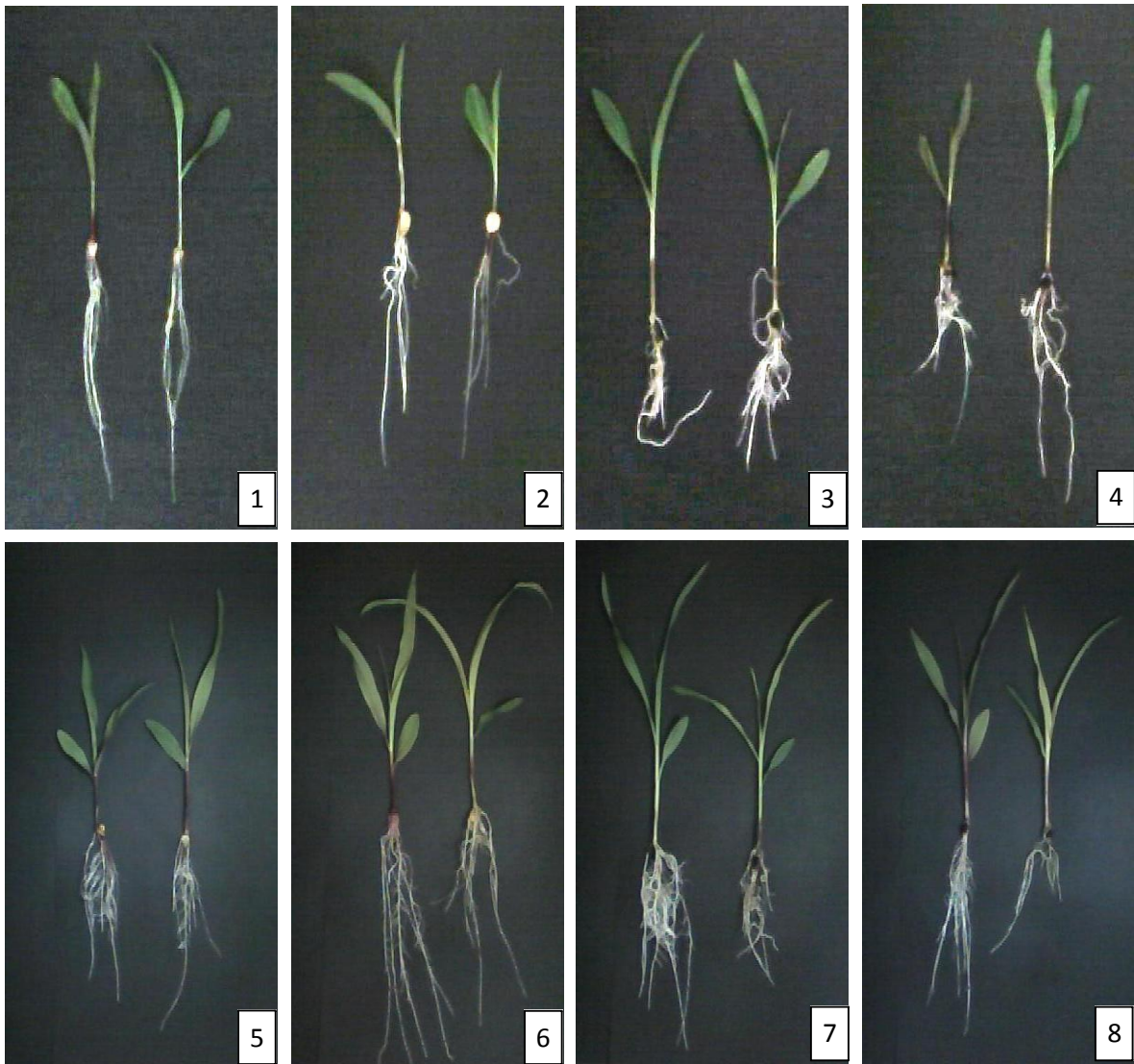


Figura 21. Plántulas de maíz cultivadas en solución nutritiva de Hoagland y Arnon (1950), En cada imagen, del lado izquierdo se muestran las plántulas cultivadas en 10% de N, y del lado derecho las plántulas en 100% de N. Las plántulas a los 14 días de crecimiento: 1 –Variedad SB 302 Berentsen, 2 – Criollo blanco, 3 – Criollo azul y 4 – Criollo rojo. Las plántulas a los 21 días de germinación: 5 –Variedad SB 302 Berentsen, 6 –Criollo blanco, 7 – Criollo azul y 8 – Criollo rojo.

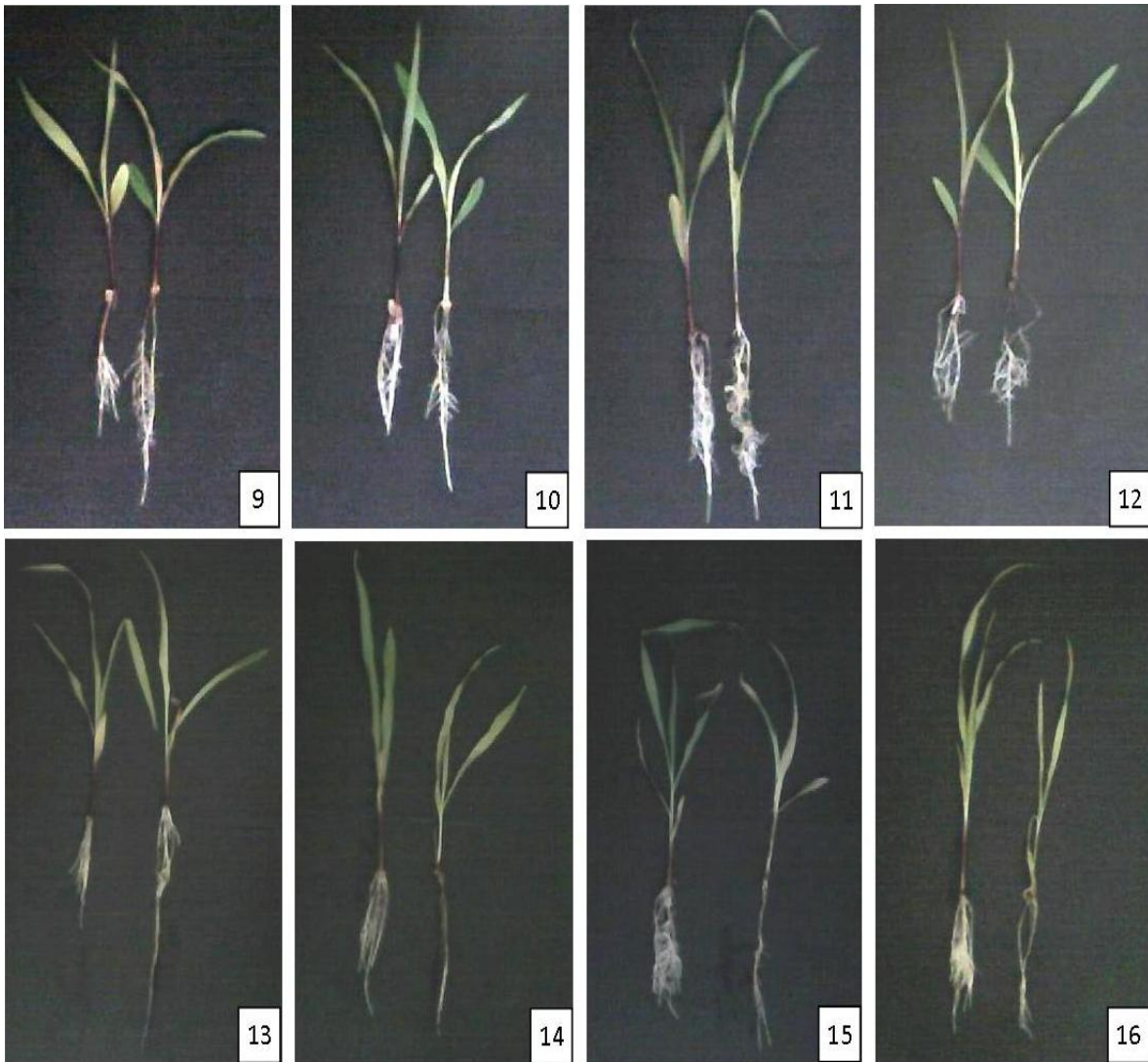


Figura 22. Plántulas de maíz cultivadas en solución nutritiva de Hoagland y Arnon (1950), En cada imagen, del lado izquierdo se muestran las plántulas cultivadas en 10% de N, y del lado derecho las plántulas en 100% de N. Las plántulas a los 28 días de crecimiento: 9 – Variedad SB 302 Berentsen, 10 – Criollo blanco, 11 – Criollo azul y 12 – Criollo rojo. Las plántulas a los 35 días de germinación: 13 – Variedad SB 302 Berentsen, 14 – Criollo blanco, 15 – Criollo azul y 16 – Criollo rojo.

El análisis de los resultados estadísticos de las variables en estudio de maíz en los ensayos de 42 días de crecimiento aplicando la técnica de raíz flotante se muestra de la figura 23 a la 34.

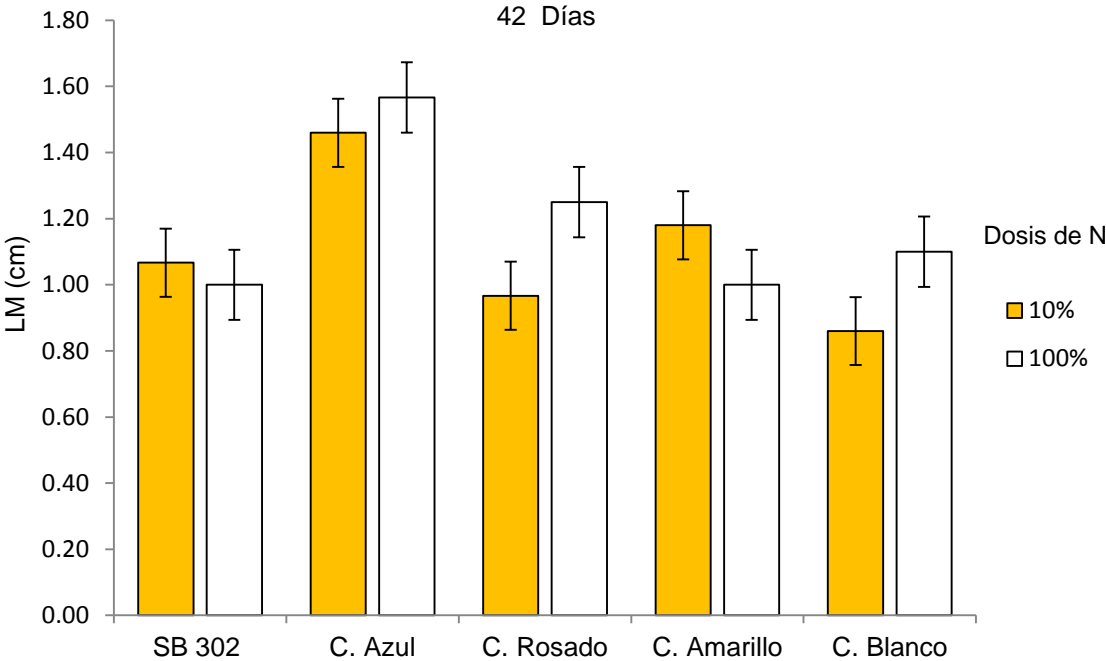


Figura 23. Longitud de mesocótilo (cm).

En la figura 23 se muestra que a los 42 días de crecimiento de las plántulas no presento diferencias para factor dosis y cultivar. La mayoría de los cultivares al 100% de N se encuentran por arriba de los valores de los de 10% de N. Se puede observar que los mejores valores medios los presento el cultivar criollo azul (Atlixco) para ambas dosis de nitrógeno. Los menores valores los obtuvo el cultivar criollo blanco (Hueyapan) para 10% de N.

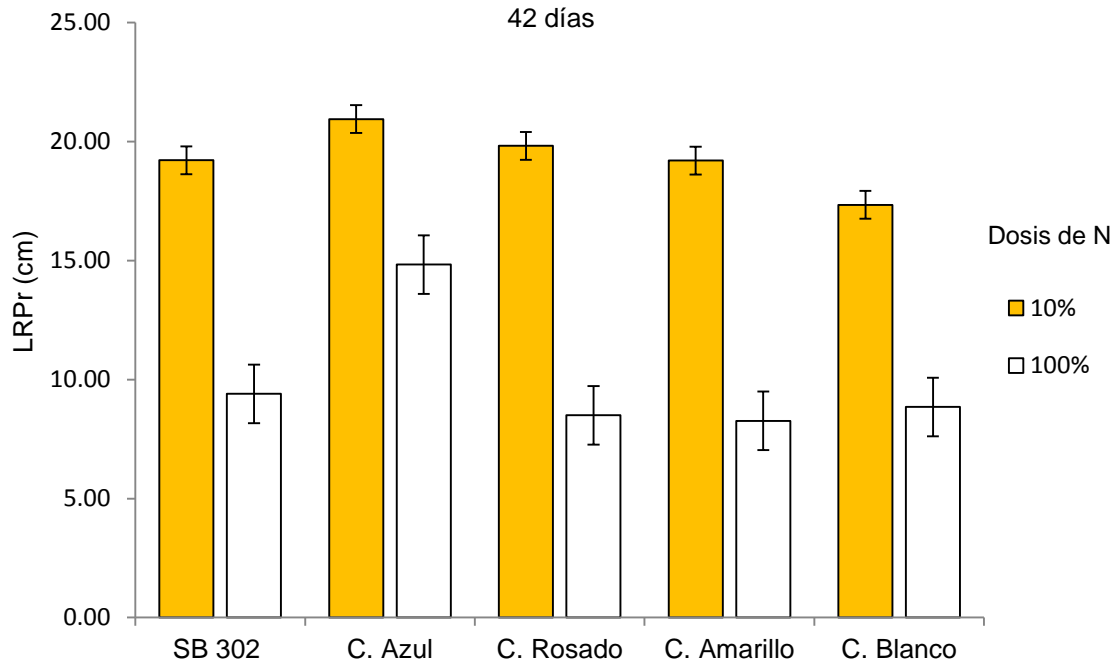


Figura 24. Longitud de la raíz primaria (cm).

En la figura 24 se observa que a los 42 días de crecimiento de las plantas existen diferencias ($p=0.000$) entre los valores de la longitud de la raíz primaria de las plantas para el factor dosis, respecto al factor cultivar no se muestran diferencias. Se puede notar que las plantas en 10% de N respondieron mejor en comparación con las cultivadas en 100% de N. Cabe resaltar que el mayor valor de la longitud de la raíz primaria lo presentó el criollo azul (Atlixco) en ambas dosis de N.

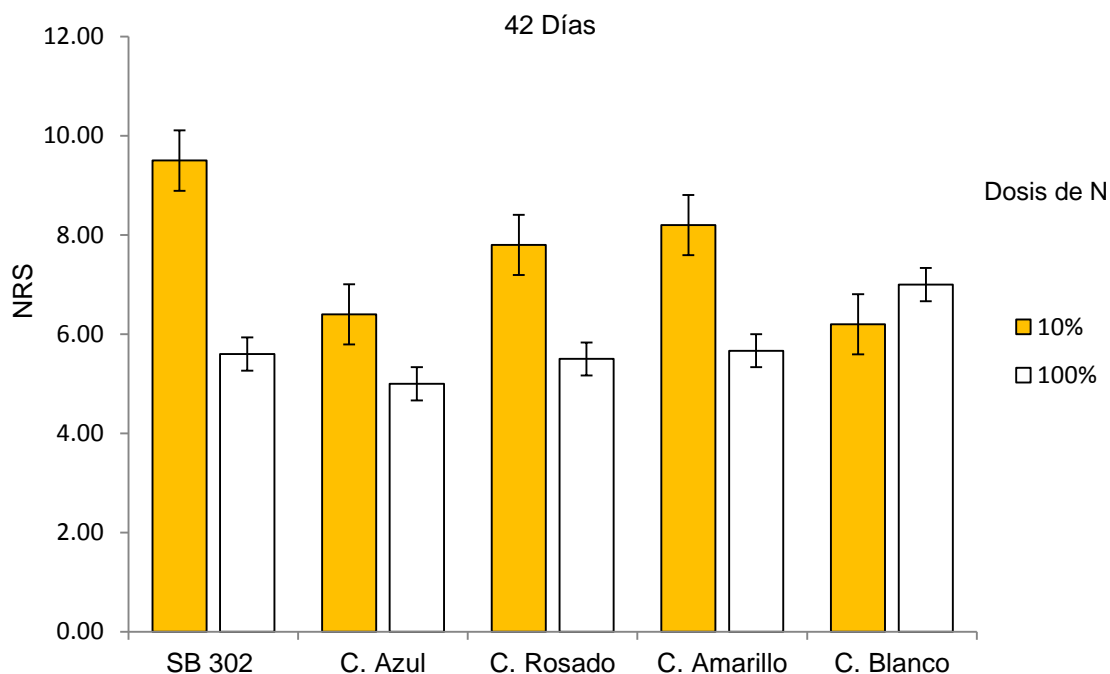


Figura 25. Número de raíces secundarias.

En la figura 25 se nota que a los 42 días no se registró diferencias entre los valores del número de raíces secundarias. Se denota que los cultivares al 10% se encuentran por encima de los valores de los de 100% de N a excepción del cultivar criollo blanco (Hueyapan). Cabe señalar que los mejores valores medios para el 10% de N los presentó el cultivar SB 302 Berentsen, para 100% los obtuvo el cultivar criollo blanco (Hueyapan). En contraste los menores valores tanto para 10% como para 100% de N los obtuvo el cultivar criollo blanco.

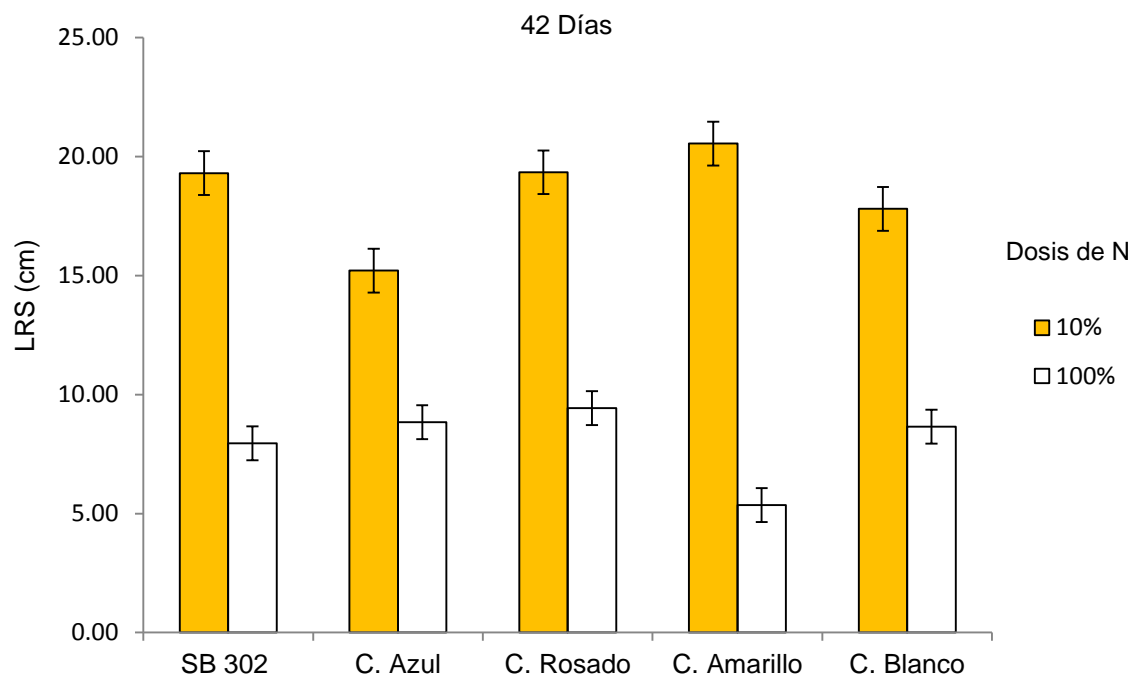


Figura 26. Longitud de raíces secundarias (cm).

En la figura 26 se advierte que existen diferencias significativas entre los valores medios de la longitud de raíces secundarias ($p=0.001$). A pesar de que estas diferencias solo se presentaron para el factor dosis. Se puede señalar que todos los valores de los cultivares al 100% se encuentran por debajo de los valores de las plántulas al 10% de N. Los mejores valores medios al 10% los presentó el cultivar criollo amarillo (Hueyapan), para el 100% el cultivar criollo rosado (Atempan). Mientras que los menores valores medios para 10% los registró el cultivar criollo azul (Atlixco) y el cultivar criollo amarillo (Hueyapan) al 100% de N.

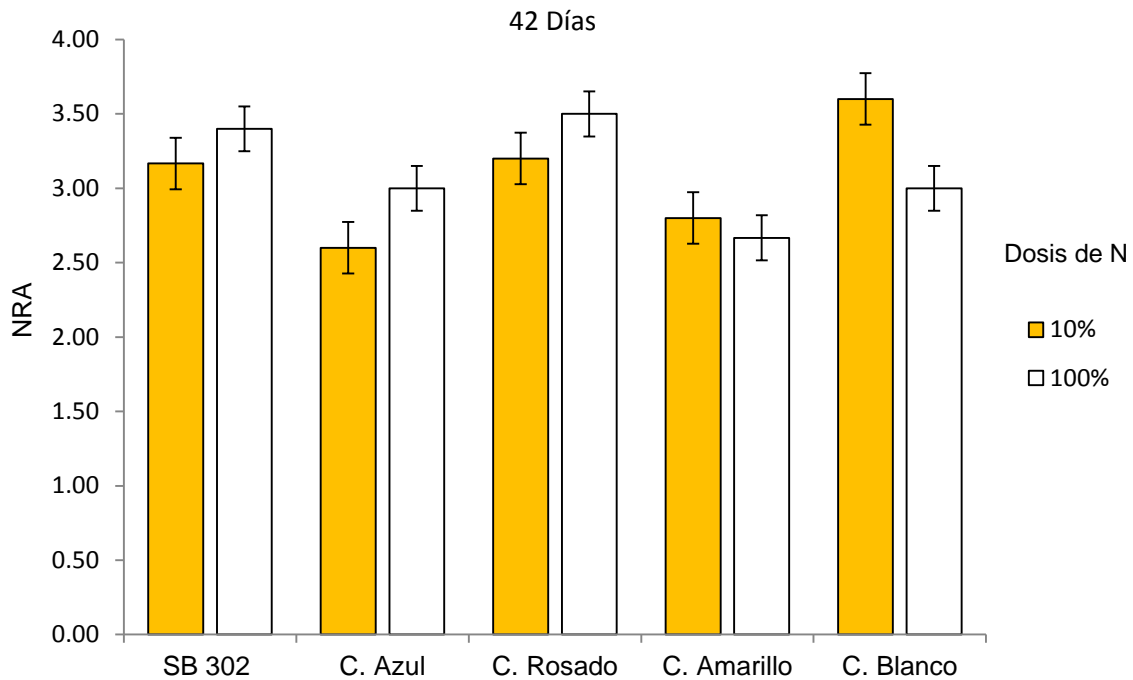


Figura 27. Número de raíces adventicias.

En la figura 27 se denota que entre los valores de número de raíces adventicias no presento diferencias para los dos factores evaluados. Los mejores valores medios los presento el cultivar criollo blanco (Hueyapan) para el 10% de N, y para el 100% el criollo rosado (Atempan). En contraste los menores valores medios los presentaron los cultivares criollo azul (Atlixco) y el criollo amarillo (Hueyapan) para ambas dosis de N.

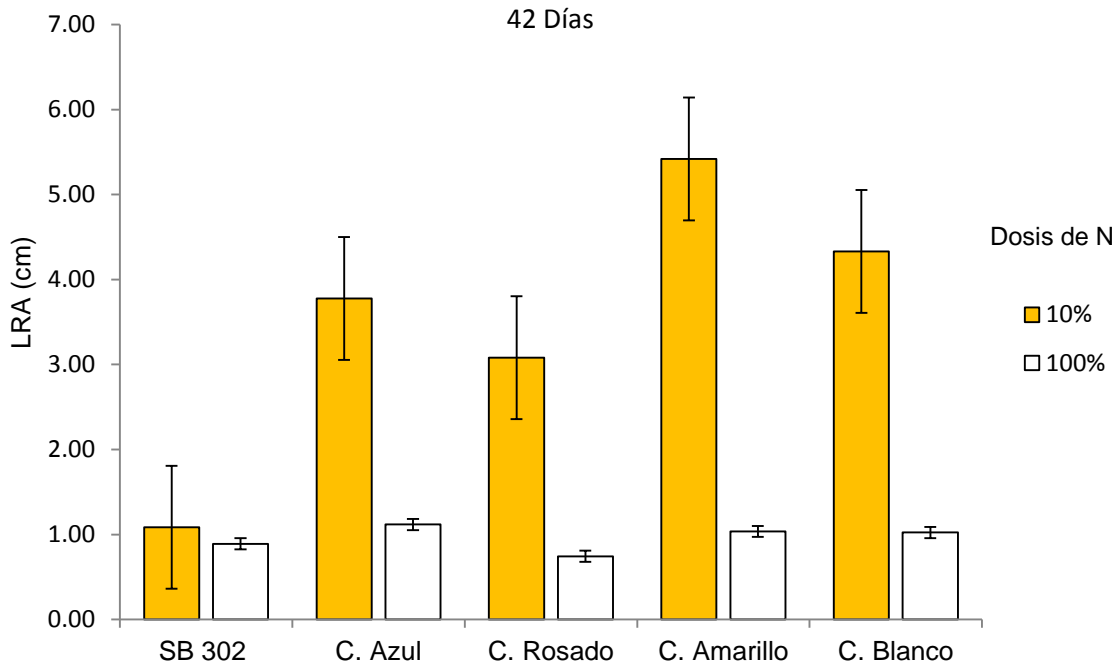


Figura 28. Longitud de raíces adventicias (cm).

En la figura 28 se distingue que entre los valores de la longitud de raíces adventicias existen diferencias significativas ($p=0.020$) para el factor dosis. Los cultivares de la dosis al 10% de N presentaron mejores valores comparados con los cultivares al 100% de N. Nótese que los mayores valores medios para el 10% de N las presentó el criollo amarillo (Hueyapan). Por otro lado los menores valores medios los exhibió el cultivar SB 302 Berentsen para el 10% de N, y el criollo rosado (Atempan) para el 100% de N.

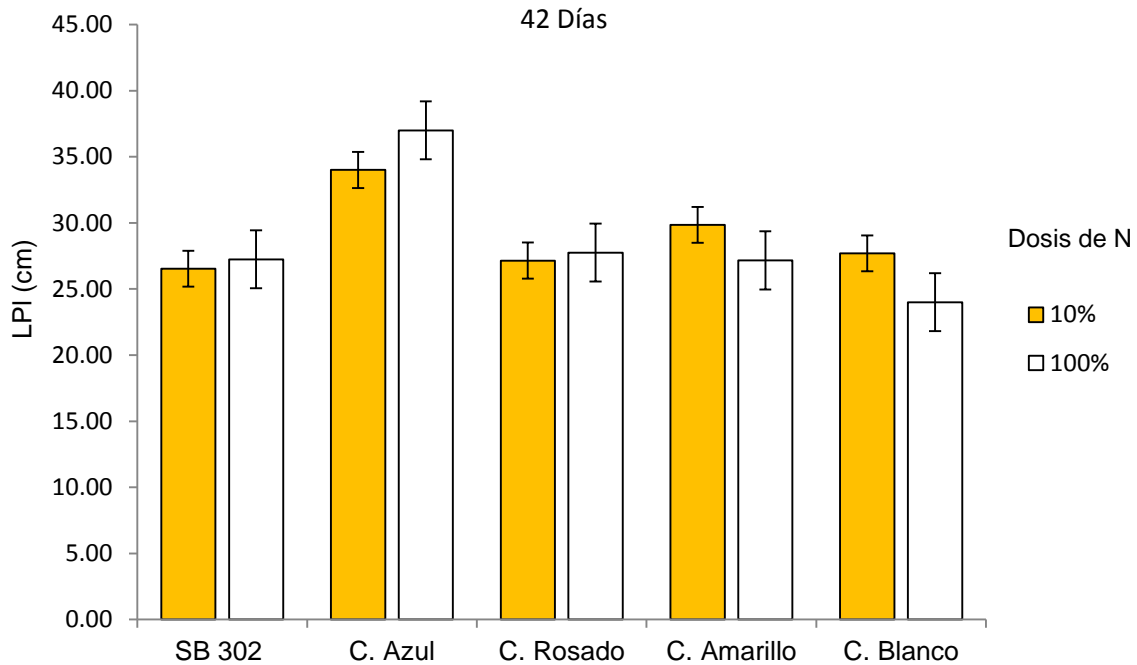


Figura 29. Longitud de la planta (cm).

En la figura 29 se registra que los valores de la longitud de la planta mostraron diferencias ($p=0.034$). No obstante, estas diferencias sólo se presentaron para el factor cultivar. El criollo azul (Atlixco) presentó los mejores valores tanto en 10% como en 100% de N. Mientras que los cultivares que no respondieron de la mejor manera en ambas dosis de N fueron SB 302 Berentsen y el criollo blanco (Hueyapan) respectivamente.

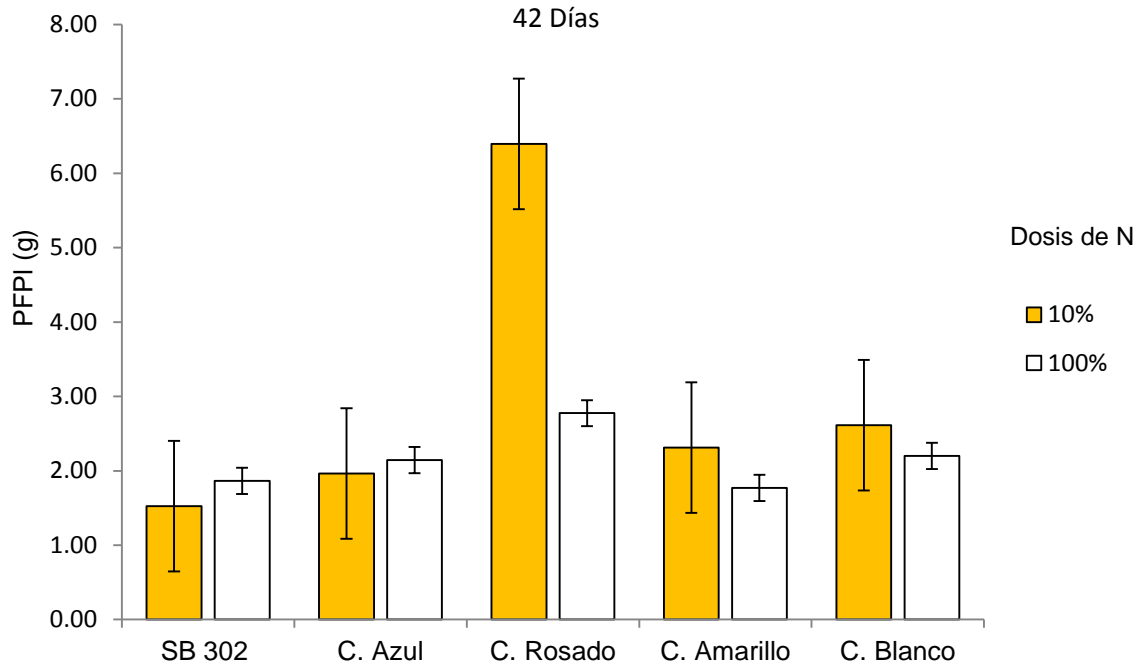


Figura 30. Peso fresco de la plántula (g).

En la figura 30 se observa que entre los valores obtenidos en el peso fresco de la plántula no existen diferencias para ninguno de los dos factores estudiados. Cabe señalar que los mejores valores en 10% y 100% de N los presentaron los cultivares criollo rosado (Atempan). Por el contrario el cultivar mostro el menor valor medio fue la variedad SB 302 Berentsen para ambas dosis de N.

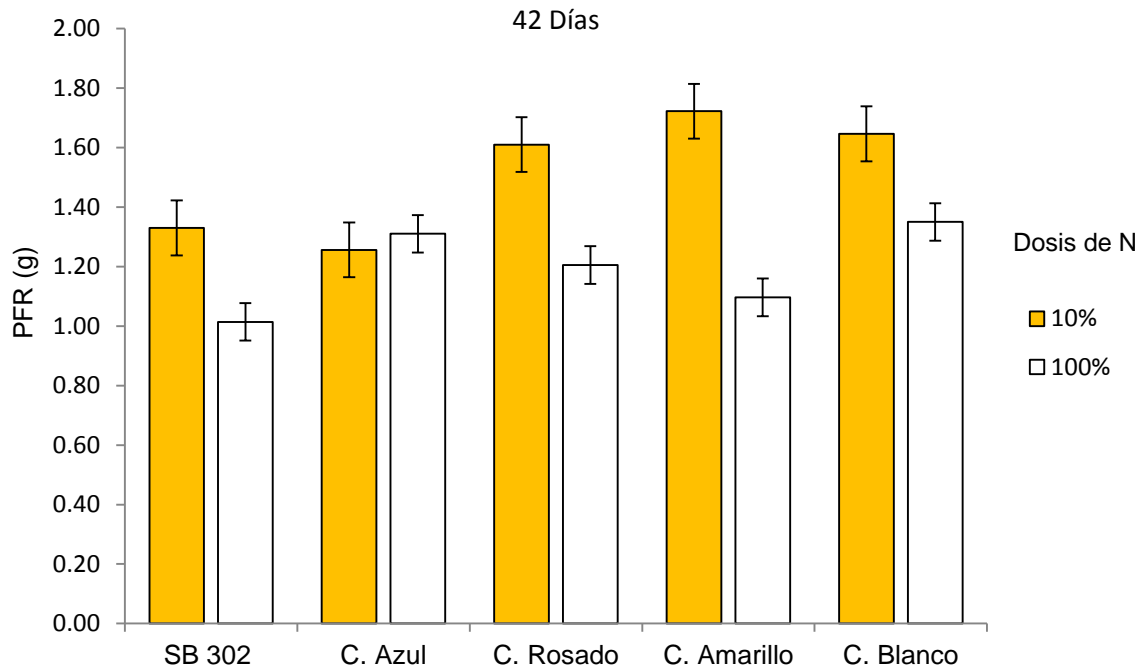


Figura 31. Peso fresco de la raíz (g).

En la figura 31 se observa que entre los valores del peso fresco de la raíz existen diferencias ($p=0.044$) para el factor dosis. Los cultivares que mostraron los mayores valores fueron el cultivar criollo amarillo (Hueyapan) para el 10% de N, y el criollo blanco (Hueyapan) para el 100% de N. En contraste, el menor valor lo obtuvo el cultivar criollo azul (Atlixco) para el 10% de N.

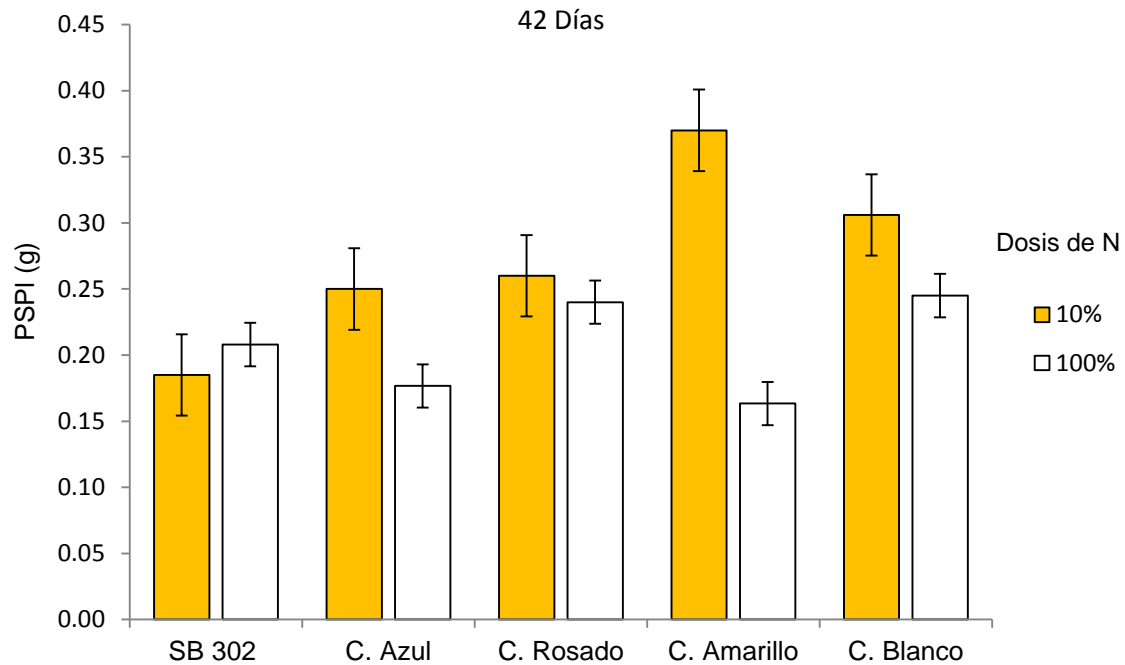


Figura 32. Peso seco de la plántula (g).

En la figura 32 a los 42 días en el peso seco de las plantas no se observan diferencias. Sin embargo, podemos rescatar a los cultivares criollo amarillo (Hueyapan) y el criollo blanco (Hueyapan) que fueron los que mostraron una mejor respuesta en ambas dosis de N. En contraparte los cultivares que obtuvieron los menores valores medios fueron el SB 302 Berentsen en 10% de N y el cultivar criollo amarillo (Hueyapan) para 100% de N.

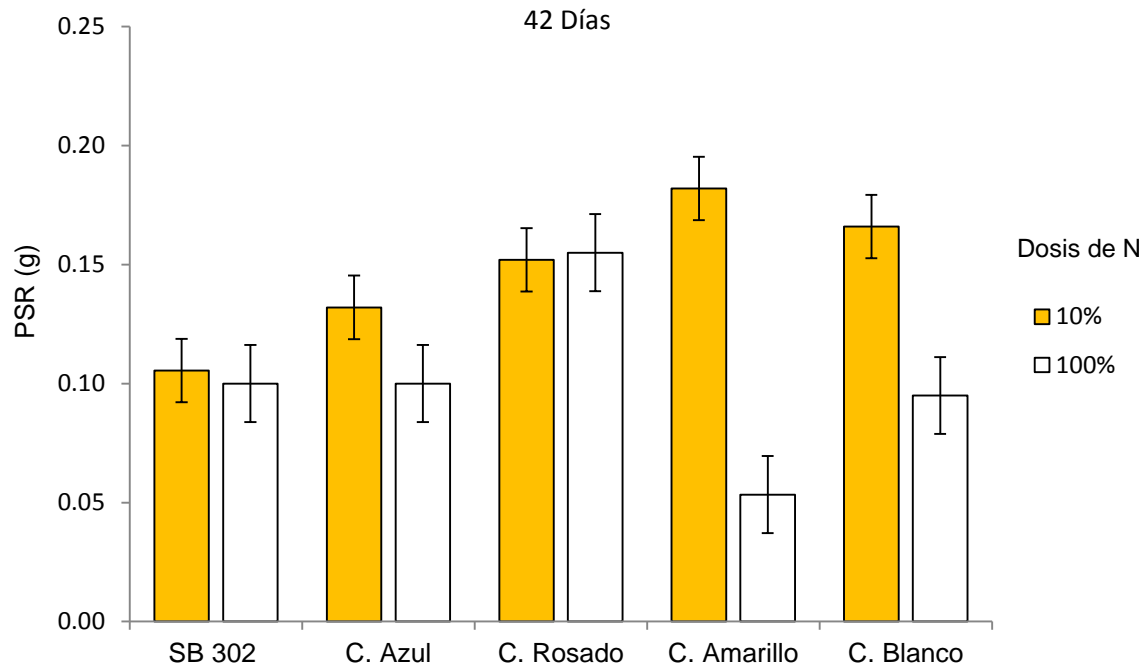


Figura 33. Peso seco de la raíz (g).

En la figura 33 se señala que entre los valores del peso fresco de la raíz no mostramos diferencias para ninguno de los factores estudiados. Los cultivares que mostraron los mayores valores fueron el cultivar criollo amarillo (Hueyapan) para el 10% de N, y el criollo rosado (Atempan) para el 100% de N. En contraste, el menor valor lo obtuvo el cultivar SB 302 Berentsen para el 10% de N y el cultivar criollo amarillo (Hueyapan) en 100% de N.

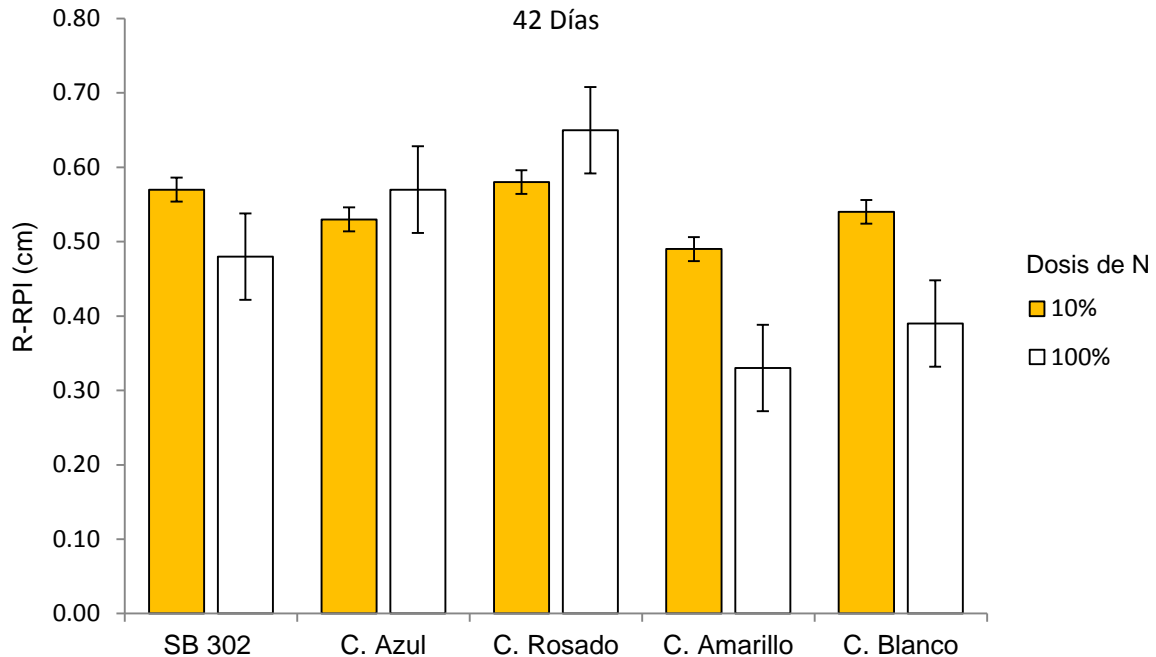


Figura 34. Relación raíz-plántula (cm).

En la figura 34 se muestra que entre los valores de la relación raíz-plántula no mostramos diferencias para ninguno de los factores estudiados. Los cultivares que mostraron los mayores valores fueron el cultivar criollo rosado (Atempan) para ambas dosis de N. En contraste, el menor valor lo obtuvo el cultivar criollo amarillo (Hueyapan) tanto para el 10% como para 100% de N.

De la misma manera que con los datos de los ensayos de la técnica de rollo de papel, para los datos del experimento de sistema de raíz flotante a los 42 días de crecimiento de las plantas de maíz se calculó la desviación estándar (σ) y el coeficiente de variación (CV), los resultados se presentan en el apéndice 7.

Para la interpretación de los resultados de los coeficientes de variación de los ensayos de maíz en ambas técnicas de estudio, se aplicaron las siguientes categorías:

<15% bajo coeficiente de variación.

15% a 30% medio coeficiente de variación.

>30% alto coeficiente de variación.

Los resultados muestran que el cultivar SB 302 Berentsen cultivado con la dosis de 10% de N presentó valores bajos de variación de 6.60%, hasta medios con 23.23% respecto a la variable LRPr. Los parámetros que mostraron CV medios fueron LM, LPI, PFPI, PSPI con 15.71 hasta 28.70%, NRS obtuvo coeficientes medios de 24.29% hasta altos con 37.26%, R-RPI registró rangos de 17.28%, hasta valores altos con 44.28%. Las variables LRS, NRA, LRA, PFR y PSR mostraron coeficientes de variación altos de 32.86 hasta los 90.33%. Respecto a la dosis 100% de N, la LPI obtuvo valores bajos de variación, desde 7.29 a 12.78%. LRPr mostró valores medios de 15.57% hasta altos con 44.23%, PFR también obtuvo rangos medios de 15.38% hasta coeficientes altos con 55.80%. La LPI presentó CV bajos, de 7.29 a 12.78%, las variables que mostraron coeficientes de variación medios fueron: LM, NRA, PFPI, PSPI y R-RPI con valores que oscilan de 15.31 a 28.19%. Los parámetros NRS, LRS, LRA, y PSR registraron coeficientes de variación altos con valores entre 36.45 y 74.12%.

El criollo blanco (Tecamachalco) cultivado en condiciones de 10% de N presentó CV bajos respecto a las variables LRPr y LM con valores desde 6.31% hasta medios con 25.06%. Los parámetros NRS y R-RPI registraron coeficientes de variación medios, con valores que oscilan de 15.49 a 27.22%. Las variables LRS, LPI, PFPI, PFR, PSR presentaron CV medios con medidas que varían de 15.40% hasta valores altos con 48.24%, La LRA obtuvo coeficientes de variación altos de 62.62 hasta 100.26%. Respecto a la dosis 100% de N, la LRS mostró CV bajos de 14.87% hasta coeficientes altos con 81.05%, La LRPr registró coeficientes medios con valores de 15.59% hasta coeficientes altos con 24.54%. Asimismo, las variables NRS, NRA mostraron CV medios con valores de 17.11 hasta valores altos con 86.01%.

Para el cultivar criollo azul (Tecamachalco) al 10% de N los parámetros LM, LPI y R-RPI mostraron CV bajos de 9.91%, a medios con 27.56%. LRPr obtuvo

coeficientes medios 21.54 a 24.22%. Las variables NRA, PFPI, PSPI y PSR obtuvo rangos medios de 18.59% hasta valores altos con 86.42%, las variables NRS, LRS, LRA, presentaron CV altos de 32.86 a 90.33%. Respecto al 100% LM mostró valores bajos de 10.54% a medios con 27.16%, los parámetros LRPr, LRS, NRA, LPI, PSPI y PSR registraron CV medios de 15.07% hasta valores que oscilan a 63.62%, las variables NRS, LRA, PFPI, y PFR presentaron rangos altos de 31.38 a 130.17%.

El cultivar criollo rojo (Tecamachalco) cultivado en condiciones de 10% de N las variables LRPr, LPI y R-RPI presentaron CV bajos de 9.69%, hasta valores medios con 29.71%. Las variables NRS, LRS, NRA, PFPI, PSPI y PSR mostraron rangos medios con valores que varían de 24.33 hasta 67.19%, Los de coeficiente alto son LRA y PFR con valores de 37.86 a los 75.27%. Respecto al 100% LRPr, LM, LPI y PSR mostraron CV bajos que oscilan de 7.97 a los 29.26%. LRPr mostró coeficientes bajos de 13.68% hasta coeficientes altos con 49.37%. Las variables NRS, NRA, LRA, PFR, PSPI y R-RPI exhibieron valores medios de 15.57% hasta CV altos de 124.41%. LRS obtuvo valores de 43.02 a 67.77%.

En relación con las plantas de maíz durante 42 días de crecimiento, los resultados muestran que en condiciones de 10% de N el cultivar SB 302 Berentsen los parámetros LRS NRA y LPI mostraron CV bajos de 10.17 a 12.89%, LRPr, LM, NRS, PFPI, PSPI, PSR y R-RPI exhibieron rangos medios de 16.48 a 26.70. LRA y PFR mostraron CV altos de 31.86 a 92.42%. En relación al 100% de N, las variables LM, LPI y R-RPI obtuvieron coeficientes bajos de 7.07 a 13.86%, los parámetros LRPr, NRS, LRS, NRA, PFPI, PFR y PSPI presentaron rangos medios de 15.50 a 24.42%, LRA Y PSR mostraron valores altos de 33.17 y 48.47% respectivamente.

El cultivar criollo azul (Atlixco) al 10% los parámetros LRPr, LM, LRS, NRA, LPI y R-RPI presentaron rangos medios de 15.83 a 27.61%, NRS, LRA, PFPI, PFR, PSPI y PSR mostraron CV altos de 33.09 a 95.95%. Respecto al 100% los

parámetros LM y R-RPI obtuvieron valores bajos de 7.37 y 5.42 respectivamente, en relación a LRPr, LRS y LPI presentaron rangos medios que oscilan de 26.18 a 28.46%. NRS, NRA, LRA, PFPI, PFR, PSPI y PSR mostraron CV altos de 33.33 a 60.83%.

El criollo rosado (Atempan) al 100% de N, los parámetros LRPr, LRS, NRA, LPI y PFR presentaron valores bajos de 6.49 a 13.98%, las variables LM, LRA, PSPI, PSR y R-RPI mostraron rangos medios de 41.82 a 26.79%, NRS y PFPI obtuvieron CV altos de 30.61 a 141.95%. Al 100% NRS, LRS, LPI, PFPI, PFR y PSPI exhibieron valores bajos de 0.45 a 12.86%, LRPr, LM y NRA obtuvieron valores de 20.20 a 24.96%, LRA, PSR y R-RPI presentaron CV altos de 89.04 a 68.50%.

Criollo amarillo (Hueyapan) al 10% de N los parámetros NRS, LRS, LPI, PFR, PSR obtuvieron valores bajos de 5.45 a los 12.69%, LRPr, NRS, PFPI, PSPI y R-RPI mostraron rangos medios de 15.97 a 17.69%, LM y LRA presentaron CV alta de 30.79 a 39.64%. En 100% LRPr, LM y R-RPI mostraron coeficientes bajos de 5.59 a 10.00%, NRS, NRA, LPI, PFPI, PFR, PSPI y PSR obtuvieron rangos medios que oscilan de 20.19 a 28.72%, LRS y LRA tienen valores altos de 45.48 y 45.15% respectivamente.

Criollo blanco (Hueyapan) en 10% de N, NRS presentó rango de coeficiente medio con 20.41, las variables LRPr, LM, LRS, NRA, LRA, LPI, PFPI, PFR, PSPI, PSR y R-RPI mostraron CV altos de 32.19 a 100.37. Respecto al 100% las variables LM, NRS, LRS, LPI, PFR, PSPI y PSR obtuvieron rangos bajos de 0 hasta 12.86%, LRPr y R-RPI tienen valores medios de 29.56 y 21.76 respectivamente. Los parámetros NRA, LRA y PFPI obtuvieron coeficientes de variación altos de 43.71 a 47.14%.

XIII DISCUSIÓN

Las plántulas de maíz cultivadas durante 14, 21, 28 y 35 días bajo la influencia de 10% y 100% de nitrógeno revelaron un nivel significativo de variación fenotípica en su arquitectura. El cultivar criollo azul (Tecamachalco) presentó la mejor respuesta a la aplicación de 10% de nitrógeno. Mientras que el criollo blanco (Tecamachalco) mostró el mejor resultado al 100% de nitrógeno.

El cultivar criollo azul obtuvo mejores resultados en los parámetros de raíces adventicias a los 21 días de crecimiento, longitud de mesocótilo a los 28 días de germinación. Así como para longitud de raíces secundarias, longitud de la plántula, peso fresco de la plántula, peso fresco de la raíz, peso seco de la plántula, peso seco de la raíz y en la relación raíz plántula a los 35 días de crecimiento. En relación al cultivar criollo blanco tuvo mejores valores en la longitud de raíces secundarias, peso fresco de la plántula, peso fresco de la raíz y peso seco de la plántula a los 21 días de crecimiento. También en los parámetros de longitud de la raíz primaria y en la relación raíz plántula a los 28 días de crecimiento. Estos procedentes de la región templada subhúmeda. Por lo que estos cultivares podrían ser utilizadas potencialmente para mejorar la eficiencia de nutrientes.

Con relación al factor dosis de nitrógeno, entre las plántulas de maíz se muestra que existen diferencias significativas ($p \leq 0.01$) respecto al número de raíces secundarias a los 28 y 35 días de crecimiento, ($p=0.016$) y ($p=0.003$) respectivamente. En los parámetros longitud de raíces secundarias ($p=0.006$), longitud de raíces adventicias ($p=0.012$), peso seco de la plántula ($p=0.00$), peso seco de la raíz ($p=0.006$) y relación raíz-plántula ($p=0.000$) las diferencias se registraron a los 28 días de crecimiento, mientras que para el número de raíces secundarias ($p=0.003$), número de raíces adventicias ($p=0.010$) y longitud de la plántula ($p=0.004$), estas diferencias se presentaron a los 35 días de desarrollo de las plántulas. Cabe mencionar que las plántulas a los 14 días de crecimiento para los parámetros peso seco de la raíz y longitud de la plántula no presentaron

diferencias, esto puede deberse al corto periodo de crecimiento de la plántula, resultados que coincide con lo reportado por Mejía (2014).

Así mismo, se muestra que existen diferencias significativas ($p \leq 0.05$) entre los valores de la longitud de raíz primaria ($p=0.043$) y (0.045) a los 14 y 28 días de desarrollo, respectivamente. En la variable longitud de raíces adventicias ($p=0.042$) las diferencias se muestran a los 21 días de crecimiento. Respecto a la longitud de raíces secundarias ($p=0.042$) y peso seco de la plántula ($p=0.033$) las diferencias se observan a los 35 días de crecimiento. Blanco *et al.* (2004) estudiaron algunos de los componentes del rendimiento del maíz en función de diferentes disponibilidades de N, concluyendo que la producción de materia seca no se incrementó significativamente al aumentar la dosis de nitrógeno.

Respecto al factor cultivar, entre las plántulas de maíz se observa que existen diferencias significativas ($p \leq 0.01$) en relación con la longitud de mesocótilo ($p=0.013$), ($p=0.013$) y (0.007) a los 14, 21 y 28 días de desarrollo, respectivamente. Estos resultados concuerdan con los reportados por Sánchez (2012) quien encontró diferencias en el comportamiento del mesocótilo de plántulas provenientes de tres diferentes regiones ecológicas: fría (Hidalgo), templada (Edo. de México y Tlaxcala) y subtropical (Tamaulipas) asimismo se obtuvieron resultados similares con Mejía (2014) donde observó diferencias significativas en el mesocótilo a los 21 y 28 días de crecimiento de las plántulas, esto podría ser por los cultivares procedentes de la región templada subhúmeda, por lo que podrían ser utilizadas potencialmente para mejorar la eficiencia de nutrientes.

También se obtuvieron diferencias en la longitud de la plántula ($p=0.004$) a los 35 días de crecimiento. De igual manera se muestra que existen diferencias significativas ($p \leq 0.05$) en el peso seco de la plántula ($p=0.033$) a los 35 días crecimiento. Así mismo, se realizó la valoración de los cultivares de maíz respecto a su respuesta a las dosis de 10% y 100% de nitrógeno para los diferentes días de cultivo. Se tomaron en cuenta las variables de peso seco de la raíz y longitud de la

plántula, debido a que sobre estos parámetros influye directamente la concentración de nitrógeno (Blanco et al, 2004; Wang et al., 2003), se presentaron diferencias significativas entre ellos para el método de rollo de papel.

La respuesta típica de las plantas de maíz a bajos niveles de N, es un aumento de la relación raíz-brote (R:S por sus siglas en inglés) mediante el aumento de la superficie de la raíz y la disminución de crecimiento de los brotes (Maizlisch *et al.*, 1980; Chun *et al.*, 2005; Wang *et al.*, 2003; Tian *et al.*, 2005; Kumar *et al.*, 2012; Abdel *et al.*, 2013,). Los hallazgos de nuestro estudio están de acuerdo con los resultados obtenidos anteriormente, cabe mencionar que la mayoría de los cultivares al 10% de N mostraron una mayor alteración en la relación R:S en comparación con el tratamiento del 100% de nitrógeno.

Las plántulas de maíz cultivadas a los 42 días de crecimiento bajo la influencia de 10% y 100% de nitrógeno revelaron un nivel significativo de variación fenotípica en su arquitectura. El cultivar criollo amarillo (Hueyapan) registró la mejor respuesta a la aplicación de 10% de nitrógeno. En tanto que el criollo rosado (Atempan) manifestó el mejor resultado al 100% de nitrógeno.

Respecto al criollo amarillo mostró mejores valores en los parámetros de longitud de raíces secundarias, longitud de raíces adventicias, peso fresco de la raíz, peso seco de la plántula y en el peso seco de la raíz. Para el criollo rosado obtuvo mejores resultados en la longitud de raíces secundarias, número de raíces adventicias, peso fresco de la plántula, peso seco de la raíz y en el parámetro de la relación raíz plántula a los 42 días de crecimiento.

Referente al factor dosis de nitrógeno, entre las plántulas de maíz se observa que a los 42 días de crecimiento existen diferencias significativas ($p \leq 0.01$) en la longitud de raíz primaria ($p=0.000$) y longitud de raíces secundarias ($p=0.001$). Asimismo, se observa que existen diferencias significativas ($p \leq 0.05$) en la longitud de raíces adventicias ($p=0.020$) y peso fresco de la raíz ($p=0.044$). La

implementación de este sistema requiere de instalaciones comunes y de baja inversión (Castagnino, 2004). En el experimento se observó que la respuesta de los cultivares, para el parámetro LPI fue mayor en 100% de N comparado con la dosis del 10% de N en el método de raíz flotante. Resultados que concuerdan con los reportados por Abdel *et al.* (2013) donde dicho parámetros respondió mejor en altas dosis de N.

Relativo al factor cultivar, entre las plántulas de maíz se advierte que a los 42 días de desarrollo existen diferencias significativas ($p \leq 0.05$) en la longitud de la plántula ($p=0.034$).

Por otra parte, (Linkohr *et al.*, 2002) determinaron que la morfología de una raíz vigorosa y un sistema radicular bien distribuido es de gran importancia para la adquisición de nutrientes móviles como NO_3^- , así como nutrientes inmóviles como P y K. Esto es porque el sistema de la raíz está expuesto a más volumen de suelo y, en consecuencia aumenta la absorción de nutrientes (Linkohr *et al.*, 2002).

Algunos autores afirman que las plántulas vigorosas con gran biomasa son excelentes para tener un mejor rendimiento en condiciones de campo (Richer *et al.*, 1997; Bohn *et al.*, 2006; Paschold *et al.*, 2010). Esto, probablemente por el uso eficiente de los nutrientes y el agua por las plántulas. Desde esta perspectiva, los cultivares con un sistema radicular vigoroso podrían contribuir de manera significativa en el manejo de las plantas y la supervivencia de las mismas bajo estrés de N. Por lo que la elección de cultivares de maíz basados en PSR en la etapa de plántulas puede ser con éxito un factor predictivo de la eficiencia en el uso de nutrientes (Kumar *et al.*, 2012).

IX CONCLUSIONES

Las plántulas de maíz cultivadas bajo la influencia de 10% y 100% de nitrógeno revelaron un nivel significativo de variación fenotípica en su arquitectura. Entre las plántulas de maíz cultivadas durante 14, 21, 28 y 35 días, el cultivar criollo azul (Tecamachalco) presentó la mejor respuesta a la aplicación de 10% de nitrógeno. Mientras que el criollo blanco (Tecamachalco) mostró el mejor resultado para 100% de nitrógeno. Entre las plántulas cultivadas a los 42 días, el criollo amarillo (Hueyapan) registró la mejor respuesta al 10% de nitrógeno. En tanto que el criollo rosado (Atempan) tuvo el mejor resultado para 100% de nitrógeno.

En la dosis de nitrógeno las plántulas muestran diferencias significativas ($p \leq 0.01$) en el número de raíces secundarias a los 28 y 35 días. De acuerdo a la longitud de raíces secundarias y adventicias, al peso seco de plántula y raíz y la relación raíz-plántula se registraron a los 28 días, número de raíces adventicias y longitud de la plántula se presentaron a los 35 días. Así mismo para ($p \leq 0.05$) muestra diferencia la longitud de raíz primaria a los 14 y 28 días, en la variable longitud de raíces adventicias se muestra a los 21 días. La longitud de raíces secundarias y peso seco de la plántula las diferencias se observan a los 35 días. Entre las plántulas cultivadas a los 42 días de crecimiento existen diferencias significativas ($p \leq 0.01$) en la longitud de raíz primaria y secundaria. Para el ($p \leq 0.05$) en la longitud de raíces adventicias y peso fresco de la raíz.

Respecto al factor cultivar se observan diferencias significativas ($p \leq 0.01$) en la longitud de mesocótilo a los 14, 21 y 28 días, así como en la longitud de la plántula a los 35 días. Así mismo en el peso seco de la plántula muestra diferencias ($p \leq 0.05$). En las plántulas cultivadas a 42 días existen diferencias ($p \leq 0.05$) en la longitud de la plántula.

El criollo azul (Tecamachalco) presentó coeficientes de variación altos al 10% en el número de raíces secundarias y su longitud al igual en raíces adventicias, para

100% al número de raíces secundarias, longitud de raíces adventicias, peso fresco de la plántula y raíz. Respecto a los 42 días el criollo blanco (Hueyapan) al 10% las variables con coeficientes altos son longitud de raíz primaria, longitud de mesocótilo, longitud de raíces secundarias y adventicias, número de raíces adventicias, longitud de la plántula, peso fresco de la plántula y raíz, peso seco de la plántula y relación raíz-plántula. Con respecto al 100% de N los parámetros número de raíces adventicias, longitud de raíces adventicias y peso fresco de la plántula mostraron coeficientes de variación altos.

X BIBLIOGRAFÍA

- Ansorena, M., J. 1995. El suelo en la agricultura y el medio ambiente (III): Fertilidad del suelo: Disponibilidad y pérdidas de nutrientes. *Viticultura enología profesional*, 41: 34-44.
- Arregui, L.M. and Quemada, M. 2008. Strategies to improve nitrogen use efficiency in winter cereal crops under rainfed conditions. *Agron. J.*, 100: 277-284.
- Attanandana, T. and Yost, R.S. 2003. A site specific nutrient management approach for maize. *Better Crops International*, 17: 3-7.
- Basantes, M. E. 2011. Curso de cultivos. Escuela politécnica del ejército Sangolqui, Ecuador, 97 p.
- Below, F.E. 1995. Nitrogen metabolism and crop productivity. *Handbook of plant and Crop Physiology*, pp. 275-301.
- Below, F.E. 2002. Fisiología, nutrición y fertilización nitrogenada del maíz. *Informaciones Agronómicas*, 54: 3-9.
- Benz, B.F. 1997. Diversidad y distribución prehispánica del maíz mexicano. *Arqueología Mexicana*, 5(25): 17-23.
- Benz, B.F. 2001. Archaeological evidence of teosinte domestication from Guilá Naquitz. *PNAS*, 98(4): 2104-2106.
- Brady, N. C. 1990. *The Nature and properties of soils*. Mc Millan Publishing Company. USA, 9 p.
- Castañeda, Z., Y. 2004. Posibles repercusiones socioeconómicas del maíz transgénico frente a las plagas del cultivo en Jalisco, Sinaloa y Veracruz. Tesis de Doctorado. Colegio de Postgraduados, México, 328 p.
- Castañeda, Z., Y. y García, J.L. 2007. Papel estratégico de la diversidad genética del maíz y situación de los pequeños productores campesinos y los cambios tecnológicos VI Congreso de la Asociación Mexicana de Estudios Rurales, Veracruz, México.
- Castagnino, A. 2004. *Manual de cultivos hortícolas innovadores*. Editorial Hemisferio Sur,. Argentina, p. 6.

- Castro, L., Gavi, R.F., Peña, C.J., Núñez, E.R. y Etchevers, B.J. 2005. Eficiencia de recuperación de N y K de tres fertilizantes de lenta liberación. *Terra Latinoamericana*, 24: 277-282.
- CIMMYT 2013. Etapas de crecimiento del maíz. [Consultado 05 de Marzo 2015]. Disponible en <http://www.cimmyt.org>.
- Cooke, G.W. 1979. Fertilizantes y sus usos. México, 180 p.
- Cordero R., E. de J. 2012. Respuesta de plántulas de maíz (*Zea mays* L.) a la aplicación de diferentes niveles de nitrógeno. Tesis de Licenciatura, Ingeniería en Biotecnología, Universidad Politécnica de Puebla, 44 p.
- Dellinger, A.E., Schmidt, J.P. and Beegle, D.B. 2008. Developing nitrogen fertilizer recommendations for corn using an active sensor. *Agron. J.*, 100: 1546–1552.
- Díaz, M.B. 2001. Siembra directa en el cono sur. Editorial Procisur. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, Uruguay, 347 p.
- Doebley, J., Goodman, M.M. and Stuber, C.W. 1987. Patterns of isozyme variation between maize and Mexican annual teosinte. *Econ. Bot.* 41(2): 234-246.
- Dunja, M.B. 2000. Fertilización del cultivo maíz. FONAIAP DIVULGA No. 65. Enero-Marzo.[Consultado 28 de Junio de 2014]. Disponible en http://sian.inia.gov.ve/repositorio/revistas_tec/FonaiapDivulga/fd65/texto/maiz.htm.
- Dupont, 2009. Agriculture is up to global productivity challenge. [Consultado 24 de Julio 2014]. Disponible en: <http://www.pioneer.com/web/site/portal/menuitem>.
- FAO.2011. FAOSTAT-Statistical databases. México. [Consultado 24 de Mayo 2014]. Disponible en <http://faostat.fao.org/site/351/default.aspx>.
- FAOSTAT. 2009. [Consultado 26 de Mayo 2014]. Disponible en: <http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx>
- FAOSTAT 2010. Base de datos estadísticos de la FAO. [Consultado 27 de Septiembre 2014]. Disponible en <http://faostat.fao.org/>.
- FAOSTAT.2011. Producción, importación y exportación. [Consultado el 03 de Junio de 2014]. Disponible en <http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx>.
- FDA. 1998. Cultivo de maíz. Guía técnica No 33. Primera Ed. Serie Cultivos. República Dominicana.

- Ferraris, N.G., Couretot, A.L. y Toribio, M. 2009. Pérdidas de nitrógeno por volatilización y su implicancia en el rendimiento del cultivo de maíz: Efectos de fuente, dosis y uso de inhibidores. *Informaciones Agronómicas*, 43 p.
- Fundación Chile. 2011. Manual de recomendaciones cultivo de maíz grano. Alimentos y Biotecnología. Santiago Chile, 17 p. [Consultado el 28 de Diciembre de 2014]. Disponible en: http://www.fundacionchile.com/archivos/Manualmaiz_baja.pdf.
- García, L. 2001. Fertilidad y fertilización de suelo Universidad Nacional Agraria. Managua, Nicaragua, 141 p.
- Gallais, A. and Hirel, B. 2004. An approach to the genetics of nitrogen use efficiency in corn. *J. Exp. Bot.* 55: 295-306.
- Guerrero, G.A. 1996. El suelo, los abonos y la fertilización de los cultivos. Ed. Mundi-Prensa. Bilbao, pp. 54-55.
- Hammad, H.M., Ahmad, A., Abbas, F. and Farhad, W. 2012. Optimizing water and nitrogen use for maize production under semiarid conditions. *Turk J Agric For*, 36: 519-532.
- Hellin, J. y Bellon, M. 2007. Manejo de semillas y diversidad del maíz. *LEISA*, 23 p.
- Hoagland, D.R. and Arnon, D.I. 1950. The water-culture method for growing plants without soil. California, Agricultural Experiment Station, Circular 347, 32 p.
- IPNI. 2014. Taxonomía del maíz. [Consultado el 13 de Marzo de 2015]. Disponible en: <http://www.ipni.org>.
- Jokela, W.E. and Randall, G.W. 1989. Corn yield and residual soil nitrate as affected by time and rate of nitrogen application. *Agron. J.*, 81: 720-726.
- Jones, J.B. 1998. *Plant nutrition*. CRC Press, USA, 140 p.
- Júnior, M., Corsi, M., Trivelin, P. and Alves, M.C. 2004. Nitrogen recovery and loss in fertilized grass pasture. *Grass and Forage Science*, 59: 80-84.
- Khan, S.A., Mulvaney, R.L., Ellsworth, T.R. and Boast, C.W. 2007. The myth of nitrogen fertilization for soil carbon sequestration. *J. Environ. Qual.* 36: 1821-1832.

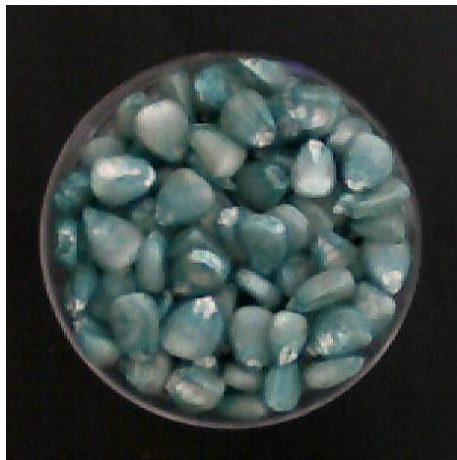
- Kato, Y.1976. Cytological studies of maize (*Zea mays* L.) and teosinte (*Zea mexicana* Schrader Kuntze) in relation to their origin and evolution. Agric. Expt. Sta. Bull., Massachusetts, 635 p.
- Kato, Y., Mapes, C., Mera, L.M., Serratos, J.A. y Bye, R.A. 2009. Origen y diversificación del maíz. Universidad Nacional Autónoma de México, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México, 116 p.
- Ladha, J.K., Pathak, H., and Krupnik, T.J. 2005. Efficiency of fertilizer nitrogen in cereal production: Adv. Agron 87: 85-156.
- Malpú, 2000. Fertilizaciones del cultivo de maíz. Agro estrategias, pp.1-2 [Consultado el 9 de Febrero de 2014]. Disponible en:<http://www.agroestrategias.com/pdf/Cultivos%20%20Fertilizacion%20de%20Maiz.pdf>.
- Mejía, P., C. 2014. Respuesta de plántulas de maíz (*Zea mays* L.) a la aplicación de niveles contrastantes de nitrógeno. Tesis de Licenciatura, Escuela de Biología, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, 81 p.
- Mendenhall, W. y Reinmuth, J.E. 1981. Estadística para administración y economía. Grupo Editorial Iberoamericana, México, 707 p.
- Monsanto, 2008. New Initiative Focuses on Water Quality Improvement in the Mississippi River Basin and Gulf of Mexico. [Consultado 24 de Julio 2014]. Disponible en: <http://www.pmewswire.com/cop/114341.html/>.
- Moraditochae, M., Motamed, M.K., Azarpour, E., Danesh, R.K. and Bozorgi, H.R. 2012. Effects of nitrogen fertilizer and plant density management in corn farming. ARPN Journal of Agricultural and Biological Science, 7(2): 133-137.
- Morison, J.I., Baker, N.R., Mullineaux, P.M. and Davies, W.J. 2008. Improving water use in crop production. Phil. Trans. R. Soc. B., 363: 639–658.
- OCDE. 2003. Consensus document on the biology of *Zea mays* sub sp. *mays* (maize). Series on Harmonization of Regulatory Oversight in Biotechnology, No. 27.
- Ortega, P.R. 2003. La diversidad del maíz en México. Sin Maíz no hay País. Consejo Nacional para la Cultura y las Artes, Dirección General de Culturas Populares e Indígenas, México, pp. 123-154.

- Overman, A.R. and Scholtz III, R.V. 2002. Corn response to irrigation and applied nitrogen. *Soil Sci. Plant Anal*, 33: 3609-3619.
- Paliwal, L., Granados, G., Renée, L. and Violic, D. 2001. El maíz en los trópicos: mejoramiento y producción. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 392 p.
- PROEMAR. 2010. Colegio de postgraduados. Montecillo, Estado de México. [Consultado el 24 de Julio 2014]. Disponible en: <http://www.firco.gob.mx/POTTtransparencia/Documents/Estudios/9EvaluaciondeResultados-PROEMAR2009.pdf>.
- Raun, W.R. and Johnson, G.V. 1999. Improving nitrogen use efficiency for cereal production, *Agron. J.*, 91: 57-351.
- Reyes, C.P. 1990. El maíz y su cultivo. Ed. A.G.T. México, pp 2-22.
- Roberts, L.M., Grant, U.C., Ramírez, R.E., Hatheway, W.H., Smith, D.L. and Mangelsdorf, P.C. 1957. National Academy of Sciences. National Research Council, Publication, 510 p.
- Rodríguez, F. 1982. Fertilización y nutrición vegetal. Ed. A.G.T. México, 157 p.
- SAGAR. 1997. Situación actual y perspectiva de la producción de maíz en México 1990-1997, México, pp. 5-6.
- SAGARPA, 2007. [Consultado el 23 de Agosto de 2014]. Disponible en: <http://www.sagarpa.gob.mx/cgcs/boletines/2007/agosto/conferencia070807a.pdf>
- Salcedo, S., García, J.A. y Sagarnaga, M. 1993. Política agrícola y maíz en México: hacia el libre comercio norteamericano en *Comercio Exterior*, vol. 43, núm. 4, México.
- Sanchez, P. A. 1976. Properties and management of soils in the tropics. New, USA. 618 p.
- Shanahan, J.F., Kitchen, N.R., Raun, W.R. and Schepers, J.S. 2008. Responsive in season nitrogen management for cereals. *Comput. Electron. Agric.*, 61: 51-62.
- SIAP. 2014. Cierre de la producción agrícola por estado. [Consultado el 24 de Mayo de 2014]. Disponible en: <http://www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agricola-por-estado/>.

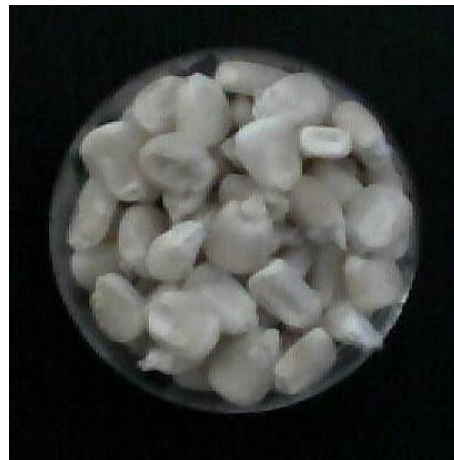
- SIAP. 2011. Sistema de información del sector agrícola: 1980- 2010. México. [Consultado el 24 de Mayo de 2014]. Disponible en <http://www.siap.sagarpa.gob.mx>.
- SIAP. 2013. Cierre de la producción agrícola por estado. [Consultado el 15 de enero de 2014]. Disponible en línea en: <http://www.siap.gob.mx>.
- Suárez, M. 2012. Interaprendizaje de estadística básica. Universidad Técnica del Norte, 1 p.
- Taiz, L. y Zeiger, E. 2006. Filosofía vegetal, Vol. 1, Castellón de la plana. 121 p.
- Tisdale, L.S. y Nelson, W.L. 1982. Fertilidad de los Suelos y Fertilizantes. Ed. UTHEA, México, 760 p.
- Thompson, S. 2011. Los Mercados de Productos Básicos y las Proyecciones Agropecuarias a 2020 del USDA. XI Foro de Expectativas del Sector Agroalimentario y Pesquero México, D.F, 12 p.
- Wang, Z.R., Rui, Y.K., Shen, J.B. and Zhang F.S. 2008. Effects of N fertilizer on root growth in *Zea mays* L. seedlings. Spanish Journal of Agricultural Research, 6(4): 677-682.
- Woll, K., Borsuk, L., Stransky, H., Nettleton, D., Schnable, P.S. and Hochholdinger, F. 2005. Isolation characterization and pericycle specific transcriptome analyses of the novel maize (*Zea mays* L.) lateral and seminal root initiation mutant rum1. Plant Physiol., 139: 1255-1267.
- Yasari, E., Noori, M. and Haddadi, M. 2012. Comparison of seed com Single crosses SC 704 and SC 770 response to different plant densities and nitrogen levels. Journal of Agricultural Science, 4(5): 263-272.

XI APÉNDICE

Apéndice 1. Semillas de maíz utilizadas en los ensayos de 14, 21, 28 y 35 días de crecimiento aplicando la técnica de rollo de papel.



SB 302 Berentsen



Criollo Blanco (Tecamachalco).

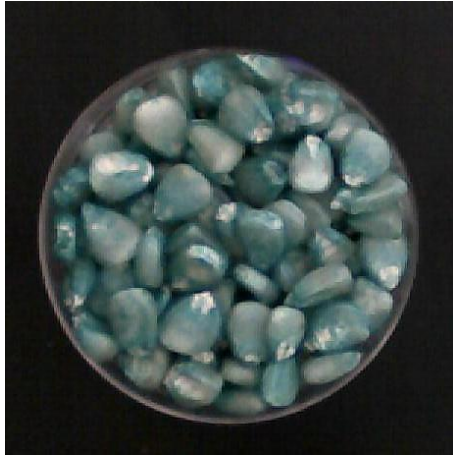


Criollo Azul (Tecamachalco).



Criollo Rojo (Tecamachalco).

Apéndice 2. Semillas de maíz utilizadas en el ensayo de 42 días de crecimiento aplicando la técnica de raíz flotante.



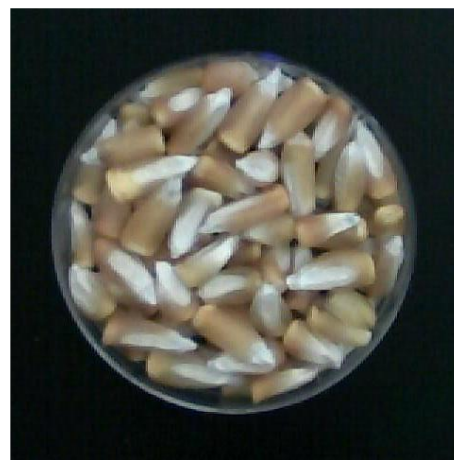
SB 302 Berentsen



Criollo Azul (Atlixco).



Criollo Rosado (Atempan).



Criollo Amarillo (Hueyapan).



Criollo Blanco (Hueyapan).

Apéndice 3. Desviación estándar y coeficiente de variación de los cultivares de maíz a los 14 días de crecimiento.

Variables	Dosis de N	Cultivares							
		SB 302 Berentsen		Criollo Blanco		Criollo Azul		Criollo Rojo	
		DE	C. V.	DE	C. V.	DE	C. V.	DE	C. V.
LRPr	10%	1.52	10.13	1.07	6.31	3.12	21.54	2.18	12.99
	100%	2.23	15.57	2.40	15.59	1.63	15.07	1.51	10.54
LM	10%	0.14	16.22	0.10	8.85	0.18	9.91	0.14	13.13
	100%	0.12	12.75	0.05	5.34	0.34	21.61	0.23	21.51
NRS	10%	1.10	27.39	1.22	27.22	2.00	50	1.75	47.76
	100%	1.22	27.22	0.84	23.90	1.55	51.64	0.52	19.36
LRS	10%	21.54	63.88	16.44	33.83	20.85	52.85	18.12	62.82
	100%	9.83	25.42	4.36	14.87	1.74	18.49	11.13	43.02
NRA	10%	1.17	100.20	1.10	27.39	1.94	50.63	1.38	39.38
	100%	1.37	40.99	1.10	36.51	1.76	39.13	1.63	44.54
LRA	10%	1.14	107.33	2.00	74.44	5.88	86.87	1.60	55.76
	100%	2.37	47.21	2.81	127.86	2.04	130.17	6.56	97.61
LPI	10%	2.02	18.16	4.54	48.24	2.78	18.75	2.21	18.83
	100%	1.66	11.08	1.94	17.12	3.74	24.96	2.98	20.07
PFPI	10%	0.14	32.56	0.11	18.98	0.16	22.36	0.20	41.05
	100%	0.07	11.42	0.18	35.03	0.19	31.38	0.14	23.55
PFR	10%	0.14	51.98	0.07	15.40	0.06	10.71	0.14	40.11
	100%	0.06	15.38	0.15	43.29	0.15	36.39	0.11	27.16
PSPI	10%	0.02	36.51	0.02	29.50	0.02	24.94	0.02	25.82
	100%	0.01	19.36	0.04	66.80	0.03	41.82	0.01	18.23
PSR	10%	0.02	54.39	0.02	23.77	0.01	18.84	0.01	35.33
	100%	0.01	22.27	0.02	41.83	0.02	41.06	0.01	31.53
R-RPI	10%	0.21	30.40	0.26	25.72	0.10	11.10	0.16	22.63
	100%	0.12	17.35	0.24	29.70	0.18	22.26	0.23	29.37

Apéndice 4. Desviación estándar y coeficiente de variación de los cultivares de maíz a los 21 días de crecimiento.

Variables	Dosis de N	Cultivares							
		SB 302 Berentsen		Criollo Blanco		Criollo Azul		Criollo Rojo	
		DE	C. V.	DE	C. V.	DE	C. V.	DE	C. V.
LRPr	10%	3.95	23.23	2.73	13.41	3.63	21.99	1.95	9.69
	100%	4.80	30.57	3.66	17.40	3.08	30.92	3.30	24.09
LM	10%	0.14	15.71	0.17	15.90	0.45	27.56	0.20	19.03
	100%	0.17	16.73	0.12	12.98	0.41	27.16	0.08	7.97
NRS	10%	1.03	44.26	0.98	20.34	1.51	45.17	1.33	31.90
	100%	2.00	50.00	3.39	78.14	1.72	54.39	1.60	50.59
LRS	10%	18.32	61.77	22.94	27.59	24.98	45.76	15.81	24.55
	100%	22.92	55.10	53.63	81.05	18.04	63.62	29.30	67.77
NRA	10%	0.52	14.08	0.75	14.57	0.84	18.59	1.17	28.06
	100%	0.52	11.92	1.03	23.83	1.55	38.73	0.75	15.57
LRA	10%	14.26	67.33	16.90	62.62	15.13	47.83	13.77	50.30
	100%	7.80	61.65	15.03	84.73	7.11	90.91	5.39	29.23
LPI	10%	4.10	21.76	3.58	16.95	3.45	14.33	3.30	15.11
	100%	2.52	12.78	5.26	22.43	7.17	32.03	2.10	9.29
PFPI	10%	0.20	23.81	0.27	23.90	0.47	37.03	0.33	32.98
	100%	0.20	19.59	0.47	30.88	0.48	48.90	0.09	9.23
PFR	10%	0.18	35.10	0.29	32.87	0.43	40.75	0.30	37.86
	100%	0.20	31.92	0.38	36.70	0.29	45.44	0.11	16.73
PSPI	10%	0.02	26.57	0.02	14.09	0.06	38.89	0.03	32.30
	100%	0.02	23.31	0.05	36.63	0.04	46.63	0.01	16.22
PSR	10%	0.02	32.86	0.03	25.90	0.05	44.02	0.03	31.90
	100%	0.02	36.45	0.04	43.86	0.03	47.77	2.02	228.84
R-RPI	10%	0.11	17.28	0.12	15.49	0.14	18.80	0.18	23.29
	100%	0.13	20.70	0.12	18.42	0.09	13.38	25.24	229.90

Apéndice 5. Desviación estándar y coeficiente de variación de los cultivares de maíz a los 28 días de crecimiento.

Variables	Dosis de N	Cultivares							
		SB 302 Berentsen		Criollo Blanco		Criollo Azul		Criollo Rojo	
		DE	C. V.	DE	C. V.	DE	C. V.	DE	C. V.
LRPR	10%	0.95	6.60	2.47	18.97	2.65	18.33	2.60	15.56
	100%	4.00	18.76	4.48	20.48	5.95	28.82	3.06	17.50
LM	10%	0.11	10.95	0.24	25.06	0.35	18.12	0.54	45.03
	100%	0.18	16.77	0.26	20.71	0.48	23.44	0.18	16.43
NRS	10%	1.86	24.29	1.94	24.78	1.97	31.05	2.68	44.72
	100%	1.33	41.97	1.63	48.99	2.42	55.90	1.75	47.76
LRS	10%	24.63	29.18	28.38	31.35	29.19	34.26	41.61	67.19
	100%	23.88	50.56	31.19	63.93	26.54	50.67	15.82	36.93
NRA	10%	1.51	90.33	1.36	51.23	1.52	43.33	1.47	35.33
	100%	1.03	30.98	2.80	60.10	1.72	24.03	1.86	42.97
LRA	10%	12.94	106.90	9.55	71.16	18.83	111.63	10.55	66.36
	100%	5.31	74.12	4.85	117.34	6.30	61.92	2.70	64.77
LPI	10%	5.95	22.58	4.85	18.97	6.79	23.01	3.93	14.23
	100%	2.53	10.89	3.34	13.63	6.39	18.63	5.78	21.94
PFPI	10%	0.30	28.70	0.53	38.94	0.53	39.38	0.47	44.82
	100%	0.23	21.74	0.29	23.05	0.55	37.64	0.34	25.81
PFR	10%	0.12	18.57	0.36	37.18	0.34	35.67	0.57	72.35
	100%	0.16	29.67	0.13	18.98	0.37	39.06	0.32	44.98
PSPI	10%	0.02	24.69	0.02	21.07	0.05	38.24	0.03	24.11
	100%	0.02	37.56	0.01	17.11	0.04	42.26	0.02	28.50
PSR	10%	0.02	37.56	0.01	17.11	0.04	42.26	0.02	28.50
	100%	0.25	44.28	0.16	21.66	0.19	23.58	0.10	13.68
R-RPI	10%	0.25	44.28	0.16	21.66	0.19	23.58	0.10	13.68
	100%	3.14	28.19	2.94	26.23	3.47	38.77	2.29	24.63

Apéndice 6. Desviación estándar y coeficiente de variación de los cultivares de maíz a los 35 días de crecimiento.

Variables	Dosis de N	Cultivares							
		SB 302 Berentsen		Criollo Blanco		Criollo Azul		Criollo Rojo	
		DE	C. V.	DE	C. V.	DE	C. V.	DE	C. V.
LRPR	10%	2.34	17.27	2.23	15.07	4.50	24.22	1.24	7.94
	100%	7.22	44.23	4.81	24.54	2.47	15.17	6.18	29.26
LM	10%	0.20	20.08	0.15	13.18	0.27	14.40	0.20	20
	100%	0.21	23.31	0.38	30.94	0.19	10.54	0.41	28.52
NRS	10%	2.73	37.26	1.03	16.31	3.44	46.97	2.04	24.99
	100%	1.64	46.95	1.21	33.03	1.63	48.99	1.17	36.92
LRS	10%	47.99	52.83	11.95	17.55	45.81	46.61	41.59	55.51
	100%	22.95	53.23	44.13	77.58	16.64	43.34	21.43	43.91
NRA	10%	1.03	38.73	0.75	23.77	3.60	86.42	1.22	48.99
	100%	0.82	15.31	1.72	33.34	1.87	34.02	1.63	28.82
LRA	10%	8.27	75.62	6.75	100.26	14.39	100.14	7.82	75.27
	100%	6.92	73.37	6.18	86.01	4.73	95.53	12.21	124.41
LPI	10%	3.92	12.99	5.38	19.07	4.48	11.62	4.89	14.65
	100%	1.68	7.29	7.22	30.39	7.00	21.88	3.21	11.04
PFPI	10%	0.26	22.27	0.34	31.65	0.35	19.65	0.33	29.15
	100%	0.14	17.09	0.40	44.80	0.44	33.01	0.52	44.21
PFR	10%	0.31	38.00	0.24	35.07	0.30	20.42	0.42	46.18
	100%	0.35	55.80	0.36	49.96	0.32	34.90	0.37	46.58
PSPI	10%	0.03	21.08	0.03	31.15	0.04	20.52	0.03	24.33
	100%	0.01	15.71	0.03	39.28	0.03	23.57	0.06	52.25
PSR	10%	0.04	45.96	0.03	39.04	0.04	23.71	0.06	51.04
	100%	0.03	50.55	0.03	50.32	0.02	23.29	0.04	49.37
R-RPI	10%	0.18	26.70	0.16	20.51	0.24	24.94	0.25	29.71
	100%	0.27	40.98	0.32	37.32	0.12	14.72	0.32	38.94

Apéndice 7. Desviación estándar y coeficiente de variación de los cultivares de maíz a los 42 días de crecimiento.

Variables	Dosis de N	Cultivares									
		SB 302 Berentsen		Criollo Azul		Criollo Rosado		Criollo Amarillo		Criollo Blanco	
		DE	C V	DE	C V	DE	C V	DE	C V	DE	C V
LRPr	10%	4.03	20.97	3.32	15.83	1.29	6.49	3.33	17.33	3.10	100.37
	100%	1.70	18.10	3.88	26.18	2.12	24.96	0.46	5.59	2.62	29.56
LM	10%	0.23	21.92	0.36	24.50	0.13	14.82	0.36	30.79	0.22	101.55
	100%	0.07	7.07	0.12	7.37	0.35	28.28	0.10	10.00	0.14	12.86
NRS	10%	2.07	21.83	2.19	34.23	2.39	30.61	0.45	5.45	2.49	20.41
	100%	0.89	15.97	1.73	34.64	0.71	12.86	1.53	26.96	0.00	0.00
LRS	10%	2.21	11.43	2.88	18.97	1.86	9.59	2.35	11.45	4.48	81.58
	100%	1.94	24.42	2.51	28.46	0.04	0.45	2.44	45.48	1.05	12.17
NRA	10%	0.41	12.89	0.55	21.07	0.45	13.98	0.45	15.97	0.89	81.65
	100%	0.55	16.11	1.00	33.33	0.71	20.20	0.58	21.65	1.41	47.14
LRA	10%	1.00	92.45	3.62	95.95	0.75	24.22	2.15	39.64	4.06	59.25
	100%	0.43	48.47	0.48	42.74	0.44	68.50	0.47	45.15	0.53	51.74
LPI	10%	2.78	10.47	6.10	17.94	3.74	13.69	3.79	12.69	2.65	62.12
	100%	2.64	9.70	10.48	28.31	0.35	1.27	5.48	20.19	1.41	5.89
PFPI	10%	0.41	26.70	0.65	33.09	9.08	141.95	0.58	24.90	0.61	88.59
	100%	0.29	15.50	1.12	52.26	0.35	12.49	0.43	24.23	0.96	43.71
PFR	10%	0.42	31.86	0.47	37.56	0.21	13.12	0.25	14.64	0.50	53.43
	100%	0.25	24.29	0.58	44.29	0.11	8.80	0.32	28.72	0.11	8.38
PSPI	10%	0.03	18.65	0.08	33.35	0.07	26.79	0.08	20.76	0.06	92.14
	100%	0.05	24.61	0.11	61.05	0.03	11.79	0.05	27.61	0.04	14.43
PSR	10%	0.03	20.71	0.06	45.26	0.02	15.71	0.02	10.57	0.04	32.19
	100%	0.03	33.17	0.06	60.83	0.15	95.80	0.02	28.64	0.01	7.44
R-RPI	10%	0.11	16.48	0.14	27.61	0.10	17.02	0.09	17.69	0.10	63.43
	100%	0.06	13.55	0.03	5.42	0.55	89.04	0.01	3.69	0.09	21.76