

RESPUESTA DEL CULTIVO DE PAPA A LA COMBINACIÓN DE DIFERENTES FUENTES DE FERTILIZACIÓN NITROGENADA: EVALUANDO LA HIPÓTESIS DE LA SINCRONIZACIÓN

Daniel Machado¹ y Lina Sarmiento²

RESUMEN

Se ha propuesto que combinando enmiendas orgánicas de diferente calidad con fertilizantes minerales puede mejorarse la utilización del nitrógeno por los cultivos al sincronizar la demanda de N con su disponibilidad en el suelo. El objetivo fue evaluar si bajo este enfoque es posible obtener mejores rendimientos con igual dosis de fertilización nitrogenada en cultivos de papa en los Andes venezolanos. Se estudió el efecto de diferentes fuentes de N sobre la acumulación y déficit de este nutriente y sobre varios factores de crecimiento del cultivo. Se utilizó un diseño experimental de bloques al azar con tres repeticiones y cuatro tratamientos, aplicando una dosis constante de N de 250 kg·ha⁻¹ a partir de fertilizante mineral (FM), G+F: gallinazo más fertilizante mineral (G+F), cáscara de arroz más fertilizante mineral (P+F), y gallinazo más cáscara de arroz más fertilizante mineral (G+P+F). El tratamiento P+F seguido por G+P+F aumentaron significativamente la acumulación de N, el área foliar y su duración, la radiación interceptada (RFAI) y la producción de biomasa total y de tubérculos, además de que disminuyeron el déficit de N respecto a los tratamientos FM y G+F. La concentración de N foliar y la eficiencia de uso de la radiación (EUR) no variaron significativamente entre los tratamientos. En conclusión, el cultivo respondió al tipo de fertilización nitrogenada, resultando un menor déficit de N cuando las fuentes lábiles (gallinazo y fertilizante) se combinaron con otra menos lábil (cáscara de arroz), mostrando el potencial de combinar apropiadamente las diferentes fuentes de N para aumentar su aprovechamiento.

Palabras clave adicionales: Nitrógeno, índice de nutrición de nitrógeno, gallinazo, cáscara de arroz, eficiencia de uso de la luz

ABSTRACT

Response of potato crop to the combination of different sources of nitrogen fertilization: an evaluation of the synchronization hypothesis

It has been proposed that the combination of organic amendments of different quality with mineral fertilizer can improve nitrogen use by crops, synchronizing their N requirements with soil availability. The aim was to evaluate if using this approach it is possible to improve potato production with the same amount of N fertilization in the Venezuelan Andes. The effect of different sources of N on the accumulation and deficit of this element, and on several growth parameters was analyzed. An experiment was carried out using a random block design, with three replicates and four fertilization treatments, applying different sources of N but the same dose of 250 kg·ha⁻¹: FM: mineral fertilizer; G+F poultry manure and mineral fertilizer; P+F rice hulls and mineral fertilizer, and G+P+F: poultry manure, rice hulls and mineral fertilizer. The P+F treatment, followed by the G+P+F, produced a significant increase in N accumulation, leaf area index and duration, intercepted radiation (IPAR), total dry matter and tuber yield, with a decrease of N deficiency, compared to the FM and G+F treatments. Leaf N concentration and radiation use efficiency (RUE) did not vary significantly among treatments. In conclusion, potato crop responded to the type of nitrogen source, experimenting a lower nitrogen deficit when the labile sources (mineral fertilizer and poultry manure) were combined with less labile sources (rice hulls), showing the potential of combining appropriately different N sources for increasing N uptake.

Additional key words: Nitrogen, nitrogen nutrition index, poultry manure, rice hulls, radiation use efficiency

INTRODUCCIÓN

El nitrógeno es el elemento que con mayor frecuencia limita el rendimiento del cultivo de papa (Li et al., 2006; Shahnazari et al., 2008). Si

no se añade suficiente el crecimiento de las plantas y los rendimientos se ven limitados (Hirel et al., 2007) mientras que el suministro excesivo conlleva a pérdidas de este elemento hacia el ambiente, convirtiéndose en causa potencial de

Recibido: Octubre 24, 2011

Aceptado: Mayo 21, 2012

¹ Dpto. de Química, Facultad de Ciencias, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela. e-mail: dmachado@ula.ve

² Instituto de Ciencias Ambientales y Ecológicas, Facultad de Ciencias, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela. e-mail: lsarmien@ula.ve

contaminación hídrica y atmosférica (Goffart et al., 2008). Para reducir los costos económicos y ambientales se hace necesario mejorar la eficiencia en el uso de este nutriente. Una de las alternativas propuestas es lograr la sincronización entre la disponibilidad de N en el suelo y la demanda por el cultivo mediante la aplicación combinada de residuos orgánicos de alta y baja relación C/N que regulen los procesos de mineralización e inmovilización del N por los microorganismos del suelo, y evitan situaciones de déficit o exceso de N (Swift, 1987; Myers, et al., 1994; Nyiraneza y Snapp, 2007). En los Andes venezolanos, los productores de papa aplican fertilizantes minerales nitrogenados junto con combinaciones variables de gallinazo (baja relación C/N) y cáscara de arroz (alta relación C/N); sin embargo, pese a la importancia económica de este cultivo, no se ha evaluado el efecto de estas combinaciones de diferentes fuentes de N sobre el rendimiento del cultivo y menos aun su efecto sobre el déficit de N y los factores de crecimiento. El conocimiento de estos aspectos es esencial para poder plantear de manera racional alternativas de manejo que permitan lograr altos niveles de producción con menor uso de insumos y menos impacto ambiental. Entre las respuestas de las plantas de papa al déficit de N pueden mencionarse la modificación de los tiempos de emergencia y tuberización, la concentración de N en los tejidos, la biomasa de los órganos y su patrón de distribución, el área foliar y su duración y la eficiencia en el uso de la radiación (Vos y Van der Putten, 1998; Van Delden, 2001; Hirel et al., 2007).

El objetivo de este trabajo fue analizar la respuesta del cultivo a la aplicación combinada o no de fertilizante mineral, gallinazo y cáscara de arroz cuantificando el nivel de déficit de N a lo largo de su desarrollo y relacionándolo con parámetros de crecimiento y rendimiento, así como concentración de N foliar y cantidad de radiación fotosintéticamente activa interceptada y eficiencia en el uso de la misma.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento de campo se realizó en la localidad de Mistique (8° 46' N) en el estado Mérida, Venezuela, a una altitud de 2960 msnm, con precipitación promedio anual de 640 mm,

evaporación anual de 1416 mm y temperatura media de 11,1 °C. El terreno tiene pendientes entre 20 y 30 % y se localiza sobre un abanico en el fondo del valle del río Chama. El suelo es de textura franca a franca-arenosa, con 4,6 a 5,8 % de materia orgánica y pH entre 6,5 y 6,9 en los primeros 30 cm. Esta parcela se manejó con agricultura intensiva por muchos años, con rotaciones de hortalizas y altas dosis de fertilización orgánica y mineral.

Se aplicaron cuatro tratamientos (Cuadro 1) utilizando distintas fuentes de fertilización nitrogenada pero con igual cantidad total de N (250 kg·ha⁻¹). Se empleó gallinazo seco empacado marca "Fertiagro" (estiércol de pollo con cáscara de arroz), y cáscara de arroz a granel, procedente del estado Portuguesa, Venezuela. Las cantidades de estas enmiendas orgánicas se calcularon a partir de los contenidos de N total (2,71 % en el gallinazo y 0,49 % en la cáscara de arroz, en base fresca) determinados por triplicado con el método de Kjeldahl en muestras compuestas tomadas al azar en los materiales utilizados. Una parte del fertilizante mineral se aplicó en forma de fosfato diamónico para garantizar el suministro de fósforo. En todos los tratamientos se suministró potasio en forma de K₂SO₄ a razón de 200 kg·ha⁻¹. El diseño experimental fue de bloques al azar con tres repeticiones. Los bloques se distribuyeron en el terreno en la dirección de la pendiente y las parcelas de cada bloque en sentido perpendicular a la pendiente. En cada parcela se delimitó un área efectiva de muestreo de 25,2 m² y se usó el resto como bordes externos o entre muestreos sucesivos. La distancia entre plantas fue 0,25 m y 0,9 entre hileras.

El terreno fue preparado con arado de disco y desterronado con escardilla. Los tratamientos de fertilización fueron aplicados al voleo antes de la siembra e incorporados en una capa de suelo de aproximadamente 12 cm de espesor. Se utilizó semilla de papa certificada, variedad Granola, con peso promedio de 50 g por tubérculo, y se plantó a una profundidad aproximada de 7 cm. Se realizó el control de malezas, plagas y enfermedades necesario para lograr un buen desempeño del cultivo. Durante el ciclo se realizaron cuatro aplicaciones de microelementos por aspersión foliar y 17 riegos, cada uno con una lámina promedio de 10 mm.

Cuadro 1. Cantidad en peso fresco de los diferentes fertilizantes utilizados en cada tratamiento y cantidad de N aportado por cada fuente

Tratamiento	Cantidad aplicada en peso fresco				N aportado				
	Gallinazo	Cáscara de arroz	Fosfato diamónico	Sulfato de amonio	Gallinazo	Cáscara de arroz	Fosfato diamónico	Sulfato amonio	Total
	Mg·ha ⁻¹		kg·ha ⁻¹				kg·ha ⁻¹ N		
FM	0	0	238	1010	0	0	38	212	250
G+F	5,54	0	238	295	150	0	38	62	250
P+F	0	30,49	238	295	0	150	38	62	250
G+P+F	2,77	15,24	238	295	75	75	38	62	250

FM: fertilizante mineral; G+F: gallinazo más fertilizante mineral; P+F: cáscara de arroz más fertilizante mineral; G+P+F: gallinazo más cáscara de arroz más fertilizante mineral

La fecha de emergencia se consideró al lograrse el 50 % de plantas emergidas (IBSNAT, 1990) y se determinó por conteo del número de plantas en cinco surcos de cada una de las parcelas. Los muestreos se efectuaron cada dos días, en promedio, después de la siembra (dds). Para determinar la fecha del inicio de la tuberización, es decir, 50 % de las plantas con al menos un tubérculo con diámetro ≥ 1 cm (IBSNAT, 1990) se utilizó un vernier en muestreos destructivos a los 10, 16 y 20 días después de la emergencia (dde), utilizando ocho plantas por parcela.

La determinación de la biomasa del cultivo y la concentración de N en los distintos órganos se realizó en cinco muestreos, a los 10, 20, 46, 67 y 93 dde, correspondientes al período entre la emergencia y el inicio de la tuberización, inicio de la tuberización, final de la expansión foliar, senescencia, y cosecha final, respectivamente. Para ello se cosecharon ocho plantas por parcela en cada muestreo, excepto en la cosecha final cuando se cosecharon 40 plantas. Las plantas fueron separadas en raíces, tubérculos, tallos y hojas, y el material fue secado a 50 °C hasta peso constante. Para determinar el contenido de N se realizaron muestras compuestas mezclando el material por órgano en cada parcela. La concentración de N total fue analizada por triplicado por el método de Kjeldahl.

El índice de área foliar (IAF) se determinó mediante un método no destructivo empleando un medidor LI-COR modelo LAI-2000. Se realizaron 14 muestreos, entre los 10 y 93 dde (a intervalos variables de 3 a 9 días) sobre una superficie de 17,5 m² con aproximadamente 78 plantas en cada parcela, lo que permitió obtener suficientes valores de IAF para el cálculo de la duración de área foliar, radiación fotosintéticamente activa

interceptada (RFAI) acumulada y eficiencia de uso de la radiación (EUR). Para cada parcela se consideró el valor más alto medido como el IAF máximo durante el desarrollo del cultivo.

Por otra parte, se midió el área foliar, utilizando un medidor LI-COR modelo LI-3100, a las plantas extraídas en cada uno de los cinco muestreos realizados para la determinación de la biomasa y concentración de N. En el muestreo final se utilizaron las primeras dos plantas de cada uno de los cuatro surcos cosechados. El área obtenida fue utilizada para calcular la concentración de N por unidad de área foliar en cada uno de los muestreos.

La radiación global incidente diaria se midió con un piranómetro LI-COR, modelo LI-200X, colocado a 2,3 m sobre el suelo y conectado al registrador Campbell, mod. CR10X, de una estación climática automática ubicada en el área del ensayo.

El nivel de déficit de N se cuantificó de acuerdo con Lemaire et al. (2007) mediante el índice de nutrición de nitrógeno (INN) definido como la relación entre la concentración de N en la biomasa del cultivo (C_N en el cultivo) y la concentración de N crítica para obtener el máximo crecimiento (C_N crítica), donde C_N en el cultivo se calculó como el porcentaje en peso de N en toda la planta (exceptuando las raíces fibrosas) a partir de los porcentajes de N y los pesos de materia seca determinados en hojas, tallos y tubérculos, y C_N crítica (% de N) se calculó por la ecuación propuesta por Greenwood et al. (1985) para el cultivo de papa: C_N crítica = $1,35 (1 + 3e^{-0,26 W})$, donde W es el peso de materia seca del cultivo por unidad de área de terreno (Mg·ha⁻¹), exceptuando las raíces fibrosas, calculado como la sumatoria de los pesos de materia seca de hojas, tallos y

tubérculos determinados experimentalmente. El INN promedio para cada réplica de cada tratamiento se calculó como el promedio ponderado por los dde: $INN \text{ promedio ponderado} = [\sum (INN_{i+1} + INN_i) * (t_{i+1} - t_i)] / 2 * t_f$ donde INN_{i+1} y INN_i son los INN calculados en dos muestreos consecutivos, $i+1$ e i , realizados respectivamente a los t_{i+1} y t_i dde, mientras que t_f son los dde en la cosecha final.

La duración del área foliar se calculó como el área bajo la curva de IAF versus dde. Cada curva fue el resultado del ajuste de una función polinómica de sexto grado a los datos experimentales de IAF considerando un valor de IAF igual a cero para la fecha de la emergencia.

La cantidad de radiación fotosintéticamente activa incidente (RFA) se calculó como el 48 % de la radiación global incidente (Bonhomme, 1993), y la RFAI se calculó mediante la fórmula: $RFAI = RFA * (1 - e^{-k * IAF})$, utilizando para el coeficiente de extinción k el valor de 0,57 (Manrique et al., 1991). Se calculó RFAI diaria con el valor de IAF correspondiente, obtenido de la función de IAF vs. dde utilizada para calcular la duración del área foliar. Con los valores de RFAI diarios se calcularon los valores de RFAI acumulados sólo hasta los 67 dde, con el objeto de excluir la intercepción de luz por las hojas amarillas (Van Delden, 2001). La EUR promedio fue calculada por regresión lineal de la cantidad de biomasa seca y la RFAI acumulada hasta 67 dde (Manrique et al., 1991; Van Delden, 2001).

La concentración de N por área foliar (C_{NAF}) se calculó en función del peso seco de la biomasa de hojas, el contenido porcentual de N en hoja y el área foliar medido en los cinco muestreos destructivos. La C_{NAF} promedio se calculó como el promedio ponderado por los dde utilizando una

ecuación análoga a la empleada para el INN.

El análisis estadístico de los resultados de los tratamientos de fertilización se realizó con el procedimiento clásico de ANOVA y prueba de medias de Tukey HSD utilizando el programa Statistica 6.0.

RESULTADOS

Emergencia e inicio de la tuberización: El porcentaje de plantas emergidas no presentó diferencias significativas entre los tratamientos en los muestreos realizados. Se determinó como fecha de la emergencia, para todos los tratamientos, el día 24 después de la siembra cuando se alcanzó un valor promedio de emergencia de 51,3 %. El porcentaje de plantas tuberizadas no presentó diferencias significativas entre los tratamientos en cada uno de los muestreos. Se determinó como fecha del inicio de la tuberización el día 20 después de la emergencia cuando se alcanzó un valor de 52,1 %.

Biomasa y cantidad de N en el cultivo: El rendimiento de tubérculos presentó diferencias ($P \leq 0,05$) entre los tratamientos (Cuadro 2). El promedio en los tratamientos P+F y G+P+F resultó 49 y 28 % más alto, respectivamente, que en FM mientras que el G+F presentó un rendimiento similar a FM. La biomasa total (incluyendo raíces fibrosas) presentó diferencias ($P \leq 0,05$) entre los tratamientos (Figura 1A) a partir del tercer muestreo (46 dde) y hasta la cosecha final (Cuadro 2) en que la MS total de P+F y G+P+F resultó 39 y 22% más alta que en el FM, mientras que el G+F presentó una cantidad similar al FM.

Cuadro 2. Efecto de la fertilización sobre la biomasa, el rendimiento de tubérculos, contenido de N e índice de nutrición de N (INN) del cultivo de papa

Trat.	Rendimiento tubérculos ($Mg \text{ ha}^{-1}$)		Biomasa total $Mg \text{ ha}^{-1}$	N en la biomasa $kg \cdot ha^{-1}$	INN promedio	
	MF	MS			Cosecha final	Ponderado por dde
FM	26,15 c	4,59 c	5,53 c	96,84 c	0,747 c	0,878 c
G+F	27,89 c	4,77 c	5,79 c	98,61 c	0,746 c	0,890 c
P+F	38,94 a	6,51 a	7,69 a	123,67 a	0,835 a	0,958 a
G+P+F	33,41 b	5,64 b	6,76 b	110,35 b	0,786 b	0,921 b

Letras distintas indican diferencias según la prueba de Tukey HSD ($P \leq 0,05$); dde=días después de la emergencia

La cantidad de N en la biomasa del cultivo aumentó hasta el cuarto muestreo (67 dde), a

partir del cual permaneció prácticamente constante hasta la cosecha final (93 dde)

observándose diferencias ($P \leq 0,05$) entre los tratamientos (Figura 1B). En la cosecha final la cantidad de N en los tratamientos P+F y G+P+F

resultó 28 y 14% más alta, respectivamente, que en el FM, mientras que el G+F presentó una cantidad similar al tratamiento FM.

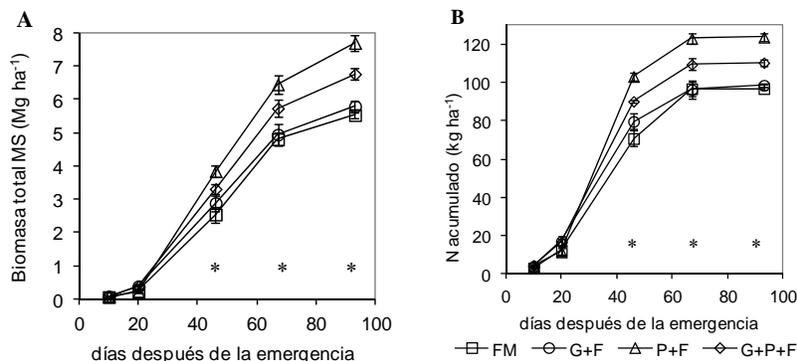


Figura 1. Biomasa total (A) y cantidad de N en el cultivo (B) en función de la edad. Las barras representan la SD. Los asteriscos señalan las fechas en las que existieron diferencias entre tratamientos ($P \leq 0,05$)

Nutrición de nitrógeno: La concentración de N en el cultivo resultó ligeramente superior a la concentración crítica de N cuando la biomasa total presentó valores menores que $1 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$, es decir, hasta el segundo muestreo correspondiente al inicio de la tuberización (Figura 2A). A partir del tercer muestreo y hasta la cosecha final la concentración de N, en todos los tratamientos, se situó por debajo de la curva de concentración crítica de Greenwood et al. (1985) para un rango

de 2,0 a $7,8 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$ de biomasa total (Figura 2A).

En consecuencia, el INN presentó valores mayores que 1,0 y con medias similares para los cuatro tratamientos en las etapas de emergencia (10 dde) e inicio de la tuberización (20 dde); luego disminuyó bruscamente en la etapa de expansión foliar, presentando diferencias ($P \leq 0,05$) debido a los tratamientos (Figura 2B). A partir de allí disminuyó progresivamente hasta la cosecha final (Cuadro 2).

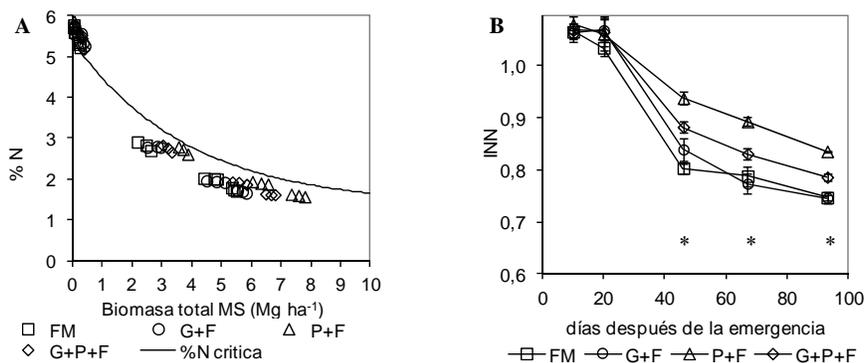


Figura 2. Relación entre la biomasa total (sin raíces fibrosas) y la concentración de N en el cultivo. La línea representa los valores de la concentración crítica de N (A). Índice de nutrición de nitrógeno en función de la edad de la planta (B). Las barras representan la SD. Los asteriscos señalan las fechas cuando existieron diferencias entre tratamientos ($P \leq 0,05$)

Los valores de INN promedio durante todo el ciclo del cultivo (ponderado por los dde) presentaron diferencias significativas entre los tratamientos, siendo el orden $P+F > G+P+F > G+F$ y FM (Cuadro 2). Al relacionar el INN con la

biomasa del cultivo en las Figuras 3A y 3B se observa que la biomasa total del cultivo y el rendimiento de materia seca de tubérculos aumentaron linealmente a medida que aumentó el INN ponderado.

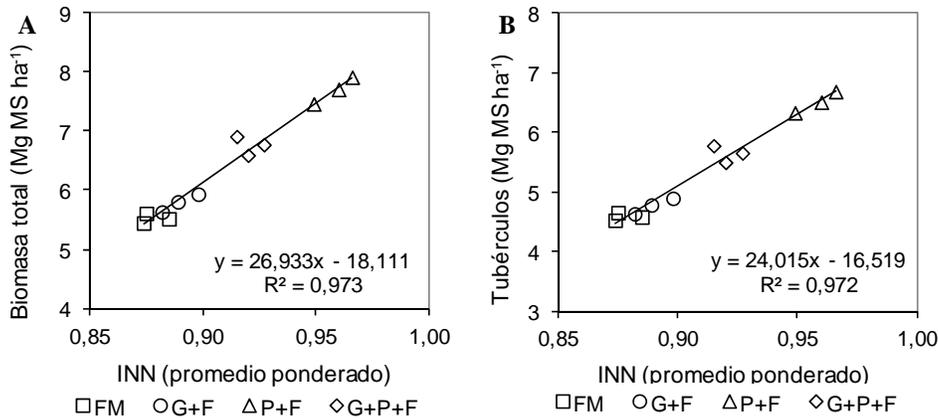


Figura 3. Relación entre el índice de nutrición de nitrógeno (INN) promedio ponderado y la biomasa total (A), y el rendimiento de tubérculos (B)

Parámetros foliares y eficiencia en el uso de la radiación: En la Figura 4 se presenta la evolución del IAF durante el desarrollo del cultivo para los cuatro tratamientos. A partir de los 41 dde hasta la cosecha final se presentó una variación significativa del índice de área foliar, por efecto de los tratamientos, alcanzándose los valores máximos de IAF para todos los tratamientos entre 53 y 58 dde. En esta etapa el P+F fue el que presentó mayor IAF, seguido en orden decreciente por G+P+F y, por último, G+F y FM. Tanto el IAF máximo como la duración del área foliar presentaron diferencias ($P \leq 0,05$) entre los tratamientos siendo el orden $P+F > G+P+F > G+F$ y FM (Cuadro 3). Al relacionar el IAF máximo y la duración del área foliar con el INN ponderado (Figuras 5A y 5B) se observa que estos

parámetros aumentaron linealmente a medida que aumentó el INN ponderado entre 0,874 y 0,966.

En cuanto al contenido de N foliar, se obtuvo que las concentraciones ponderadas de N en hoja, tanto en porcentaje de N como en peso de N por área foliar, no presentaron diferencias ($P > 0,05$) entre los tratamientos (Cuadro 3) y prácticamente no variaron con el aumento del INN ponderado (Figuras 5C y 5D). Por otra parte, la RFAI acumulada hasta los 67 dde presentó diferencias ($P \leq 0,05$) entre los tratamientos (Cuadro 3) y aumentó linealmente a medida que se incrementó el INN ponderado entre 0,874 y 0,966 (Figura 6A), mientras que la EUR promedio hasta los 67 dde no difirió significativamente con los tratamientos (Cuadro 3) y prácticamente no cambió con el INN ponderado (Figura 6B).

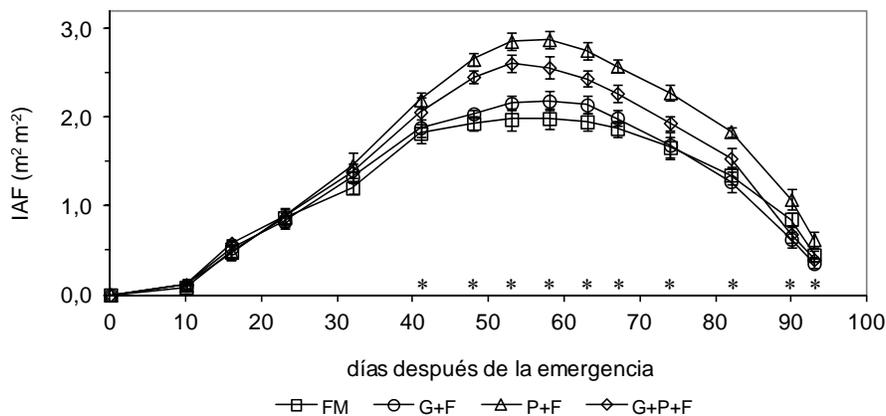
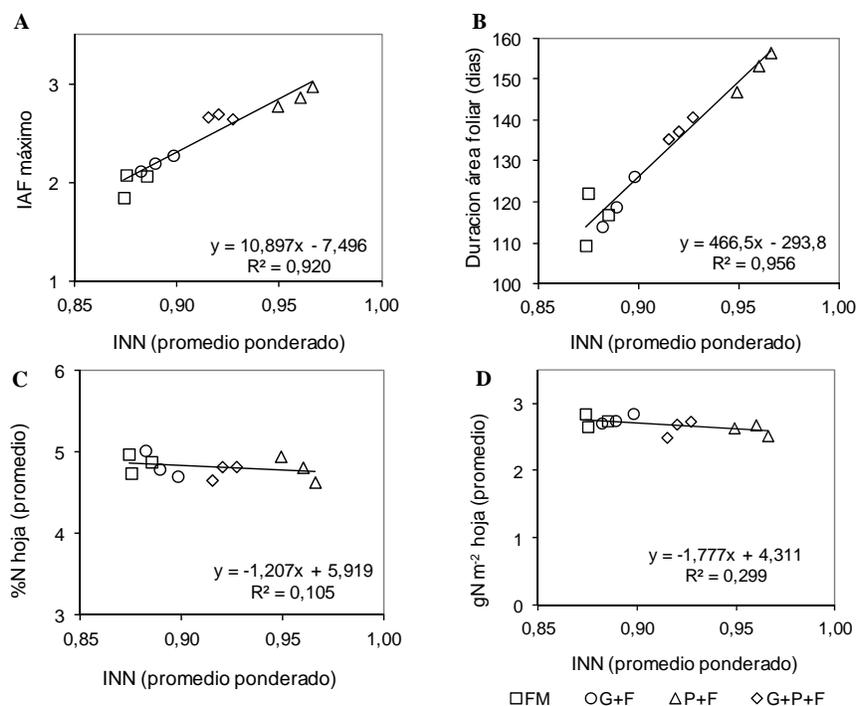
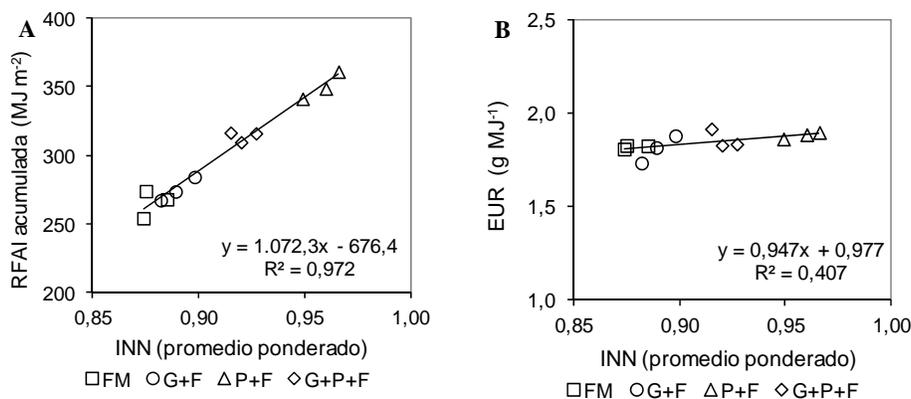


Figura 4. Índice de área foliar (IAF) en función de la edad del cultivo. Las barras representan la SD. Los asteriscos indican las fechas en las que existieron diferencias entre tratamientos ($P \leq 0,05$)

Cuadro 3. Efecto de la fertilización sobre el índice de área foliar, N foliar, radiación fotosintéticamente activa interceptada (RFAI) y eficiencia en el uso de la radiación (EUR)

Trat.	Índice de área foliar máximo	Duración del área foliar días	N en hoja prom. pond. por dde		RFAI acumulada a los 67 dde MJ·m ⁻²	EUR hasta 67 dde g·MJ ⁻¹
			% base MS	g m ⁻²		
FM	2,00 b	116 c	4,87 a	2,75 a	265 c	1,82 a
G+F	2,20 b	120 c	4,84 a	2,77 a	275 c	1,83 a
P+F	2,88 a	152 a	4,80 a	2,61 a	350 a	1,88 a
G+P+F	2,67 a	138 b	4,77 a	2,64 a	314 b	1,86 a

Letras distintas indican diferencias según la prueba de Tukey HSD ($P \leq 0,05$); dde=días después de la emergencia

**Figura 5.** Relación entre el índice de nutrición de nitrógeno (INN) y el índice de área foliar máximo (IAF) (A), duración del área foliar (B), contenido de N foliar (C) y contenido de N por área foliar (D)**Figura 6.** Relación entre el índice de nutrición de nitrógeno (INN) y la radiación fotosintéticamente activa interceptada (RFAI) (A) y eficiencia en el uso de la radiación (EUR) (B), ambos hasta 67 días después de la emergencia

DISCUSIÓN

Acumulación y deficiencia de nitrógeno.

Efectos sobre el rendimiento del cultivo: Los resultados muestran claramente como el tipo de fuente utilizada para la fertilización nitrogenada influye significativamente sobre el rendimiento de tubérculos, la biomasa total y la acumulación de N por el cultivo de papa. En la literatura está establecido que estos parámetros aumentan con el suministro de nitrógeno (Vos, 1995; Van Delden, 2001; Goffart et al., 2008). En este experimento, aún cuando en todos los tratamientos se suministró inicialmente la misma cantidad de N, los resultados indican que la cáscara de arroz combinado con N mineral favoreció una mayor acumulación de N por el cultivo de papa y como consecuencia mayor producción de materia seca total y mayor rendimiento de tubérculos, mientras que el suministro de gallinazo con fertilizante mineral no modificó sustancialmente estos parámetros con respecto a los del tratamiento con fertilizante mineral solo.

El hecho de que los valores de INN resultaron entre 1,0 y 1,1, para todos los tratamientos durante las etapas de emergencia e inicio de la tuberización, indica que durante estas etapas no se presentó déficit de N en ninguno de los tratamientos, lo cual sugiere que el N disponible en el suelo fue suficiente para satisfacer la demanda del cultivo en esas etapas iniciales del desarrollo. Este resultado es apoyado por el hecho de que entre los tratamientos no se presentaron diferencias significativas en las fechas de emergencia e inicio de la tuberización.

Se ha comprobado que la tuberización se inicia más temprano cuando hay deficiencia de N (Fahem y Haverkort, 1988; Sarmiento, 1995), lo cual corrobora que en este experimento no ocurrió déficit en esta etapa del desarrollo. Durante las etapas de expansión foliar, senescencia y maduración del tubérculo los INN fueron menores que 1, indicando que se presentó déficit de N el cual aumentó progresivamente en todos los tratamientos. De la relación lineal entre el INN y los valores de la biomasa total del cultivo y el rendimiento de materia seca de tubérculos en la cosecha final se desprende que a menor déficit de N, mayor es la producción de materia seca del cultivo. Esta misma tendencia fue encontrada por Van Delden (2001) con distintos niveles de

aplicación de N que se tradujeron en valores de INN ponderado que variaron entre 0,52 y 0,94. En nuestro caso se puede observar que variaciones pequeñas, entre 0,87 y 0,97, en el INN ponderado y valores no muy alejados de 1,0 se tradujeron en diferencias importantes en la producción total de materia seca y el rendimiento de materia seca de tubérculos. Estos resultados indican que las diferencias obtenidas entre los tratamientos en cuanto a la biomasa total y el rendimiento de tubérculos ($P+F > G+P+F > G+F$ y FM) se debieron al déficit en la nutrición de nitrógeno ($P+F < G+P+F < G+F$ y FM) que se presentó por efecto del suministro de distintas enmiendas orgánicas con un mismo nivel inicial de nitrógeno aplicado. En este sentido, se puede decir que el suministro de cáscara de arroz fue determinante en la disminución del déficit de N y en la obtención de mejores rendimientos y que al combinar una fuente poco lábil (cáscara de arroz) con fuentes lábiles (gallinazo, fertilizante mineral) tiende a mejorar el aprovechamiento del N en este tipo de suelo.

Efecto de la deficiencia de N sobre los factores de crecimiento del cultivo:

Las diferencias entre los tratamientos en la evolución del IAF y en la duración del área foliar siguieron el mismo orden que el encontrado para los valores de rendimiento de tubérculos, cantidad de biomasa y N acumuladas en la cosecha final e índice de nutrición de N, es decir $P+F > G+P+F > G+F$ y FM. Si se toma en cuenta la tendencia encontrada por otros autores (Sarmiento, 1995; Vos y Van der Putten, 1998) en el sentido de que un mayor suministro de N permite el desarrollo de un mayor IAF, nuestros resultados indican que aun cuando todos los tratamientos recibieron la misma cantidad de N, las distintas fuentes causaron diferencias en la acumulación de N que se tradujeron en diferencias en la duración del área foliar. Tanto el IAF máximo como la duración del área foliar aumentaron linealmente a medida que disminuyó el déficit de N (aumento del INN promedio) mientras que las concentraciones de N en hoja, expresadas tanto por unidad de masa como por unidad de área foliar, prácticamente no variaron con el INN. Estas tendencias coinciden con lo encontrado por Van Delden (2001) excepto para la concentración en porcentaje de N, en base a materia seca de hoja, para la cual informó un

aumento con el incremento de INN. Sin embargo, se debe resaltar que en el trabajo del citado autor los INN disminuyeron hasta valores de 0,52, es decir, se produjo mayor déficit de N al compararlo con en este estudio. Similarmente, Villa (2007) encontró que con un nivel mayor de déficit y valores de INN entre 0,32 y 0,79, hubo respuesta de la concentración de N en la biomasa. En el presente trabajo los resultados indicaron que a niveles moderados de déficit de N el cultivo de papa respondió sensiblemente a la limitación de N ajustando la expansión foliar y manteniendo la concentración de N en la hoja.

Con respecto a la RFAI acumulada, la tendencia encontrada de aumento lineal a medida que disminuyó el déficit de N y que se tradujo en diferencias entre los tratamientos, coincide con los resultados de Van Delden (2001). Por otra parte, la tendencia de la EUR de no variar con el INN (Figura 8B) ha sido encontrada por otros autores para valores de INN por encima de 0,7 (Duchenne et al., 1997; Van Delden, 2001), mientras que para valores de 0,60 Villa (2007) encontró disminución de la EUR. Estos resultados corroboran la hipótesis de Vos y Van der Putten (1998) según la cual el cultivo de papa responde a una limitación moderada de N reduciendo la interceptación de luz y manteniendo la EUR (Van Delden, 2001).

Efectos del tipo de fertilización sobre el desarrollo del cultivo: Los resultados mostraron que la fuente de la fertilización nitrogenada tuvo un efecto muy marcado sobre el rendimiento y desarrollo del cultivo, apuntando en la dirección señalada para cultivos en general por Swift (1987), y para papa por Snapp y Fortuna (2003) y Nyiraneza y Snapp (2007) de que las combinaciones de enmiendas de diferente calidad con fertilizantes minerales tienden a aumentar la eficiencia en el uso del nitrógeno. En ese sentido, el suministro previo a la siembra de enmiendas orgánicas de distinta calidad, gallinazo y cáscara de arroz combinadas con fertilizante mineral, para un mismo nivel de aplicación total de N, causaron diferencias significativas en la cantidad de N acumulada por el cultivo (P+F>G+P+F>G+F y FM), las cuales se tradujeron en distintos niveles de deficiencia de N a partir del inicio de la tuberización. Los tratamientos que suministraron únicamente fuentes lábiles (fertilizante mineral y gallinazo) presentaron el mayor déficit de N,

probablemente porque estas fuentes permitieron una disponibilidad inmediata de N pero un déficit posterior evidenciado por el INN. En cambio, los tratamientos en los que las fuentes lábiles se combinaron con una fuente poco lábil mejoraron significativamente el rendimiento y redujeron el déficit de N, probablemente por una mejor sincronización entre demanda y disponibilidad. Sin embargo, los mecanismos específicos que permitieron reducir el déficit combinando enmiendas de calidad contrastante deben ser estudiados más a fondo.

CONCLUSIONES

El cultivo de papa respondió a una limitación moderada de N reduciendo la expansión foliar y la interceptación de radiación, pero manteniendo la concentración de N en la hoja y la eficiencia en el uso de la radiación. Por esto, a niveles moderados de déficit, estos últimos parámetros no serían útiles como indicadores de deficiencia de N.

Para una misma dosis total de fertilización nitrogenada el cultivo de papa respondió a la calidad de la fuente, encontrándose mayor acumulación de N, y mayor producción de biomasa y tubérculos, al combinar fertilizante mineral con un sustrato orgánico de baja calidad como es la cáscara de arroz. Se deduce que la combinación de fertilizante mineral con cáscara de arroz es conveniente para este cultivo; sin embargo, queda por definir la mejor proporción de cáscara de arroz y fertilizante mineral, la frecuencia de aplicación y el efecto a corto y mediano plazo en otras condiciones iniciales y tipos de suelo.

Los resultados validan las prácticas de fertilización usadas por los productores andinos, quienes combinan estas tres fuentes de fertilización.

AGRADECIMIENTO

Al FONACIT (proyecto S1-2000000810) y al CDCHTA de la Universidad de los Andes (proyecto C-1362-05-01- A). A Francis Guillén, Zulay Méndez, Sonia Morales, Nelson Márquez y Alexander Suárez por su asistencia técnica. A Carlos Díaz por su apoyo durante el trabajo de campo y las discusiones fructíferas. A Gloria y Ana Graziella Machado por su gentil cooperación.

LITERATURA CITADA

1. Bonhomme, R. 1993. The solar radiation: characterization and distribution in the canopy. *In: C. Varlet-Grancher, R. Bonhomme y H. Sinoquet (eds.). Crop Structure and Light Microclimate.* INRA Editions. Paris. pp. 17-28.
2. Duchenne, T., J. Machet y M. Martin. 1997. Potatoes. *In: G. Lemaire (ed.), Diagnosis of the nitrogen status in crops.* Springer-Verlag. Berlin. pp. 119-130.
3. Fahem, M. y A. Haverkort. 1988. Comparison of the growth of potato crops grown in autumn and spring in North Africa. *Potato Res.* 31: 557-568.
4. Goffart, J., M. Olivier y M. Frankinet. 2008. Potato Crop Nitrogen Status Assessment to Improve N Fertilization Management and Efficiency: Past-Present-Future. *Potato Res.* 51: 355-383.
5. Greenwood, D., J. Neeteson y A. Draycott. 1985. Response of potatoes to N fertilizer: Quantitative relations for components of growth. *Plant Soil.* 85: 163-183.
6. Hirel, B., J. Gouis, B. Ney y A. Gallais. 2007. The challenge of improving nitrogen use efficiency in crop plants: towards a more central role for genetic variability and quantitative genetics within integrated approaches. *J. Exp. Bot.* 58: 2369-2387.
7. IBSNAT (International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer). 1990. Field and Laboratory Methods for the Collection of the IBSNAT Minimum Data Set. Technical Report 2. Department of Agronomy and Soil Science. University of Hawaii.
8. Lemaire, G., E. Van Oosterom, J. Sheehy, M.H. Jeuffroy, A. Massignam y L. Rossato. 2007. Is crop N demand more closely related to dry matter accumulation or leaf area expansion during vegetative growth? *Field Crop Res.* 100: 91-106.
9. Li, H., L. Parent y A. Karam. 2006. Simulation modeling of soil and plant nitrogen use in a potato cropping system in the humid and cool environment. *Agr. Ecosyst. Environ.* 115: 248-260.
10. Manrique, L., J. Kiniry, T. Hodges y D. Axness. 1991. Dry matter production and radiation interception of potato. *Crop Sci.* 31: 1044-1049.
11. Myers, R., C. Palm, E. Cuevas, I. Gunatilleke y M. Brossard. 1994. The synchronisation of nutrient demand. *In: P.L. Woomer y M.J. Swift (eds.). The Biological Management of Tropical Soil Fertility.* Wiley. pp. 81-116.
12. Nyiraneza, J. y S. Snapp. 2007. Integrated management of inorganic and organic nitrogen and efficiency in Potato Systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 71: 1508-1515.
13. Sarmiento, L. 1995. Restauración de la fertilidad en un sistema agrícola a jachère longue des hautes Andes du Venezuela. Tesis doctoral. Université de Paris-Sud, Paris.
14. Shahnazari, A., S. Ahmadi, P. Laerke, F. Liu, F. Plauborg, S. Jacobsen, C. Jensen y M. Andersen. 2008. Nitrogen dynamics in the soil-plant system under deficit and partial root-zone drying irrigation strategies in potatoes. *Eur. J. Agron.* 28: 65-73.
15. Snapp, S. y A. Fortuna. 2003. Predicting nitrogen availability in irrigated potato systems. *Hort Tech.* 13: 598-604.
16. Swift, M. 1987. Tropical soil biology and Fertility. Inter-Regional Research Planning Workshop. Paris. Special Issue 13: 28-34.
17. Van Delden, A. 2001. Yielding ability and weed suppression of potato and wheat under organic nitrogen management. Thesis. Wageningen University. The Netherlands.
18. Villa, P. 2007. Efecto de la nutrición nitrogenada sobre el balance de carbono en el cultivo de papa (*Solanum tuberosum*). Tesis. Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela. 233 p.
19. Vos, J. 1995. Nitrogen and the growth of potato crops. *In: A. Haverkort y D. MacKerron (eds.). Potato Ecology and Modelling of Crops under Conditions of Limiting Growth.* Kluwer. Dordrecht, The Netherlands. pp. 115-128.
20. Vos, J. y P. Van der Putten. 1998. Effect of nitrogen supply on leaf growth, leaf nitrogen economy and photosynthetic capacity in potato. *Field Crops Res.* 59: 63-72.