

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE CIENCIAS
INSTITUTO DE CIENCIAS AMBIENTALES Y ECOLÓGICAS
POSTGRADO DE ECOLOGÍA TROPICAL

TESIS DOCTORAL

**Un enfoque agroecosistémico para el manejo eficiente del
suministro de nitrógeno en el cultivo de papa en los
Andes venezolanos**

**Trabajo presentado ante la Universidad de
Los Andes como requisito parcial para optar
al grado de Doctor en Ecología Tropical**

DANIEL MACHADO DÍAZ

TUTORA:

Dra. LINA SARMIENTO M.

JURADO:

Dr. ISMAEL HERNÁNDEZ

Dra. ROSA MARY HERNÁNDEZ

Dr. DIMAS ACEVEDO

MÉRIDA – VENEZUELA

ABRIL 2005

VEREDICTO

Quienes suscriben, integrantes del jurado designado por el Consejo de Estudios del Postgrado de la Universidad de los Andes para conocer y emitir veredicto sobre la **TESIS DOCTORAL** presentada por **DANIEL MACHADO DÍAZ** para optar al título de **Doctor en Ecología Tropical** y que se titula:

"Un Enfoque Agroecosistémico para el Manejo Eficiente del Suministro de Nitrógeno en el Cultivo de Papa en los Andes Venezolanos "

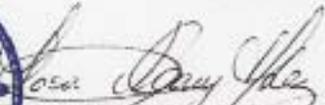
Hacen constar lo siguiente:

PRIMERO: que hoy 21 de abril de 2005 a las 08: 30 a.m, nos constituimos como jurado en el salón de reuniones del Postgrado en Ecología Tropical, siendo la Presidenta del Jurado la Dra. Lina Sarmiento. **SEGUNDO:** A continuación procedimos a discutir si se lleva a cabo su defensa pública. Luego de considerar las observaciones críticas de cada miembro de jurado, acordamos por unanimidad autorizar su presentación. **TERCERO:** A las 09:00 a.m. de éste mismo día, se reunió en el Auditorium A-10 de la Facultad de Ciencias y se dió curso al acto público de sustentación de la Tesis presentada a requerimiento del jurado. **CUARTO:** Una vez concluida la sustentación correspondiente, el jurado interrogó al aspirante sobre los diversos aspectos a que el trabajo se refiere. **QUINTO:** Seguidamente la presidenta del jurado invitó al público asistente a formular preguntas y observaciones sobre el trabajo presentado. **SEXTO:** Una vez concluido el acto de presentación, el jurado procedió a su deliberación final y concluyó que: **SE APRUEBA LA TESIS DOCTORAL PRESENTADA A NUESTRA CONSIDERACIÓN.**


Dra. Lina Sarmiento
Tutora


Dr. Ismael Hernández Valencia
Jurado




Dra. Rosa Mary Hernández
Jurado


Dr. Dimas Acevedo Novoa
Jurado

Idalba Guadua

Este trabajo forma parte del proyecto “Efecto de las enmiendas orgánicas y de la topografía sobre el balance hídrico, el ciclado de nitrógeno y los procesos erosivos en agroecosistemas de los Andes venezolanos”, financiado por FONACIT (Proyecto S1-2000000810).

También se recibió financiamiento de Postgrados Integrados en Ecología (FONACIT).

Agradecimientos

A mi tutora Lina Sarmiento, por su participación determinante en todas las etapas de la realización de esta tesis y de mi doctorado, por sus conocimientos, enseñanzas y aportes invaluableles y por su ejemplo de dedicación, perseverancia y mística de trabajo.

A los integrantes del jurado: Rosa Mary Hernández, Ismael Hernández y Dimas Acevedo, por sus observaciones, correcciones, comentarios y aportes para el mejoramiento de la tesis.

A Serafín González-Prieto, por la realización de análisis isotópicos de extractos de suelo y aguas en el Instituto de Investigaciones Agrobiológicas de Galicia (IIAG), España; por sus comentarios, observaciones y aportes enriquecedores a la tesis.

Al Instituto de Ciencias Ambientales y Ecológicas (ICAE), Facultad de Ciencias, Universidad de Los Andes, por sus recursos humanos y laboratorios.

A Adriana Padilla y Enid Marcano, por la realización de los análisis bioquímicos de los substratos en el Laboratorio de Bioenergía, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Universidad de Los Andes.

Al Laboratorio de Suelos, Instituto de Geografía y Conservación de los Recursos Naturales Renovables, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Universidad de Los Andes, por los análisis de suelos realizados, especialmente a Isabel Amaya.

A la Unidad de Laboratorio del Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias, Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Maracay, por la realización de análisis isotópicos de muestras de tejidos vegetales.

A Pierre Bottner del Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive, Montpellier, Francia, por la realización de análisis isotópicos de muestras de suelo.

A Carlos Díaz, mi amigo y compañero de postgrado y tesis, de diligencias y discusiones, de sol y lluvia, de aciertos y preocupaciones, por el trabajo y buenos ratos compartidos.

A Francis Guillén, Sonia Morales, Karina Sosa, Ana Escalona, Alexander Suárez y Jhonny Márquez por su dedicación especial al trabajo técnico en laboratorio y campo.

A Zulay Méndez por su asistencia técnica incondicional, por el entrenamiento brindado a los que trabajamos en el laboratorio, por sus enseñanzas y apoyo, y sobre todo por su amistad.

Al Sr. Gonzalo Rivas, propietario de la Finca “El Tesoro” en Mistique, Mucuchíes, donde se realizaron los experimentos de campo, y a su familia por la colaboración brindada en todas las labores de campo, especialmente preparación del terreno, riegos y fumigaciones.

A todas las personas que trabajaron en el establecimiento del experimento de campo: Ana Escalona, Luis Ramón Rivas, Zoraida Abreu, Coromoto, Auxiliadora Olivo, Sonia García, David Dugarte, Zulay Méndez, Jhonny Márquez, hermanos Pérez, Karina Sosa y Bernabé Torres.

A Carlitos Díaz, por su colaboración constante en la toma de muestras y en el mantenimiento de los experimentos de campo.

Al Sr. Luis Ramón Rivas por su trabajo en el mantenimiento y cuidado del cultivo.

A los estudiantes del curso de Ecosistemas (2001) del Postgrado de Ecología Tropical: Gladys Aguilar, Zulimar Hernández, Mirian Yépez y Adriana, por su colaboración en la cosecha final.

A Julia Smith, por su colaboración en la elaboración de la solicitud de financiamiento del proyecto y en la ubicación del experimento de campo.

A Nancy Gavidia, Idalba Guadua y Lic. Magda Flores, por su trabajo y apoyo administrativo.

A mis profesores en el Postgrado de Ecología: Lina Sarmiento, Michele Ataroff, Maximina Monasterio, Aura Azocar, Guillermo Sarmiento, Fermín Rada, Samuel Segnini, Juan Silva, Rigoberto Andressen, Licia Romero, Dimas Acevedo, Carlos García, Eulogio Chacón, Ramón Jaimez, Dimas Malagón y Walter Bowen, por sus conocimientos y enseñanzas.

A mis compañeros de postgrado: Maribel Hernández, Pablo Alvizu, Carlos Díaz, Acacia Neves, Mirlay Herrera, Tania Zambrano, Holanda Moreno, Adriana Ruiz, Marcela Pinillos, Aleide Linares, Zoraida Abreu, Gladys Aguilar, Marisol Rodríguez, Enrique García, Robin Walker, Susan Smith, Andrés Puig, Freddy Matos y Luis Daniel Llambí, por las “discusiones ecológicas” y por su amistad.

A Anairamiz Aranguren y Dimas Acevedo por introducirme en el estudio de la Ecología.

A Anabela Medina por la realización del diseño gráfico de la presentación pública.

A mis amigos Marilena, Martha y Gustavo por el apoyo de siempre.

A todos los que colaboraron conmigo apoyándome en la realización del postgrado y la tesis

Y los últimos son los primeros...los corazones que me dan vida...

A mi esposa Maria Eva por su colaboración, tolerancia y apoyo incondicional durante todo el postgrado y sobre todo por su amor infinito...

A mis hijos por su apoyo y paciencia: Ana Graziella por su colaboración en el laboratorio y en el cálculo de derivadas e integrales, Rodrigo por su sonriente apoyo, Daniel Alberto por su apoyo computacional, informático y matemático y Gloria por su trabajo en todas las etapas de la realización de la tesis: campo, laboratorio, transcripción de datos y especialmente en la edición de esta monografía.

Dedicatoria

A los jóvenes...

*Gloria, Daniel Alberto, Ana Graziella y Rodrigo,
Cristóbal, Ana Cecilia y Javier, Mariaga, Kati,
Eduardo, Pablo Andrés, Ezequiel, Aimé,...*

Resumen

En las zonas altas de los Andes venezolanos la intensificación de la agricultura ha ocurrido debido, entre otros factores, a la utilización de semillas de altos rendimientos, riego por aspersión e importantes cantidades de fertilizantes químicos, biocidas y enmiendas orgánicas. Con la finalidad de contribuir a la búsqueda de posibles alternativas de manejo que permitan optimizar la fertilización nitrogenada en esta zona, en esta tesis se estudia, utilizando un enfoque agroecosistémico, el efecto del empleo de distintas enmiendas orgánicas sobre el balance de N y la producción del cultivo de papa. El objetivo general fue evaluar la hipótesis de que mediante la selección adecuada de la cantidad y calidad de los fertilizantes minerales y enmiendas orgánicas suministrados se podría mejorar la sincronización entre la disponibilidad de N en el suelo y la demanda de N por el cultivo, para aumentar el rendimiento de tubérculos, disminuir las pérdidas de N e incrementar la eficiencia en el uso del N. Para evaluar esta hipótesis se realizó un experimento de campo en el cual se cultivó papa de la variedad Granola, en la localidad de Misteque (2960 msnm), estado Mérida, utilizando diferentes fuentes de suministro de nitrógeno: fertilizante mineral, gallinazo y pargana. Se emplearon cuatro tratamientos de fertilización con un mismo nivel total de aplicación de N (250 kg N ha^{-1}) suministrado en una sola dosis antes de la siembra: 1- FM: fertilizante mineral (250 kg N ha^{-1}); 2- G+F: gallinazo (150 kg N ha^{-1}) y fertilizante mineral (100 kg N ha^{-1}); 3- P+F: pargana (150 kg N ha^{-1}) y fertilizante mineral (100 kg N ha^{-1}) y 4- G+P+F: gallinazo (75 kg N ha^{-1}), pargana (75 kg N ha^{-1}) y fertilizante mineral (100 kg N ha^{-1}). El diseño experimental fue de bloques al azar con tres replicas por tratamiento. Al mismo tiempo se cultivaron plantas de papa en canteros, utilizando los mismos tratamientos pero empleando $(^{15}\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ como trazador isotópico. Durante el desarrollo del cultivo se evaluaron en distintas etapas, la biomasa de los diferentes órganos de la planta y su contenido de N, la concentración de N-NO_3^- y de N-NH_4^+ en el suelo, la cantidad de N en la biomasa microbiana y la cantidad de N lixiviado. En el caso de los canteros en cada compartimiento se determinó la concentración de N total y de ^{15}N . También se realizó un experimento de incubación en laboratorio para estudiar la descomponibilidad de estas enmiendas y su relación con los procesos de mineralización e inmovilización del N. Los

resultados de la incubación indican que la dinámica de los procesos de mineralización del C y de inmovilización del N, involucrados en la descomposición de enmiendas orgánicas de alta calidad, como el gallinazo, y de baja calidad, como la cáscara de arroz, dependen no sólo de su relación C/N sino más aún de su composición bioquímica, la cual condiciona la actividad de la comunidad microbiana descomponedora. Por otra parte, los resultados obtenidos en los experimentos de campo indican que para una misma dosis de fertilización nitrogenada, la calidad de la fuente afectó la acumulación y déficit de N en el cultivo. Las plantas respondieron a la limitación moderada de N reduciendo la expansión foliar y la cantidad de radiación interceptada mientras que otros parámetros como la concentración de N foliar y la eficiencia en el uso de la luz no se vieron tan afectados. La pargana combinada con fertilizante mineral, estimuló mayor biomasa de raíces y mayor relación de biomasa de raíces a vástagos en las etapas iniciales del desarrollo del cultivo, que promovieron mayor acumulación de N, menor déficit de N y mayor producción de biomasa asimilatoria durante la expansión foliar y la obtención de rendimientos de tubérculos más altos en la cosecha final. El gallinazo, promovió en la etapa inicial del cultivo la inmovilización y organización del N mineral disponible en el suelo, disminuyendo así el riesgo de pérdidas de N, principalmente por vía gaseosa, cuando la demanda por el cultivo fue baja, mientras que la pargana, promovió el desarrollo radicular de las plantas, la accesibilidad al N disponible en el suelo y la acumulación de N de acuerdo a la demanda. El suministro combinado de gallinazo, pargana y fertilizante mineral mejoró la sincronización, tanto a escala temporal como espacial, contribuyendo así a la obtención de altos rendimientos de tubérculos con menores pérdidas de N y un mayor índice uso/pérdidas de N. Se discuten las posibles causas y efectos de estas respuestas. Se concluye que mediante la selección de la calidad de las enmiendas orgánicas suministradas en los cultivos de papa en los Andes venezolanos se puede controlar la sincronización, tanto a escala temporal como espacial, entre la disponibilidad de N en el suelo y la demanda de N por el cultivo, para aumentar el rendimiento de tubérculos, disminuir las pérdidas e incrementar la eficiencia en el uso del nitrógeno.

Palabras claves: balance de nitrógeno, papa, sincronización, eficiencia en el uso del nitrógeno, gallinazo, cáscara de arroz o pargana, Andes, Venezuela.

Índice de contenido

Capítulo 1: Introducción general	1
Antecedentes	
Agricultura andina	1
Cultivos de papa y enmiendas orgánicas	2
Función de las enmiendas orgánicas	3
Optimización de la fertilización nitrogenada	4
Justificación.....	4
Sincronización de la demanda y la disponibilidad de nitrógeno.....	5
Un enfoque conceptual agroecosistémico	6
Teoría ecosistémica e hipótesis de la sincronización.....	6
Procesos de transferencia del nitrógeno.....	9
Demanda de nitrógeno por el cultivo.....	11
De la teoría ecosistémica a la práctica agrícola	12
Hipótesis	
General	14
Específicas	14
Objetivos	
General	20
Específicos	20
Metodología	21
Estructura de la tesis	23
Bibliografía	25

Capítulo 2	
Mineralización del carbono y evolución del nitrógeno en un suelo agrícola abonado con materiales orgánicos de calidad contrastante	30
Resumen	30
Introducción	31
Metodología	33
Suelo	33
Tratamientos y diseño experimental	34
Gallinazo y cáscara de arroz (pargana).....	34
Incubación.....	35
Mediciones	35
Carbono.....	35
Nitrógeno.....	35
Características del suelo y de los sustratos.....	36
Procesamiento de datos	37
Cinética de la mineralización del carbono.....	37
Nitrificación.....	37
Cantidad de N en la biomasa microbiana.....	38
Inmovilización (cantidad neta de N inmovilizado).....	38
Análisis estadístico	39
Resultados	39
Características del suelo y de los sustratos orgánicos	39
Mineralización del carbono	42
Evolución del nitrógeno	49
Nitrógeno mineral: amonio y nitrato.....	49
Nitrógeno total extraíble.....	51

N en la biomasa microbiana.....	52
Cantidades netas de N “solubilizado” e inmovilizado.....	52
Relación entre la cantidad de C mineralizado y N inmovilizado.....	54
Discusión y conclusiones.....	55
Calidad de las enmiendas orgánicas.....	55
Mineralización del carbono.....	55
Evolución del nitrógeno.....	58
Nitrificación.....	58
Mineralización del nitrógeno.....	59
“Solubilización” e inmovilización del nitrógeno.....	61
Los procesos del ciclado del N y la sincronización.....	65
Descomposición de los sustratos e inmovilización del nitrógeno.....	67
Recomendaciones.....	70
Aplicación para mejorar la “sincronización”.....	70
Determinación de N en la biomasa microbiana.....	70
Bibliografía.....	72
Capítulo 3	
Efecto de diferentes fuentes de fertilización nitrogenada sobre el desarrollo y la nutrición del cultivo de papa	78
Resumen.....	78
Introducción.....	79
Metodología.....	81
Ubicación del experimento de campo.....	81
Tratamientos y diseño experimental.....	81

Prácticas agronómicas	83
Mediciones	83
Biomasa del cultivo y concentración de nitrógeno.....	84
Índice de área foliar (LAI).....	84
Radiación incidente.....	85
Procesamiento de los datos	85
Índice de nutrición de nitrógeno (NNI).....	85
Duración de área foliar.....	86
Concentración de N por área foliar.....	86
Cantidad de radiación fotosintéticamente activa interceptada (IPAR).....	86
Eficiencia en el uso de la luz (RUE).....	87
Análisis estadístico	87
Resultados	87
Emergencia e inicio de la tuberización	87
Biomasa y cantidad de N en el cultivo	88
Índice de nutrición de nitrógeno (NNI)	91
Parámetros foliares y eficiencia en el uso de la luz	94
Discusión y Conclusiones	98
Acumulación y deficiencia de nitrógeno. Efectos sobre el rendimiento del cultivo	98
Efecto de la deficiencia de N sobre los factores de crecimiento del cultivo	99
Efectos del tipo de fertilización sobre el desarrollo del cultivo	100
Recomendaciones	102
Bibliografía	103

Capítulo 4	
Efecto de diferentes fuentes de fertilización sobre la distribución de la biomasa y del nitrógeno en el cultivo de papa	106
Resumen	106
Introducción	107
Metodología	109
Ubicación del experimento de campo	109
Tratamientos y diseño experimental	110
Prácticas agronómicas	111
Mediciones	111
Biomasa del cultivo y concentración de nitrógeno.....	112
Procesamiento de los datos	112
Análisis estadístico	113
Resultados	115
Crecimiento y distribución de la biomasa	115
Dinámica de la biomasa total y de los órganos.....	115
Distribución de la biomasa.....	118
Tasas de crecimiento y tasas de migración de asimilados.....	121
Acumulación y distribución del nitrógeno	123
Concentración de N.....	123
Cantidad de N acumulada y distribución en la planta.....	124
Tasas de acumulación y migración de nitrógeno.....	126
Correlación entre los rendimientos y la biomasa de raíces y vástagos	128
Discusión y Conclusiones	128
Biomasa y acumulación de nitrógeno	128
Efecto de la acumulación de N sobre los rendimientos	128

Distribución de asimilados y del N en el cultivo.....	130
Índice de cosecha.....	130
Distribución de la biomasa de vástagos y raíces.....	131
Efectos de los tratamientos sobre el rendimiento de tubérculos.....	132
Recomendaciones.....	134
Bibliografía.....	135
Capítulo 5	
Efecto de diferentes enmiendas orgánicas combinadas con fertilizante mineral sobre el ciclado de nitrógeno en un agroecosistema de papa	139
Resumen.....	139
Introducción.....	140
Metodología.....	142
Ubicación del experimento de campo.....	142
Tratamientos y diseño experimental.....	143
Prácticas agronómicas.....	144
Mediciones.....	144
Características edáficas iniciales.....	144
Nitrógeno en el suelo.....	145
Biomasa del cultivo y concentración de nitrógeno.....	146
Drenaje y N lixiviado.....	146
Demanda de nitrógeno por el cultivo.....	147
Procesamiento de los datos.....	148
Nitrificación.....	148
Cantidad de N en la biomasa microbiana.....	148

Tasas de acumulación y demanda de N.....	148
Eficiencia en el uso del nitrógeno.....	149
Análisis estadístico.....	149
Resultados.....	150
Características del suelo.....	150
Nitrógeno en el suelo.....	152
N mineral: amonio y nitrato.....	152
N total extraíble.....	153
N en la biomasa microbiana.....	155
N acumulado por el cultivo.....	157
Drenaje y N lixiviado.....	158
Disponibilidad, acumulación y demanda de N.....	159
Discusión y Conclusiones.....	161
Procesos del ciclo del nitrógeno.....	161
Nitrificación.....	161
Mineralización, “organización” e inmovilización del N.....	162
Drenaje y lixiviación del N.....	163
Disponibilidad, acumulación y demanda.....	164
Sincronización de la disponibilidad y la demanda de N.....	166
Recomendaciones.....	168
Bibliografía.....	169
Capítulo 6	
Balance de nitrógeno en un cultivo de papa fertilizado con distintas fuentes nitrogenadas.	173
Resumen.....	173

Introducción	174
Metodología	176
Ubicación del experimento de campo	176
Diseño experimental y tratamientos	176
Prácticas agronómicas	177
Mediciones	178
Características edáficas iniciales.....	178
Biomasa del cultivo y concentración de nitrógeno.....	178
Nitrógeno en el suelo.....	179
Drenaje y N lixiviado.....	180
Procesamiento de los datos	181
Nitrificación.....	181
Cantidad de N en la biomasa microbiana.....	181
Acumulación de N en las plantas	181
Trazador isotópico.....	182
Eficiencia en el uso del nitrógeno.....	184
Análisis estadístico	185
Resultados	186
Características del suelo	186
Biomasa y cantidad de N acumulada por las plantas	187
Balance de nitrógeno	191
Distribución del N del fertilizante mineral.....	191
Procesos del ciclado del nitrógeno.....	194
Eficiencia en el uso del N	198
Eficiencia en el uso del N del fertilizante mineral.....	198

Eficiencia en el uso del nitrógeno total suministrado.....	198
Discusión y Conclusiones.....	201
Recomendaciones.....	208
Bibliografía.....	209
Capítulo 7	
Discusión general y conclusiones	213
Análisis del problema.....	213
Comprobación de las hipótesis.....	217
Hipótesis I.....	217
Hipótesis II.....	220
Hipótesis alternativa.....	222
Hipótesis III.....	223
Hipótesis general.....	225
Recomendaciones.....	229
Prioridades de Investigación.....	229
Bibliografía.....	230

Índice de Tablas

Capítulo 2

Tabla 1. Cantidad de materia fresca de las diferentes fuentes utilizadas en cada tratamiento y su aporte de N y C en términos absolutos y en relación al N y C total del suelo.....	34
Tabla 2. Características principales del suelo utilizado en la incubación.....	40
Tabla 3. Características principales de los sustratos (en base a materia seca).....	41
Tabla 4. Parámetros cinéticos de la mineralización acumulada (mg C-CO ₂ / 100 g suelo seco) para el suelo control y los suelos con tratamientos, utilizando el modelo doble exponencial sin condicionar (Ec. 2).....	44
Tabla 5. Parámetros cinéticos de la mineralización acumulada (mg C-CO ₂ / 100 g suelo seco) para el suelo control y los suelos con tratamientos, utilizando el modelo exponencial simple (Ec. 1).....	44
Tabla 6. Parámetros cinéticos de la mineralización acumulada (%) para el suelo control (mg C-CO ₂ / mg C suelo seco) y los sustratos (mg C-CO ₂ / mg C sustrato), utilizando el modelo doble exponencial sin condicionar.....	46
Tabla 7. Parámetros cinéticos de la mineralización acumulada (%) para el suelo control (mg C-CO ₂ / mg C suelo seco) y los sustratos (mg C-CO ₂ / mg C sustrato), utilizando el modelo doble exponencial condicionando, $C_1 = 100\% - C_0$	47
Tabla 8. Porcentaje del N mineral total que se encontraba en forma de nitratos y nitritos a determinados días (d) del inicio de la incubación y porcentaje de nitrificación calculado (Ec. 4) desde el inicio hasta los 14 días (0-14 d) y desde los 14 hasta los 30 días (14-30 d), para los distintos tratamientos.....	49
Tabla 9. Porcentaje del N total extraíble que se encontraba como N mineral a determinados días (d) del inicio de la incubación para los distintos tratamientos.....	51

Capítulo 3

Tabla 1. Cantidad en peso fresco de los diferentes fertilizantes utilizados en cada tratamiento y cantidad de N aportado por cada fuente..... 82

Tabla 2. Efecto de los tratamientos sobre el rendimiento en materia fresca y en materia seca de tubérculos, biomasa total en MS, cantidad de N en la biomasa e índice de nutrición de N del cultivo de papa (NNI) en la cosecha final y sobre el NNI promedio ponderado por los días transcurridos después de la emergencia (DDE)..... 89

Tabla 3. Efecto de los tratamientos sobre el índice de área foliar máximo, la duración del área foliar hasta la cosecha final, la cantidad acumulada de radiación fotosintéticamente activa interceptada (IPAR) y la eficiencia en el uso de la luz (RUE) hasta 67 DDE y sobre los valores promedio ponderados por los días transcurridos después de la emergencia de: contenido % de nitrógeno en hojas y contenido de nitrógeno por área foliar..... 96

Capítulo 4

Tabla 1. Cantidad de materia fresca de las fuentes utilizadas en cada tratamiento y cantidad de N aportado por cada fuente para un total de 250 kg N ha⁻¹ en cada tratamiento..... 110

Tabla 2. Coeficientes de las funciones que describen el curso de la biomasa (g m⁻²) de: toda la planta, tubérculos, vástagos y raíces y de las cantidades de N acumuladas (g N m⁻²) en éstas, con el tiempo (t) transcurrido (DDE)..... 114

Tabla 3. Medias y efectos de los tratamientos sobre: la biomasa de raíces y la relación en peso de biomasa de raíces a vástagos a los 10, 20, 46, 67 y 93 DDE..... 117

Tabla 4. Coeficientes de correlación entre la biomasa seca de raíces y la biomasa (MS) de la parte aérea (vástagos) en las distintas fechas de muestreo y entre estas variables y la biomasa total, el rendimiento de tubérculos y la cantidad de N acumulada por el cultivo (N acum. total), en la cosecha final (CF)..... 120

Capítulo 5

Tabla 1. Cantidad de materia fresca de las fuentes utilizadas en cada tratamiento y cantidad de N aportado por cada fuente para un total de 250 kg N ha⁻¹ en cada tratamiento..... 143

Tabla 2. Características principales del suelo (0-30 cm) del área experimental.....	151
Tabla 3. Relación (%) de las concentraciones (g m^{-2}) de N-NO_3^- y N-mineral a determinados días (d) después de la siembra y porcentaje de nitrificación calculado (Ec. 4, cap. 2) desde el inicio hasta los 12 días (0-12 d) y desde los 12 hasta los 24 días (12-24 d), para los distintos tratamientos (Trat.).....	153
Tabla 4. Relación (%) de las concentraciones (mg kg^{-1}) de N mineral y N total extraíble a determinados días (d) del inicio de la incubación para los distintos tratamientos (Trat.).....	155
Tabla 5. Variación entre la siembra y la cosecha en las cantidades de N total extraíble, N mineral y N en la biomasa microbiana. Cantidades de N en el cultivo y de N lixiviado, acumuladas entre la siembra y la cosecha.....	156

Capítulo 6

Tabla 1. Cantidad de materia fresca de las fuentes utilizadas en cada tratamiento y cantidad de N aportado por cada fuente para un total de 25.0 g N m^{-2} ($5.63 \text{ g N planta}^{-1}$) en cada tratamiento.....	177
Tabla 2. Características principales del suelo (0-30 cm) del área experimental.....	186
Tabla 3. Medias de los rendimientos en materia fresca (MF) y materia seca (MS) de tubérculos, biomasa total en MS y cantidad de nitrógeno en la biomasa total, con los distintos tratamientos, en la cosecha final.....	187
Tabla 4. Medias de la biomasa de raíces y la relación (%) en peso de materia seca de raíces a vástagos ($\text{g MS raíces por } 100 \text{ g MS vástagos}$) con los distintos tratamientos a los 33, 69, 89 y 119 DDS.....	188
Tabla 5. Eficiencia en el uso del nitrógeno del fertilizante (%NUEf); proporción de N del fertilizante acumulado en la biomasa (%Ndff); índice de uso-lavado del N del fertilizante mineral (IULNf); índice de uso-pérdidas del N del fertilizante mineral (IUPNf); Cantidades totales de N acumuladas en planta y de N lixiviado (g N m^{-2}); cantidad de N del fertilizante mineral perdido por vía gaseosa (g N m^{-2}); cantidad total de N perdido (g N m^{-2}); eficiencia en el uso del N total suministrado (%NUE); índice de uso-lavado del N total (IULN); índice de uso-pérdidas del N total (IULPN), para cada uno de los tratamientos en la cosecha final.....	200

Capítulo 7

Tabla 1. Objetivos y conclusiones de los capítulos de la tesis.....	215
--	-----

Índice de Figuras

Capítulo 1

Figura 1. Patrones hipotéticos de la disponibilidad de nutrientes para las plantas en tratamientos con residuos de distinta calidad.....	8
Figura 2. Diagrama con los principales compartimientos y flujos de N en el agroecosistema de estudio.....	10
Figura 3. Tendencias hipotéticas de la disponibilidad de N en el suelo, la demanda potencial de N por el cultivo, la absorción de N por el cultivo, la cantidad de N perdida y la mineralización de N desde la MOS, en cada uno de los tratamientos de los experimentos de campo.....	16
Figura 4. Base conceptual y aportes esperados del estudio.....	19
Figura 5. Representación esquemática de la estructura de la Tesis.....	24

Capítulo 2

Figura 1. A. Curso de la cantidad acumulada de C-CO ₂ liberado del suelo control y de los suelos con suministro de sulfato de amonio, gallinazo y pargana. B. Curso de la cantidad acumulada de C-CO ₂ liberado expresada como porcentaje de la cantidad inicial de C en el suelo control y en los suelos con substrato orgánico.....	43
Figura 2. Curso del coeficiente de mineralización % C (mg de C-CO ₂ / mg de C-substrato) acumulado del gallinazo y de la pargana	45
Figura 3. Curso de la cantidad acumulada de C-CO ₂ liberado del gallinazo, de la pargana y de la combinación de gallinazo + pargana.....	48
Figura 4. Curso, durante la incubación, de la cantidad de N en el suelo control y en el suelo con: fertilizante mineral, gallinazo, pargana y gallinazo + pargana, en las formas: A. N mineral. B. N total extraíble. C. N en la biomasa microbiana. D. N total extraíble respecto al suelo control	50
Figura 5. A. Curso de la cantidad neta de N solubilizado durante la incubación, en el suelo control y en el suelo con: gallinazo, pargana y gallinazo + pargana. B. Relación entre las cantidades netas de N inmovilizado calculadas Ec.6 y Ec.7. C. Curso de la cantidad neta de N inmovilizado durante la incubación, en los tratamientos G, P y G+P, calculada Ec.7. D. Correlación entre las cantidades de C mineralizado y N inmovilizado (Ec.7) para los substratos gallinazo, pargana y gallinazo + pargana.....	53

Capítulo 3

Figura 1. Porcentaje de plantas emergidas y tuberizadas en función de los días transcurridos después de la siembra.....	88
Figura 2. Curso con los días transcurridos después de la emergencia de: A. Biomasa total en materia seca. B. Cantidad de N acumulada en el cultivo.....	90
Figura 3. Relación entre la biomasa total (exceptuando las raíces fibrosas) en materia seca del cultivo ($Mg\ ha^{-1}$) y la concentración de N (% en peso en base a MS).....	91
Figura 4. Índice de nutrición de nitrógeno en función de los días transcurridos después de la emergencia.....	92
Figura 5. Relación entre el índice de nutrición de nitrógeno (NNI) promedio y: A. Biomasa total en materia seca. B. Rendimiento en materia seca de tubérculos, ambos en la cosecha final.....	93
Figura 6. Índice de área foliar (LAI) en función de los días después de la siembra (DDS).....	94
Figura 7. Relación entre el índice de nutrición de nitrógeno (NNI) promedio y: A. Índice de área foliar máximo (LAI). B. Duración del área foliar. C. Contenido % promedio de N en hoja. D. Contenido promedio de N por área foliar ($g\ N\ m^{-2}$).....	95
Figura 8. Relación entre el índice de nutrición de nitrógeno (NNI) promedio y: A. Radiación fotosintéticamente activa interceptada acumulada (IPAR). B. Eficiencia en el uso de la luz promedio (RUE), ambos hasta 67 DDE.....	97

Capítulo 4

Figura 1. Curso con los días transcurridos después de la emergencia (DDE) de: A. Biomasa total. B. Biomasa de tubérculos. C. Biomasa y necromasa de vástagos. D. Biomasa de raíces.....	116
Figura 2. Curso de la relación (%) de la biomasa de tubérculos (A), de vástagos (B) y de raíces (C) a biomasa total y de la biomasa de hojas a la biomasa de biovástagos (D), con los días transcurridos después de la emergencia (DDE).....	119
Figura 3. Curso de las tasas de crecimiento absoluto (AGR) y de tubérculos (TGR) y de las tasas de migración de asimilados hacia los tubérculos, con los días transcurridos después de la emergencia (DDE), para cada uno de los tratamientos: FM, G+F, P+F y G+P+F.....	122

Figura 4. Curso de la concentración de nitrógeno (%) en los órganos: hojas, tallos, raíces y tubérculos, con los días transcurridos después de la emergencia (DDE).....	123
Figura 5. Curso con los días transcurridos después de la emergencia (DDE) del nitrógeno acumulado en: A. Biomasa total. B. Biomasa de tubérculos. C. Biomasa y necromasa de vástagos. D. Biomasa de raíces.....	125
Figura 6. Curso de las tasas diarias de acumulación de nitrógeno en la biomasa total (NAR) y en los tubérculos (TNAR) y de las tasa de migración de nitrógeno hacia los tubérculos, con los días transcurridos después de la emergencia (DDE), para cada uno de los tratamientos: FM, G+F, P+F y G+P+F.....	127

Capítulo 5

Figura 1. Curso con los días transcurridos después de la siembra (DDS) de las cantidades de N en el suelo (g N m^{-2}): A. Mineral total. B. En forma de amonio (N-NH_4^+) y de nitrato+nitrito (N-NO_3^-).....	152
Figura 2. Curso con los días transcurridos después de la siembra (DDS) de las cantidades de N en el suelo (g N m^{-2}): A. Total extraíble. B. Orgánico extraíble. C. En la biomasa microbiana; para cada tratamiento.....	154
Figura 3. Curso con los días transcurridos después de la siembra (DDS) de: A. Cantidad de N acumulado en el cultivo para cada uno de los tratamientos y de la demanda de N por el cultivo (g N m^{-2}). B. Tasas diarias de acumulación de N en el cultivo para cada uno de los tratamientos y tasa diaria de demanda de N por el cultivo ($\text{g N m}^{-2} \text{d}^{-1}$), calculadas (Ec. 4).....	157
Figura 4. Curso con los días transcurridos después de la siembra (DDS) de: A. Cantidad de agua drenada (mm). B. Cantidad de N lixiviada (g N m^{-2}); para cada uno de los tratamientos.....	158
Figura 5. Curso con los días transcurridos después de la siembra (DDS) de: A. Cantidad de N total extraíble en el suelo (g N m^{-2}) en eje Y principal, tasas de demanda y acumulación de N en el cultivo (g N m^{-2}) en eje Y secundario. B. Disponibilidad de N mineral en el suelo (g N m^{-2}) en eje Y principal, tasas de demanda y acumulación de N en el cultivo en eje Y secundario.....	159
Figura 6. Regresión lineal de la cantidad de N acumulado en el cultivo (g N m^{-2}) respecto: A. Cantidad de N mineral disponible en suelo (g N m^{-2}). B. Biomasa de raíces (g m^{-2}) para cada uno de los muestreos efectuados en los días (DDS) indicados	160

Capítulo 6

Figura 1. Curso con los días transcurridos después de la siembra (DDS) de: A. Cantidad de N acumulado (g N m^{-2}) en las plantas de cada uno de los tratamientos B. Disponibilidad de N mineral en el suelo (g N m^{-2}) en eje Y principal y tasas de acumulación de N en las plantas ($\text{g N m}^{-2} \text{d}^{-1}$) en eje Y secundario.....	189
Figura 2. Regresión lineal de la cantidad de N acumulado en las plantas (g N m^{-2}) respecto: A. Biomasa de raíces (g m^{-2}). B. Cantidad de N mineral disponible en el suelo (g N m^{-2}) para cada uno de los muestreos efectuados en los días (DDS) indicados.....	190
Figura 3. Curso a partir de la fecha de siembra (dd/mm), de la distribución porcentual del N proveniente del fertilizante mineral (% Nf) entre plantas y distintos compartimentos del suelo.....	192
Figura 4. Distribución porcentual del N proveniente del fertilizante mineral (% Nf) en la cosecha final, entre plantas y distintos compartimentos del suelo.....	193
Figura 5. Balance de N en el agroecosistema entre la siembra y 33 DDS.....	196
Figura 6. Balance de N en el agroecosistema entre 33 DDS y la cosecha final.....	197

Capítulo 1

Introducción general

Antecedentes

Agricultura andina

En las zonas altas de la cordillera de Mérida (entre 2000 y 3800 msnm), en los Andes Venezolanos, ha ocurrido un proceso histórico de tecnificación de la agricultura desde la época precolombina hasta el presente. Durante la época precolombina los indígenas se asentaron fundamentalmente en los valles altos y bolsones intermontanos climáticamente más secos, localizados por debajo de los páramos, desarrollando una agricultura basada fundamentalmente en el cultivo de tubérculos: papa, ulluco y oka (Monasterio, 1980). Posteriormente los conquistadores españoles introdujeron cereales, principalmente trigo, en estos mismos ambientes. El auge triguero, que abarcó aproximadamente 200 años, desarrollado sobre suelos frágiles de ladera, con fuertes pendientes, fue disminuyendo a medida que los suelos se erosionaban y degradaban (Monasterio, 1980). Para la década 1950-1960, como consecuencia del creciente proceso productivo petrolero desarrollado en Venezuela, inmigrantes procedentes principalmente de las Islas Canarias inician en esta zona andina un proceso de desarrollo agrícola basado en la explotación intensiva de tubérculos y hortalizas que sustituye a los cultivos tradicionales de trigo y arveja (Ramírez y Pérez, 1982). Los isleños introducen nuevas técnicas de preparación de tierras y riego por aspersión, empleo de fertilizantes, plaguicidas y semillas importadas de distintas variedades de papa blanca, cultivo de hortalizas, mecanización, etc. (Monasterio, 1980). Además, los proyectos agrícolas de los distintos gobiernos del Estado venezolano, tales como el Subsidio Conservacionista y el Programa de los Valles Altos de la Corporación de Los Andes (CORPOANDES), han incentivado el riego por aspersión, trayendo como consecuencia la diversificación de la horticultura. En los últimos veinte años la agricultura en esta zona ha experimentado un crecimiento sostenido basado en el cultivo de variedades foráneas y utilización de tecnologías modernas (Gutiérrez, 1996, Velásquez, 2001). A partir de 1989, las presiones económicas se agudizan sobre los agricultores, debido fundamentalmente a los bajos precios de sus productos a “puerta de finca” y al aumento de los precios de los insumos agrícolas. Esta situación se genera

principalmente por las políticas de ajuste estructural adoptadas por el gobierno venezolano como consecuencia del fenómeno de globalización o inserción del país en los mercados internacionales, entre las cuales destacan la eliminación de los subsidios y el levantamiento de las barreras arancelarias. Como respuesta a esta situación, los agricultores han buscado alternativas que les permitan aumentar la productividad económica (Arias, 1996; Gutiérrez, 1996).

Cultivos de papa y enmiendas orgánicas

Como estrategia para aumentar la productividad económica de sus cultivos, los agricultores de la zona han recurrido a la especialización y a la intensificación.

La especialización ha consistido fundamentalmente en cultivar solamente los rubros que ofrecen ventajas económicas competitivas para el agricultor. De esta forma los agricultores de los distintos valles altos de la región andina en determinadas épocas han tenido la tendencia a especializarse en el cultivo ya sea de papa, ajo, zanahoria, fresa, hortalizas, etc. generalmente en rotación. Entre estos rubros se destaca la papa, por la importante proporción que representa la producción de esta zona tanto a escala regional como nacional (Gutiérrez, 1996, Ministerio de Producción y Comercio, 1999).

La intensificación ha consistido principalmente en tratar de lograr mayores rendimientos de cosecha por superficie cultivada y por año. Con esta finalidad los agricultores recurren al empleo de semillas certificadas de variedades de alto rendimiento, a la reducción o eliminación de los períodos de descanso o barbecho para lograr una mayor utilización temporal de las parcelas agrícolas y al suministro de mayores cantidades de agua para riego.

Estas estrategias han requerido el empleo de mayores cantidades de fertilizantes químicos y de enmiendas orgánicas. Estas últimas consisten principalmente en: estiércol de pollo o gallina (gallinazo), estiércol de chivo y cáscara de arroz. De estos materiales orgánicos, el gallinazo y la cáscara de arroz son los más utilizados debido a que se producen a escala industrial y a los rendimientos satisfactorios obtenidos con estos residuos. Estas enmiendas generalmente se suministran combinadas con fertilizantes minerales. Las combinaciones realizadas, las cantidades empleadas así como la frecuencia de suministro, son variables y se basan principalmente en: 1) el conocimiento empírico de

los productores, fundamentado principalmente en la observación del desarrollo del cultivo y los rendimientos obtenidos en términos de cosecha y de dinero; 2) la accesibilidad de los vehículos de transporte a los terrenos que se cultivan y 3) la disponibilidad presupuestaria de los productores en el momento de la siembra. En cuanto a las cantidades utilizadas en el cultivo de papa, se tiene información (comunicación personal de productores) de suministros que oscilan entre 10 y 30 Mg ha⁻¹año⁻¹ de gallinazo repartidos, según el número de ciclos de cultivo realizados, en una a tres dosis aplicadas antes de la siembra. En cuanto a la cáscara de arroz se utilizan cantidades que oscilan entre 30 y 90 Mg ha⁻¹ para dos ciclos de cultivo (CORPOANDES, 1995), en combinación con gallinazo y/o fertilizante mineral. En relación a la fertilización mineral son frecuentes aplicaciones entre 150 y 300 kg N ha⁻¹ para cada cultivo que pueden ser repartidas entre la siembra y el aporque.

Surgen entonces las siguientes interrogantes sobre el empleo de enmiendas orgánicas en estos agroecosistemas: ¿qué ventajas ofrecen?; ¿cuál es la función principal que cumplen?; ¿cómo optimizar su empleo?; ¿cuál es su efecto sobre la sustentabilidad del agroecosistema?

Función de las enmiendas orgánicas

Para los productores agrícolas de la zona alta de los Andes venezolanos, la aplicación de enmiendas orgánicas se ha convertido en una práctica necesaria para aumentar y sostener los rendimientos de cosecha. Es decir, su función primordial parece ser la de compensar la pérdida de fertilidad de los suelos que en la agricultura tradicional era restablecida, en parte, mediante los períodos de descanso (Sarmiento, 1995; Llambí, 1997; Sarmiento y Bottner, 2002).

La fertilidad depende de una serie de factores edáficos, climáticos y biológicos que regulan la disponibilidad de agua y nutrientes para los cultivos. En este sentido, los residuos orgánicos, combinados o no con fertilizantes minerales, aumentan la fertilidad del suelo principalmente por las siguientes razones (Sánchez et al., 1989):

- 1- Constituyen una fuente directa de nutrientes para los cultivos.
- 2- Ayudan al mantenimiento del contenido de materia orgánica del suelo (MOS), la cual mejora las propiedades físicas y químicas del mismo: mayor capacidad de retención de agua y nutrientes, mejor estructura y menores pérdidas por erosión y escorrentía.

En el presente trabajo, aún cuando se consideran diversos aspectos relacionados con estos factores, la atención se centra principalmente en la función de las enmiendas orgánicas como fuente de nutrientes para los cultivos y su relación con la materia orgánica del suelo. Particularmente las interacciones con la microbiota del suelo que regula los procesos de transferencia y ciclado de nutrientes en el agroecosistema (Sánchez et al., 1989; Myers et al., 1994; Agren y Bosatta, 1996; Friedel et al., 2001).

Es ampliamente conocido que, de los diferentes nutrientes esenciales para los cultivos, el nitrógeno es el elemento que con mayor frecuencia condiciona la productividad del agroecosistema. La experiencia indica que si no se añade N, el crecimiento de las plantas y los rendimientos de cosecha se ven limitados (Bowen y Baethgen, 1998). En los agroecosistemas terrestres es tan importante el N, que diversas variables del estatus y la dinámica del N edáfico, como los contenidos de N total y N potencialmente mineralizable y la nitrificación, han sido propuestas no sólo como indicadores básicos de la calidad y fertilidad de los suelos (McCarty y Meisenger, 1997; Knoepp et al., 2000) sino también para predecir su productividad potencial (Nilsson et al., 1995; González-Prieto y Villar, 2003). Por otra parte, el gallinazo generalmente contiene N en forma orgánica y también cantidades relativamente altas de N en forma mineral (Nodar et al., 1990), que constituye una fuente directa de este nutriente tanto para las plantas como para los microorganismos del suelo. Por estas razones hemos escogido al nitrógeno como elemento clave para estudiar la función de las enmiendas orgánicas como factor regulador del suministro de nutrientes para los cultivos de papa en la zona andina.

Optimización de la fertilización nitrogenada

Justificación

Dada la importancia, en términos económicos y de superficie cultivada, que representa la producción de papa para la región andina venezolana y en vista de que en los cultivos de papa de esta zona se hacen cuantiosas aplicaciones de nitrógeno en forma orgánica y/o mineral, consideramos de importancia prioritaria racionalizar y optimizar las cantidades suministradas de este nutriente, no sólo debido a su obvia repercusión en los costos económicos de la producción de tubérculos sino también a su costo ambiental (Bowen et al., 1999). Respecto al impacto ambiental, Sandia (1995; 1997) y Arias (1996)

indican que el uso del gallinazo ha ocasionado efectos negativos sobre la salud de los habitantes de algunas localidades del estado Mérida, debido principalmente a su contribución a la proliferación de la mosca común. Además, parte del N suministrado puede perderse del agroecosistema y puede constituirse, a través del proceso de lixiviación, en fuente de contaminación de nitratos en las corrientes de agua y, a través del proceso de desnitrificación, en fuente de contaminación atmosférica por óxidos de nitrógeno (Paul y Clark, 1989; Shepherd y Bhogal, 1998). Es de hacer notar que existe muy poca información sobre la magnitud de las pérdidas de compuestos nitrogenados de los agroecosistemas papeiros en los Andes venezolanos.

La optimización de la fertilización nitrogenada debe fundamentarse en el aumento de la eficiencia en el uso del N, entendida ésta como la proporción de la cantidad de N aplicada que es utilizada por el cultivo (Bowen y Baethgen, 1998). Esta optimización podría lograrse, mediante prácticas de manejo tales como la selección de la cantidad, calidad, forma y momento de aplicación de fertilizantes minerales y enmiendas orgánicas que permitan obtener el máximo rendimiento de cosecha con las menores pérdidas de N desde el agroecosistema (Myers et al., 1994; Bowen y Baethgen, 1998).

Sincronización de la demanda y la disponibilidad de nitrógeno

Para aumentar la eficiencia en el uso del N y optimizar la fertilización nitrogenada, una de las alternativas planteadas es lograr una buena “sincronización” entre la disponibilidad de N en el suelo y la demanda de N por el cultivo durante su desarrollo (Swift, 1984). Es decir, tratar de lograr que la oferta de N en el suelo en formas absorbibles por las plantas, principalmente amonio y nitratos, sea similar a los requerimientos de N de estas plantas durante todo el ciclo de cultivo, ya que cuando la disponibilidad sea menor que la demanda, el crecimiento del cultivo se verá limitado y el rendimiento de cosecha resultará disminuido, mientras que durante el tiempo en que la disponibilidad exceda a la demanda, este exceso de N podría perderse del agroecosistema por lavado, volatilización y desnitrificación, dependiendo de las condiciones ambientales prevalecientes. En cambio, una adecuada sincronización debería permitir satisfacer la demanda de N por el cultivo con las menores pérdidas. Esta sincronización, según indican Myers et al. (1994), involucra no sólo la escala temporal sino también la escala espacial, en el sentido de la localización de

los nutrientes con respecto a las raíces de las plantas. El tema de la sincronización es tan relevante que constituye una de las propuestas de estudio más importantes del Programa “Tropical Soil Biology and Fertility” (TSBF), (Swift, 1984, 1987; Woomer y Swift, 1994) cuyo objetivo fundamental es generar conocimientos que contribuyan con el mejoramiento de la fertilidad de los suelos y la productividad de los cultivos en la zona intertropical. En este sentido Swift (1987) ha planteado, como una de las alternativas para lograr la sincronización, la posibilidad de seleccionar en base a su calidad las enmiendas orgánicas suministradas para así controlar la liberación de nutrientes y la disponibilidad de N de manera que coincida con los requerimientos del cultivo.

Un enfoque conceptual agroecosistémico.

Teoría ecosistémica e hipótesis de la sincronización.

Agren y Bosatta (1996) definen la ecología ecosistémica como la subdisciplina que estudia la transformación, flujo y acumulación de energía y materia. En el presente trabajo se plantea que el conocimiento de los factores y procesos que determinan el flujo de nutrientes entre los distintos compartimentos de un agroecosistema y entre éste y el ambiente que lo rodea debería constituir la base fundamental para entender su funcionamiento y por lo tanto, se requiere de un enfoque ecosistémico para analizar el problema de la optimización del uso del N.

En este sentido, la liberación de nutrientes, a través de su mineralización desde la materia orgánica del suelo (MOS) y desde los residuos y enmiendas orgánicas hacia la solución del suelo, donde se hacen disponibles para las plantas depende principalmente del proceso de descomposición de estos substratos, realizado en gran medida por los microorganismos heterótrofos que actúan para satisfacer sus requerimientos de materia (C para biosíntesis y nutrientes como el N) y energía (Paul y Clark, 1989; Myers et al., 1994; Agren y Bosatta, 1996; Fontaine et al., 2003). A su vez, la magnitud y velocidad de la descomposición de estos substratos está condicionada por la calidad de los mismos (Myers et al., 1994; Agren y Bosatta, 1996; Mary et al., 1996; Henriksen y Breland, 1999; Hadas et al., 2004) y su interacción con los factores ecológicos del lugar, como son las características del suelo, clima y prácticas de manejo (Sánchez et al., 1989; Swift y Anderson, 1993; Myers et al., 1994). Respecto a la calidad de los substratos, la relación

C/N ha sido uno de los indicadores más utilizados para predecir su descomponibilidad o degradabilidad (Taylor et al., 1989; Myers et al., 1994; Springob y Kirchman, 2003) y para explicar los procesos más importantes de transferencia del N (mineralización-inmovilización) entre la microbiota y el suelo, involucrados en la descomposición (Myers et al., 1994; Agren y Bosatta, 1996). El empleo de la relación C/N de los substratos como indicador se debe a que es una de las características químicas que mejor se relaciona (de manera inversa) con la velocidad de descomposición y la cantidad de N mineralizado (Myers et al., 1994; Janssen, 1996). Adicionalmente a la relación C/N, se han encontrado factores que modifican la velocidad de descomposición de los residuos vegetales y la dinámica de mineralización e inmovilización del N, como por ejemplo, el contenido de lignina o polifenoles (Myers et al., 1994; Janssen, 1996); la concentración de: C soluble, compuestos similares a la celulosa y similares a la lignina, así como la relación C/N de estos compartimentos (Henriksen y Breland, 1999; Hadas et al., 2004).

La teoría ecosistémica indica que la microbiota liberará N en forma mineral a partir del N en forma orgánica del substrato, mineralización, o tomará N mineral de la solución del suelo para incorporarlo en su biomasa, inmovilización, dependiendo de la relación C/N del substrato que utiliza y de sus requerimientos de energía, C y N, los cuales son función de su composición celular (Agren y Bosatta, 1996). Se ha determinado que ambos procesos ocurren simultáneamente, pero según cual de los dos predomine se habla de mineralización neta o inmovilización neta (Paul y Clark, 1989; Duxbury et al., 1989; Myers et al., 1994; Agren y Bosatta, 1996; Mary et al., 1996). Así, Myers et al. (1994), consideran que residuos con relación $C/N > 25$ producen inmovilización neta inicial de N al ser incorporados al suelo, mientras que los residuos con $C/N < 25$ producen mineralización neta de N. Con este criterio clasifican a los primeros (alta C/N) como de baja calidad y a los segundos (baja C/N) como de alta calidad.

Sobre estas bases, Swift (1987) plantea que en el caso de que se empleen residuos de alta calidad los nutrientes serán liberados rápidamente, produciéndose un exceso respecto a la demanda del cultivo en su etapa temprana de desarrollo (Fig.1a) y, por lo tanto, aumentaría el riesgo de que un nutriente como el N se pierda por lavado o por vías gaseosas. En cambio, en el caso de los residuos de baja calidad, inicialmente predominaría el proceso de inmovilización, causando un déficit nutricional en el cultivo (Fig. 1b).

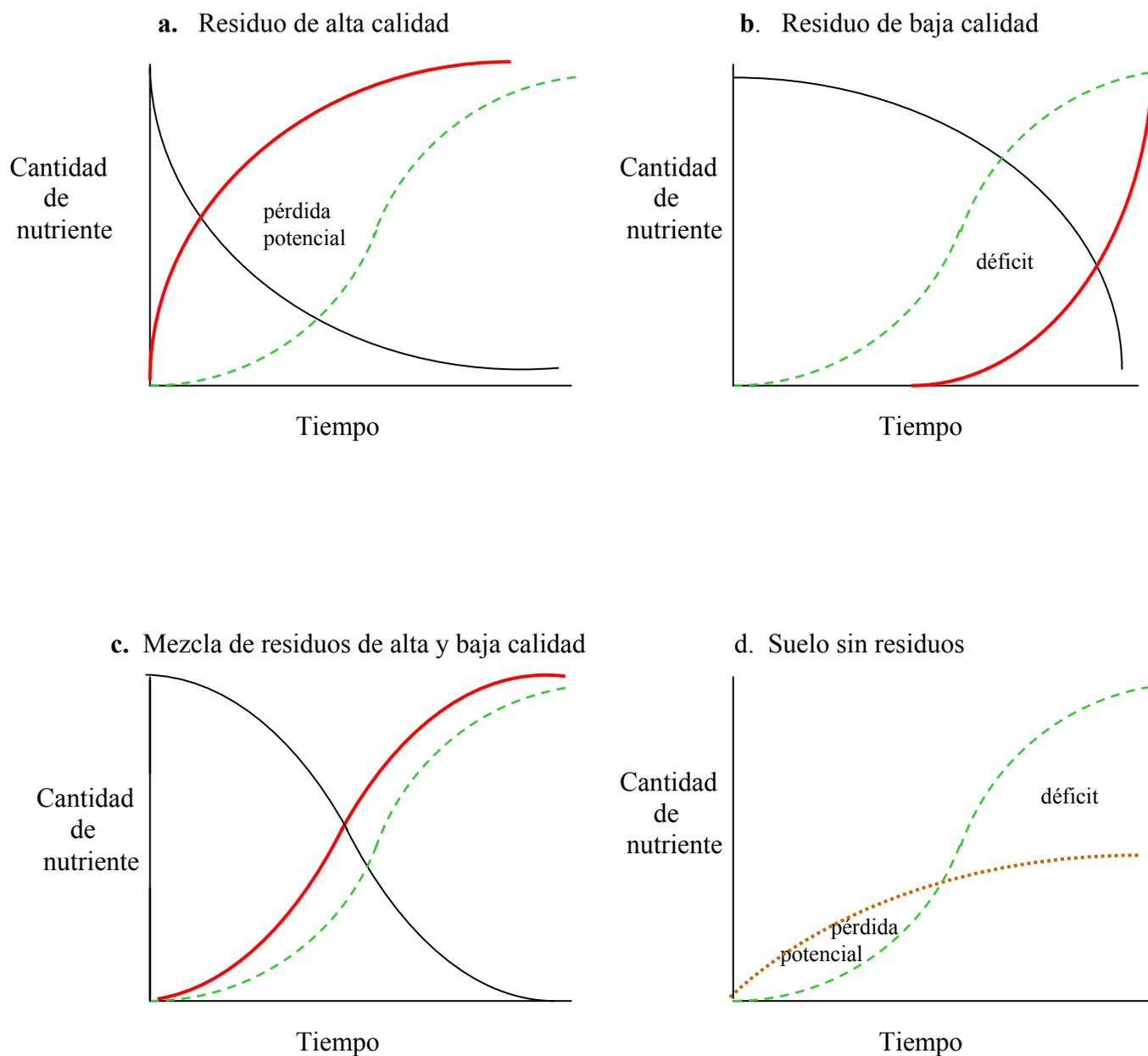


Figura 1. Patrones hipotéticos de la disponibilidad de nutrientes para las plantas en tratamientos con residuos de distinta calidad. Cantidad de nutriente en el residuo en descomposición (—); cantidad de nutriente liberado desde el residuo en descomposición (—); demanda acumulada del nutriente por la planta (- - -); cantidad de nutriente liberado por el suelo (·····).

Tomado de Swift (1987).

Este mismo autor propone la hipótesis de que con una combinación adecuada de residuos de alta y baja calidad podrían regularse los procesos de mineralización e inmovilización para controlar la disponibilidad de N en el suelo y lograr una mejor sincronización con la demanda de N por las plantas (Fig. 1c), que la obtenida con el empleo de dichos residuos de manera separada (Figs. 1a y 1b), contribuyendo así a disminuir las pérdidas de N y a lograr una adecuada nutrición nitrogenada que mejore los rendimientos del cultivo.

Procesos de transferencia del nitrógeno

Además de la cantidad y calidad de los residuos agregados como enmiendas orgánicas y de los dejados por cultivos anteriores o por las plantas que crecen durante el descanso en el caso de que éste exista (Sánchez et al., 1989; Myers et al., 1994), la disponibilidad de N en el suelo va a depender de otros factores como son: las características físicoquímicas del suelo (Scholes et al., 1994), la cantidad y calidad de la materia orgánica y su interacción con la fracción mineral (Duxbury et al., 1989); la actividad de la microbiota (Duxbury et al., 1989) y macrofauna (Lavelle et al., 1994); la cantidad y forma de aplicación de fertilizantes minerales (Barber, 1984); el clima y el contenido de humedad en el suelo (Anderson y Flanagan, 1989 ; Scholes et al., 1994).

La interacción de todos estos factores condiciona la dinámica de los procesos fundamentales que regulan la disponibilidad de N en los agroecosistemas. Estos procesos son: mineralización, inmovilización, fijación, humificación, nitrificación, absorción por las plantas, lixiviación, desnitrificación y volatilización (Paul y Clark, 1989; Myers et al., 1994). En la figura 2 se presenta un diagrama de los principales compartimentos y flujos de N en el agroecosistema de estudio. Se puede observar que el N orgánico y mineral procedente de las enmiendas orgánicas y fertilizantes minerales suministrados, ingresa al suelo, donde por los procesos de inmovilización, mineralización y humificación, mediados principalmente por la actividad microbiana, se distribuye en distintos compartimentos del suelo, desde los cuales el N puede perderse del agroecosistema por lixiviación, erosión, volatilización y desnitrificación y también puede ser absorbido por las plantas. Parte de este N absorbido reingresa al suelo debido a pluviolavado foliar, exudación radicular y mortalidad y otra parte importante sale del sistema con la cosecha de tubérculos.

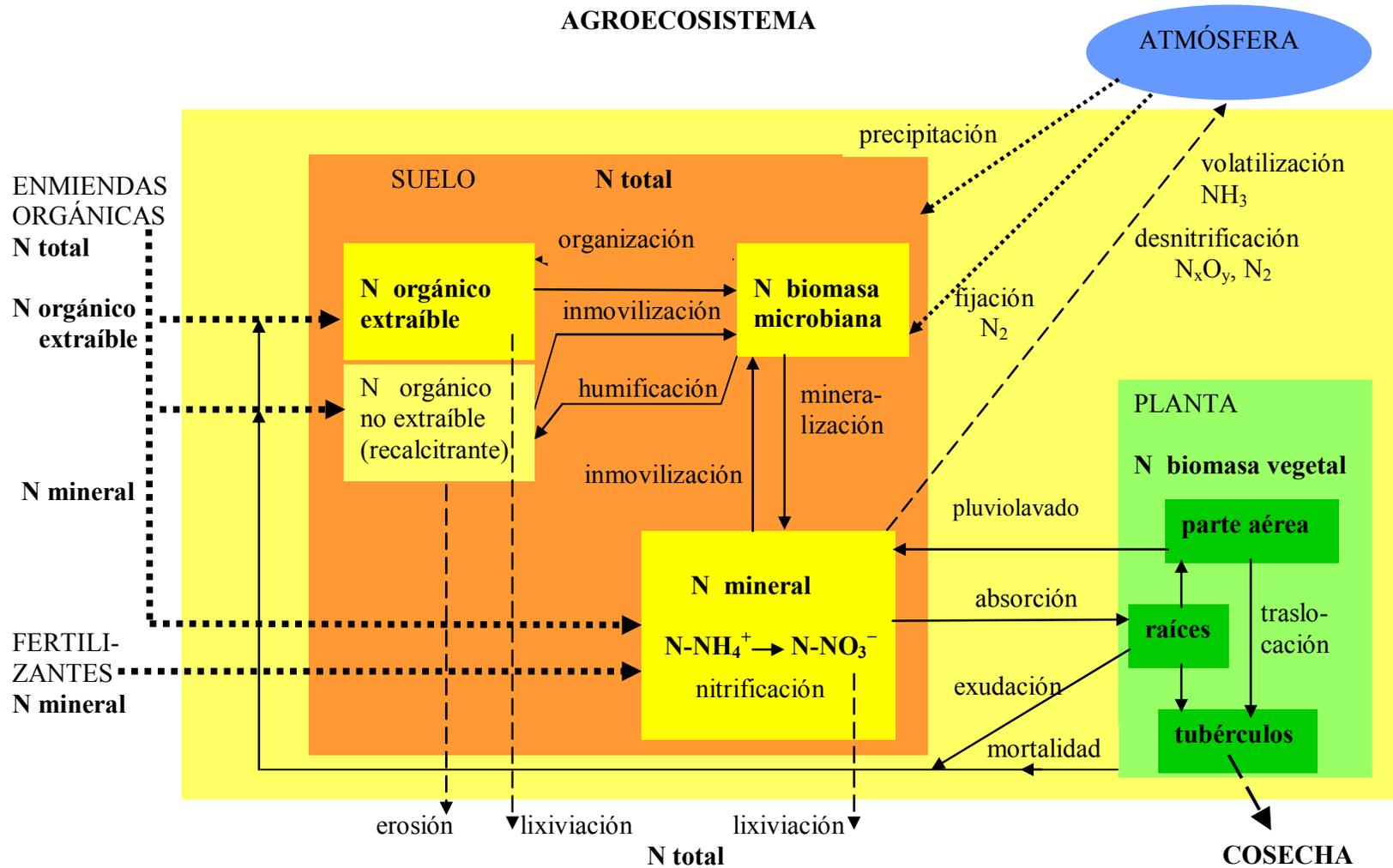


Figura 2. Diagrama con los principales compartimientos y flujos de N en el agroecosistema de estudio.
 En negritas las variables que serán determinadas durante el ciclo del cultivo de papa en el experimento de campo.

Demanda de nitrógeno por el cultivo

En vista de que alcanzar una buena sincronización implica satisfacer los requerimientos de N del cultivo durante su desarrollo, es importante conocer la dinámica de la demanda de N por el cultivo. Bowen y Baethgen (1998) indican que la demanda de N por un cultivo depende del rendimiento potencial de la especie cultivada en las condiciones climáticas del lugar y Bowen et al. (1999) indican que el rendimiento potencial en el caso de la papa depende de la interacción de los rasgos genéticos de la variedad cultivada con factores tales como: fotoperíodo, radiación solar y temperatura, cuando no existan limitaciones en la disponibilidad de agua y nutrientes y en ausencia de plagas y enfermedades.

Dada la complejidad de cuantificar la influencia de los diferentes factores que condicionan los requerimientos de N del cultivo, se han propuesto distintos modelos matemáticos para predecir la demanda de N e incorporarla a los modelos de simulación para el cultivo de papa (Haverkort y MacKerron, 1995; Bowen et al., 1999; Van Delden, 2001). Algunos de estos modelos matemáticos consideran que durante el desarrollo del cultivo de papa, cuando los requerimientos de N no son satisfechos, se produce un déficit de N que limita el crecimiento (Bowen et al., 1999; Van Delden, 2001).

En este sentido, por ejemplo, Van Delden (2001) cuantifica el déficit de N mediante el índice de nutrición de nitrógeno NNI (Lemaire et al., 1989), definido como la relación entre las concentraciones (%) medida y crítica de N en el cultivo, $NNI = C_N \text{ medida} / C_N \text{ crítica}$, siendo esta última, la concentración de N en el cultivo necesaria para obtener el máximo crecimiento y se puede calcular como $C_N \text{ crítica} = 1.35 (1 + 3e^{-0.26 W})$. Esta ecuación fue deducida por Greenwood et al. (1985) para el cultivo de papa, a partir de la relación entre la concentración (%) de N presente en el cultivo y la cantidad de materia seca, W (Mg ha^{-1}), medidas en experimentos con y sin suministro de N. La cuantificación de la deficiencia de N en el cultivo utilizando el NNI reviste gran importancia, ya que permite evaluar en que proporción resultan satisfechos los requerimientos de N del cultivo; sin embargo, este indicador no permite evaluar en términos absolutos la demanda potencial de N por el cultivo.

Por otra parte, algunos modelos de simulación del cultivo de papa, como por ejemplo el modelo DSSAT-SUBSTOR-papa (Tsuji et al., 1994), a los fines de simular el crecimiento del cultivo y pronosticar tanto la demanda de N como el rendimiento potencial en condiciones ambientales y de manejo establecidas, necesita ser previamente calibrado mediante la evaluación de coeficientes genéticos específicos para la variedad cultivada, los cuales determinan el desarrollo del cultivo en las condiciones existentes (Tsuji et al., 1994; Trabaos et al., 1996). Esto significa que la dinámica de la demanda de N por el cultivo de papa no constituye un parámetro preestablecido ni fácilmente predeterminable, debido a la variación de los requerimientos de N en las distintas etapas fenológicas de la variedad particular cultivada y su interacción con los factores ambientales o “coordenadas ecológicas” del sitio.

De la teoría ecosistémica a la práctica agrícola

Myers et al. (1994) presentan una revisión de resultados encontrados en la literatura y en los proyectos del programa TSBF (Swift, 1984, 1987; Woomey y Swift, 1994) y concluyen que algunos resultados apoyan el concepto de la utilización de la calidad de los residuos para alcanzar la sincronización pero que otros resultados no lo apoyan, e indican la necesidad de profundizar en el conocimiento de los procesos involucrados como paso previo para la implementación de este concepto a nivel de prácticas de manejo en el campo. En este sentido, consideran que el tema de la sincronización es una herramienta práctica de gran valor potencial para promover la productividad de los agroecosistemas en el trópico, especialmente aquellos en que el ciclado de nutrientes es manejado con el empleo de enmiendas orgánicas.

De las dos enmiendas orgánicas más ampliamente utilizadas en los agroecosistemas de la zona alta de los Andes venezolanos, gallinazo y cáscara de arroz, se podría esperar para el gallinazo una relación $C/N < 15$ (Contreras, 2002; Beloso, 1991) y para la cáscara de arroz una relación $C/N > 80$ (Cullison, 1983; Hadas et al., 2004), las cuales indicarían que son substratos de alta y baja calidad respectivamente. Por lo tanto, de acuerdo al marco teórico planteado, si se suministran estos residuos de calidades contrastantes en forma combinada, hipotéticamente debemos esperar que se pueda controlar la disponibilidad de N y además sincronizarla con la demanda por el cultivo de papa. Sin embargo, no se tiene

suficiente conocimiento de la dinámica de la demanda potencial de N del cultivo de papa en las condiciones ecológicas de esta zona, ni de los efectos de estas enmiendas sobre el desarrollo del cultivo y tampoco sobre los procesos de transferencia que condicionan el balance del N en estos agroecosistemas, que permita entender su funcionamiento, como condición previa para explorar y plantear posibles alternativas de manejo tendientes a optimizar el uso del N.

Por otra parte, los conceptos antes expuestos, de la teoría ecosistémica y de la hipótesis de la sincronización, deben ser confirmados para un conjunto de condiciones agroecológicas que no ha sido estudiado hasta el presente: condiciones ecológicas de alta montaña tropical; empleo de substratos como cáscara de arroz (baja calidad) combinado con gallinazo (alta calidad) y con fertilizante mineral, en sistemas de producción intensivos de papa (*Solanum tuberosum*). A tal fin, en este trabajo se proponen las siguientes hipótesis que se pretenden comprobar mediante un enfoque agroecosistémico.

Hipótesis

General

En base a la hipótesis de la sincronización expuesta anteriormente, se propone la siguiente hipótesis general:

En los cultivos de papa de la zona alta de los Andes venezolanos se puede aumentar el rendimiento de tubérculos, disminuir las pérdidas de nitrógeno e incrementar la eficiencia en el uso del N, mejorando la sincronización entre la disponibilidad de N en el suelo y la demanda de N por el cultivo mediante la selección de la cantidad y calidad de los fertilizantes minerales y enmiendas orgánicas suministrados.

Específicas

I. La eficiencia en la utilización, por parte del cultivo de papa, del N aplicado como fertilizante mineral o gallinazo, en el piso andino venezolano podría ser baja debido a que el proceso de mineralización del N orgánico contenido en el gallinazo y el proceso de nitrificación del NH_4^+ , procedente de este abono y/o del fertilizante mineral, posiblemente transcurren de manera rápida en una etapa temprana del desarrollo del cultivo en la que la demanda de N es mucho menor que la disponibilidad de este nutriente en el suelo, contribuyendo a que una fracción importante del NO_3^- así producido se pierda por lixiviación u otras vías.

Justificación

Las cantidades de gallinazo y fertilizante mineral nitrogenado aplicadas en los agroecosistemas del piso andino venezolano para mantener la productividad en términos de cosecha, generalmente son bastante altas. El gallinazo tiene un alta concentración de N (del 2 al 4 %) y, por lo tanto, una baja relación C/N. Así, al ser descompuesto por la microbiota, el proceso de liberación de nutrientes debería predominar sobre el proceso de inmovilización, produciendo como resultado neto la mineralización rápida de nutrientes, que en el caso del N es liberado en forma de NH_4^+ . Si sólo una fracción del amonio así liberado o del amonio aplicado en forma de fertilizante mineral es absorbida por el cultivo, porque éste se encuentra en una etapa temprana de desarrollo en la que la demanda de nutrientes es baja (Fig. 3a y 3b), entonces el NH_4^+ tendería a acumularse en el suelo

favoreciendo el proceso de nitrificación, el cual se incrementa a medida que aumenta la concentración de NH_4^+ . Además el proceso de nitrificación puede ser favorecido (Paul y Clark, 1989) por: a) Las prácticas de labranza y la textura arenosa de los suelos que promueven la aeración, ya que la nitrificación es un proceso esencialmente aeróbico. b) La práctica de encalado, ampliamente utilizada en los suelos agrícolas, dado que el proceso de nitrificación alcanza su óptimo en valores de pH comprendidos entre 6.6 y 8.0. c) El riego usualmente aplicado en estos agroecosistemas para mantener la humedad del suelo en valores cercanos a la capacidad de campo. Por otra parte, el exceso de agua por riego o por precipitación sobre suelos bien drenados puede producir el lavado del NO_3^- . De esta manera una parte importante del N aplicado se perdería del agroecosistema sin que pueda ser utilizado por el cultivo (Fig. 3a y 3b). Así mismo, la presencia de NH_4^+ puede favorecer el proceso de volatilización de NH_3 y la presencia de NO_3^- la desnitrificación, que contribuyen a las pérdidas.

II. El N suministrado al cultivo, a través de la fertilización mineral, podría ser protegido mediante la adición de substratos de baja calidad que inicialmente estimulen el proceso de inmovilización microbiana del N, disminuyendo de esta manera las pérdidas por lixiviación del NO_3^- y por otras vías. El N de la microbiota, podría ser mineralizado en una etapa posterior, de manera gradual.

Justificación

El suministro de N en forma mineral (amonio o nitrato) al momento de la siembra implica que en esta etapa la demanda por el cultivo sea menor que la disponibilidad de N en el suelo (fig. 3a). Este exceso del nutriente aumenta el riesgo de pérdidas del agroecosistema por los procesos de volatilización, lavado y desnitrificación. El N mineral también puede ser inmovilizado por la microbiota y de esta manera protegido. Sin embargo, para que ésto ocurra la microbiota tiene que disponer no sólo de una fuente de nutrientes que le permita satisfacer su demanda nutricional sino también de una fuente de C para biosíntesis y energía. Esta podría ser cubierta por un substrato de baja calidad (alta relación C/N) produciéndose entonces la inmovilización por la microbiota del N mineral que, en ausencia de una fuente de C, tendería a perderse del sistema.

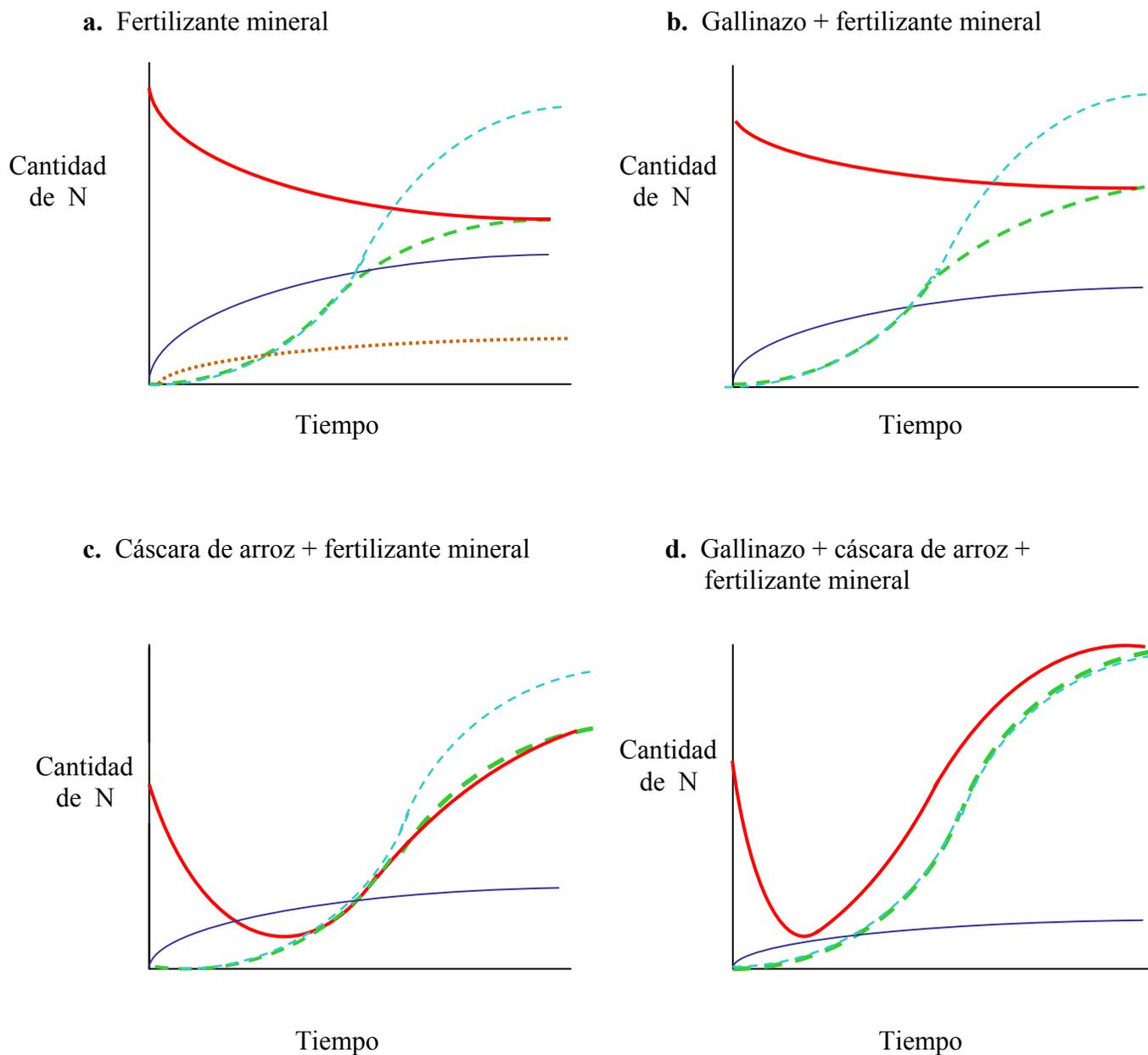


Figura 3. Tendencias hipotéticas de la disponibilidad de N en el suelo (—); la demanda potencial de N por el cultivo (---); la absorción de N por el cultivo (- - -); la cantidad de N perdida (—) y la mineralización de N desde la MOS (.....), en cada uno de los tratamientos realizados en los experimentos de campo. La mineralización de N desde la MOS (.....) sólo se representó en (a) por motivos de simplificación; sin embargo, debe ocurrir con tendencia similar en todos los casos.

Posteriormente, cuando se consume la fuente nutricional o energética se produce la liberación paulatina de N debida al proceso de mortalidad de la microbiota. Si esta liberación de N se produce a medida que el cultivo crece y sus requerimientos nutricionales aumentan se podría lograr una mayor eficiencia en la utilización del fertilizante mineral por parte del cultivo y, por lo tanto, mejor desarrollo y rendimiento, según se ve al comparar las figuras 3a y 3c.

III. Mediante la aplicación combinada de enmiendas orgánicas de calidad contrastante, gallinazo y cáscara de arroz, se podría promover una mayor sincronización entre la disponibilidad de N en el suelo y la demanda de N por el cultivo que la obtenida mediante la aplicación de estas enmiendas de manera separada. Esta mayor sincronización debería mejorar los rendimientos y disminuir la pérdida de N desde el agroecosistema.

Justificación

La aplicación, antes de la siembra, de un sustrato de alta calidad como el gallinazo, debería favorecer inicialmente la mineralización del N frente a la inmovilización, causando que la disponibilidad de N en el suelo sea mayor que la demanda por el cultivo durante su primera etapa de desarrollo (fig. 3b). De esta manera se aumenta el riesgo de que se pierda una fracción importante del N suministrado, por volatilización, desnitrificación o lavado, el cual no estaría disponible para las etapas siguientes del desarrollo del cultivo. Por el contrario, la aplicación de un sustrato de baja calidad, como la cáscara de arroz, favorecería la inmovilización del N, en las primeras etapas de la descomposición, causando que la disponibilidad de N en el suelo sea menor que la demanda del cultivo, el cual se vería afectado por un retraso en su crecimiento (Fig. 1b).

En cambio, la aplicación combinada de sustratos de calidad contrastante debería regular la velocidad de los procesos de mineralización e inmovilización del N por la biomasa microbiana. De esta manera, el N mineral, NH_4^+ y NO_3^- , en la solución del suelo se encontraría disponible para las plantas en cantidad suficiente para cubrir la demanda del cultivo durante todo su desarrollo, sin que se produzca un exceso que favorezca las pérdidas desde el agroecosistema (fig. 3d). La sincronización así alcanzada

debe permitir la obtención de mayores rendimientos con menores pérdidas en comparación con la aplicación individual de estas enmiendas orgánicas (Fig. 3b, 3c y 3d).

En la figura 4 se presentan de manera esquemática los fundamentos de la teoría ecosistémica y de la hipótesis de la sincronización que constituyen la base conceptual de las hipótesis planteadas en este trabajo. Se puede observar que de acuerdo a la teoría ecosistémica, la microbiota actúa sobre los substratos orgánicos, descomponiéndolos, para satisfacer sus requerimientos de energía, C y N, los cuales dependen de su relación C/N. La magnitud y velocidad de la descomposición de estos substratos y de los procesos de mineralización e inmovilización involucrados, que determinan la concentración de N mineral en el suelo, están condicionadas por la calidad de los mismos y su interacción con los factores ambientales. A partir de estos conceptos, la hipótesis de la sincronización plantea que con una combinación adecuada de residuos de alta y baja calidad podrían regularse los procesos de mineralización e inmovilización para controlar la disponibilidad de N y lograr una mejor sincronización entre ésta y la demanda de N por las plantas, contribuyendo así a disminuir las pérdidas de N y a lograr una adecuada nutrición nitrogenada que mejore los rendimientos de cosecha.

En la figura 4 también se presentan de forma resumida los aportes esperados, a través de la comprobación de las hipótesis correspondientes, tanto a nivel de la confirmación de los fundamentos teóricos lograda mediante el estudio de un conjunto novedoso (no estudiado con anterioridad) de condiciones agroecológicas, como a nivel de su potencial aplicación para mejorar la eficiencia en la utilización del N suministrado al agroecosistema papa en el piso andino venezolano.

Para comprobar las hipótesis antes expuestas, se planteó alcanzar los objetivos que se presentan a continuación.

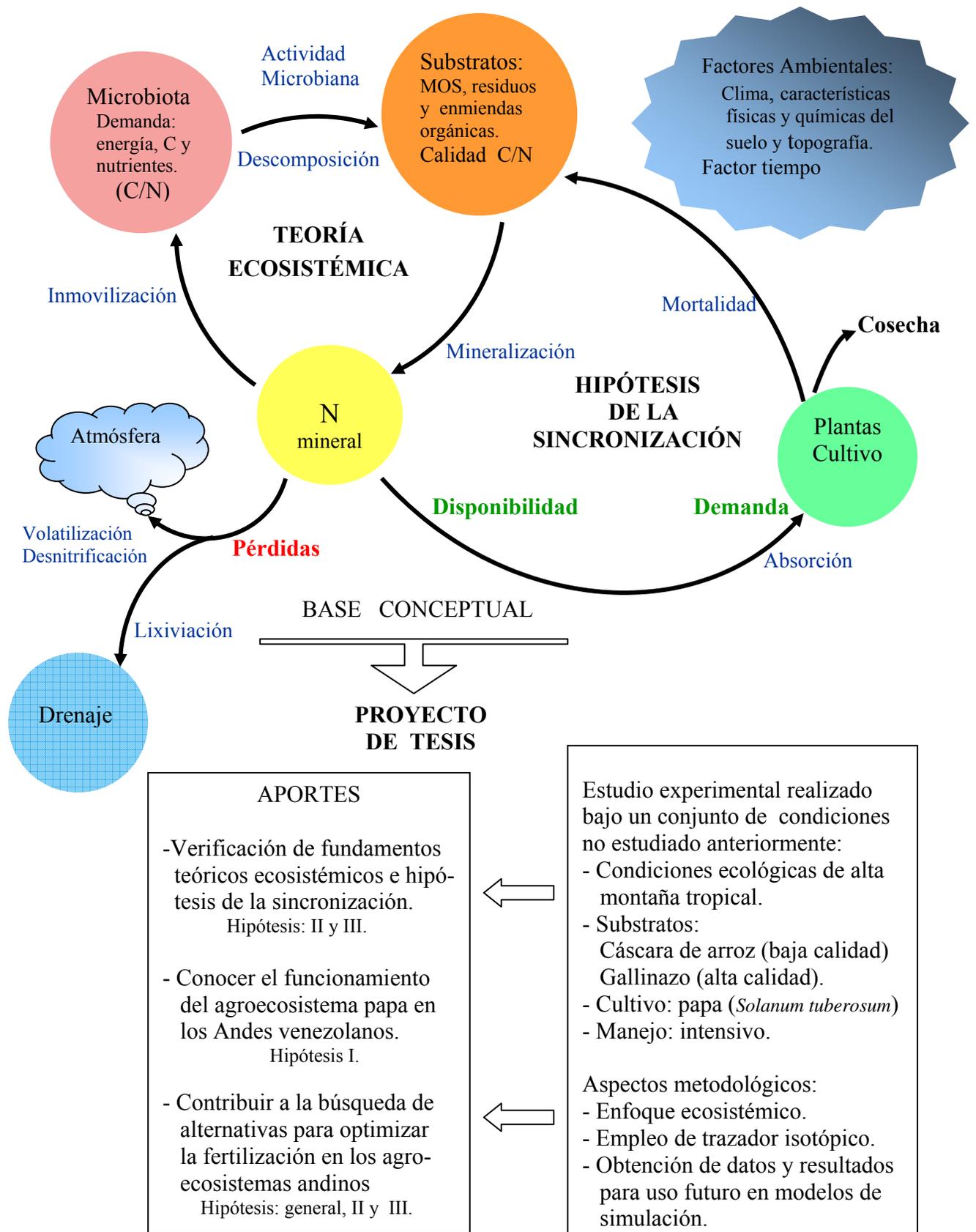


Figura 4. Base conceptual y aportes esperados del estudio.

Objetivos

General

Estudiar el efecto del suministro de enmiendas orgánicas de diferente calidad: gallinazo y cáscara de arroz (pargana), combinadas con fertilizante mineral, sobre la dinámica de los procesos de transferencia del nitrógeno que regulan el funcionamiento del agroecosistema papa (*Solanum tuberosum*) en el piso andino venezolano para:

- 1- Aportar información que contribuya a la evaluación de la hipótesis de la sincronización y a la confirmación de los fundamentos teóricos ecosistémicos.
- 2- Contribuir a la búsqueda de alternativas de manejo para optimizar el empleo de enmiendas orgánicas y fertilizantes minerales aumentando la eficiencia en el uso del N para obtener rendimientos mayores con menores pérdidas de N.

Específicos

1. Caracterizar las enmiendas orgánicas gallinazo y cáscara de arroz en cuanto a su calidad y estudiar los efectos del suministro separado y combinado de estos substratos sobre los procesos de mineralización del C y de mineralización e inmovilización del N.
2. Analizar el efecto del suministro de fuentes de fertilización nitrogenada de diferente calidad, gallinazo (alta calidad) y cáscara de arroz (baja calidad), combinadas con fertilizante mineral, sobre:
 - a- El desarrollo y rendimiento del cultivo de papa, evaluando la dinámica de la acumulación de N y la deficiencia de este nutriente en el cultivo con cada tipo de fertilización.
 - b- La distribución de la biomasa y del N entre los órganos de las plantas durante su desarrollo y analizar su relación con el rendimiento final del cultivo.
3. Evaluar los procesos del ciclo del N: mineralización, inmovilización, nitrificación, lixiviación y acumulación por las plantas, en el cultivo de papa, con suministro de fuentes de fertilización nitrogenada de diferente calidad: gallinazo y cáscara de arroz combinadas con fertilizante mineral.

4. Analizar el balance de N en el cultivo de papa con el suministro de las distintas fuentes de fertilización nitrogenada antes señaladas.

Metodología

Con la finalidad de lograr estos objetivos, se realizaron tres experimentos:

1- Experimento de campo. Cultivo de papa en parcelas, con cuatro tratamientos de fertilización, con igual cantidad total de N aplicada (250 kg ha^{-1}), que consistieron en el suministro de fuentes de fertilización nitrogenada de diferente calidad: gallinazo y cáscara de arroz combinadas con fertilizante mineral (Capítulo 3, tabla 1). Se empleó un diseño experimental de bloques al azar con tres réplicas. El diseño de las parcelas así como el diseño de muestreos se fundamentó en las recomendaciones del Proyecto “International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer” (IBSNAT, 1990), a los fines de utilizar un diseño previamente probado y además, de obtener datos que permitirán, en una etapa posterior, calibrar y validar el modelo de simulación DSSAT-SUBSTOR-papa (Tsuji et al., 1994).

2- Experimento de campo. Cultivo de plantas de papa en canteros, utilizando los mismos tratamientos que en el experimento anterior, con la diferencia que se suministró $(^{15}\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, como trazador isotópico a los fines de evaluar como se distribuye el N-NH_4^+ suministrado como fertilizante mineral, entre los distintos compartimientos del agroecosistema.

En estos dos experimentos, el nivel de aplicación de N (250 kg ha^{-1}) fue escogido en base a los niveles de extracción de N y recomendaciones presentadas por Méndez (1999) para el cultivo de papa. En el tratamiento utilizado como control (FM) se suministró todo el N en forma mineral mientras que en los otros tres se sustituyó una parte (150 kg ha^{-1}) por enmiendas orgánicas para evaluar los efectos de estas (objetivos específicos 2, 3 y 4). Se incluyó N mineral en todos los tratamientos principalmente por tres razones:

- a- Porque la combinación de fertilizante mineral con abonos orgánicos, constituye una práctica frecuente entre los agricultores de la zona.
- b- Para evaluar la capacidad de la microbiota para inmovilizar el N mineral cuando se suministra un substrato de baja calidad (Hipótesis II).

c- Para poder estudiar algunos procesos de transferencia del N, mediante el empleo de $(^{15}\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ como trazador isotópico y dada la dificultad de disponer de enmiendas orgánicas con ^{15}N incorporado. Las cantidades suministradas de N en forma mineral (100 kg ha^{-1}) y en forma de enmiendas orgánicas (150 kg ha^{-1}) se escogieron en base a que la abundancia isotópica esperada en las muestras de plantas y suelos del experimento en canteros, estuviera en un rango entre 0.4 y 4.0 % (Guiraud, 1984).

En estos experimentos, los tratamientos fueron suministrados en una sola dosis antes de la siembra y distribuidos al voleo, debido a que los agricultores, por razones prácticas, generalmente suministran las enmiendas orgánicas de esa manera. Con respecto a los fertilizantes minerales, muchos productores de papa reparten el fertilizante mineral en dos dosis, una en la siembra y la otra en el aporque; sin embargo, en este trabajo se suministraron en una sola dosis antes de la siembra con el objetivo de estudiar la sincronización alcanzada por efecto de las enmiendas orgánicas. La densidad de siembra ($4.44 \text{ plantas m}^{-2}$) utilizada en ambos experimentos y las distancias entre plantas empleadas en el experimento de campo en parcelas fueron las recomendadas por el Proyecto “Internacional Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer” (IBSNAT, 1990) que se encuentran en el rango generalmente utilizado en otros países como en Holanda (Van Delden, 2001) y Alemania (Maidl et al., 2002) y también en el rango utilizado en la zona andina venezolana, entre $3.7 \text{ plantas m}^{-2}$ (Sarmiento, 1995), $4.0 \text{ plantas m}^{-2}$ (CORPOANDES, 1995) y $5.0 \text{ plantas m}^{-2}$ (comunicación personal de productores) con distancias entre hileras entre 70 y 90 cm y en la hilera entre 20 a 30 cm. Estos experimentos se realizaron en una finca productora de papas ubicada en la localidad de Mistique, Mucuchíes, estado Mérida, Venezuela, a una altitud de 2960 m. En esta finca, y en la zona circundante, se cultiva papa (una a dos cosechas por año) en rotación con hortalizas (Ej. ajo, zanahoria, repollo, coles) con alto empleo de insumos. En esta finca se ha empleado este manejo intensivo por lo menos durante los últimos 10 años.

3- Experimento de incubación de un suelo agrícola de los Andes venezolanos, en condiciones controladas de laboratorio, con y sin suministro de las enmiendas orgánicas: gallinazo, cáscara de arroz y ambas combinadas. Se utilizó suelo tomado de la capa 0-10 cm de profundidad en la misma localidad donde se establecieron los experimentos de campo. El tratamiento control (S) fue el suelo sin enmiendas. Las cantidades de las

enmiendas orgánicas gallinazo y pargana suministradas como sustratos (Capítulo 2, tabla1), se escogieron de manera de aplicar en todos los tratamientos la misma cantidad de N (11.9 mg N / 100 g de suelo seco). Esta fue seleccionada considerando un suministro de N de 150 kg ha⁻¹ en la capa de suelo de 0 a 10 cm de profundidad. El valor de 150 kg ha⁻¹ fue la cantidad de N suministrada en forma de enmiendas orgánicas en los experimentos de campo. En los tratamientos del experimento de incubación, a diferencia de los experimentos de campo, no se combinó fertilizante mineral con las enmiendas orgánicas, porque el objetivo principal fue estudiar los procesos de mineralización e inmovilización del N involucrados en la descomposición de los sustratos (objetivo específico 1). Sin embargo se utilizó un tratamiento accesorio que consistió en el suministro de N mineral sin sustratos orgánicos, con la finalidad de evaluar el efecto de la aplicación de N, sobre la descomposición de la materia orgánica del suelo (Mary et al., 1996).

Los detalles experimentales sobre los parámetros medidos, los métodos analíticos empleados así como los métodos de procesamiento de datos utilizados, se presentan en cada uno de los capítulos siguientes que conforman la tesis.

Estructura de la tesis

En el presente capítulo se expusieron los antecedentes que motivaron la realización de esta Tesis, así como también las hipótesis y los objetivos propuestos. En los siguientes cinco capítulos, se abordan los objetivos planteados. El texto de cada uno de estos capítulos ha sido intencionalmente estructurado y organizado en secciones: resumen, introducción, metodología, resultados, discusión y conclusiones, de manera que cada uno de los capítulos pueda constituirse en un artículo a ser publicado de manera independiente. En el último capítulo se presentan en forma resumida las conclusiones más importantes obtenidas y los alcances del trabajo en cuanto a la comprobación de las hipótesis planteadas. En la figura 5 se presenta de manera esquemática la estructura de la tesis, indicando los nombres de cada uno de los capítulos así como su relación con los objetivos planteados.

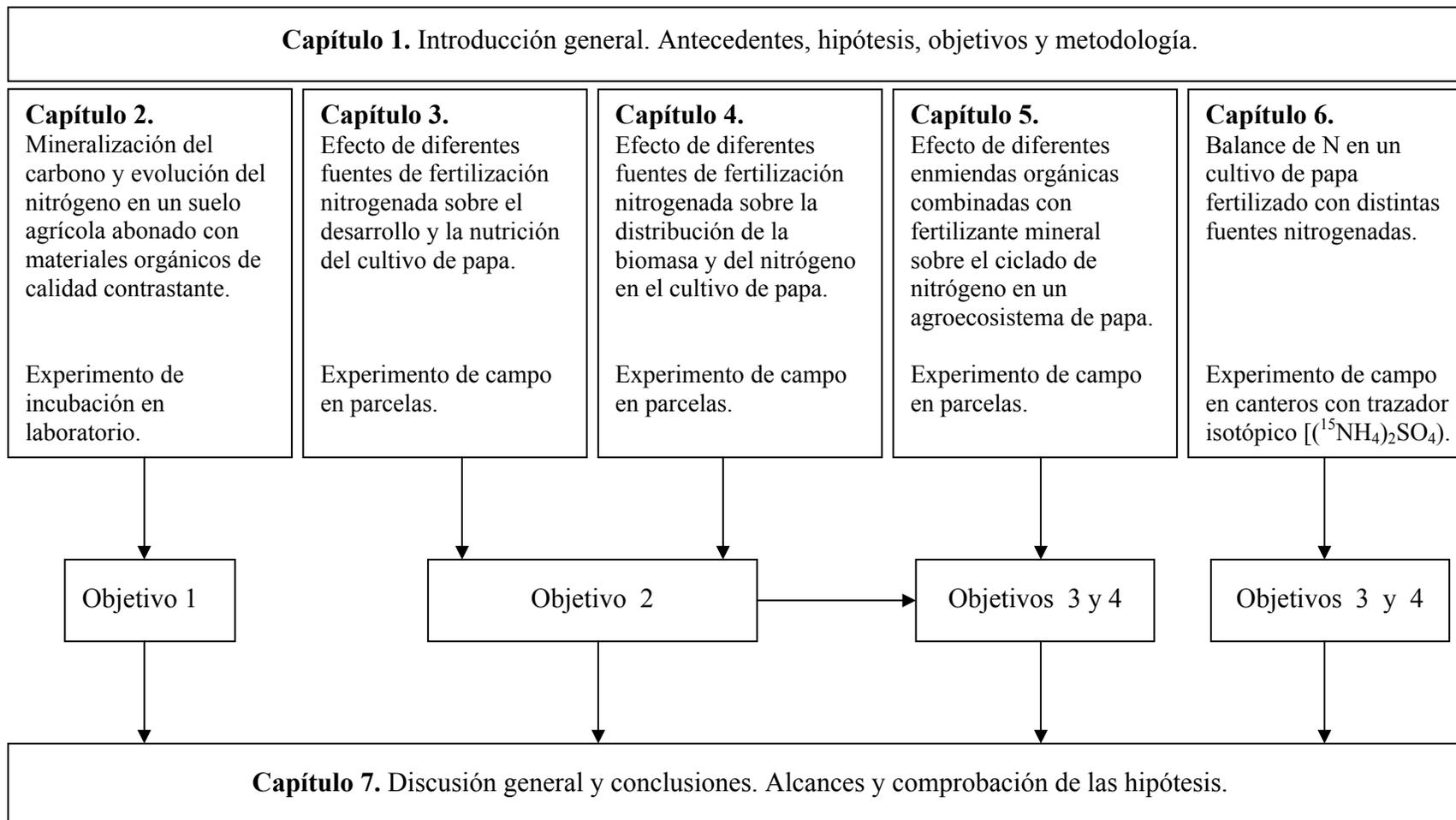


Figura 5. Representación esquemática de la estructura de la Tesis. Las flechas indican los flujos de la información.

Bibliografía

- Agren G., Bosatta E., 1996. Theoretical Ecosystem Ecology. Understanding Element Cycles. Cambridge University Press. 234p.
- Anderson J., Flanagan P., 1989. Biological processes regulating organic matter dynamics in tropical soils. En: D.C. Coleman, J.M. Oades and G.Uehara (Eds.). Dynamics of Soil Organic Matter in Tropical Ecosystems. NifTAL Project. University of Hawaii, USA, pp. 97-123.
- Arias E., 1996. Impactos de las políticas de ajuste estructural en los productores papeiros y hortícolas de los Andes Venezolanos: El caso de Pueblo Llano, Estado Mérida. Tesis de Maestría. IVIC, Caracas, Venezuela. 70p.
- Barber S.A., 1984. Soil Nutrient Bioavailability: A Mechanistic Approach. John Wiley & Sons, Inc. 398p.
- Beloso M.C., 1991. Estudio de la gallinaza como fertilizante agrícola. Tesis Doctoral. Universidad de Santiago de Compostela. Santiago de Compostela, 313 p.
- Bowen W.T., Baethgen W.E., 1998. Simulation as a tool for improving nitrogen management. In: G.Y. Tsuji, G. Hoogenboom, P.K. Thornton (Eds.). Understanding options for Agricultural Production. Kluwer Academic Publishers. The Netherlands, pp. 189-204.
- Bowen W., Cabrera H., Barrera V., Baigorria G., 1999. Simulating the response of potato to applied nitrogen. En: CIP Program Report 1997-1998. International Potato Center. Lima, Perú, pp. 381-386.
- Contreras F., 2002. Efecto de la adición de enmiendas orgánicas sobre las actividades enzimáticas (deshidrogenada, ureasa, fosfomonoesterasa ácida y arisulfatasa) y la mineralización del carbono en suelos del Municipio Rivas Dávila (Estado Mérida). Tesis Doctoral, Postgrado en Ciencia del Suelo, Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela, Maracay, 145p.
- CORPOANDES, 1995. Proyecto Desarrollo Integral Las Cuadras. Mérida, Venezuela. 156p.
- Cullison A.E., 1983. Alimentos y alimentación de animales. Editorial Diana. México, pp. 37- 91.
- Duxbury J. M., Smith M.S., Doran J.W, 1989. Soil organic matter as a source and a sink of plant nutrients. En: D.C. Coleman, J.M. Oades and G.Uehara (Eds.). Dynamics of Soil Organic Matter in Tropical Ecosystems. NifTAL Project. University of Hawaii, USA, pp. 33-67.

- Fontaine S., Mariotti A., Abbadie L., 2003. The priming effect of organic matter: a question of microbial competition? *Soil Biol. Biochem.* 35: 837-843.
- Friedel J.K., Gabel D., Stahr K., 2001. Nitrogen pools and turnover in arable soils under different durations of organic farming: II. Source-and-sink function of the soil microbial biomass or competition with growing plants? *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 164: 421-429.
- González Prieto, S.J., Villar, M.C., 2003. Soil organic N dynamics and stand quality in *Pinus radiata* pinewoods of the temperate humid region. *Soil Biology and Biochemistry* 35, 1395-1404.
- Guiraud G., 1984. Contribution du marquage isotopique a l'évaluation des transferts d'azote entre les compartiments organiques et minéraux dans les systemes sol-plante. Docteur es Sciences Thèse. Université Pierre et Marie Curie. Paris. 335 p.
- Gutiérrez A., 1996. Plan estratégico de desarrollo agrícola del Estado Mérida: Documento sobre el sector agrícola. Centro de Investigaciones Agroalimentarias, Facultad de Ciencias Económicas y Sociales, Mérida, Venezuela, 30p.
- Hadas A., Kautsky L., Goek M., Kara E.E., 2004. Rates of decomposition of plant residues and available nitrogen in soil, related to residue composition through simulation of carbon and nitrogen turnover. *Soil Biol. Biochem.* 36: 255-266.
- Haverkort A.J., MacKerron D.K.L. (Eds.), 1995. *Potato Ecology and Modelling of Crops under Conditions Limiting Growth*. Kluwer Academic Publishers, 379p.
- Henriksen T.M., Breland T.A., 1999. Evaluation of criteria for describing crop residue degradability in a model of carbon and nitrogen turnover in soil. *Soil Biol. Biochem.* 31: 1135-1149.
- IBSNAT, 1990. International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer (IBSNAT) Project. Technical Report 2, Field and Laboratory Methods for the Collection of the IBSNAT Minimum Data Set. Department of Agronomy and Soil Science, Hawaii Institute of Tropical Agriculture and Human Resources, University of Hawaii, 67p.
- Janssen B.H., 1996. Nitrogen mineralization in relation to C: N ratio and decomposability of organic materials. *Plant and Soil* 181: 39-45.
- Knoepp, J.D., Coleman, D.C., Crossley, D.A., Clark, J.S., 2000. Biological indices of soil quality: an ecosystem case study of their use. *Forest Ecology and Management* 138, 357-368.
- Lavelle P., Dangerfield M., Fragoso C., Eschenbrenner V., Lopez-Hernandez D., Pashanasi B. and Brussaard L., 1994. The relationship between soil macrofauna and tropical soil fertility. En: P.L. Woormer and M.J. Swift (Eds.). *The Biological Management of Tropical Soil Fertility*. John Wiley and Sons, Inc., pp. 137-170.

- Lemaire G., Gastal F., Salette J., 1989. Analysis of the effect of nutrition on dry matter yield of sward by reference to potential yield and optimum N content. Proc. XVI Int. Grassland Congr., 4-11 Oct. 1989, Nice, pp. 179-180.
- Llambí L.D., 1997. Recuperación de la fertilidad en una sucesión en el Páramo: Biomasa microbiana y Ciclaje de nitrógeno. Trabajo especial de grado. Universidad Simón Bolívar, Sartenejas, Venezuela, 128p.
- Maidl F. -X., Brunner H., Sticksel E., 2002. Potato uptake and recovery of ¹⁵N- enriched ammonium nitrate. *Geoderma*. 105: 167-177.
- Mary B., Recous S., Darwis D., Robin D., 1996. Interactions between decomposition of plant residues and nitrogen cycling in soil. *Plant and Soil* 181: 71-82.
- McCarty, G.W., Meisinger, J.J., 1997. Effects of N fertilizer treatments on biologically active N pools in soils under plow and no tillage. *Biology and Fertility of Soils* 24, 406-412.
- Méndez R.O., 1999. Fertilización en papa. En: Compendio del curso taller “Producción y certificación de semilla de papa”, Dic. 1999, Centro de Investigaciones Agropecuarias del Estado Mérida, Mucuchíes, Venezuela, pp. 11-21.
- Ministerio de Producción y Comercio, 1999. Potencialidades agrícolas del estado Mérida. Informe técnico. Mérida, Venezuela.
- Monasterio M., 1980. Poblamiento humano y uso de la tierra en los altos andes de Venezuela. En: M. Monasterio (Ed.). *Estudios Ecológicos en los Páramos Andinos*. Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela, pp. 170-198.
- Myers R.J.K., Palm C.A., Cuevas E., Gunatilleke I.U.N., Brossard M., 1994. The synchronization of nutrient mineralization and plant nutrient demand. En: P.L. Woomer and M.J. Swift (Eds.). *The Biological Management of Tropical Soil Fertility*. John Wiley and Sons, Inc., pp. 81-116.
- Nilsson L.O., Hüttl R.F., Johansson V.T., Jochheim H., 1995. Nutrient uptake and cycling in forest ecosystems - present status and future research directions. *Plant and Soil* 168-169, 5-13.
- Nodar R., Acea M.J. & Carballas T., 1990. Microbial composition of poultry excreta. *Biological Wastes*. 33: 95-105.
- Paul E.A. and Clark F.E., 1989. *Soil Microbiology and Biochemistry*. Academic Press, Inc. USA, 273p.

- Ramírez C. y Pérez J.G., 1982. Cambios en el conjunto agrícola del área de Bailadores, Dtto. Rivas Dávila, Estado. Mérida, 1950-1980. Trabajo especial de grado. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela, 82 p.
- Sánchez P., Palm C., Szott L., Cuevas E. and Lal R., 1989. Organic input management in tropical agroecosystems. En: D.C. Coleman, J.M. Oades and G.Uehara (Eds.). Dynamics of Soil Organic Matter in Tropical Ecosystems. NifTAL Project. University of Hawaii, USA, pp. 125-152.
- Sandia L., 1995. Evaluación del impacto de las actividades agropecuarias sobre la salud de la población del Municipio Rivas Dávila, Estado. Mérida, Venezuela. Curso de Postgrado en Formación Ambiental, Facultad Latinoamericana de Ciencias Ambientales. La Plata, Argentina, 109p.
- Sandia L., 1997. Evaluación del impacto de las actividades agropecuarias sobre la salud de la población del Municipio Pueblo Llano, Edo. Mérida, Venezuela. Informe de avance, Convenio CIDIAT-Fundación Polar. CIDIAT, Mérida, Venezuela, 45p.
- Sarmiento L., 1995. Restauration de la fertilité dans un système agricole à jachère longue des hautes Andes du Venezuela. Docteur en Sciences Thèse. Université de Paris-Sud, Paris, 237p.
- Sarmiento L., Bottner P., 2002. Carbon and nitrogen in two soils with different fallow times in the high tropical Andes: indications for fertility restoration. *Applied Soil Ecology*. 19: 79-89.
- Scholes R.J., Dalal R. and Singer S., 1994. Soil physics and fertility: The effects of water, temperature and texture. En: P.L. Woomer and M.J. Swift (Eds.). *The Biological Management of Tropical Soil Fertility*. John Wiley and Sons Inc, pp. 117-136.
- Shepherd, M., Bhogal, A., 1998. Regular applications of poultry litter to a sandy arable soil: Effects on nitrate leaching and nitrogen balance. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 78, 19-29.
- Springob, G, Kirchmann, H., 2003. Bulk soil C to N ratio as a simple measure of net N mineralization from stabilized soil organic matter in sandy arable soils. *Soil Biology & Biochemistry* 35, 629-632.
- Swift M.J. (Ed.), 1984. *Soil Biological Processes and Tropical Soil Fertility: A Proposal for a Collaborative Program of Research*. Biology International. Paris. Special Issue 5:1-37.
- Swift M.J., (Ed.) 1987. *Tropical Soil Biology and Fertility (TSBF): Inter-Regional Research Planning Workshop*. Biology International. Paris. Special Issue 13:28-34.

- Swift M.J. and Anderson J.M., 1993. Biodiversity and ecosystem function. En: E.D. Schulze & H.A. Mooney (Eds.). Biodiversity and Ecosystem Function. Ecological Studies 99. Springer-Verlag, pp.15-41.
- Taylor B.R., Parkinson D. and Parsons W.F.J., 1989. N and lignin as predictors of litter decay rates: a microcosm experiment. *Ecology* 70:97-104.
- Travasso M.I., Caldiz D.O., Saluzzo J.A., 1996. Yield prediction using the SUBSTOR-potato model under Argentinean conditions. *Potato Research* 39: 305-312.
- Tsuji G.Y., Uehara G., Balas S., (Eds.), 1994. DSSAT v3. University of Hawaii, Honolulu, Hawaii, USA.
- Van Delden, A., 2001. Yielding ability and weed suppression of potato and wheat under organic nitrogen management. PhD Thesis. Wageningen University, The Netherlands, 197 p.
- Velásquez N., 2001. El sistema socio-ambiental Andino Venezolano y la modernización de la agricultura: 1930-1995. Tesis doctoral. Postgrado en Ecología Tropical, CIELAT, Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela, 185p.
- Woomer P.L., Swift M.J. (Eds.), 1994. The Biological Management of Tropical Soil Fertility. John Wiley and Sons Inc, UK, 242p.

Capítulo 2

Mineralización del carbono y evolución del nitrógeno en un suelo agrícola abonado con materiales orgánicos de calidad contrastante

Resumen

Para sincronizar la disponibilidad de N en el suelo con la demanda de los cultivos se ha propuesto el suministro combinado de materiales orgánicos de distinta calidad. El objetivo del presente trabajo fue evaluar la calidad de los dos abonos orgánicos más comúnmente utilizados en los Andes venezolanos: el gallinazo y la cáscara de arroz (pargana). Se analizaron los efectos del suministro separado y combinado de estos sustratos sobre la mineralización del C y del N y sobre la inmovilización del N. Para ello se determinaron la relación C/N y los contenidos de compuestos solubles, celulosa y lignina de estos sustratos y se realizó, en condiciones controladas de laboratorio, la incubación de un suelo agrícola, solo (S) y con cuatro tratamientos con un mismo nivel de aplicación de N (120 mg kg^{-1} de suelo seco): sulfato de amonio (FM); gallinazo (G); pargana (P) y gallinazo + pargana (G+P). Durante la incubación se realizaron medidas periódicas de: C-CO₂ liberado, N mineral y N total extraíble (K_2SO_4 0.5 M) en suelo fumigado y no fumigado para determinar el N en la biomasa microbiana. Los resultados de los análisis de los sustratos indican que el gallinazo es de alta calidad y la pargana de baja, tanto por la relación C/N como por la composición bioquímica. Los parámetros cinéticos de la mineralización del C resultaron significativamente diferentes para los dos sustratos, indicando que el gallinazo posee una mayor fracción de C más lábil que la pargana y ésta tiene una fracción mayor de C más estable que el gallinazo. En todos los tratamientos predominó el nitrato en el compartimento mineral, lo cual indica que este suelo posee un alto potencial de nitrificación. Por otra parte, el N mineral representó una proporción baja del N total extraíble, lo que sugiere que predomina un proceso de “organización” del N mineral. Los resultados obtenidos en los tratamientos sin y con enmiendas, en cuanto a las cantidades de N total extraíble así como las cantidades netas de N inmovilizado y su relación con las cantidades de C mineralizado, indican que en todos los tratamientos el factor que más condicionó la actividad y desarrollo microbiano fue el carbono y no el nitrógeno. Además indican que el gallinazo causó mayor inmovilización de N que la pargana durante la primera etapa de la incubación mientras que el suministro combinado de los dos sustratos estimuló la actividad microbiana con respecto a la esperada de los resultados obtenidos por el suministro separado de los dos sustratos. En este sentido, se plantean posibles explicaciones basadas en la interacción de factores químicos y bióticos. En conclusión, se propone que la dinámica de los procesos de mineralización del C y de inmovilización del N, involucrados en la descomposición de enmiendas orgánicas de alta calidad como el gallinazo y de baja calidad como la cáscara de arroz, dependen no sólo de su relación C/N sino más aún de su composición bioquímica, la cual condiciona la actividad de la comunidad microbiana descomponedora.

Palabras claves: incubación, gallinazo, cáscara de arroz, mineralización, inmovilización, biomasa microbiana, sincronización, Andes, Venezuela.

Introducción

La intensificación de la producción agrícola durante las últimas décadas en los Andes venezolanos ha implicado la utilización de grandes cantidades de fertilizantes nitrogenados. Actualmente los productores de hortalizas y tubérculos combinan el suministro de fertilizantes minerales con el empleo de enmiendas orgánicas, entre las cuales se destacan el gallinazo y la cáscara de arroz (pargana) por ser las más ampliamente utilizadas. Sin embargo, no se tiene el conocimiento suficiente de los efectos de estas enmiendas sobre el ciclado de N en estos agroecosistemas que permita plantear prácticas de manejo tendientes a optimizar su uso en términos agrícolas, económicos y ambientales.

Para aumentar la eficiencia en el uso del N, entendida ésta como la relación entre la cantidad de N utilizada por el cultivo y la cantidad de N aplicada, una de las alternativas planteadas (Swift, 1984) es lograr la mejor sincronización entre la disponibilidad de N en el suelo y la demanda de N por el cultivo durante su desarrollo.

De acuerdo con Swift (1987), la sincronización debería poder lograrse seleccionando, en base a su calidad, las enmiendas orgánicas suministradas para así controlar la liberación de nutrientes de manera que coincida con los requerimientos del cultivo. Este planteamiento se basa en la suposición de que un substrato de alta calidad (baja relación C/N) es descompuesto rápidamente por los microorganismos, liberando N mineral (NH_4^+). La liberación rápida probablemente cause un exceso de N en relación con la demanda del cultivo en la etapa inicial de su desarrollo, aumentando el riesgo de pérdidas gaseosas o por lavado. Por otro lado, un substrato de baja calidad (alta relación C/N) produce inmovilización de N en la microbiota durante la etapa inicial de la descomposición el cual es mineralizado en una etapa posterior, causando deficiencia de N en la primera etapa de desarrollo del cultivo y disponibilidad tardía (Swift, 1987; Myers et al., 1994). Estos autores plantean hipotéticamente que el suministro combinado de substratos de alta y baja calidad debería regular los procesos de mineralización e inmovilización del N, de tal manera de promover una mejor sincronización entre la disponibilidad de N en el suelo y la demanda de N por el cultivo y así minimizar las pérdidas de N y aumentar los rendimientos del cultivo.

Los procesos de transformación del N más importantes involucrados en la sincronización son: mineralización- inmovilización, desnitrificación, volatilización, lavado y absorción (Myers et al., 1994). De los cuales, la mineralización-inmovilización del N está condicionada principalmente por la descomposición de la materia orgánica del suelo (MOS) y de los substratos, realizada en gran medida por los microorganismos heterótrofos que actúan para satisfacer sus requerimientos de materia (C para biosíntesis y nutrientes) y energía (Paul y Clark, 1989; Myers et al., 1994; Agren y Bosatta, 1996). A su vez, la magnitud y velocidad de la descomposición (descomponibilidad o degradabilidad) y, por lo tanto, de los procesos de mineralización-inmovilización del N dependen de la calidad de los substratos (Myers et al., 1994; Agren y Bosatta, 1996; Mary et al., 1996). Se han propuesto distintos criterios para evaluar la calidad de los substratos orgánicos, especialmente de los residuos vegetales, y para predecir su descomponibilidad, entre los cuales destaca la relación C/N por ser uno de los parámetros que mejor se relaciona (de manera inversa) con la cantidad de N mineralizado (Myers et al., 1994; Janssen, 1996).

Adicionalmente, se han encontrado otros factores que modifican la velocidad de descomposición de los residuos vegetales y la dinámica de mineralización e inmovilización del N, como por ejemplo: el contenido de lignina o polifenoles (Myers et al., 1994; Janssen, 1996) y la composición bioquímica en cuanto al contenido de: C soluble, compuestos similares a la celulosa y similares a la lignina, así como la relación C/N en estos compartimentos (Henriksen y Breland, 1999; Hadas et al., 2004). En este sentido, la información disponible generalmente indica que en la medida en que aumenta el contenido de compuestos tipo lignina y polifenoles tienden a disminuir la descomponibilidad y la fracción de N mineralizado en residuos vegetales con relación C/N similar (Myers et al., 1994; Janssen, 1996), mientras que residuos vegetales con mayor contenido de compuestos solubles y celulósicos tienden a ser más degradables y a mineralizar más N (Henriksen y Breland, 1999; Hadas et al., 2004).

Uno de los métodos más utilizado para evaluar y comparar los efectos del suministro de distintos substratos sobre los procesos de mineralización e inmovilización del N y sobre la mineralización del C, se basa en la incubación de suelo con y sin enmiendas en condiciones controladas de laboratorio (Ej. Mary et al., 1996; Henriksen y Breland, 1999; Sarmiento y Bottner, 2002; Hadas et al., 2004).

En base a las ideas planteadas, el objetivo del presente trabajo fue caracterizar las enmiendas orgánicas, gallinazo y cáscara de arroz (pargana), en cuanto a su calidad, basada en la relación C/N y en algunos parámetros de su composición bioquímica, y estudiar los efectos del suministro separado y combinado de estos substratos sobre los procesos de mineralización del C y de mineralización e inmovilización del N, mediante la incubación de un suelo agrícola de los Andes venezolanos con y sin suministro de enmiendas, en condiciones controladas de laboratorio.

Metodología

Los procesos de mineralización del C, mineralización-inmovilización del N y nitrificación se estudiaron mediante la incubación en el laboratorio de suelo enmendado y no enmendado.

Suelo

El experimento de incubación se realizó con suelo de una finca productora de papas ubicada en la localidad de Mistequé (8° 46' N, 70° 54' W) en el estado Mérida, Venezuela, a una altitud de 2960 m, con precipitación promedio anual de 640 mm, evaporación promedio anual en tina de 1416 mm y temperatura media anual de 11.1 °C. En esta finca, y en la zona circundante, se cultiva papa (una o dos cosechas por año) en rotación con hortalizas (ajo, zanahoria, repollo, coles) con alto empleo de insumos. El terreno seleccionado tiene pendientes entre 20 y 30 % y se localiza sobre un abanico situado en el fondo del valle del río Chama. De acuerdo al sistema taxonómico de los EEUU (Soil Survey Staff, 1992), el suelo es un *Antropic Ustumbrept*, de textura franca a franca-arenosa, con un contenido de materia orgánica de 4.6 a 5.8 % y pH entre 6.5 y 6.9 en la capa arable de 0-30 cm (Capítulo 5).

El suelo utilizado se tomó con barreno (0-10 cm) en 40 puntos al azar en un área de 720 m² en la localidad referida. El suelo obtenido fue mezclado, tamizado a 4 mm, homogeneizado y secado al aire para ser analizado. Posteriormente, de esta mezcla homogénea se pesaron 120 porciones equivalentes de suelo necesarias para la incubación.

Tratamientos y diseño experimental

Se aplicaron cuatro tratamientos de fertilización con distintas fuentes de fertilización nitrogenada e igual cantidad de N aplicada (119 mg N kg^{-1} suelo seco), la cual fue seleccionada considerando un suministro de N de 150 kg ha^{-1} en la capa de suelo de 0 a 10 cm de profundidad con densidad aparente de 1.257 g cm^{-3} . Además del suelo control sin enmiendas (S), los tratamientos fueron (tabla 1): 1- fertilizante mineral (FM); 2- gallinazo (G); 3- pargana (P) y 4- gallinazo y pargana (G + P). Como fertilizante mineral se empleó sulfato diamónico calidad proanálisis.

Tabla 1. Cantidad de materia fresca de las diferentes fuentes utilizadas en cada tratamiento y su aporte de N y C en términos absolutos y en relación al N y C total del suelo.

Trat	Cantidad de materia fresca g / 100 g de suelo seco			Cantidad de N y C mg / 100 g de suelo seco		Cantidad (%) aportada en relación con el contenido del suelo	
	(NH ₄) ₂ SO ₄	Gallinazo	Pargana	N total	C total	N	C
S	0	0	0	240*	3050*	–	–
FM	0.056	0	0	11.9	0	5.0	0
G	0	0.442	0	11.9	125	5.0	4.1
P	0	0	2.425	11.9	1101	5.0	36.1
G+P	0	0.221	1.213	11.9	613	5.0	20.1

* Cantidad inicial contenida en el suelo, igual para todos los tratamientos.

Gallinazo y cáscara de arroz (pargana).

Se empleó gallinazo comercial seco y empacado (marca “Fertiagro”). Se tomaron porciones al azar en 5 sacos diferentes y se mezclaron hasta homogeneizar para ser analizadas. Posteriormente, de esta mezcla homogénea se pesaron las cantidades correspondientes a las réplicas de cada tratamiento. Se empleó pargana sin marca procedente del estado Portuguesa, Venezuela. Se tomaron porciones al azar de un volumen aproximado de 20 m^3 de la pargana a granel y se mezclaron hasta homogeneizar para ser

analizadas. Posteriormente, de esta mezcla homogénea se pesaron las cantidades correspondientes a las réplicas de cada tratamiento.

Incubación

Se incubaron 24 muestras de suelo control y 24 muestras de suelo con cada uno de los tratamientos (tabla 1). Para cada muestra (réplica) se pesó una cantidad de suelo secado al aire, equivalente a 100 g de suelo seco, y se colocó en frascos de 500 ml con tapa hermética. A cada réplica (exceptuando las de suelo control) se añadió la cantidad de enmienda correspondiente (tabla 1) y, después de homogenizar, todas las muestras fueron humedecidas hasta 80 % de la capacidad de campo del suelo utilizando un aspersor de gota fina. La incubación se realizó en cámara oscura, a 28°C. Por lo menos una vez a la semana se abrieron los frascos para ajustar la humedad del suelo y mantener las condiciones aeróbicas (Alef, 1995; Öhlinger, 1996).

Mediciones

Carbono

Para determinar el C mineralizado (C-CO₂ liberado) se colocó dentro de los frascos, correspondientes a 8 réplicas por tratamiento y 8 réplicas para el suelo control, un recipiente (trampa) con 30 ml de solución 0.2 M de NaOH, los cuales se reemplazaron en cada fecha de muestreo: 2, 3, 5, 8, 11, 15, 23, 34, 48, 62, 79, 98 y 120 días de incubación. Se utilizaron como blancos 8 frascos con trampa pero sin suelo. El CO₂ liberado se determinó por titulación potenciométrica (pH = 7) de alícuotas de 5 ml de la solución de NaOH, previa precipitación de los carbonatos con 2.5 ml de solución al 20 % de BaCl₂. El C-CO₂ liberado fue calculado por diferencia respecto al promedio de los blancos y expresado en mg de C-CO₂ / 100 g de suelo seco (Alef, 1995; Öhlinger, 1996).

Nitrógeno

Las cantidades de nitrógeno en forma de: amonio, nitrato, total extraíble (N orgánico + N mineral) y biomasa microbiana, fueron determinados en 4 réplicas por tratamiento y para el suelo control en muestreos destructivos realizados a los 14, 30, 63, 98

y 120 días de incubación. El N en la biomasa microbiana fue determinado por el método de fumigación-extracción (Brookes et al., 1985). De cada réplica se pesaron 2 porciones de suelo, equivalentes a 40 g de suelo seco cada una. Una fue fumigada con cloroformo libre de alcohol durante 18 h (Chaussod et al., 1988) y la otra no. Ambas fueron sometidas a extracción con 150 ml de solución 0.5 M de K_2SO_4 , agitación durante 30 minutos, centrifugación a 6000 rpm durante 15 minutos y filtración. El volumen sobrenadante de las muestras no fumigadas se dividió en dos: una alícuota (control no fumigado) para la determinación de N total extraíble (N orgánico + N mineral) y la otra alícuota para la determinación de nitrógeno mineral: en forma de amonio ($N-NH_4^+$) y en forma de nitratos + nitritos ($N-NO_3^-$). Todos los extractos fueron congelados para su posterior análisis. A los extractos fumigados y no fumigados se les determinó la concentración de N total por el método de digestión-destilación Kjeldahl (Bremner y Mulvaney, 1982). En la segunda alícuota de extracto no fumigado se determinaron el contenido de $N-NH_4^+$ por destilación, previa adición de MgO, y luego el contenido de $N-NO_3^-$ utilizando aleación Devarda para reducir los nitratos a amonio (Rojas y Castillo, 1989).

Características del suelo y de los substratos

Los siguientes análisis de suelo y de los substratos, gallinazo y pargana, fueron realizados en el Laboratorio de suelos, Instituto de Geografía y Conservación de los Recursos Naturales Renovables, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Universidad de los Andes: para los parámetros Ca, Mg, K y Na disponibles (extraíbles en acetato de amonio 1M y pH 7) por espectrofotometría de absorción atómica (IGCA, 1978); para P disponible (extracción por el método Bray I) por determinación colorimétrica a 660 nm (ICA,1989); para Capacidad de Intercambio Iónico de suelo, CIC, por extracción con acetato de amonio 1M y pH 7 (IGCA, 1978); para textura de suelo por Bouyoucos (1962); para Capacidad de campo de suelo por retención de agua a 1/3 bar (Klute, 1986); para C orgánico del suelo y de los substratos por el método de Walkley-Black (IGCA, 1978); para P total de los substratos (digestión nítrico-perclórica, ajuste de pH entre 3 y 4 y extracción por el método Bray I) por determinación colorimétrica a 660 nm (ICA,1989) y para Ca, Mg y K totales de los substratos (digestión nítrico-perclórica) por espectrofotometría de absorción atómica (IGCA, 1978);

Los siguientes análisis de los substratos gallinazo y pargana fueron realizados en el Laboratorio de Bioenergía, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Universidad de los Andes: para los parámetros cenizas, extraíbles en agua, extraíbles en etanol-benceno y celulosa, según los métodos de análisis empleados en la Universidad de Santander, Colombia (Rodríguez, 1978); y para lignina según el método de lignina en plantas anuales (Dence, 1992).

Procesamiento de datos

Cinética de la mineralización del carbono.

Para evaluar los parámetros cinéticos de la mineralización del carbono se probó el ajuste de los datos obtenidos a funciones exponenciales de tipo (Ellert y Bettany, 1988):

$$\text{Simple: } C_t = C_0 (1 - e^{-k t}) \quad (1)$$

$$\text{Doble: } C_t = C_0 (1 - e^{-k t}) + C_1 (1 - e^{-h t}) \quad (2)$$

donde: C_t es la cantidad de C-CO₂ liberado acumulado hasta el tiempo t ; C_0 y C_1 son las concentraciones iniciales de C en los compartimentos lábil y estable respectivamente; k y h son las constantes de velocidad de mineralización correspondientes a los compartimentos.

Para las funciones doble exponenciales se probaron dos modelos, uno estableciendo como condición que: $C_1 = C_{\text{total}} - C_0$ (3), donde C_{total} es la cantidad de carbono total inicial ya sea en el suelo control, en el suelo + sustrato o en el sustrato solo según el caso que se trate; el otro modelo sin establecer esta condición. Los valores medios de estos parámetros fueron calculados como el promedio de los valores determinados mediante el ajuste de los datos obtenidos para cada réplica de cada tratamiento.

Nitrificación

El proceso de nitrificación se cuantificó, tomando en cuenta los procesos de mineralización-inmovilización, por medio de la ecuación (Kandeler, 1996):

$$\% N = 100 * (N\text{-NO}_3^-_{t2} - N\text{-NO}_3^-_{t1}) / [N\text{-NH}_4^+_{t1} + (N_{\text{min } t2} - N_{\text{min } t1})] \quad (4)$$

donde: % N es la nitrificación porcentual durante un intervalo de tiempo ($t_2 - t_1$ días), es decir la proporción de N-NH₄⁺ que se transforma en N-NO₃⁻; N-NO₃⁻_{t2} y N-NO₃⁻_{t1} son las cantidades de N en forma de nitrato + nitrito a los t_2 días y a los t_1 días de la incubación respectivamente; N-NH₄⁺_{t1} es la cantidad de N en forma de amonio a los t_1 días

de la incubación; $N_{min_{t_2}}$ y $N_{min_{t_1}}$ son las cantidades de N mineral ($N-NO_3^- + N-NH_4^+$) a los t_2 días y t_1 días de la incubación respectivamente. Las cantidades de N se expresan en: $mg\ N\ kg^{-1}$ de suelo seco.

Cantidad de N en la biomasa microbiana

La cantidad de N en la biomasa microbiana se calculó como (Brookes et al., 1985):

$$NBM = (N \text{ fumigado} - N \text{ control}) / k_{EN} \quad (5)$$

donde: NBM es el contenido de N en la biomasa microbiana ($mg\ N\ kg^{-1}$); N fumigado y N control son los contenidos de N total ($mg\ N\ kg^{-1}$) en los extractos de suelo fumigado y no fumigado respectivamente y k_{EN} es el factor correspondiente al método de fumigación-extracción para la determinación de N. Se utilizó $k_{EN} = 0.54$ (Brookes et al., 1985; Joergensen y Muller, 1996).

Inmovilización (cantidad neta de N inmovilizado)

A los fines de evaluar las dinámicas de inmovilización de la mejor manera posible, las cantidades netas de N inmovilizado, desde el inicio de la incubación hasta la fecha de cada uno de los muestreos realizados (tiempo t en días), fueron calculadas de dos formas:

La primera, como la diferencia respecto al inicio de las cantidades determinadas (Ec. 5) de N en la biomasa microbiana en cada uno de los muestreos:

$$\text{Cantidad neta de N inmovilizado (entre 0 y } t \text{ días)} = NBM_t - NBM_o \quad (6)$$

donde: NBM_t y NBM_o son las cantidades de N en la biomasa microbiana ($mg\ N\ kg^{-1}$) en el tiempo t y al inicio de la incubación respectivamente.

La segunda forma, como la diferencia de la cantidad de N total extraíble en el suelo control ($mg\ N\ kg^{-1}$) respecto al inicio, menos la cantidad de N total extraíble ($mg\ N\ kg^{-1}$) en el suelo enmendado respecto al inicio, en cada uno de los muestreos respectivos:

$$\text{Cantidad neta de N inmovilizado (entre 0 y } t \text{ días)} = (NteS_t - NteS_o) - (NteT_t - NteT_o) \quad (7)$$

donde: $NteS_t$ y $NteS_o$ son las cantidades de N total extraíble en el suelo control en el tiempo t y en el inicio de la incubación respectivamente; $NteT_t$ y $NteT_o$ son las cantidades de N total extraíble en el suelo con enmienda en el tiempo t y en el inicio de la incubación respectivamente. Este cálculo se fundamentó en el procedimiento empleado por: Mary et al. (1996) y Henriksen y Breland (1999), con la diferencia que estos autores utilizan las

cantidades de N mineral en el suelo control y en el suelo enmendado en lugar de las cantidades de N total extraíble. En la discusión de los resultados se explican las razones que motivaron esta modificación.

Análisis estadístico

Para el suelo control (S) y para cada uno de los cuatro tratamientos se realizaron un número n de réplicas, siendo $n = 8$ para la determinación del C-CO₂ liberado (análisis no destructivos) y $n = 4$ para la determinación de N mineral y de N total extraíble en el suelo fumigado y en el no fumigado (análisis destructivos) en cada uno de los muestreos realizados durante la incubación.

Se comprobó la homogeneidad de las varianzas utilizando la prueba de Bartlett. En los casos en que se encontró heterogeneidad, se realizaron transformaciones logarítmicas de los datos. El análisis de los datos se realizó con el procedimiento clásico ANOVA de una vía. Las diferencias entre las medias de las distintas variables analizadas se evaluaron utilizando la prueba de “Tukey, HSD”. En los casos en que aún después de transformar los datos no se logró homogeneidad de las varianzas (Bartlett, $P < 0.1$), se analizaron los datos originales mediante ANOVA no paramétrico de Kruskal-Wallis, utilizando la prueba a posteriori de Dunn para comparar las medias. En los resultados y discusión se indica el nivel de significancia utilizado en cada caso.

Resultados

Características del suelo y de los substratos orgánicos

En la tabla 2 se presentan las características principales del suelo utilizado en la incubación, entre las cuales se destacan su alto contenido de P soluble, N total extraíble y de N-NO₃⁻. Estos dos últimos parámetros, así como la baja relación C/N sugieren que el suelo utilizado posee importantes cantidades de nitrógeno en un compartimento relativamente lábil, que pudiera estar disponible para las plantas y la microbiota. Es notable en este suelo el alto contenido de Ca, lo cual se debe posiblemente a la gran cantidad de cal agrícola que han venido aplicando los productores del área para neutralizar los suelos. En este sentido si se compara el alto valor del contenido de Ca con el valor moderado de la

CIC los resultados indican que se trata de un suelo saturado en iones Ca^{++} . También se puede observar que el contenido de P disponible es muy alto, probablemente como consecuencia del suministro de grandes cantidades de gallinazo y fertilizantes minerales NPK, realizado en numerosos ciclos de cultivo anteriores.

Tabla 2. Características principales del suelo utilizado en la incubación. Los valores de P, Ca, Mg, K y Na se refieren a cantidades disponibles en el suelo. % ret. H_2O 1/3 atm. = capacidad de campo. Los valores entre paréntesis corresponden a la desviación normal.

pH 1:1 (H_2O)	C orgánico g kg^{-1}	N total g kg^{-1}	C/N	Nextraíble mg kg^{-1}	N- NH_4^+ mg kg^{-1}	N- NO_3^- mg kg^{-1}	P mg kg^{-1}	
6.64 (0.09)	29.4 (0.8)	2.4 (0.1)	12.7 (0.9)	155 (9)	3.1 (0.4)	116 (6)	560 (50)	
Ca $\text{meq}/100\text{g}$	Mg $\text{meq}/100\text{g}$	K $\text{meq}/100\text{g}$	Na $\text{meq}/100\text{g}$	CIC $\text{meq}/100\text{g}$	% ret. H_2O 1/3 atm	Textura (%) arena Arcilla limo		
30.6 (0.7)	3.3 (0.2)	2.3 (0.1)	0.04 (0.01)	16.5 (0.9)	29.2 (1.0)	49 (2)	17 (1)	34 (2)

En la tabla 3 se presentan las características principales de los substratos gallinazo y pargana empleados en la incubación. Se puede observar que el gallinazo presentó mayor contenido de N total así como de N extraíble, N- NH_4^+ y N- NO_3^- , menor contenido de C orgánico y, por lo tanto, menor relación C/N que la pargana. Además, la distribución de las distintas formas de N analizadas también fue distinta para los dos substratos: en el gallinazo el N total extraíble representó el 37 % y el N mineral el 20 % del N total, mientras que en la pargana el N total extraíble representó el 4 % y el N mineral sólo el 1.7 % del N total. También se puede observar que el gallinazo presentó mayores contenidos de compuestos orgánicos solubles, tanto en agua como en alcohol-benceno, y menores contenidos de celulosa y lignina que la pargana. Además, el gallinazo presentó mayor contenido de nutrientes (P, Ca, Mg y K) que la pargana y mayor pH, aún cuando ambos substratos presentan valores de pH cercanos a la neutralidad. Es de hacer notar el alto contenido de cenizas de estos dos substratos; en el caso del gallinazo este valor es similar al encontrado por Beloso (1991) y Ordoñez (1992) y se debe al alto contenido de elementos minerales como Ca, Mg y K; en el caso de la pargana el valor es similar al encontrado por Kamath y Proctor (1998) y se debe al alto contenido de sílice.

Tabla 3. Características principales de los substratos (en base a materia seca). Los valores entre paréntesis corresponden a la desviación normal. Letras distintas (a, b) indican diferencias significativas entre los substratos (Tukey HSD, $P < 0.01$). Laboratorio de Suelos, Instituto de Geografía y Conservación de los Recursos Naturales (G) y Laboratorio de Bioenergía. (B), Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, ULA.

		Gallinazo	Pargana
Cenizas (g kg ⁻¹)	B	420 (9) a	205 (2) b
Carbono orgánico total (g kg ⁻¹)		307 (4) b	486 (4) a
Nitrógeno total (g kg ⁻¹)		29.3 (0.5) a	5.3 (0.2) b
C / N		10.5 (0.3) b	91.7 (4.0) a
N extraíble (g kg ⁻¹)		11.0 (0.1) a	0.22 (0.02) b
N-NH ₄ ⁺ (mg kg ⁻¹)		5 190 (140) a	71 (6) b
N-(NO ₃ ⁻ + NO ₂ ⁻) (mg kg ⁻¹)		757 (32) a	20 (2) b
Extraíbles agua caliente (g kg ⁻¹) B Orgánicos		290 (9) a	42 (2) b
extraíbles agua caliente (g kg ⁻¹) B		189 (7) a	36 (2) b
Extraíbles etanol-benceno(g kg ⁻¹) B		62 (4) a	17 (1) b
Celulosa (g kg ⁻¹)	B	231 (1) b	392 (5) a
Lignina (g kg ⁻¹)	B	79 (1) b	219 (2) a
pH (1:1 en H ₂ O)		7.75 (0.05) a	6.10 (0.03) b
P total (g kg ⁻¹)	G	7.8 (0.7) a	0.26 (0.05) b
P disponible (g kg ⁻¹)	G	3.18 (0.09) a	0.12 (0.01) b
Ca total (g kg ⁻¹)	G	10.1 (0.9) a	0.8 (0.1) b
Ca disponible (g kg ⁻¹)	G	1.03 (0.03) a	0.29 (0.02) b
Mg total (g kg ⁻¹)	G	4.02 (0.05) a	0.40 (0.01) b
Mg disponible (g kg ⁻¹)	G	0.77 (0.06) a	0.17 (0.02) b
K total (g kg ⁻¹)	G	18.6 (0.4) a	1.7 (0.2) b
K disponible (g kg ⁻¹)	G	9.21 (0.09) a	0.69 (0.02) b

Mineralización del carbono.

En la figura 1A se observa que el suelo con gallinazo y el suelo con pargana presentaron una mineralización acumulada de C durante la incubación mayor que la del suelo control, mientras que la adición de sulfato de amonio no afectó significativamente a la cantidad de C mineralizada. A los 120 días de incubación la mineralización acumulada de C del suelo control alcanzó 99.0 mg de C-CO₂ (Fig. 1A), que en términos relativos representa el 3.25 % del C inicial del suelo (Fig. 1B), mientras que la del suelo con gallinazo y la del suelo con pargana alcanzaron 128.0 y 141.0 mg de C-CO₂ respectivamente (Fig. 1A), que en términos relativos representan el 4.03 % del C inicial del suelo con gallinazo y 3.40 % del C inicial del suelo con pargana (Fig. 1B).

Se encontró que los valores de la cantidad acumulada de C-CO₂ liberado durante la incubación (Fig. 1A) se ajustaron mejor a funciones exponenciales dobles sin condicionar (Ec. 2), que a funciones exponenciales simples (Ec. 1). En las tablas 4 y 5 se presentan los parámetros cinéticos y los valores de R² respectivos. Para el modelo doble exponencial sin condicionar (tabla 4) se observa que el suelo control presentó un compartimento lábil (C₀=14 mg) con vida media de 4.6 días y un compartimento estable (C₁ = 143 mg) con vida media de 90 días. Con respecto al suelo control, el suministro de sulfato de amonio no modificó significativamente los parámetros cinéticos, mientras que en el suelo con gallinazo se incrementó en un 143 % la cantidad de C en el compartimento lábil y no se modificó significativamente la cantidad de C en el compartimento estable y en el suelo con pargana se incrementó en un 86 % la cantidad de C en el compartimento lábil y aumentó en un 71 % la cantidad de C en el compartimento estable. Si se compara el suelo con gallinazo con el suelo con pargana (tabla 4) podemos observar que el primero presentó mayor cantidad de C en el compartimento lábil (C₀ = 34 mg) con mayores constantes de velocidad de mineralización y, por lo tanto, menor vida media (t_{1/2} = 3.8 días) que el suelo con pargana (C₀ = 26 mg; t_{1/2} = 6.1 días), mientras que este último presentó mayor cantidad de C en el compartimento estable (C₁ = 245 mg) y mayor vida media (t_{1/2} = 130 días) que el suelo con gallinazo (C₀ = 136 mg; t_{1/2} = 71 días). Estas diferencias se evidencian en la figura 1A en la cual se puede observar que en el suelo con gallinazo se mineraliza más C que en el suelo con pargana durante la primera mitad de la incubación, mientras que en el suelo con pargana es mayor la cantidad de C mineralizada acumulada al final de la incubación.

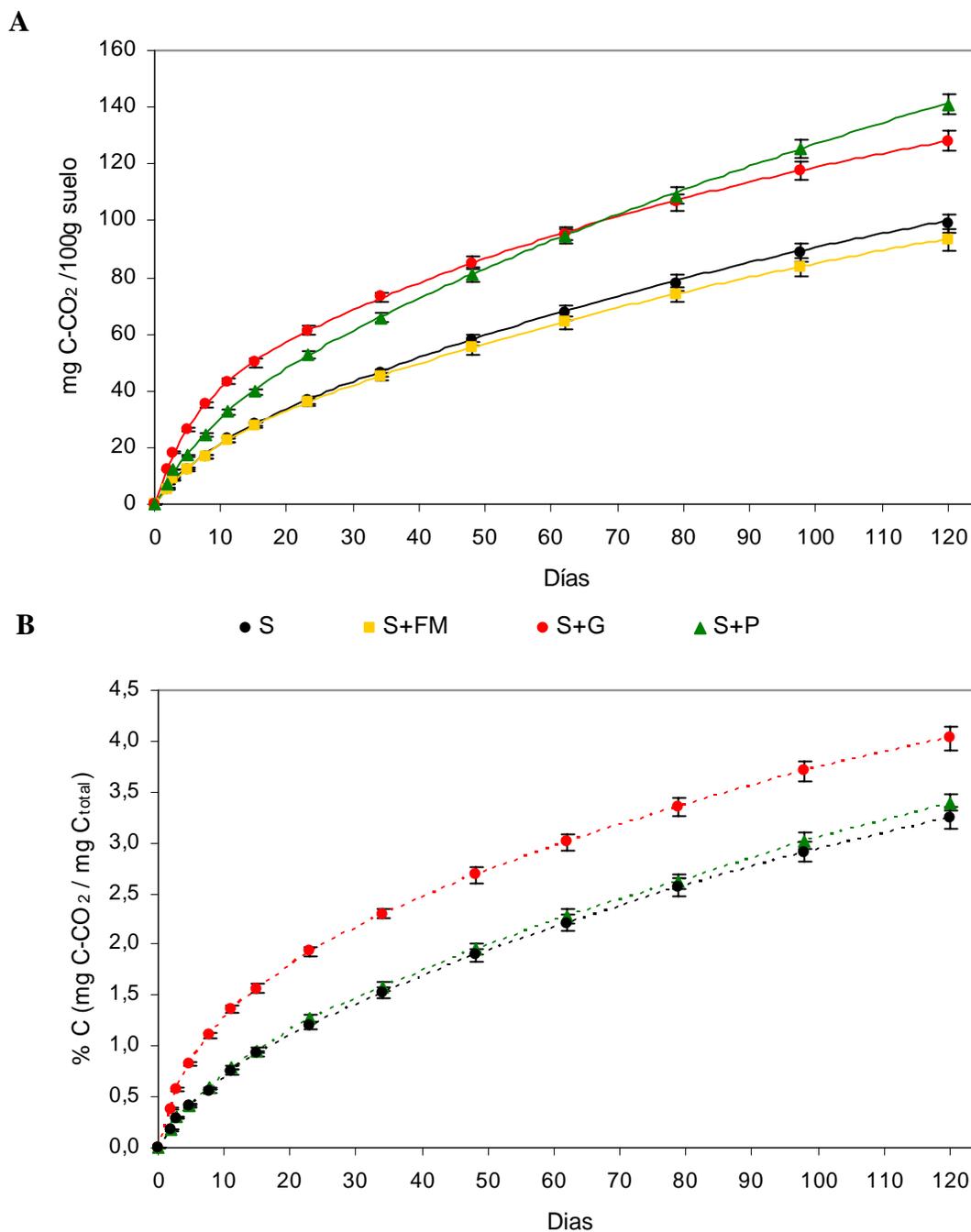


Figura 1. **A.** Curso de la cantidad acumulada de C-CO₂ liberado del suelo control (S) y de los suelos con suministro de sulfato de amonio (FM), gallinazo (G) y pargana (P). Las curvas (líneas sólidas) corresponden a las funciones doble exponencial cuyos parámetros cinéticos respectivos se presentan en la tabla 4. **B.** Curso de la cantidad acumulada de C-CO₂ liberado expresada como porcentaje de la cantidad inicial de C en el suelo control y en los suelos con sustrato orgánico. Las barras representan los valores de la desviación normal ($n=8$).

Tabla 4. Parámetros cinéticos de la mineralización acumulada (mg C-CO₂ / 100 g suelo seco) para el suelo control y los suelos con tratamientos, utilizando el modelo doble exponencial sin condicionar (Ec. 2). Los valores entre paréntesis corresponden a la desviación normal. Letras distintas indican diferencias significativas entre las medias de los tratamientos ($n = 8$, Tukey HSD, $P < 0.01$)

Tratamiento	C ₀ (mg/100g)	k (día ⁻¹)	t _{1/2} de C ₀ (día)	C ₁ (mg/100g)	h x 10 ³ (día ⁻¹)	t _{1/2} de C ₁ (día)	R ²
Suelo control	14 (1) c	0.15 (0.01) b	4.6 (0.3) b	143 (14) b	7.7 (1.0) b	90 (12) b	0.9998
Suelo + FM	16 (1) c	0.14 (0.01) b	5.1 (0.4) b	133 (11) b	7.3 (0.8) b	95 (10) b	0.9999
Suelo + G	34 (2) a	0.18 (0.01) a	3.8 (0.1) c	136 (8) b	9.8 (0.7) a	71 (5) c	0.9999
Suelo + P	26 (2) b	0.11 (0.01) c	6.1 (0.4) a	245 (17) a	5.3 (0.5) c	130 (11)a	0.9999

Tabla 5. Parámetros cinéticos de la mineralización acumulada (mg C-CO₂ / 100 g suelo seco) para el suelo control y los suelos con tratamientos, utilizando el modelo exponencial simple (Ec. 1). Los valores entre paréntesis corresponden a la desviación normal ($n = 8$).

Tratamiento	C ₀ (mg/100g)	k (día ⁻¹)	t _{1/2} de C ₀ (día)	R ²
Suelo control	110 (6)	0.017 (0.002)	41 (5)	0.9909
Suelo + FM	100 (6)	0.018 (0.002)	38 (4)	0.9891
Suelo + G	120 (6)	0.032 (0.005)	22 (3)	0.9707
Suelo + P	155 (9)	0.017 (0.002)	42 (5)	0.9897

Para estudiar con más detalle la dinámica de la mineralización del C de los sustratos, se determinó el coeficiente de mineralización de la materia orgánica de cada sustrato a partir de la diferencia entre las cantidades de C-CO₂ liberadas por el suelo con sustrato y por el suelo control (González-Prieto et al., 1991 en Beloso, 1991), debido a que no se disponía de los sustratos marcados con ¹⁴C. En la figura 2 se presentan los valores de

los coeficientes de mineralización acumulada del C de cada sustrato (% C), calculados como: $\% C = [100 * (\text{mg C-CO}_2 \text{ suelo+substrato} - \text{mg C-CO}_2 \text{ suelo control}) / \text{mg C sustrato}]$.

Se observa que los valores fueron mucho mayores para el gallinazo que para la pargana durante toda la incubación. Es de hacer notar que aún cuando el coeficiente de mineralización acumulada del C del gallinazo (23.2 %) fue seis veces mayor que el de la pargana (3.8 %) a los 120 días de la incubación, el del gallinazo apenas se incrementó en términos relativos en un 9 % respecto al obtenido a los 34 días, mientras que el de la pargana se incrementó en 111 % desde esa misma fecha hasta el final de la incubación. Esta diferencia se evidencia en la figura 2, en la cual se puede observar que los valores acumulados del C mineralizado del gallinazo tendieron a un valor asintótico en la etapa final de la incubación mientras que los de la pargana continuaron en ascenso.

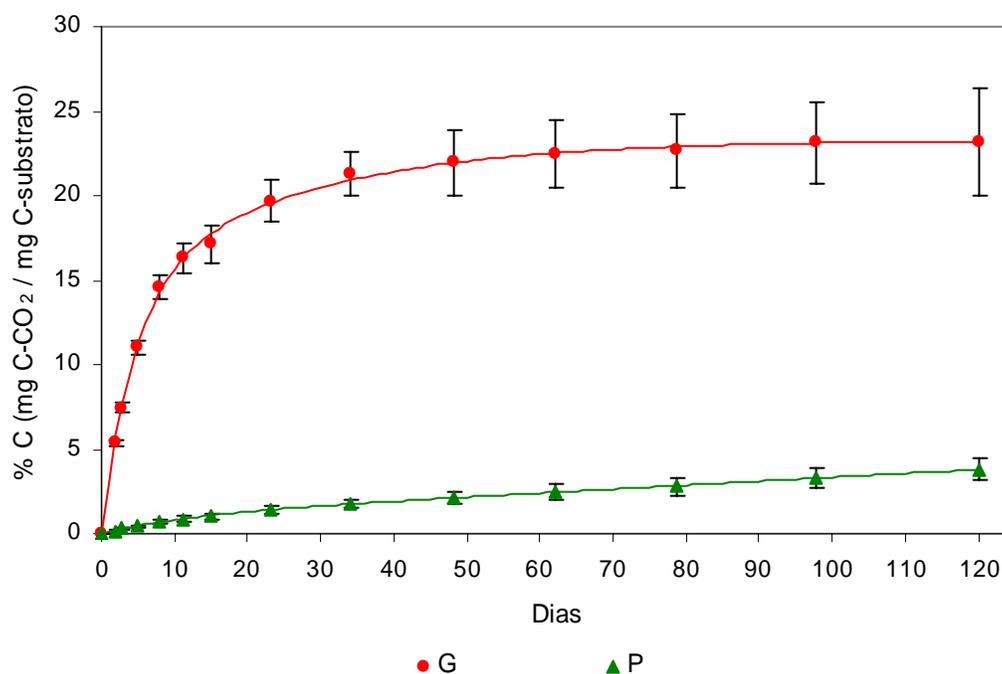


Figura 2. Curso del coeficiente de mineralización % C (mg de C-CO₂ / mg de C-substrato) acumulado del gallinazo (G) y de la pargana (P). Las curvas corresponden a las funciones doble exponencial cuyos parámetros cinéticos respectivos se presentan en la tabla 6. Las barras representan los valores de la desviación normal ($n = 8$).

En la figura 2 también se presentan las curvas obtenidas ajustando los coeficientes de mineralización antes referidos a funciones doble exponencial y en la tabla 6 se presentan los parámetros cinéticos que resultan de dicho ajuste, observándose que el gallinazo presentó mayor cantidad de C en un compartimento más lábil ($C_0 = 14.1\%$; $t_{1/2} = 3.0$ días) que la pargana ($C_0 = 1.0\%$; $t_{1/2} = 8.2$ días), mientras que la pargana presentó mayor cantidad de C en un compartimento más estable ($C_1 = 50.2\%$; $t_{1/2} = 1443$ días = 4 años) que el gallinazo ($C_1 = 9.2\%$; $t_{1/2} = 17$ días). Sin embargo, debido a que los resultados obtenidos con este modelo dan cuenta solamente de 23 % del C del gallinazo, de 51% del C de la pargana y de 5 % del C del suelo control al considerar la suma de $C_0 + C_1$ correspondiente, entonces se probó el modelo doble exponencial (Ec. 2) condicionado estableciendo como condición que $C_1 = 100\% - C_0$ (Ec. 3), es decir involucrando la totalidad del C del sustrato.

Tabla 6. Parámetros cinéticos de la mineralización acumulada (%) para el suelo control (mg C-CO₂ / mg C suelo seco) y los sustratos (mg C-CO₂ / mg C sustrato), utilizando el modelo doble exponencial sin condicionar. Los valores entre paréntesis corresponden a la desviación normal. Letras distintas indican diferencias significativas entre las medias de los tratamientos ($n = 8$, Tukey HSD, $P < 0.01$).

Trat.	C_0 (%)	k (día ⁻¹)	$t_{1/2}$ de C_0 (día)	C_1 (%)	$h \times 10^3$ (día ⁻¹)	$t_{1/2}$ de C_1 (día)	R^2
Suelo	0.47 (0.04) c	0.15 (0.01) b	4.6 (0.3) b	4.7 (0.5) c	7.7 (1.0) b	90 (12) b	0.9998
Gallinazo	14.1 (0.8) a	0.23 (0.01) a	3.0 (0.1) c	9.2 (1.0) b	40 (4) a	17 (2) c	0.9989
Pargana	1.00 (0.09) b	0.084 (0.002) c	8.2 (0.3) a	50.2 (0.5) a	0.48 (0.04) c	1443 (98) a	0.9994

En la tabla 7 se presentan los parámetros cinéticos que resultan del ajuste con este modelo para el gallinazo, la pargana y el suelo control. Se observa que, aún cuando los valores de R^2 para el gallinazo y para el suelo control son menores que los obtenidos con el modelo doble exponencial no condicionado (tabla 6), sin embargo son mayores que 0.995 y por lo tanto se plantea su empleo para obtener información de la tendencias de mineralización a largo plazo. En la tabla 7 podemos observar que el gallinazo presentó

mayor cantidad relativa de C en un compartimento más lábil ($C_0 = 19.7\%$; $t_{1/2} = 4.4$ días) que la pargana ($C_0 = 1.0\%$; $t_{1/2} = 8.2$ días), mientras que la pargana presentó mayor cantidad relativa de C en un compartimento más estable ($C_1 = 99.0\%$; $t_{1/2} = 7.9$ años) que el gallinazo ($C_1 = 81.3\%$; $t_{1/2} = 4.5$ años). Por otra parte, el suelo control posee un compartimento menos lábil ($t_{1/2} = 10.3$ días) y un compartimento más estable ($t_{1/2} = 9.5$ años) que los de los dos substratos que contienen cantidades relativas de C similares a los de la pargana ($C_0 = 1.0\%$ y $C_1 = 99.0\%$). Estos resultados sugieren que ambos substratos poseen gran parte del C en un compartimento recalcitrante que se incorpora a la materia orgánica del suelo (MOS) y que es susceptible de mineralizarse lentamente. Así mismo, los parámetros cinéticos de la mineralización del C en el suelo control (tablas 6 y 7) indican que la MOS tiene la mayor parte del C en un compartimento recalcitrante que, aún cuando se mineraliza lentamente, permite mantener activa la mineralización a los 120 días de incubación (Fig. 1A).

Tabla 7. Parámetros cinéticos de la mineralización acumulada (%) para el suelo control (mg C-CO₂ / mg C suelo seco) y los substratos (mg C-CO₂ / mg C substrato), utilizando el modelo doble exponencial condicionando $C_1 = 100\% - C_0$. Los valores entre paréntesis corresponden a la desviación normal. Letras distintas indican diferencias significativas entre las medias de los tratamientos ($n = 8$, Prueba de Dunn, $P < 0.01$, posterior a ANOVA no paramétrico de Kruskal-Wallis).

Trat.	C_0 (%)	k (día ⁻¹)	$t_{1/2}$ de C_0 (día)	C_1 (%)	$h \times 10^4$ (día ⁻¹)	$t_{1/2}$ de C_1 (año)	R^2
Suelo	1.01 (0.06) b	0.067 (0.005) c	10.3 (0.8) a	99.0	2.0 (0.1) c	9.5 (0.5) a	0.9990
Gallinazo	19.7 (1.0) a	0.16 (0.01) a	4.4 (0.3) c	81.3	4.5 (0.9) a	4.2 (0.8) c	0.9951
Pargana	1.00 (0.09) b	0.084 (0.002) b	8.2 (0.2) b	99.0	2.4 (0.2) b	7.9 (0.7) b	0.9994

En la figura 3 se puede observar que los valores de las cantidades acumuladas de C-CO₂ liberado del gallinazo y de la pargana suministrados de manera separada, calculados utilizando las funciones doble exponencial (no condicionadas) cuyos parámetros cinéticos respectivos se presentan en la tabla 6, se ajustaron muy bien a los valores experimentales.

Mientras que para el sustrato combinado G+P, los valores calculados combinando las funciones individuales de ambos sustratos ponderadas por los pesos de los sustratos, se ajustaron a los valores experimentales solamente hasta los 64 días, a partir de los cuales los valores experimentales resultaron mayores que los calculados. Este hecho sugiere que con el suministro combinado de gallinazo y pargana se produjo un efecto de interacción entre los dos sustratos que indujo hacia el final de la incubación una mineralización mayor de carbono que la esperada por la suma de la contribución del gallinazo y de la pargana.

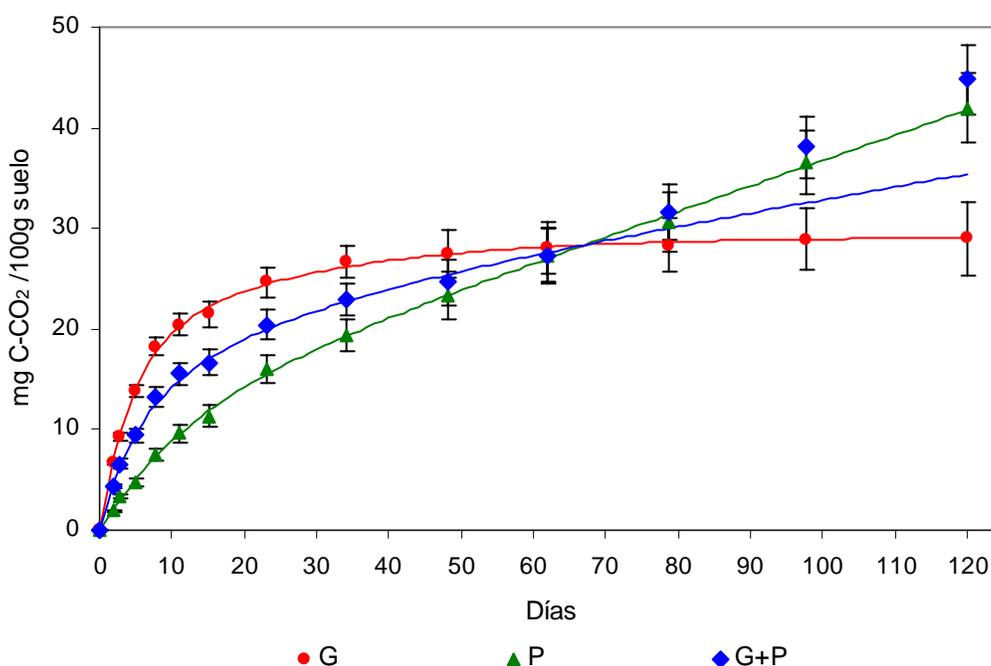


Figura 3. Curso de la cantidad acumulada de C-CO₂ liberado del gallinazo (G), de la pargana (P) y de la combinación de gallinazo + pargana (G+P). Las curvas en rojo y verde corresponden a los valores calculados con las funciones doble exponencial del gallinazo y de la pargana, respectivamente, cuyos parámetros cinéticos respectivos se presentan en la tabla 6. La curva azul corresponde a los valores esperados para la combinación de gallinazo + pargana, calculados combinando las funciones individuales de ambos sustratos. Las barras representan los valores de la desviación normal ($n = 8$).

Evolución del nitrógeno

Nitrógeno mineral: amonio y nitrato

En la figura 4A se puede observar que la cantidad de N mineral presentó un descenso marcado entre el inicio y los 14 días de incubación en los tratamientos FM, P y G+P, mientras que el suelo con gallinazo se mantuvo en el mismo nivel y el suelo control aumentó un 24 % respecto a su valor inicial. Entre los 14 y 30 días de incubación el contenido de N mineral en todos los tratamientos disminuyó y luego, a partir de los 30 días hasta el final de la incubación, presentó poca variación manteniéndose en un rango entre 37 y 51 mg N kg⁻¹ suelo seco. En la tabla 8 se puede observar que, para todos los tratamientos, la cantidad relativa de N en forma de nitrato con respecto al N mineral total aumentó entre el inicio y los 14 días. Desde esta última fecha hasta el final de la incubación estas cantidades representaron entre el 89 y 99 % del nitrógeno mineral, considerando todos los tratamientos. También se puede observar (tabla 8) que los porcentajes de nitrificación calculados (Ec. 4) entre el inicio y los 14 días estuvieron en un rango entre 97 y 100 % , y entre los 14 y 30 días estuvieron entre 100 y 107 %.

Tabla 8. Porcentaje del N mineral total que se encontraba en forma de nitratos y nitritos durante la incubación (d = días) y porcentaje de nitrificación calculado (Ec. 4) desde el inicio hasta los 14 días (0-14 d) y desde los 14 hasta los 30 días (14-30 d), para los distintos tratamientos (Trat.)

Trat.	N-NO ₃ ⁻ / N-mineral (%)						Nitrificación (%) (N-NH ₄ ⁺ → N-NO ₃ ⁻)	
	0 d	14 d	30 d	63 d	98 d	120 d	0-14 d	14-30 d
S	97	99	98	99	99	97	98	100
FM	49	99	98	90	89	89	99	100
G	83	99	99	97	98	95	97	100
P	96	99	98	97	97	97	100	104
G+P	89	98	98	97	98	99	100	107

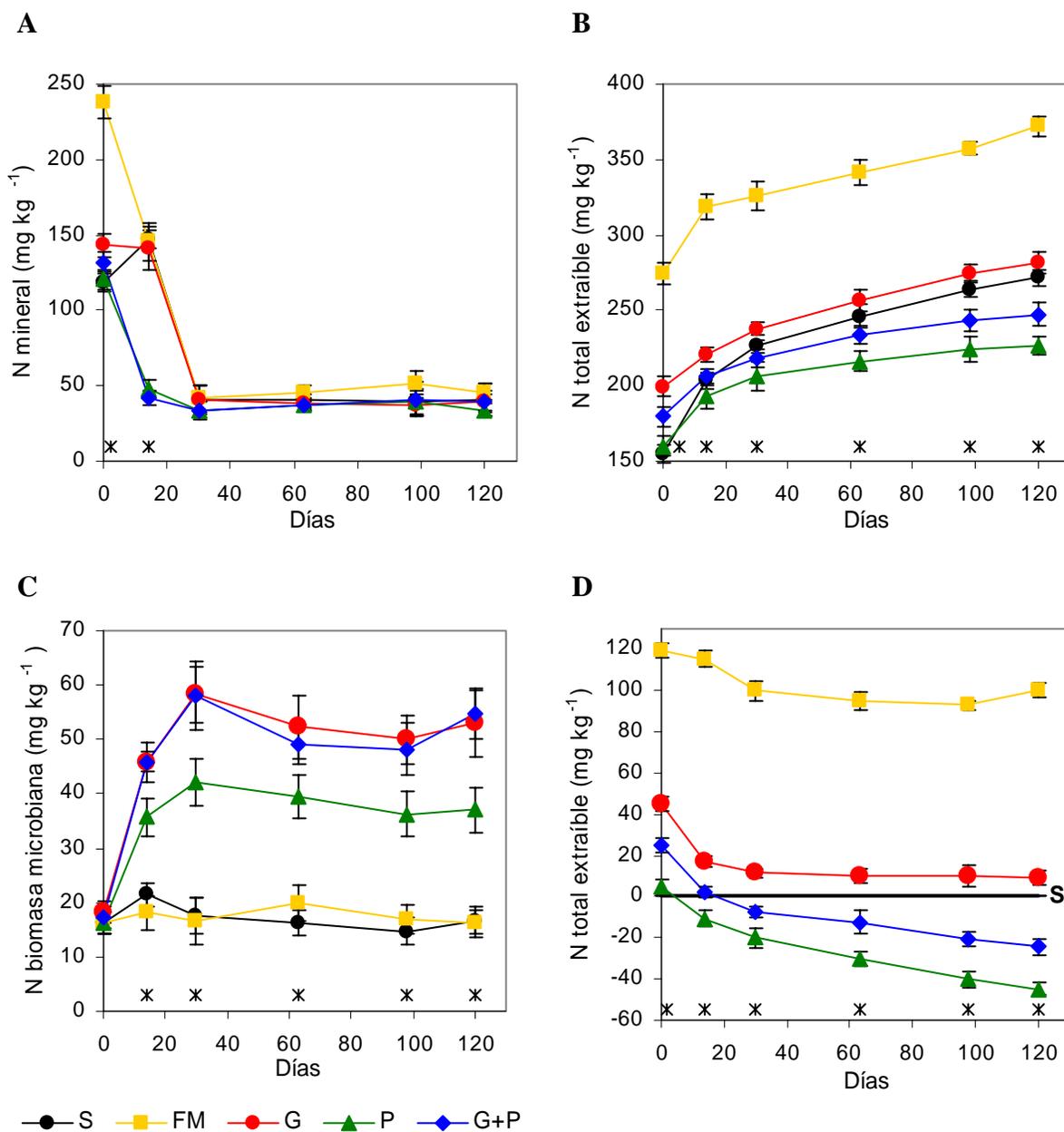


Figura 4. Curso, durante la incubación, de la cantidad de N en el suelo control (S) y en el suelo con: fertilizante mineral (FM), gallinazo (G), pargana (P) y gallinazo + pargana (G+P) en las formas: **A.** N mineral (N-amonio + N-nitratos). **B.** N total extraíble (K_2SO_4 0.5 M). **C.** N en la biomasa microbiana (fumigación-extracción). **D.** N total extraíble respecto al suelo control (S). Las barras representan los valores de la desviación normal. En las fechas de muestreo (días) señalados con * se presentan diferencias significativas ($n = 4$, $P < 0.05$) debido a los tratamientos.

En la tabla 9 se observa que las cantidades de N mineral representaron entre el 71 y el 87 % del N total extraíble (mineral + orgánico) al inicio de la incubación, en cambio a partir de los 30 días y hasta el final de la incubación el porcentaje de N mineral se mantuvo entre 12 y 18 % para todos los tratamientos, lo cual significa que el N orgánico extraíble calculado como la diferencia entre el N total extraíble y el N mineral (Zhong y Makeschin, 2003) representa en esta etapa la mayor parte, entre el 82 y 88 %, del N total extraíble.

Tabla 9. Porcentaje del N total extraíble que se encontraba como N mineral durante la incubación para los distintos tratamientos (d = días).

Trat.	N mineral / N total extraíble (%)					
	0 d	14 d	30 d	63 d	98 d	120 d
S	77	72	18	16	15	15
FM	87	46	13	13	14	12
G	72	64	17	15	13	14
P	76	25	16	17	17	15
G+P	73	21	15	16	17	16

Nitrógeno total extraíble

En la figura 4B se puede observar que la cantidad de N total extraíble (orgánico + mineral) en todos los tratamientos aumentó durante la incubación, presentándose los mayores incrementos entre el inicio y el día 30. En la figuras 4B y 4D se puede observar que las cantidades de N total extraíble en los tratamientos FM y G resultaron mayores que las del suelo control en cada uno de los muestreos realizados, mientras que en el caso de los tratamientos P y G+P resultaron menores que las del suelo control a partir de los 30 días. También se observa en la figura 4D que la cantidad de N total extraíble en cada uno de los tratamientos disminuyó con respecto a la cantidad de N total extraíble del suelo control, entre el inicio y los 30 días de la incubación. A partir del día 30, en los tratamientos FM y

G estas cantidades tendieron a mantenerse constantes, mientras que en los tratamientos P y G+P continuaron disminuyendo. Analizando la diferencia entre la cantidad de N total extraíble de cada tratamiento y la del suelo control en cada uno de los muestreos, en la figura 4D, se puede observar que en el caso de los tratamientos FM y G estas diferencias disminuyeron desde el inicio hasta el día 30, a partir del cual presentaron poca variación hasta el final de la incubación. En cambio, en el caso del tratamiento P la diferencia, en valor absoluto, tendió a aumentar durante toda la incubación, mientras que la del tratamiento G+P disminuyó entre el inicio y el día 14, a partir del cual tendió a aumentar en valor absoluto.

N en la biomasa microbiana

En la figura 4C se puede observar que las cantidades (Ec. 5) de N en la biomasa microbiana en el tratamiento FM variaron poco en el curso de la incubación, no presentando diferencias significativas respecto al suelo control. En cambio, en los otros tratamientos se observó un marcado aumento de la cantidad de N en la biomasa microbiana en la primera etapa de la incubación y luego los valores presentaron poca variación hasta el final de la incubación siendo $G \text{ y } G+P > P > S \text{ y } FM$.

Cantidades netas de N “solubilizado” e inmovilizado

La cantidad neta de N “solubilizado” se define, en el presente trabajo, como la diferencia de la cantidad de N total extraíble (soluble en K_2SO_4 0.5 M) en cada uno de los muestreos realizados menos la cantidad inicial. En la figura 5A, se puede observar que las cantidades así calculadas para los tratamientos G, P y G+P resultaron menores que para el suelo control en todas las fechas de muestreo y además que en la primera etapa de la incubación (14 y 30 días) resultaron menores para el tratamiento G que para P y que en la etapa final (98 y 120 días) resultaron menores para P que para G, mientras que para G+P en la etapa inicial fueron similares a las de G y en la etapa final similares a las de P.

En la figura 5B se comparan los valores de las cantidades netas de N inmovilizado, calculadas de las dos formas descritas en la metodología, para los tratamientos G, P y G+P en cada uno de los muestreos. Se puede observar que los valores calculados (Ec. 6) a partir de las cantidades de N en la biomasa microbiana (Ec.5, con $k_{EN} = 0.54$) para los

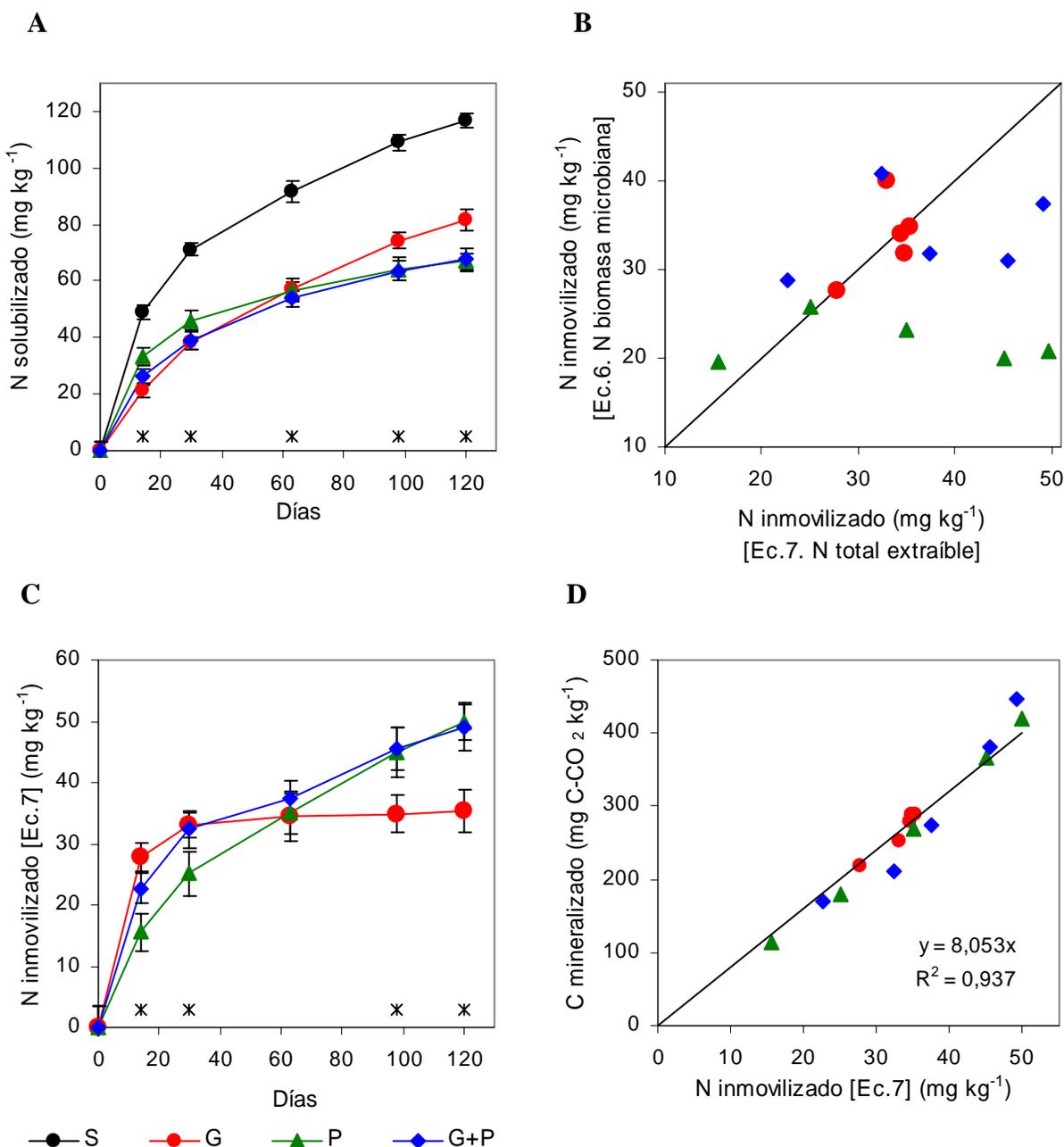


Figura 5. A. Curso de la cantidad neta de N solubilizado durante la incubación, en el suelo control (S) y en el suelo con: gallinazo (G), pargana (P) y gallinazo + pargana (G+P). B. Relación entre las cantidades netas de N inmovilizado: calculadas (Ec.6) a partir de las cantidades de N en la biomasa microbiana determinadas (Ec.5, con $k_{EN} = 0.54$) y calculadas (Ec.7) a partir de las cantidades de N total extraíble. C. Curso de la cantidad neta de N inmovilizado durante la incubación, en los tratamientos G, P y G+P, calculada (Ec.7) a partir de las cantidades de N total extraíble. D. Correlación entre las cantidades de C mineralizado y N inmovilizado (Ec.7) para los substratos gallinazo, pargana y gallinazo + pargana.

tratamientos P y G+P, correspondientes a las etapas intermedia y final de la incubación, resultaron inferiores a los valores calculados (Ec. 7) a partir de las cantidades de N total extraíble. Mientras que para el tratamiento G las cantidades netas de N inmovilizado calculadas de las dos formas resultaron semejantes.

En la figura 5C se puede observar que las cantidades netas de N inmovilizado calculadas a partir de las cantidades de N total extraíble (Ec. 7), para los tratamientos G, P y G+P, aumentaron en el curso de la incubación, presentándose mayores incrementos en la primera etapa de la incubación (hasta los 30 días) que el observado posteriormente (30 a 120 días) y notándose que en el caso del tratamiento G, a partir de los 30 días hasta el final de la incubación, este parámetro prácticamente permaneció constante. También se puede observar que en la primera etapa de la incubación (14 y 30 días) las cantidades netas de N inmovilizado resultaron mayores para el tratamiento G que para P y que en la etapa final (98 y 120 días) se invirtieron, resultando mayores para P que para G, mientras que para G+P en la etapa inicial fueron similares a las de G y en la etapa final similares a las de P.

Para cada uno de los tratamientos G, P y G+P, la cantidad neta de N inmovilizado así calculada (Ec. 7) al final de la incubación (Fig. 5C) resultó menor que la cantidad neta de N “solubilizado” al final de la incubación (Fig. 5A). Sin embargo, es importante resaltar que mientras para el tratamiento G la cantidad de N inmovilizado representó el 43 % de la cantidad de N “solubilizado”, en cambio para los tratamientos P y G+P la cantidad de N inmovilizado representó el 74 % y 72 % respectivamente.

Relación entre la cantidad de C mineralizado y N inmovilizado

En la figura 5D se presenta la relación entre la cantidades acumuladas de C mineralizado ($\text{mg C-CO}_2 \text{ kg}^{-1}$ suelo) de los substratos: gallinazo, pargana y gallinazo + pargana determinadas (Fig. 3) y las cantidades netas de N inmovilizado (mg N kg^{-1} suelo) calculadas (Ec.7, Fig. 5C), correspondientes a cada substrato y tiempo de incubación. Se puede observar (Fig. 5D) la alta correlación lineal entre los dos parámetros, no sólo para los substratos gallinazo y pargana sino también para la combinación de éstos, que refleja la interdependencia entre los procesos de mineralización del C e inmovilización del N de los substratos durante todo el curso de la incubación.

Discusión y conclusiones

Calidad de las enmiendas orgánicas

Los resultados de los análisis realizados indican que el gallinazo es un substrato de alta calidad y la pargana de baja calidad, no sólo de acuerdo al criterio de la relación C/N sino también por su composición bioquímica en cuanto al contenido de compuestos orgánicos solubles, celulosa y lignina que para ambos substratos refuerza el criterio anterior (Myers et al., 1994; Henriksen y Breland, 1999; Hadas et al., 2004).

Mineralización del carbono

La cantidad relativa de C mineralizado en el suelo control a los 42 días, 1.71 %, fue ligeramente superior a los valores encontrados por Contreras (2002), 0.9 a 1.5 %, en suelos del Municipio Rivas Dávila (Edo. Mérida, Andes venezolanos). Así mismo, a los 81 días, 2.60 %, fue superior a los valores encontrados por Sarmiento y Bottner (2002), 1.30 a 1.41 %, en suelos agrícolas de Gavidia (Edo. Mérida, Andes venezolanos) y también fue superior a los 90 días, 2.76 %, a los valores informados por Beloso (1991), 0.55 a 0.63 %, en suelos de Galicia (España), todos determinados en condiciones similares de incubación.

La cantidad de C potencialmente mineralizable $C_0 = 110$ mg C-CO₂ /100 g suelo seco (determinada con el modelo exponencial simple) resultó mayor que la encontrada por: Contreras (2002), 16.9 a 32.0 mg, para suelos agrícolas del Edo. Mérida, Andes venezolanos; Beloso (1991), 13.7 a 66.0 mg, para suelos de Galicia, España; Ajwa y Tabatabai (1994), 42 a 48 mg, para suelos agrícolas de Iowa, EEUU; Franzluebbbers y Arshad (1996), 42 a 94 mg, para suelos agrícolas bajo labranza mínima y convencional en Canadá; y resultó menor que los informados por Glaser et al. (2001), 100 a 270 mg, para suelos de sabana natural cultivada en Tanzania.

Por otra parte, la vida media del compartimento recalcitrante del suelo control, $t_{1/2} = 9.5$ años, resultó menor a la informada por Sarmiento y Bottner (2002), $t_{1/2} = 19$ a 24 años, en suelos de Gavidia, ambas determinadas con modelo doble exponencial condicionado. Estos resultados indican que la materia orgánica del suelo control utilizado en este experimento contiene una cantidad de C potencialmente mineralizable relativamente alta que, debido a su moderada estabilidad, favorece una importante actividad microbiana a corto y mediano plazo.

Con el suministro de gallinazo o de pargana se incrementó la liberación de CO₂ respecto al suelo control. Esta tendencia está de acuerdo con lo informado en la literatura en el sentido de que la adición de sustratos orgánicos estimula el metabolismo microbiano (Contreras, 2002; Sarmiento y Bottner, 2002). Así, el suministro de gallinazo incrementó el porcentaje de C mineralizado respecto al suelo control desde 2.76 % hasta 3.55 %, a los 90 días de incubación. Esta misma tendencia es informada por Beloso (1991) en los suelos de Galicia, en los cuales la adición de gallinazo incrementó el porcentaje de C mineralizado respecto al suelo control desde 0.59 % hasta 1.61 %, después de 90 días de incubación. La dinámica de la mineralización del C resultó diferente para el suelo con gallinazo y el suelo con pargana, lo cual concuerda con lo informado en la literatura en el sentido de que la mineralización del C depende de la naturaleza de la materia orgánica exógena (Beloso, 1991; Contreras, 2002). El coeficiente de mineralización estimado para el C del gallinazo en el presente trabajo se situó en el rango de los informados por dichos autores en condiciones similares de incubación, siendo 21.7 % a los 42 días, el cual es menor que el encontrado por Contreras (2002), 34 a 35 %, en otros suelos de los Andes venezolanos, y siendo 23 % a los 90 días, el cual es mayor que los informados por Beloso (1991), 3.3 a 17.8 %, con distintos tipos de gallinazo aplicados en suelos de Galicia (España). No se encontraron en la literatura resultados para la mineralización del C de la cáscara de arroz. Sin embargo, la influencia de la naturaleza del sustrato sobre la mineralización del C se manifestó en el hecho de que el coeficiente de mineralización del C del gallinazo, 23.2 %, resultó 6 veces mayor que el de la pargana, 3.8 %, al final de la incubación. Además, los parámetros cinéticos indican que el gallinazo posee una fracción mayor de C más lábil que la pargana que causa una elevada actividad microbiana en la etapa inicial de la incubación, a consecuencia de la degradación de compuestos fácilmente metabolizables que tienden a agotarse relativamente rápido quedando un material orgánico más estable que se descompone lentamente (Beloso, 1991; Contreras, 2002). Por otra parte, aunque los parámetros cinéticos indican que la pargana tiene una fracción mayor de C más recalcitrante que el gallinazo, sin embargo, la cantidad absoluta acumulada de C mineralizado desde la pargana continuó incrementándose en el curso de la incubación superando a la del gallinazo al final, debido a la cantidad de pargana suministrada. Estos resultados contrastantes entre las cinéticas de mineralización del gallinazo y de la pargana

pueden ser atribuidas a que el gallinazo posee mayor contenido de compuestos hidrosolubles, aminoácidos y aminoazúcares (Beloso, 1991) y menor relación C/N, así como a su alta población microbiana inicial (Nodar et al., 1990), mientras que la pargana posee mayor contenido de compuestos celulósicos y lignina y mayor relación C/N. Además, en la cáscara de arroz, así como en otros residuos de cereales como la paja de trigo (Acea y Carballas, 1996) cabría esperar una comunidad microbiana inicial relativamente pobre en cantidad y diversidad.

Ahora bien, los resultados sugieren que con el suministro combinado de gallinazo y pargana se produce un efecto sinérgico en la mineralización del C en la etapa final de la incubación respecto a la que ocurre suministrando los substratos de manera separada. Este comportamiento podría tener las siguientes explicaciones: 1) Por una parte, diferentes grupos de la microbiota descomponedora muestran preferencia por distintos tipos de recursos (Swift y Anderson, 1993), así mientras en el gallinazo (Nodar et al., 1990) y en los suelos recién abonados con gallinazo (Acea y Carballas, 1996) predominan las bacterias, en cambio con el suministro de pargana es de esperarse que, como ocurre con la paja de trigo (Acea y Carballas, 1996), se estimule la población de hongos. Si consideramos que los microorganismos pueden formar cadenas tróficas de complejidad variable (Swift y Anderson, 1993) en las cuales las poblaciones se alimentan unas de otras, crecimiento críptico (Paul y Clark, 1989, p. 124), el suministro combinado de ambos substratos podría estimular la riqueza de especies y la actividad microbiana y, por lo tanto, los flujos de energía y carbono. 2) Por otra parte, el suministro combinado de ambos substratos podría afectar la degradabilidad de algunos compuestos, por ejemplo, se ha sugerido que cierto tipo de hongos degrada la lignina solamente en presencia de otros substratos lábiles que son utilizados como fuente primaria de energía (Paul y Clark, 1989, p. 97) y también que la descomposición de compuestos aromáticos ocurre sólo en presencia de otros substratos como la celulosa (Paul y Clark, 1989, p. 126). En resumen, se plantea que el suministro combinado de gallinazo y pargana aporta distintos tipos de compuestos que favorecen diferentes grupos funcionales a nivel de la microbiota, produciéndose una interacción a nivel químico y biótico que habría promovido hacia el final de la incubación una mayor mineralización de C que la esperada, considerando los resultados obtenidos para los dos substratos suministrados de manera separada.

Si tomamos en cuenta los antecedentes del manejo de este suelo agrícola, el cual ha sido cultivado de manera intensiva por lo menos durante los últimos 10 años (comunicación personal del propietario de la finca), tenemos que, por una parte, la MOS debería tender a disminuir como consecuencia de la práctica frecuente del arado que expone la MOS a una mayor acción de la microbiota y, por lo tanto, a una mayor mineralización (Paul y Clark, 1989; Anderson y Flanagan, 1989) pero, por otra parte, tiende a reponerse por el suministro en los últimos años de cantidades variables pero importantes de materiales orgánicos como: residuos de cosecha y enmiendas como el gallinazo y la pargana, dosificados por separado o de manera combinada, los cuales aportan compuestos de degradabilidad variable que permiten el mantenimiento de la MOS y de la actividad microbiana durante sucesivos ciclos de cultivo, como se desprende de los resultados de este trabajo.

Evolución del nitrógeno

Nitrificación

El contenido de N en forma de nitratos en relación (%) al N mineral presente en el suelo control antes de la incubación y durante el curso de la misma resultó superior al encontrado por Sarmiento (1995), Llambí (1997) y Abreu (2004) en suelos agrícolas de Gavidia, Andes venezolanos. Sin embargo, fue similar a los resultados de Rasmussen (1998) en experimentos establecidos en suelos agrícolas de Oregon, USA, con distintos manejos, con 30 a 60 años de duración, de rotación de cultivos, arado y suministro de fertilizantes y residuos orgánicos, donde las concentraciones de N-NH_4^+ resultaron menores a 1 mg kg^{-1} y, por lo tanto considera $\text{N mineral} = \text{N-NO}_3^-$. Así mismo nuestros resultados fueron similares a los de Sierra (2002) en un suelo, oxisol de Guadalupe, Antillas, donde todo el NH_4^+ añadido nitrificó en 11 días a 40°C y en 14 días a 30°C y a los resultados de Burger y Jackson (2003) en distintos suelos de California, USA, usando dos sistemas agrícolas, convencional y orgánico, encontrando en ambos sistemas que la nitrificación es alta y representa el mayor consumo de NH_4^+ .

Por lo tanto, el alto porcentaje de N en forma de nitratos en relación al N mineral así como las altas tasas de nitrificación encontradas al añadir sulfato de amonio y también al adicionar substratos orgánicos, en particular gallinazo que tiene un contenido importante de N-NH_4^+ , indican que el suelo utilizado en el presente experimento posee un alto potencial

de nitrificación que se traduce en la práctica en una rápida transformación en nitratos del amonio que ingresa a la solución del suelo, bien sea de manera directa con el suministro de fertilizantes minerales amoniacaes y gallinazo o como producto de la amonificación de los residuos orgánicos y de la materia orgánica del suelo. Ahora bien, dada la textura franca a franco-arenosa de estos suelos, el hecho de que la mayor parte del N mineral del suelo se encuentre en forma de nitratos, en lugar de amonio, aumenta el riesgo de pérdida de N por lixiviación, debido a que el ión nitrato presenta más movilidad que el amonio en la solución del suelo (Paul y Clark, 1989; Ünlü et al., 1999).

Mineralización del nitrógeno

La concentración de N mineral en la solución del suelo disminuyó en la primera etapa de la incubación y luego se mantuvo en valores muy por debajo del inicial hasta el final de la incubación en todos los tratamientos y especialmente en el suelo control, lo cual difiere de los resultados reseñados generalmente en la literatura en experimentos de incubación similares (Stanford y Smith, 1972; Robertson et al. 1988, Sarmiento, 1995; Mary et al., 1996; Rasmussen, 1998), en los cuales el N mineral del suelo aumenta gradualmente en el curso de la incubación. Sin embargo, en todos los tratamientos, incluyendo el suelo control, la cantidad de N total extraíble (orgánico + mineral) evolucionó de manera similar a la que podría esperarse para el N mineral en un experimento de incubación de suelo. Si consideramos además que, durante las etapas intermedia y final de la incubación, el N mineral representó una fracción relativamente baja (< 19 %) del N total extraíble, entonces todos estos resultados sugieren que en este suelo, bien sea enmendado o no, tanto el N procedente de la descomposición de formas relativamente estables de la MOS o de los substratos orgánicos añadidos, como el N mineral suministrado o presente inicialmente en el suelo tienden a transformarse en N orgánico “soluble” (extraíble con solución 0.5 M de K_2SO_4).

De lo anterior se puede concluir que:

- 1) Tanto el N de la materia orgánica, N-MOS, como el añadido en los dos substratos orgánicos, N-MOsubstrato, tienden a transformarse en N “soluble” (N orgánico + N mineral, extraíbles con solución 0.5 M de K_2SO_4), proceso que en el presente trabajo se denomina “solubilización”.

2) El N mineral tiende a transformarse en N orgánico soluble, proceso que denominamos “organización”.

Además los mayores cambios, tanto en el contenido de N total extraíble como de N mineral, se observaron durante los primeros 30 días de la incubación los cuales se corresponden a su vez con la etapa en la cual se observó la mayor parte de la mineralización del C, lo que sugiere que ambos procesos son consecuencia de la actividad microbiana.

Este planteamiento está de acuerdo con las ideas de: Jensen et al. (1997) quienes proponen que el N orgánico, extraíble con K_2SO_4 0.5 M, en lugar del N mineral, podría constituir la mayor parte del compartimento de ciclaje microbiano; Friedel et al., (2001) quienes encuentran que, en suelos agrícolas con enmiendas orgánicas en Alemania, el N orgánico extraíble, calculado como la diferencia entre el N total extraíble con K_2SO_4 0.5 M y el N mineral extraído con $CaCl_2$ 0.0125 M, se correlaciona mejor con el N de la biomasa microbiana que el N mineral y concluyen que la biomasa microbiana ejerce una función de sumidero y fuente para el N orgánico lábil más que para el N inorgánico; Compton y Boone (2002) quienes sugieren que, en suelos de bosque de zona templada en USA, el N inorgánico suministrado se convierte rápidamente (menos de 18 h) en N orgánico soluble que pasa al extracto de KCl o metatungstato; Zhong y Makeschin (2003) quienes informan que, en suelos de bosque de zona templada en Alemania incubados aeróbicamente en el laboratorio durante 2 meses, la dinámica del N orgánico soluble (SON), calculado como la diferencia entre el N total extraído (con KCl 1 M o con K_2SO_4 0.5 M) menos el N mineral (extraído con KCl 1M), es afectada significativamente por la mineralización y la inmovilización y concluyen que podría ser un indicador sensible para evaluar el “status” de N en esos suelos.

Además, los resultados de la proporción (%) de N mineral a N total extraíble sugieren que podría existir una reacción reversible y, por lo tanto, un equilibrio dinámico entre las formas en que se presenta el N total extraíble (N mineral $\leftarrow\rightleftharpoons$ N orgánico) y que para este suelo enmendado o no, en las condiciones en que fue realizada la incubación y la determinación de N mineral y N total extraíble, predomina la “organización” frente a la “mineralización” (N mineral $\leftarrow\rightleftharpoons$ N orgánico extraíble).

En vista de estos resultados y considerando además: que Robertson et al. (1988) indican que las cantidades de N potencialmente mineralizable pudieran ser seriamente subestimadas si no se incluye el N total extraíble en la determinación de este parámetro; que Appel y Mengel (1993) concluyen que la fracción de N orgánico extraíble (con solución 0.01 M de CaCl₂) refleja la actividad microbiana del suelo y representa un compartimento de N fácilmente mineralizable y que adicionalmente otros autores (Barak et al., 1990; Hadas et al., 1992; Mary et al., 1996) destacan la importancia de la “asimilación directa” de compuestos orgánicos por la microbiota en el proceso de inmovilización del N; entonces en el presente trabajo se utilizó el N total extraíble (orgánico + mineral) en lugar del N mineral como parámetro para evaluar los procesos de “solubilización” e inmovilización de N por la microbiota.

“Solubilización” e inmovilización del nitrógeno

Al evaluar el proceso de inmovilización del N, a partir de las variaciones temporales del N en la biomasa microbiana (Ec. 6), los resultados indican que la rehumectación y posterior incubación del suelo no causó inmovilización significativa de N en el suelo control. Así mismo el suministro de N mineral en forma de sulfato de amonio no alteró la cantidad de N en la biomasa microbiana respecto al suelo control, contrariamente a lo encontrado por Sarmiento (1995) y Abreu (2004). Mientras que el aumento, durante la incubación, de las cantidades de N total extraíble tanto en el suelo control como en el suelo con suministro de sulfato de amonio estaría indicando que en éstos predominó el proceso de mineralización frente al de inmovilización, como era de esperarse para un suelo incubado en el laboratorio sin suministro de enmiendas orgánicas (Mary et al., 1996). Sin embargo, en el presente trabajo como se refirió anteriormente, posiblemente ocurrió un proceso de “organización” que trajo como consecuencia que se produjera un aumento en el N orgánico extraíble y no en el N mineral. En cambio el suministro de las enmiendas orgánicas: gallinazo o pargana y de estos dos substratos combinados, promovió un rápido aumento en la cantidad de N en la biomasa microbiana respecto al suelo control en la primera etapa de la incubación. Estos resultados sugieren que este suelo agrícola posee suficiente cantidad de N disponible para la microbiota y que es el carbono el principal factor que limita la actividad y el crecimiento de la microbiota (Paul y Clark, 1989).

La disminución observada en la cantidad de N total extraíble en el suelo con sulfato de amonio respecto a la del suelo control durante los primeros 30 días de la incubación, la cual no se tradujo en un aumento de N en la biomasa microbiana, pudiera deberse a un efecto de inhibición en la actividad microbiana debido a la concentración relativamente alta de NH_4^+ (Paul y Clark, 1989). Sin embargo, como no se observó en esta etapa una disminución significativa en la mineralización de C en este tratamiento respecto a la del suelo control, podría pensarse en la posibilidad de que hayan ocurrido pérdidas gaseosas de N por volatilización del NH_3 producido por la reacción del NH_4^+ en un suelo con pH cercano a la neutralidad (Paul y Clark, 1989).

Las diferencias encontradas entre las cantidades netas de N inmovilizado en el caso de los tratamientos P y G+P, calculadas de las dos formas descritas (Ec. 6 y Ec. 7), en las etapas intermedia y final de la incubación, podrían deberse a que la pargana estuviera favoreciendo, como producto de la acción microbiana, la formación de compuestos nitrogenados orgánicos no extraíbles (Capítulo 6), es decir la estabilización o humificación del N lábil. Otra explicación podría ser que esas diferencias se deban a que el factor $k_{\text{EN}} = 0.54$ utilizado para determinar la cantidad de N en la biomasa microbiana podría haber sido inadecuado para las etapas avanzadas de la incubación en los suelos que recibieron pargana. Esta hipótesis se sustenta en las siguientes ideas:

Los resultados de las cantidades de C, N y P en la biomasa microbiana determinadas por el método de fumigación-extracción dependen en gran medida del factor de conversión k_{E} empleado para convertir la cantidad del elemento, que fue solubilizada por efecto de la fumigación con cloroformo, en la cantidad originalmente presente en la biomasa microbiana (Jenkinson et al., 2004). Por esta razón, se han realizado numerosos estudios para encontrar un factor k_{EN} apropiado para determinar la cantidad de N en la biomasa microbiana (Joergensen, 1996; Joergensen y Mueller, 1996), así como también para conseguir los factores k_{EC} y k_{EP} para la determinación de las cantidades de C y P respectivamente en la biomasa microbiana (Tate et al., 1988; Sparling y West, 1988; Eberhardt, 1996). Los resultados de los trabajos realizados con este objetivo, desde que Jenkinson, Brookes, Powelson, Vance y colaboradores (Jenkinson et al., 2004) propusieron entre 1982 y 1987 el método de fumigación-extracción para la determinación de P, N y C en la biomasa microbiana, hasta el presente, incluyen un amplio rango de valores para k_{E} ,

que en el caso de k_{EN} oscilan entre 0.20 y 0.88 (Joergensen y Mueller, 1996). Esta amplia variación depende de los métodos empleados para la determinación de k_E , algunos directos y otros indirectos (Joergensen, 1996; Joergensen y Mueller, 1996; Jenkinson et al., 2004) y del sustrato utilizado en la determinación (Dietor et al., 1998; Jenkinson et al., 2004). Además, las variaciones de los factores k_{EN} (Greenfield, 1995), k_{EC} (Tate et al., 1988; Eberhardt, 1996) y k_{EP} (Eberhardt, 1996), derivados de la fumigación-extracción de cepas aisladas individualmente de distintas bacterias y hongos, indican que los valores de k_E son afectados por la estructura de la comunidad microbiana del suelo (Eberhardt, 1996). En relación a estos aspectos, Müller et al. (2003) indican que la inmovilización de N mineral durante la etapa de fumigación pudiera afectar los factores de conversión k_{EN} y sugieren la posibilidad que este efecto sea más importante en el caso de los hongos como consecuencia de su posible mayor resistencia a la lisis producida por el cloroformo. Si consideramos además que con el suministro de la cáscara de arroz, como ocurre con la paja de trigo (Acea y Carballas 1996), se haya estimulado la población de hongos debido a que éstos son principalmente responsables de la descomposición de compuestos de celulosa y lignina, mientras las bacterias muestran preferencia por compuestos más solubles (Paul y Clark, 1989; Mary, 1996) y que la relación de biomasa de hongos a biomasa de bacterias y de sus actividades hayan aumentado con la sucesión microbiana durante la descomposición del sustrato tal como lo plantean Henriksen y Breland, (1999); entonces en el presente trabajo se plantea que el factor $k_{EN} = 0.54$ empleado para calcular N en la biomasa microbiana posiblemente representó un valor sobrestimado para las etapas intermedia y final de la incubación en los suelos con suministro de pargana, debido a un mayor desarrollo de hongos que de bacterias a medida que se agotan los compuestos orgánicos más lábiles con el progreso de la descomposición de los sustratos orgánicos en el curso de la incubación. Resultando entonces subestimadas las cantidades de N en la biomasa microbiana y, por lo tanto, las cantidades de N inmovilizado calculadas a partir de éstas, en las etapas avanzadas de la incubación, en los suelos que recibieron pargana sola o combinada con gallinazo.

Si analizamos el proceso de inmovilización del N por medio de las cantidades de N inmovilizado calculadas (Ec. 7) a partir de las cantidades de N total extraíble, el hecho de que con el suministro separado o combinado de gallinazo (baja relación C/N) y pargana

(alta relación C/N), al término de la incubación, las cantidades netas de N solubilizado resultaron mayores que las cantidades netas de N inmovilizado, difiere de la idea generalmente establecida (Paul y Clark, 1989; Myers et al., 1994) que indica que para sustratos de baja relación C/N la mineralización debería ser mayor que la inmovilización y que para sustratos de alta relación C/N la inmovilización debería ser mayor que la mineralización. Sin embargo, esta aparente contradicción, refuerza el planteamiento realizado en un párrafo anterior de esta misma sección, en el sentido de que en el suelo utilizado en este trabajo, el factor que más limita el desarrollo y actividad de la microbiota parece ser el carbono y no el nitrógeno y es apoyado además por el hecho de que las cantidades medidas de N total extraíble en el suelo control presentaron valores relativamente altos, en un rango entre 154 hasta 272 mg N kg⁻¹ entre el inicio y el fin de la incubación respectivamente, donde la cantidad inicial de 154.8 mg N kg⁻¹, incluyó una cantidad de N mineral de 118.7 mg N kg⁻¹.

Por otra parte, el hecho de que en la etapa final de la incubación las cantidades de N inmovilizado, calculadas (Ec. 7), resultaron mayores en los tratamientos con suministro de pargana (alta relación C/N), sola o combinada con gallinazo, que en el tratamiento con suministro de gallinazo (baja relación C/N), tanto en valor absoluto como relativo a la cantidad de N “solubilizado”, está de acuerdo con la idea, generalmente establecida (Mary et al., 1996), que indica que la máxima cantidad neta de N inmovilizado resulta mayor al suministrar sustratos de alta relación C/N que al suministrar sustratos de baja relación C/N. Si además consideramos que en la etapa inicial de la incubación las cantidades de N inmovilizado resultaron contrarias, es decir, mayores en los tratamientos con suministro de gallinazo solo o combinado con pargana que en el tratamiento con suministro de pargana sola, tanto en valor absoluto como relativo a la cantidad de N “solubilizado”, entonces estos resultados indican, tal como lo proponen Mary et al. (1996) y Hadas et al. (2004), que la relación C/N de los sustratos explica solamente parte de las diferencias encontradas en la inmovilización neta y que las cinéticas de los procesos de mineralización e inmovilización del N dependen más de la composición bioquímica de los residuos, como es su contenido de compuestos solubles, celulosa y lignina, que de la relación C/N.

En este sentido, la elevada inmovilización de N encontrada en la primera etapa de la incubación con el suministro de un sustrato de alta calidad como el gallinazo, la cual resultó inesperadamente superior a la obtenida con el suministro de un sustrato de baja calidad como la pargana contrasta con los resultados generalmente informados en la literatura (Myers et al., 1994; Janssen, 1996; Henriksen y Breland, 1999) respecto a que los sustratos de alta calidad deberían causar poca o ninguna inmovilización neta en la etapa inicial de su descomposición. Sin embargo, es importante hacer notar que la mayoría de los resultados presentados por los autores citados anteriormente, en cuanto a la relación entre la calidad de los sustratos y los procesos de mineralización e inmovilización del N, fueron obtenidos a partir de experimentos realizados con residuos vegetales en cambio el gallinazo es un residuo de origen animal con características diferentes, entre las cuales destaca su alto contenido de compuestos orgánicos nitrogenados hidrosolubles que incluye una fracción importante de aminoácidos (Beloso, 1991), los cuales pudieran ser asimilados directamente por la biomasa microbiana (Barak et al., 1990; Hadas et al., 1992).

En vista de estos resultados, en el presente trabajo se plantea que el gallinazo contiene compuestos orgánicos fácilmente degradables y asimilables por microorganismos de baja relación C/N y que constituyen una fuente tanto de energía como de C asimilable que permiten un rápido incremento de la biomasa microbiana y, por lo tanto, de la demanda de N, el cual es incorporado en la biomasa (inmovilizado) no sólo desde el sustrato sino también desde el suelo, donde en este caso se encuentra disponible en forma mineral (amonio y nitratos) así como en forma orgánica extraíble.

Los procesos del ciclado del N y la sincronización

A los fines de emplear los sustratos gallinazo y pargana, suministrados de manera separada o combinada en el establecimiento de un cultivo anual, para lograr una adecuada sincronización entre la disponibilidad de N en el suelo y la demanda de N por el cultivo, los resultados encontrados en el presente trabajo indican que en la etapa inmediata al suministro de los sustratos en el caso del gallinazo, aún cuando se inmovilizó mayor cantidad de N que con el suministro de pargana, sin embargo se encontró mayor cantidad de N extraíble el cual podría perderse por lavado si no es utilizado por el cultivo por encontrarse éste en una etapa incipiente de desarrollo; mientras que con el suministro de

pargana se encontró menos N extraíble y, por lo tanto, podría ser menor el riesgo de pérdidas por lavado. En etapas posteriores la inmovilización resultó mayor en el tratamiento con pargana que en el caso del gallinazo y, por lo tanto, la cantidad de N extraíble en el tratamiento con pargana fue menor que con el gallinazo, lo cual sugiere que la disponibilidad de N podría ser menor que en el caso del gallinazo dependiendo de las pérdidas que pudieran haber ocurrido en la etapa inicial. Para el tratamiento combinado de gallinazo y pargana cabría esperarse una situación intermedia en cuanto al riesgo de pérdidas en la etapa inicial y una cantidad de N disponible variable en la etapa final dependiendo del lavado.

Por otro lado, la remineralización del N previamente inmovilizado en la microbiota puede ser un proceso determinante a los fines de lograr la sincronización entre la disponibilidad de N en el suelo y la demanda de N por el cultivo empleando residuos orgánicos (Myers et al., 1994), no solamente en cuanto a la magnitud sino también en el momento en que este proceso ocurra. Si se analiza la dinámica de la inmovilización de N, a partir de los valores calculados (Ec. 7) para las cantidades netas de N inmovilizado, los resultados sugieren que no ocurrió “remineralización” neta del N (según Mary et al., 1996) o “resolubilización” neta del N (según el presente trabajo) en ninguno de los tratamientos durante los 120 días que duró la incubación. Esa misma tendencia es encontrada por Mary et al. (1996) durante un experimento de campo con suministro de paja de trigo, en el cual no ocurrió aparente remineralización aún después de un año de la incorporación del substrato. En el presente trabajo, en el caso del gallinazo aún cuando no se observó “resolubilización” de N, sin embargo la inmovilización neta aparentemente se detuvo. Por otra parte, los resultados de las cantidades de N en la biomasa microbiana en el suelo con gallinazo y/o pargana presentaron una ligera tendencia a disminuir después de alcanzar un máximo a los 30 días de la incubación. Por ello no se descarta la posibilidad de que pudiera ocurrir remineralización o resolubilización del N en una etapa posterior.

Sin embargo, las dinámicas de mineralización, solubilización e inmovilización del N presentadas por los dos substratos suministrados de manera separada o combinada en el experimento de incubación realizado en el presente trabajo podrían cambiar en condiciones de campo incluso para este mismo suelo. Esta suposición se fundamenta en que algunos autores (Honeycutt, 1999; Delphin, 2000), encuentran que existen diferencias en la

estimación de la mineralización del N de la MOS y de residuos de cultivos entre experimentos de campo y experimentos de incubación en el laboratorio, atribuidas a distintos factores, entre los cuales se destacan la temperatura y la humedad. Así por ejemplo, De Neve et al. (1996) informan que la temperatura afecta la mineralización del C y del N de la MOS y de residuos de cultivos durante la incubación, y que los efectos son diferentes para la MOS y para distintos residuos vegetales, sugiriendo que un aumento en la temperatura favorece más la mineralización de N de los residuos más resistentes que la de los más degradables. Por otra parte, Beauchamp et al. (1986) encuentran que la cinética de la mineralización del N durante la incubación es afectada por la historia de cultivo (especie cultivada) y por el pretratamiento del suelo: congelado, seco al aire ($20 \text{ g H}_2\text{O kg}^{-1}$) o mantenido en frío ($2 \text{ }^\circ\text{C}$) con la humedad del campo (aprox. $230 \text{ g H}_2\text{O kg}^{-1}$). Además, existen importantes factores que afectan los procesos de mineralización e inmovilización del N en el suelo cultivado, como pueden ser las interacciones entre los microorganismos y las plantas a nivel de la rizósfera (Paul y Clark, 1989) y también muchos mecanismos complejos de interacción entre las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, particularmente la microbiota, la fauna y las raíces de las plantas) influenciados a su vez por el clima y las prácticas de manejo como el arado y el suministro de biocidas que afectan la descomposición de los sustratos orgánicos (Woomer et al., 1994; Paul y Clark, 1989) y, por lo tanto, los procesos de mineralización e inmovilización del N en el suelo.

Descomposición de los sustratos e inmovilización del nitrógeno

Los resultados encontrados, muestran que el suministro de sulfato de amonio no causó un aumento de la mineralización del C de la MOS, ni de la inmovilización de N respecto al suelo control, es decir no estimuló la actividad microbiana. Este hecho, unido a la alta concentración de N total extraíble encontrada al final de la incubación en todos los tratamientos, indican que la cantidad de N disponible para los microorganismos en este suelo, no constituyó un factor limitante para la descomposición de la MOS ni de los sustratos suministrados (Mary et al., 1996).

Por otra parte, la alta correlación observada entre las cantidades de C mineralizado y de N inmovilizado para el gallinazo y la pargana, aún cuando las dinámicas de los procesos de mineralización del C e inmovilización de N difieren entre los dos sustratos, es

indicativa de la interdependencia entre la descomponibilidad de los substratos y la inmovilización de N a través de la actividad microbiana (Robertson et al., 1988; Mary et al., 1996; Henriksen y Breland, 1999). En este sentido, en el presente trabajo se plantea que: el suministro de gallinazo promueve el establecimiento de una comunidad microbiana en la que predominan bacterias y microorganismos de baja relación C/N, que se desarrollan rápidamente a expensas de compuestos orgánicos solubles de bajo peso molecular y baja relación C/N. Es decir, microorganismos de selección *r* (Paul y Clark, 1989; Fontaine et al., 2003) que consumen rápidamente los compuestos más lábiles del gallinazo, aumentando sus poblaciones drásticamente al inicio para luego disminuir a medida que van quedando compuestos de estabilidad mayor (Henriksen y Breland, 1999) similar a la de los compuestos de la MOS, razón por la cual la actividad microbiana reflejada a través de la mineralización del C y la inmovilización del N resultó mucho mayor que la del suelo control al principio y similar a la de éste hacia el final de la incubación. En cambio, con el suministro de pargana se establece al principio de la incubación una comunidad microbiana en la que predominan microorganismos que se desarrollan a expensas de la MOS y de una escasa cantidad de compuestos lábiles provenientes del substrato añadido, causando cierto aumento en la mineralización de C y en la inmovilización del N con respecto a la del suelo control, pero menores que las causadas por el gallinazo en esta misma etapa. Además, se plantea que en esta etapa inicial de la incubación con el suministro de pargana se desarrollan poblaciones incipientes de hongos y microorganismos de mayor relación C/N, que van estableciéndose lentamente sobre compuestos celulósicos y lignínicos. Es decir, microorganismos de selección *K* (Paul y Clark, 1989; Fontaine et al., 2003) que van consumiendo lentamente compuestos estables y de alta relación C/N del substrato añadido y que, con el curso de la incubación, van incrementando su contribución relativa a la actividad microbiana (Henriksen y Breland, 1999), la cual se reflejó en cantidades de C mineralizado y de N inmovilizado superiores a los del suelo control. Esta actividad de los microorganismos de selección *K*, a diferencia de la de los microorganismos de selección *r*, se mantiene hasta el final de la incubación debido a la gran abundancia de este tipo de compuestos, tanto por su alta concentración en la cáscara de arroz como por la cantidad suministrada de este substrato, dando como resultado al final de la incubación mayores

cantidades acumuladas de C mineralizado y N inmovilizado en el suelo con pargana que en el suelo control y que en el suelo con gallinazo.

El planteamiento anterior también es soportado por el hecho de que las dinámicas de mineralización de C e inmovilización de N, para el suministro combinado de gallinazo y pargana, fueron similares a las del gallinazo en la etapa inicial y a las de la pargana en las etapas siguientes. Así, se plantea que el gallinazo, con alto contenido de compuestos solubles, favoreció el rápido desarrollo de microorganismos de selección r en la etapa inicial y la pargana, con mayor contenido de compuestos celulósicos y lignínicos, favoreció el desarrollo de microorganismos de selección K en las siguientes etapas. Además, dado el hecho de que con el suministro combinado de los dos substratos las cantidades de C mineralizado y N inmovilizado al final de la incubación resultaron mayores que las esperadas considerando los resultados obtenidos con el suministro separado de los dos substratos, indica un aumento en la actividad microbiana posiblemente debido a que se produce una interacción, a nivel químico y biótico, entre los dos substratos, causada por factores tales como: a) aumento en la degradabilidad de algunos compuestos por la presencia de otros (Paul y Clark, 1989; Fontaine et al., 2003); b) aumento en la diversidad de la microbiota como consecuencia del aumento en las poblaciones de microorganismos especializados en la descomposición de substratos diferentes (Swift y Anderson, 1993; Fontaine et al., 2003); c) aumento de las poblaciones de microorganismos herbívoros y predadores (Paul y Clark, 1989; Swift y Anderson, 1993) y, como consecuencia, aumento en la competencia por la obtención de energía y nutrientes que produce un efecto similar al “priming effect” (Fontaine et al., 2003). Los planteamientos anteriores están de acuerdo con las ideas de Fontaine et al. (2003) que indican que el carbono es la “fuerza motriz” de la mayoría de los procesos mediados por la microbiota y que la “calidad del carbono” condiciona el suministro de energía para la producción de enzimas y el crecimiento, estableciéndose una relación microbiota-substrato.

En vista de los resultados obtenidos se plantea que en este experimento, tanto en el suelo solo como en el suelo con enmiendas, el factor que más condicionó la actividad y desarrollo microbiano fue el carbono (cantidad y calidad de la materia orgánica) y no el nitrógeno el cual se encontró disponible en cantidad suficiente en formas asimilables por los microorganismos.

En conclusión se plantea que, en condiciones de incubación en laboratorio, las dinámicas de los procesos de mineralización del C y de “solubilización” e inmovilización del N implicados en la descomposición de los substratos gallinazo (alta calidad) y cáscara de arroz (baja calidad), suministrados a un suelo agrícola con una alta concentración de N total extraíble (mineral y orgánico), dependen no sólo de la relación C/N de los substratos sino más aún de su composición bioquímica, en cuanto al contenido de compuestos: solubles, celulosa y lignina, que condiciona la actividad de la comunidad microbiana descomponedora.

Recomendaciones

Aplicación para mejorar la “sincronización”

A los fines de utilizar los substratos gallinazo y pargana, de manera separada o combinada, para lograr una adecuada sincronización entre la disponibilidad de N en el suelo y la demanda de N por un cultivo de ciclo relativamente corto como la papa (aprox. 4 meses) fundamentada en los procesos de mineralización e inmovilización del N, derivados de la descomposición de estos substratos, se hace necesario realizar experimentos de campo que permitan evaluar de manera integrada la contribución de estos procesos al balance de N en el agroecosistema y su efecto sobre el desarrollo del cultivo. Por otra parte, los análisis del suelo utilizado en el presente trabajo sugieren que posee características peculiares como, por ejemplo, alto contenido de nutrientes (N, Ca, P) posiblemente debidas al suministro repetido de grandes cantidades de fertilizantes y enmiendas, por lo tanto, sería recomendable realizar experimentos de incubación con otros suelos de la región que hayan tenido distintos manejos en cuanto al suministro de enmiendas y fertilizantes orgánicos a los fines de evaluar la influencia de la historia de manejo sobre la magnitud de los procesos de “solubilización”, “organización” e inmovilización del N.

Determinación de las cantidades de N inmovilizado

A los fines de determinar las cantidades de N en la biomasa microbiana por el método de fumigación-extracción en el suelo con suministro de cáscara de arroz y por lo

tanto, evaluar de manera más directa el proceso de inmovilización, y en vista de la amplia variación de valores de k_{EN} encontrados en la literatura (Joergensen y Mueller, 1996) que aparentemente dependen de los métodos empleados así como de las características de los sustratos y microorganismos involucrados, sería recomendable determinar un factor k_{EN} (eficiencia en la extracción) para la microbiota que se desarrolla cuando se suministra este sustrato. Sin embargo, las diferencias en las cantidades de N inmovilizado calculadas por dos métodos distintos para los tratamientos con pargana, pudieran deberse no al valor de k_{EN} empleado sino a que el suministro de pargana pudiera estar favoreciendo la formación de compuestos nitrogenados orgánicos no extraíbles, como producto de la acción microbiana, pero localizados fuera de la biomasa microbiana. En vista de esta situación y dadas las exigencias metodológicas que implica la determinación de k_{EN} , pudiera ser preferible realizar incubaciones de suelos con suministro de pargana + ^{15}N mineral como trazador isotópico a los fines de analizar el destino del N mineral en distintos compartimentos del suelo.

Bibliografía

- Abreu Z., 2004. Aspectos del ciclado del nitrógeno en un sistema agrícola con descansos largos de los páramos venezolanos. Tesis de Magíster Scientiae, Postgrado en Ecología Tropical, Instituto de Ciencias Ambientales y Ecológicas, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela, 114 p.
- Acea M.J., Carballas T., 1996. Microbial response to organic amendments in a forest soil. *Bioresource Technology*. 57: 193-199.
- Agren G., Bosatta E., 1996. *Theoretical Ecosystem Ecology. Understanding Element Cycles*. Cambridge University Press, 234 p.
- Ajwa H.A., Tabatabai M.A., 1994. Decomposition of different organic materials in soils. *Biol. Fertil. Soils*. 18: 175-182.
- Alef K., 1995. Soil respiration. In: K. Alef and P. Nannipieri (Eds.). *Methods in Applied Soil Microbiology and Biochemistry*. Academic Press, London, pp. 214-220.
- Anderson J., Flanagan P., 1989. Biological processes regulating organic matter dynamics in tropical soils. En: D.C. Coleman, J.M. Oades and G.Uehara (Eds.). *Dynamics of Soil Organic Matter in Tropical Ecosystems*. NifTAL Project. University of Hawaii, USA, pp. 97-123.
- Appel T., Mengel K., 1993. Nitrogen fractions in sandy soils in relation to plant nitrogen uptake and organic matter incorporation. *Soil Biol. Biochem*. 25: 685-691.
- Barak P., Molina J.A.E., Hadas A., Clapp C.E., 1990. Mineralization of amino acids and evidence of direct assimilation of organic nitrogen. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54: 769-774.
- Beauchamp E.G., Reynolds W.D., Brasche-Villeneuve D., Kirby K., 1986. Nitrogen mineralization kinetics with different soil pretreatments and cropping histories. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50: 1478-1483.
- Beloso M.C., 1991. Estudio de la gallinaza como fertilizante agrícola. Tesis Doctoral. Universidad de Santiago de Compostela. Santiago de Compostela, 313 p.
- Bremmen J.M., Mulvaney C.S., 1982. Nitrogen-total. En: A.L. Page, R.H. Miller, D.R. Keeney (Eds.). *Methods of soil analysis. Part 2*. 2nd Edition, Agronomy. 9: 595-624.
- Brookes P.C., Landman A., Pruden G., Jenkinson D.S., 1985. Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: a rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil. *Soil Biol. Biochem*. 17: 837-842.
- Bouyoucos G.J., 1962. Hydrometer Method Improved for Making Particle Size Analyses of Soils. *Agron. J.* 54: 464-465.

- Burger J., Jackson L.E., 2003. Microbial immobilization of ammonium and nitrate in relation to ammonification and nitrification rates in organic and conventional cropping systems. *Soil Biol. Biochem.* 35: 29-36.
- Chaussod R., Houot S., Guiraud G., Hetier J.M., 1988. Size and turnover of the microbial biomass in agricultural soils: laboratory and field measurements. En: D.S. Jenkinson and K.A. Smith (Eds.). *Nitrogen Efficiency in Agricultural Soils*. Elsevier Applied Science, Amsterdam, pp. 312-326.
- Compton J.E., Boone R.D., 2002. Soil nitrogen transformation and the role of light fraction organic matter in forest soils. *Soil Biol. Biochem.* 34: 933-943.
- Contreras F., 2002. Efecto de la adición de enmiendas orgánicas sobre las actividades enzimáticas (deshidrogenada, ureasa, fosfomonoesterasa ácida y arisulfatasa) y la mineralización del carbono en suelos del Municipio Rivas Dávila (Estado Mérida). Tesis Doctoral, Postgrado en Ciencia del Suelo, Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela, Maracay, 145p.
- Delphin J.E., 2000. Estimation of nitrogen mineralization in the field from an incubation test and from soil analysis. *Agronomie.* 20: 349-361.
- Dence C.W., 1992. The Determination of Lignin. Determination of acid insoluble lignin in annual plants. En: S.Y. Lim, C.W. Dence (Eds). *Methods in Lignin Chemistry*. Springer-Verlag. Berlin Heidelberg New York, pp. 33-41.
- De Neve S., Pannier J., Hofman G., 1996. Temperature effects on C- and N-mineralization from vegetable crop residues. *Plant and Soil.* 181: 25-30.
- Dictor M.C., Tessier L., Soulas G., 1998. Reassessment of the k_{EC} coefficient of the fumigation-extraction method in a soil profile. *Soil Biol. Biochem.* 30: 119-127.
- Eberhardt U., Apel G., Joergensen R.G., 1996. Effects of direct chloroform fumigation on suspended cells of ^{14}C and ^{32}P labeled bacteria and fungi. *Soil Biol. Biochem.* 28: 677-679.
- Ellert B.H., Bettany J.R., 1988. Comparison of kinetic models for describing net sulphur and nitrogen mineralization. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52: 1692-1702.
- Fontaine S., Mariotti A., Abbadie L., 2003. The priming effect of organic matter: a question of microbial competition? *Soil Biol. Biochem.* 35: 837-843.
- Franzluebbers A., Arshad M.A., 1996. Soil organic matter pools during early adoption of conservation tillage in Northwestern Canada. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60: 1422-1427.
- Friedel J.K., Gabel D., Stahr K., 2001. Nitrogen pools and turnover in arable soils under different durations of organic farming: II. Source-and-sink function of the soil microbial biomass or competition with growing plants? *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 164: 421-429.

- Glasser B., Lehmann J., Fuhrbister M., Solona D., Zech W., 2001. Carbon and nitrogen mineralization in cultivated and natural savanna soils of Northern Tanzania. *Biol. Fertil. Soils*. 33: 301-309.
- González-Prieto S.J., Carballas M., Carballas T., 1991. Mineralization of a nitrogen-bearing organic substrate model ^{14}C , ^{15}N -Glycine in two acid soils. *Soil Biol. Biochem.* 23: 53-63.
- Greenfield L.G., 1995. Release of microbial cell N during chloroform fumigation. *Soil Biol. Biochem.* 27: 1235-1236.
- Hadas A., Sofer M., Molina J.A.E., Barak P., Clapp C.E., 1992. Assimilation of nitrogen by soil microbial population: NH_4 versus organic N. *Soil Biol. Biochem.* 24: 137-143.
- Hadas A., Kautsky L., Goek M., Kara E.E., 2004. Rates of decomposition of plant residues and available nitrogen in soil, related to residue composition through simulation of carbon and nitrogen turnover. *Soil Biol. Biochem.* 36: 255-266.
- Henriksen T.M., Breland T.A., 1999. Evaluation of criteria for describing crop residue degradability in a model of carbon and nitrogen turnover in soil. *Soil Biol. Biochem.* 31: 1135-1149.
- Honeycutt C.W., 1999. Nitrogen mineralization from soil organic matter and crop residues: field validation of laboratory predictions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 134-141.
- ICA, 1989. El Análisis de suelos, plantas y aguas para riego. Manual de Asistencia Técnica N° 47. Instituto Colombiano Agropecuario. Bogotá, pp. 42-56.
- IGAC, 1978. Métodos analíticos del laboratorio de suelos. Instituto Geográfico "Agustín Codazzi". Ministerio de Hacienda y Crédito Público. Bogotá, Colombia, 663 p.
- Janssen B.H., 1996. Nitrogen mineralization in relation to C/ N ratio and decomposability of organic materials. *Plant and Soil*. 181: 39-45.
- Jenkinson D.S., Brookes P.C., Powlson D.S., 2004. Measuring soil microbial biomass. *Soil Biol. Biochem.* 36: 5-7.
- Jensen L.S., Mueller T., Magid J., Nielsen N.E., 1997. Temporal variation of C and N mineralization, microbial biomass and extractable organic pools in soil after oilseed rape straw incorporation in the field. *Soil Biol. Biochem.* 29: 1043-1055.
- Joergensen R.G., 1996. The fumigation-extraction method to estimate soil microbial biomass: calibration of the k_{EC} value. *Soil Biol. Biochem.* 28: 25-31.
- Joergensen R.G., Mueller T., 1996. The fumigation-extraction method to estimate soil microbial biomass: calibration of the k_{EN} value. *Soil Biol. Biochem.* 28: 33-37.

- Kamath S.R. y Proctor A., 1998. Silica gel from Rice Hull Ash: Preparation and Characterization. *Cereal Chemistry*. 75 (4): 484-487.
- Kandeler E., 1996. Nitrification during long-term incubation. En: F. Schinner, R. Öhlinger, E. Kandeler, R. Margesin (Eds.). *Methods in Soil Biology*. Springer. Germany, pp. 149-151.
- Klute A., 1986. Water retention: Laboratory methods. En: Klute A. (Ed.), *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods*. Agronomy. 9: 635-662.
- Llambí L.D., 1997. Recuperación de la fertilidad en una sucesión en el Páramo: Biomasa microbiana y Ciclaje de nitrógeno. Trabajo especial de grado. Universidad Simón Bolívar, Sartenejas, Venezuela, 128 p.
- Mary B., Recous S., Darwis D., Robin D., 1996. Interactions between decomposition of plant residues and nitrogen cycling in soil. *Plant and Soil*. 181: 71-82.
- Myers R.J.K., Palm C.A., Cuevas E., Gunatilleke I.U.N., Brossard M., 1994. The synchronization of nutrient demand. En: P.L. Woomer and M.J. Swift (Eds.). *The Biological Management of Tropical Soil Fertility*. John Wiley and Sons Inc, pp. 81-116.
- Müller C., Stevens R.J., Laughlin R.J., Ottow J.C.G., Jäger H.J., 2003. Ammonium immobilization during chloroform fumigation. *Soil Biol. Biochem*. 35: 651-665.
- Nodar R., Acea M.J., Carballas T., 1990. Microbial composition of poultry excreta. *Biological Wastes*. 33: 95-105.
- Öhlinger R., 1996. Soil respiration by titration. En: F. Schinner, R. Öhlinger, E. Kandeler, R. Margesin (Eds.). *Methods in Soil Biology*. Springer. Germany, pp. 95-98.
- Ordóñez J.A., 1992. Notas sobre el uso de la cama de pollo en la alimentación de bovinos a pastoreo. *Revista VENEZUELA BOVINA*. 5 (19): 35-38.
- Paul E.A., Clark F.E., 1989. *Soil Microbiology and Biochemistry*. Academic Press, Inc. USA, 273 p.
- Rasmussen P.E., Douglas C.L., Collins H.P., Albrecht S.L., 1998. Long-term cropping system effects on mineralizable nitrogen in soil. *Soil Biol. Biochem*. 30: 1829-1837.
- Robertson K., Schnürer J., Clarholm M., Bonde A., Rosswall T., 1988. Microbial biomass in relation to C and N mineralization during laboratory incubations. *Soil Biol. Biochem*. 20: 281-286.
- Rodríguez L., 1978. *Métodos de análisis empleados en la industria papelera*. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, 155p.

- Rojas L.A., Castillo L.E., 1989. Determinación de amonio, nitratos y nitritos. En: Instituto Colombiano Agropecuario, ICA (Ed.). El Análisis de Suelos, Plantas y Aguas para Riego. Manual de Asistencia Técnica N° 47. Bogotá, pp. 27-40.
- Sarmiento L., 1995. Restauration de la fertilité dans un système agricole à jachère longue des hautes Andes du Venezuela. Docteur en Sciences Thèse. Université de Paris-Sud, Paris, 237 p.
- Sarmiento L., Bottner P., 2002. Carbon and nitrogen in two soils with different fallow times in the high tropical Andes: indications for fertility restoration. *Applied Soil Ecology*. 19: 79-89.
- Sierra J., 2002. Nitrogen mineralization and nitrification in a tropical soil: effects of fluctuating temperature conditions. *Soil Biol. Biochem.* 34: 1219-1226.
- Soil Survey Staff, 1992. Keys to Soil Taxonomy. 5th Edition. SMS Technical monograph N° 19. Blacksburg, Virginia, Pocahontas Press Inc, 556 p.
- Sparling G.P., West A.W., 1988. A direct extraction method to estimate soil microbial C: calibration *in situ* using microbial respiration and ¹⁴C labeled cells. *Soil Biol. Biochem.* 20: 337-343.
- Stanford G., Smith S.J., 1972. Nitrogen mineralization potentials of soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 36: 465-472.
- Swift M.J. (Ed.), 1984. Soil Biological Processes and Tropical Soil Fertility. A Proposal for Collaborative Programme of Research. Biology International. Paris. Special Issue. 5: 1-37.
- Swift M.J. (Ed.), 1987. Tropical Soil Biology and Fertility (TSBF). Inter-Regional Research Planning Workshop. Biology International. Paris. Special Issue 13: 28-34.
- Swift M.J., Anderson J.M., 1993. Biodiversity and ecosystem function. En: E.D. Schulze & H.A. Mooney (Eds.). Biodiversity and Ecosystem Function. Ecological Studies 99. Springer – Verlag, pp. 15-41.
- Tate K.R., Ross D.J., Feltham C.W., 1988. A direct extraction method to estimate soil microbial C: effects of experimental variables and some different calibration procedures. *Soil Biol. Biochem.* 20: 329-335.
- Ünlü K., Özenirler G., Yurteri C., 1999. Nitrogen fertilizer leaching from cropped and irrigated sandy soil in Central Turkey. *European Journal of Soil Science*. 50: 609-620.
- Woomer P.L., Martin A., Albrecht A., Resck D.V.S., Scharpenseel H.W., 1994. The importance of soil organic matter in the tropics. En: P.L. Woomer and M.J. Swift (Eds.). The Biological Management of Tropical Soil Fertility. John Wiley and Sons, Inc, pp. 47-80.

Zhong Z., Makeshin F., 2003. Soluble organic nitrogen in temperate forest soils. *Soil Biol. Biochem.* 35: 333-338.

Capítulo 3

Efecto de diferentes fuentes de fertilización nitrogenada sobre el desarrollo y la nutrición del cultivo de papa

Resumen

La respuesta de los cultivos a la fertilización nitrogenada no sólo depende de la cantidad de N aplicada sino también de las características de los fertilizantes o abonos orgánicos utilizados, los cuales condicionan la disponibilidad de N en el suelo. Para sincronizar la disponibilidad de N en el suelo con la demanda del cultivo y optimizar así el uso del N, se ha propuesto combinar fertilizantes minerales y orgánicos de distinta calidad. El objetivo de este trabajo fue analizar el efecto de diferentes formas de fertilización nitrogenada sobre el desarrollo del cultivo de papa y su dinámica de acumulación de N, evaluando el déficit de N bajo cada tipo de fertilización. Para ello se cultivó papa de la variedad Granola a 2960 msnm en los Andes de Venezuela, utilizando diferentes fuentes de suministro de N: fertilizante mineral, gallinazo (baja relación C/N, alta calidad) y cáscara de arroz o pargana (alta relación C/N, baja calidad). Cuatro tratamientos de fertilización con un mismo nivel total de aplicación de N (250 kg N ha^{-1}) fueron realizados: 1) FM: fertilizante mineral (250 kg N ha^{-1}); 2) G+F: gallinazo (150 kg N ha^{-1}) y fertilizante mineral (100 kg N ha^{-1}); 3) P+F: pargana (150 kg N ha^{-1}) y fertilizante mineral (100 kg N ha^{-1}) y 4) G+P+F: gallinazo (75 kg N ha^{-1}), pargana (75 kg N ha^{-1}) y fertilizante mineral (100 kg N ha^{-1}). El diseño experimental fue de bloques al azar con tres réplicas por tratamiento. La deficiencia de N fue cuantificada utilizando el índice de nutrición de nitrógeno (NNI). Los tratamientos, P+F en primer lugar y G+P+F en segundo lugar, produjeron un incremento significativo ($P < 0.05$) en la acumulación de N en el cultivo, el índice de área foliar máximo, la duración del área foliar, la cantidad de radiación interceptada (IPAR), la producción total de materia seca y de tubérculos, mientras que disminuyeron la deficiencia de N respecto a los niveles obtenidos con los tratamientos FM y G+F. Los valores promedio de la concentración de N en las hojas y la eficiencia en el uso de la luz (RUE) no variaron significativamente ($P > 0.1$) entre los tratamientos, lo que indica que el cultivo de papa respondió a la limitación de N reduciendo la expansión foliar y la IPAR para mantener la concentración de N en la hoja y la RUE. En conclusión, para una misma dosis total de fertilización nitrogenada, el cultivo de papa respondió sensiblemente a la calidad de la fuente, resultando una mayor acumulación de N y mayor producción de biomasa y de tubérculos al combinar fertilizante mineral con un substrato orgánico de baja calidad, como es la cáscara de arroz.

Palabras claves: nitrógeno, sincronización, índice de nutrición de nitrógeno, gallinazo, cáscara de arroz o pargana, eficiencia de uso de la luz, Andes, Venezuela.

Introducción

El nitrógeno es el elemento que con mayor frecuencia limita el rendimiento del cultivo de papa. Si no se añade suficiente N, el crecimiento de las plantas y los rendimientos de cosecha se ven limitados (Bowen y Baethgen, 1998), mientras que el suministro excesivo de N generalmente conlleva pérdidas de este elemento hacia el ambiente, convirtiéndose en potencial fuente de contaminación hídrica y atmosférica (Paul y Clark, 1989; Ünlü et al., 1999). Por lo tanto, para reducir los costos económicos y ambientales se hace necesario optimizar la eficiencia en el uso del N, entendiendo ésta como la relación entre la cantidad de N utilizada por el cultivo y la cantidad de N aplicada (MacKerron et al., 1993; Bowen y Baethgen, 1998). Una forma de aumentar la eficiencia del uso del N es lograr una sincronización entre la disponibilidad de N en el suelo y la demanda de N por el cultivo, evitando situaciones de exceso de N en el suelo (Swift, 1984). Una de las alternativas propuestas para lograr esta sincronización, es combinar el empleo de residuos orgánicos de baja y alta calidad (Swift, 1987), ya que la disponibilidad de N en el tiempo va a depender tanto de la cantidad de N aplicado como de la calidad de la fuente utilizada. En este sentido, las enmiendas orgánicas de alta calidad (baja relación C/N) que mineralizan rápidamente promoverían una disponibilidad temprana, en cambio enmiendas orgánicas de baja calidad (alta relación C/N) que se descomponen lentamente y causan una inmovilización temporal del N promoverían una disponibilidad tardía (Myers, et al., 1994).

Para poner a punto alternativas adecuadas de manejo que permitan mejorar la sincronización entre la disponibilidad y los requerimientos de N del cultivo, manteniendo altos niveles de producción, es importante cuantificar la demanda temporal de N del cultivo y conocer la respuesta de los procesos de crecimiento del cultivo a la deficiencia de N (Van Delden, 2001). En este sentido, las variaciones en los rendimientos de materia seca en respuesta al N pueden deberse a diferencias en: la cantidad de radiación fotosintéticamente activa interceptada (IPAR) por el dosel, la eficiencia en el uso de la luz (RUE) y el índice de cosecha (Charles-Edwards, 1982). Así ante la limitación de N, las plantas han desarrollado distintas respuestas. Dos tipos de estrategias extremas son: 1) mantener la concentración de N en hoja (cantidad de N por unidad de área foliar) necesaria para mantener la RUE a expensas de reducir la velocidad de expansión de área foliar; 2) maximizar la expansión de área foliar y la IPAR al costo de reducir la cantidad de N por

área foliar y la RUE. En el caso del cultivo de papa, Vos (1995) no observa efectos del suministro de N sobre la RUE y Van Delden (2001) concluye que el cultivo de papa responde a la limitación de N reduciendo la IPAR y maximizando RUE y la concentración de N en la hoja.

Considerando que en los Andes venezolanos los productores de papa suministran grandes cantidades de fertilizantes nitrogenados combinando la aplicación de fertilizantes minerales con el empleo de gallinazo y pargana, enmiendas orgánicas de alta y baja calidad respectivamente, se plantea la necesidad de optimizar el uso de la fertilización nitrogenada mediante un manejo adecuado, fundamentado en el conocimiento de los procesos que regulan la dinámica de acumulación de N por el cultivo y la respuesta del cultivo a las distintas fuentes de N empleadas.

A los fines de comparar la respuesta del cultivo de papa a la aplicación de enmiendas orgánicas en relación al suministro de N es necesario cuantificar la deficiencia de N. Para la cuantificación del déficit de N, Lemaire et al. (1989) proponen un índice de nutrición de nitrógeno (NNI) definido como la relación entre la concentración medida y crítica de N en el cultivo:

$$\text{NNI} = C_N \text{ medida en el cultivo} / C_N \text{ crítica para el cultivo} \quad (1)$$

donde C_N crítica para el cultivo es la concentración de N en la biomasa del cultivo necesaria para obtener el máximo crecimiento. Cuando la concentración de N en el cultivo es menor que la C_N crítica, el NNI es menor de 1 y disminuye mientras mayor sea el déficit.

Greenwood et al. (1985) proponen una ecuación empírica para calcular la C_N crítica para el cultivo de papa en función de la biomasa total del cultivo, deducida a partir de la relación entre la cantidad de N tomada por el cultivo y su producción de materia seca medidas en experimentos con y sin suministro de N:

$$C_N \text{ crítica} = 1.35 (1 + 3e^{-0.26 W}) \quad (2)$$

donde C_N crítica es el % de N en toda la planta (exceptuando las raíces fibrosas) y W es el peso de materia seca del cultivo (exceptuando las raíces fibrosas) por unidad de área de terreno (Mg ha^{-1}). Esta expresión fue deducida a partir de resultados obtenidos en numerosos experimentos con papa y es aplicable para un amplio rango de valores de W incluso menores que 1 Mg ha^{-1} .

En base a estas ideas, el objetivo de este trabajo fue evaluar la respuesta del cultivo de papa al suministro de fuentes de fertilización nitrogenada de calidad contrastante: gallinazo (alta calidad) y pargana (baja calidad) combinadas con fertilizante mineral, para igual cantidad de N aplicada. Para ello se evaluaron como parámetros de desarrollo tanto la producción de tubérculos en la cosecha final como también las cantidades de materia seca total y de N en la biomasa del cultivo en distintas etapas del crecimiento, determinando en estas etapas la posible existencia de déficit de N. Una vez identificada y cuantificada la deficiencia de N, se planteó analizar la respuesta del cultivo a este déficit en relación no sólo con el rendimiento de tubérculos y biomasa seca total, sino también con los parámetros foliares: índice y duración del área foliar y concentración de N, así como con los factores de crecimiento: cantidad de radiación fotosintéticamente activa interceptada (IPAR) y eficiencia en el uso de la misma (RUE).

Metodología

Ubicación del experimento de campo

El experimento de campo se realizó en una finca productora de papas ubicada en la localidad de Mistique (8° 46' N, 70° 54' W) en el estado Mérida, Venezuela, a una altitud de 2960 msnm, con precipitación promedio anual de 640 mm, evaporación en tina promedio anual de 1416 mm y temperatura media anual de 11.1 °C. En esta finca, y en la zona circundante, se cultiva papa (una o dos cosechas por año) en rotación con hortalizas (Ej. ajo, zanahoria, repollo, coles) con alto empleo de insumos. El terreno utilizado tiene pendientes entre 20 y 30 % y se localiza sobre un abanico situado en el fondo del valle del río Chama. De acuerdo al sistema taxonómico de los EEUU, el suelo es un *Antropic Ustumbrept* (Soil Survey Staff, 1992), de textura franca a franca-arenosa, con un contenido de materia orgánica de 4.6 a 5.8 % y pH entre 6.5 y 6.9 en la capa arable de 0-30 cm.

Tratamientos y diseño experimental

Se aplicaron cuatro tratamientos de fertilización con distintas fuentes de fertilización nitrogenada pero con igual cantidad total de N aplicada (250 kg ha⁻¹), Tabla 1:

1- fertilizante mineral (FM); 2- gallinazo y fertilizante mineral (G+F); 3- pargana y fertilizante mineral (P+F) y 4- gallinazo, pargana y fertilizante mineral (G+P+F). Una parte del fertilizante mineral se aplicó en forma de fosfato diamónico, con el objeto de suministrar 100 kg P₂O₅ ha⁻¹ para garantizar el suministro de fósforo de acuerdo a las recomendaciones de Méndez (1999); además en todos los tratamientos se incluyó el suministro de sulfato de potasio a razón de 200 kg K₂O ha⁻¹ para cubrir las necesidades de potasio del cultivo.

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

Trata- Miento	Cantidad aplicada en peso fresco				N aportado				
	Gallinazo	Pargana	Fosfato diamónico	Sulfato amonio	Gallinazo	Pargana	Fosfato diamónico	Sulfato amonio	Total
	Mg ha ⁻¹		kg ha ⁻¹		kg N ha ⁻¹				
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

El diseño experimental fue de bloques al azar, con tres réplicas para cada uno de los cuatro tratamientos. Los bloques se ubicaron en la dirección de la pendiente. Cada una de las réplicas se localizó en una parcela con un área de 61.2 m² (8.5 m x 7.2 m) dentro de la cual se delimitó un área efectiva de muestreo de 25.2 m², utilizándose el resto como bordes externos o entre muestreos sucesivos. La densidad de plantas fue de 4.44 plantas m⁻² sembradas a 0.25 m de separación en hileras orientadas perpendicularmente a la pendiente y separadas 0.9 m.

Prácticas agronómicas

En el terreno utilizado el cultivo anterior fue de hortalizas. El terreno fue preparado con arado de disco y desterronado con escardilla un mes antes de la siembra. Los tratamientos de fertilización fueron aplicados al voleo antes de la siembra, utilizando una red de nylon para lograr una distribución homogénea de los fertilizantes, los cuales posteriormente fueron mezclados con el suelo en una capa de aproximadamente 12 cm de espesor, empleando escardilla. Se utilizó semilla de papa certificada, de la variedad Granola (producida en Alemania) calibre 35 a 55 mm, con un peso fresco promedio de 50 g tub⁻¹, la cual se sembró el 18/07/2001 a una profundidad aproximada de 7 cm. El control de plagas se realizó utilizando las prácticas agrícolas normalmente empleadas en la zona: control de malezas químico preemergente y mecánico manual postemergente; control químico preventivo de insectos y nemátodos en la siembra y sintomático de insectos durante el cultivo; y control químico preventivo y sintomático de *Phytophthora infestans*. Durante el cultivo se realizaron 4 aplicaciones de microelementos por aspersión foliar y se realizaron 17 riegos por aspersión con una lámina promedio de 10 mm por riego.

Mediciones

Los parámetros que se indican a continuación se midieron en cada una de las tres parcelas (réplicas) de cada uno de los cuatro tratamientos.

Fecha de emergencia e inicio de la tuberización

Para determinar la fecha de emergencia [50 % de plantas emergidas (IBSNAT, 1990)] y el % total de emergencia, se realizaron 15 conteos del número de plantas en cinco surcos de cada una de las parcelas. Los muestreos se efectuaron en los días: 15, 17, 19, 21, 23, 24, 25, 27, 28, 30, 33, 35, 37, 40, 42 y 44 después de la siembra (DDS).

Para determinar la fecha del inicio de la tuberización [50 % de las plantas con un mínimo de un tubérculo con diámetro ≥ 1 cm (IBSNAT, 1990)] se realizaron 3 muestreos destructivos de 8 plantas por parcela, a las cuales se les determinó el número de tubérculos con diámetro ≥ 1 cm utilizando un vernier. Los muestreos se realizaron en los días: 34, 40 y 44 después de la siembra (DDS).

Biomasa del cultivo y concentración de nitrógeno

Para determinar la biomasa del cultivo y la concentración de N en base a MS en los distintos órganos, se realizaron 5 muestreos correspondientes a las etapas: 1- entre la emergencia y el inicio de la tuberización; 2- inicio de la tuberización; 3- final de la expansión foliar; 4- senescencia; y 5- madurez del tubérculo (cosecha final), efectuados los días: 34, 44, 70, 91 y 117 después de la siembra, respectivamente.

Para ello se cosecharon 8 plantas por parcela en cada muestreo excepto en la cosecha final en que se cosecharon 40 plantas. Cada planta fue separada en sus distintos órganos: raíces, tubérculos, tallos y hojas, excepto en la cosecha final en que se separaron los órganos de las 40 plantas cosechadas, pero reuniendo 10 plantas de cada uno de cuatro surcos. El material fue secado a 50 °C hasta peso constante y pesado.

Para determinar el contenido de N, se mezcló el material vegetal, por órgano, de los individuos colectados en cada parcela y se molió a 1 mm. Se determinó la concentración de N total por triplicado en cada muestra, por el método de Kjeldahl (Bradstreet, 1965; AOAC, 1990).

Índice de área foliar (LAI)

El índice de área foliar se determinó por dos métodos:

1- Método de campo (no destructivo), que se basa en la medida de la radiación difusa debajo y arriba del follaje, con un sensor “ojo de pez”, utilizando un medidor automático LICOR, modelo LAI-2000. Se efectuaron 14 muestreos los días: 34, 40, 47, 56, 65, 72, 77, 82, 87, 91, 98, 106, 114 y 117 después de la siembra. En cada muestreo se realizaron 32 medidas por parcela por debajo del follaje a lo largo de 8 transectas orientadas diagonalmente a las hileras de las plantas y 4 medidas sobre el follaje. En cada transecta se realizaron entre las hileras 4 medidas a una distancia aproximada de 22.5 cm partiendo de la hilera. En vista de que este método no destructivo permitió la realización de 14 muestreos durante el ciclo del cultivo, los valores de LAI así obtenidos (LAI_{campo}) fueron utilizados para el cálculo de la duración de área foliar, IPAR y RUE. Para cada parcela se consideró el LAI máximo como el valor más alto medido por este método durante el desarrollo del cultivo.

2- Método de laboratorio, utilizando un medidor de área LICOR modelo LI-3100. Se efectuaron las medidas del área de las hojas de las 8 plantas cosechadas en cada uno de los muestreos realizados para la determinación de materia seca. En la cosecha final se midió el área foliar de las primeras dos plantas de cada uno de los cuatro surcos cosechados. El LAI obtenido por este método (LAI_{lab}) fue utilizado para calcular la concentración de N por unidad de área foliar en cada uno de los 5 muestreos con el objetivo de realizar las dos determinaciones (concentración de N y área foliar) en las mismas hojas.

Radiación incidente

Se midió la radiación global incidente diaria ($MJ\ m^{-2}día^{-1}$) con un piranómetro LICOR, modelo LI-200X, colocado a una altura de 2.3 m sobre el suelo y conectado a un almacenador de datos CAMPBELL, modelo CR10X, parte de la estación climática automática ubicada dentro del área del ensayo. El instrumento fue programado para tomar medidas (instantáneas) cada 30 segundos y calcular y registrar los valores diarios integrados.

Procesamiento de los datos

Índice de nutrición de nitrógeno (NNI)

El NNI se calculó por medio de la ecuación (1) en cada uno de los muestreos de biomasa realizados. Para ello se calculó la concentración de N en el cultivo como el contenido % en peso de N en toda la planta exceptuando las raíces fibrosas, a partir de los contenidos % de N y los pesos de materia seca determinados experimentalmente en los distintos órganos. La concentración crítica se calculó por medio de la ecuación (2) introduciendo para la variable W, los valores de peso de materia seca del cultivo (toda la planta exceptuando las raíces fibrosas) en $Mg\ ha^{-1}$, calculado como la sumatoria de los pesos de materia seca de hojas, tallos y tubérculos determinados experimentalmente. El NNI promedio para cada réplica de cada tratamiento se calculó como el promedio ponderado por los días transcurridos después de la emergencia (DDE) mediante la ecuación:

$$NNI\ promedio\ ponderado = [\sum (NNI_{i+1} + NNI_i) * (n_{i+1} - n_i)] / 2 * n_t$$

donde NNI_{i+1} y NNI_i son los NNI calculados en dos muestreos consecutivos realizados respectivamente en los días n_{i+1} y n_i después de la emergencia y n_t son los DDE en la cosecha final.

Duración de área foliar

La duración del área foliar se calculó como el área bajo la curva de LAI versus DDE. Cada curva es el resultado del ajuste a una función polinómica de sexto grado de los datos experimentales de LAI_{campo} , suponiendo un valor de LAI_{campo} igual a cero para la fecha de la emergencia.

Concentración de N por área foliar

La concentración de N por área foliar (C_{NAF}) se calculó en función del peso seco de la biomasa de hojas (BM_H), el contenido porcentual de N en hoja ($\% N_H$) y el LAI_{lab} determinados experimentalmente en cada una de las réplicas de cada tratamiento en cada uno de los cinco muestreos realizados para determinar la biomasa del cultivo. La C_{NAF} promedio ($g\ m^{-2}$) para cada réplica de cada tratamiento se calculó como el promedio ponderado por los DDE utilizando una ecuación análoga a la empleada para el NNI.

Cantidad de radiación fotosintéticamente activa interceptada (IPAR)

La cantidad de radiación fotosintéticamente activa incidente (PAR) se calculó como el 48 % de la radiación global incidente (Bonhomme, 1993) medida con el piranómetro.

La cantidad de radiación fotosintéticamente activa interceptada por el cultivo se calculó mediante la ecuación de Monsi y Saeki (en: Manrique et al., 1991; Kooman y Spitters, 1995):

$$IPAR = PAR * (1 - e^{-k * IAF}) \quad (3)$$

donde: k es el coeficiente de extinción. En este trabajo se empleó el valor de $k = 0.57$ utilizado para la papa por Manrique et al. (1991). Se calculó IPAR para cada día utilizando el valor de LAI correspondiente a ese día, obtenido de la función de LAI vs. DDE utilizada para calcular la duración del área foliar. Con estos valores de IPAR diarios se calcularon los valores de IPAR acumulados ($MJ\ m^{-2}$) hasta los 67 DDE con el objeto de excluir la intercepción de luz por las hojas amarillas (Van Delden, 2001).

Eficiencia en el uso de la luz (RUE)

La RUE (g MJ^{-1}) promedio para cada réplica de cada tratamiento fue calculada por regresión lineal de la cantidad de biomasa seca (g m^{-2}) y la IPAR acumulada (MJ m^{-2}) (Manrique et al., 1991; Van Delden, 2001) hasta los 67 DDE con el objeto de excluir la intercepción de luz por hojas amarillas (Van Delden, 2001).

Análisis estadístico

Previa comprobación de la homogeneidad de las varianzas y de una baja correlación entre las medias y la desviación normal, el análisis de los datos se realizó con el procedimiento clásico ANOVA, sin transformar los datos, utilizando como factor el tratamiento de fertilización y tomando en cuenta el efecto de bloque. Las diferencias entre las medias de las distintas variables analizadas se evaluaron utilizando el “test de Tukey, HSD”. En los resultados y discusión se indica el nivel de significancia utilizado en cada caso.

Resultados

Emergencia e inicio de la tuberización

El porcentaje de plantas emergidas no presentó diferencias significativas ($P>0.1$) entre los tratamientos en cada uno de los muestreos realizados (Fig. 1). Se determinó como fecha de la emergencia, para todos los tratamientos el día 24 después de la siembra, ya que para los días 23, 24 y 25 los porcentajes promedio de emergencia de las 12 parcelas fueron: 41.5; 51.3 y 60.6 respectivamente.

El porcentaje de plantas tuberizadas no presentó diferencias significativas ($P>0.1$) entre los tratamientos en cada uno de los muestreos realizados (Fig.1). Se determinó como fecha del inicio de la tuberización el día 20 DDE (44 DDS).

Estos resultados indican que no hubo diferencias en las fechas de emergencia e inicio de la tuberización del cultivo debido a los distintos tratamientos utilizados.

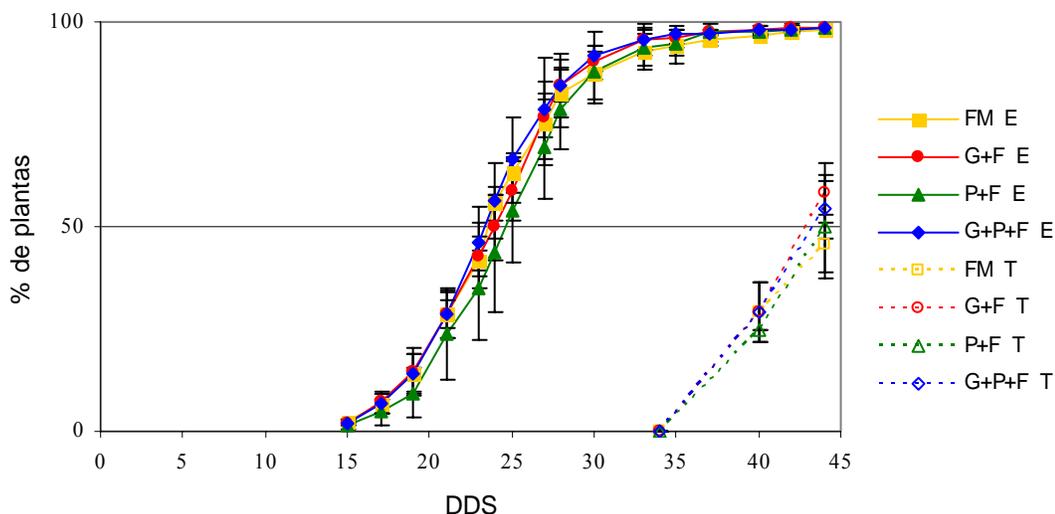


Figura 1. Porcentaje de plantas emergidas (E) y tuberizadas (T) en función de los días transcurridos después de la siembra (DDS). Media \pm desviación normal.

Biomasa y cantidad de N en el cultivo

El rendimiento de tubérculos en peso fresco y seco presentó diferencias significativas ($P < 0.05$) entre los tratamientos (Tabla 2). En promedio el rendimiento de MS de tubérculos de los tratamientos P+F y G+P+F resultó 42% y 23% más alto respectivamente que el FM, mientras que el tratamiento G+F presentó un rendimiento similar al FM.

La biomasa total (toda la planta incluyendo raíces fibrosas) del cultivo presentó diferencias significativas entre los tratamientos (Fig. 2A) a partir del tercer muestreo (46 DDE) hasta la cosecha final (Tabla 2) en que la MS total de los tratamientos P+F y G+P+F resultó 39% y 22% más alta que en el tratamiento FM, mientras que el tratamiento G+F presentó una cantidad similar al FM.

La cantidad de N en la biomasa del cultivo aumentó con los DDE hasta el cuarto muestreo (67 DDE), a partir del cual permaneció prácticamente constante hasta la cosecha final (93 DDE), observándose diferencias significativas entre los tratamientos (Fig. 2B). En

la cosecha final la cantidad de N de los tratamientos P+F y G+P+F resultó 28% y 14% más alta respectivamente que el tratamiento FM, mientras que el G+F presentó una cantidad similar al tratamiento FM.

Tabla 2. Efecto de los tratamientos sobre el rendimiento en materia fresca (MF) y en materia seca (MS) de tubérculos, biomasa total en MS, cantidad de N en la biomasa e índice de nutrición de N del cultivo de papa (NNI) en la cosecha final y sobre el NNI promedio ponderado por los días transcurridos después de la emergencia (DDE). Los valores entre paréntesis corresponden a la desviación normal. Letras distintas indican diferencias significativas entre los tratamientos (Tukey HSD, $P = 0.05$).

Trat.	Cosecha Final					Promedio ponderado por DDE
	Rendimiento Tubérculos MF Mg ha ⁻¹	Rendimiento Tubérculos MS Mg ha ⁻¹	Biomasa Total MS Mg ha ⁻¹	Cantidad de N en la biomasa del cultivo kg N ha ⁻¹	NNI	NNI
FM	26.15 (0.69) c	4.59 (0.06) c	5.53 (0.08) c	96.84 (0.86) c	0.747 (0.011) c	0.878 (0.006) c
G+F	27.89 (1.69) c	4.77 (0.13) c	5.79 (0.15) c	98.61 (0.68) c	0.746 (0.004) c	0.890 (0.008) c
P+F	38.94 (1.17) a	6.51 (0.13) a	7.69 (0.15) a	123.67 (1.62) a	0.835 (0.002) a	0.958 (0.009) a
G+P+F	33.41 (0.61) b	5.64 (0.14) b	6.76 (0.16) b	110.35 (2.01) b	0.786 (0.007) b	0.921 (0.006) b

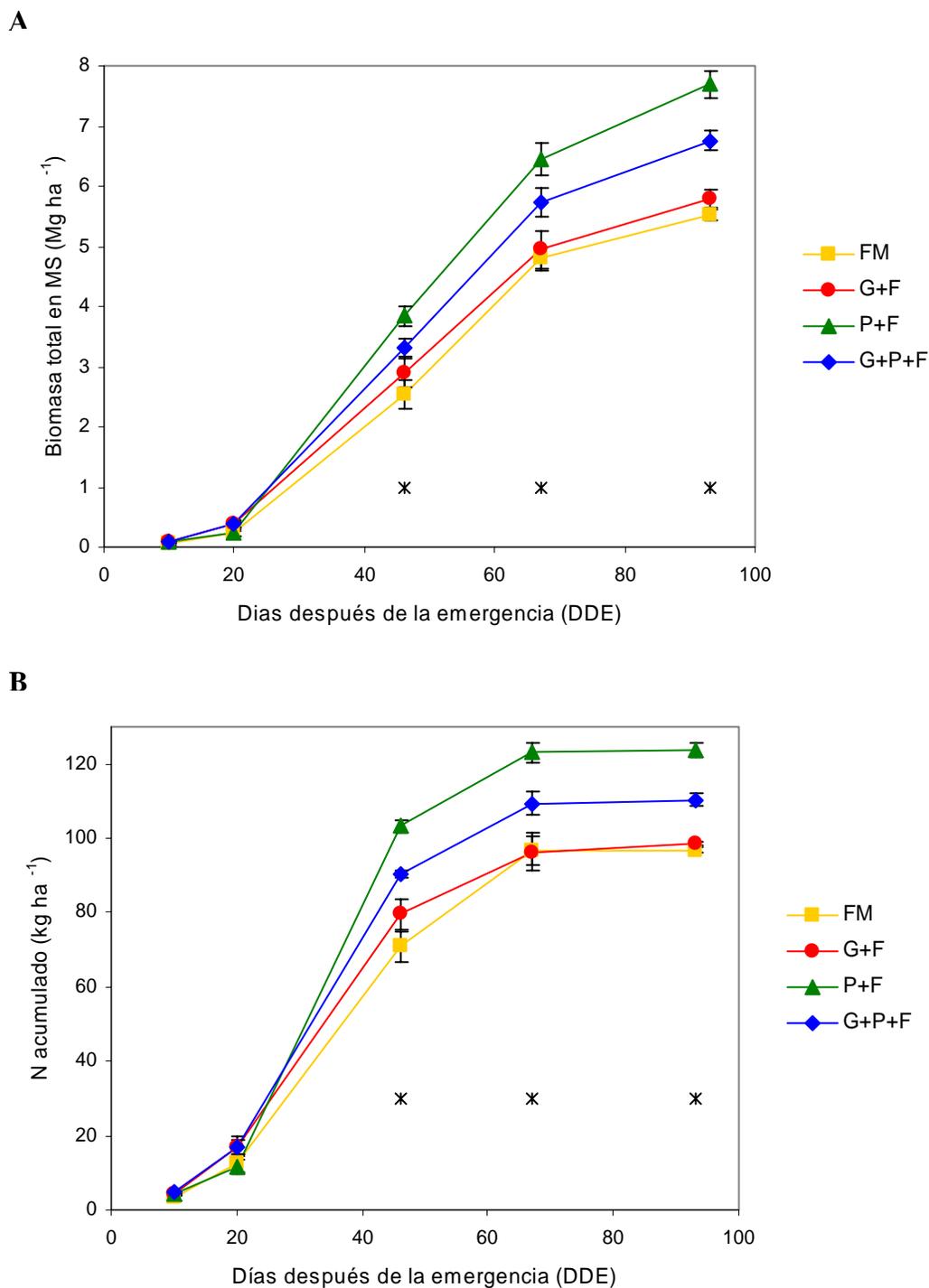


Figura 2. Curso con los días transcurridos después de la emergencia de: **A.** Biomasa total en materia seca. **B.** Cantidad de N acumulada en el cultivo. Media \pm desviación normal. Las fechas de muestreo indicadas con * presentan diferencias significativas ($P < 0.05$, HSD) entre las medias de los tratamientos.

Índice de nutrición de nitrógeno (NNI)

La concentración de N en el cultivo, en todas las réplicas de todos los tratamientos, resultó ligeramente superior a la concentración crítica de N cuando la biomasa total presentó valores menores que 1 Mg ha^{-1} , es decir hasta el segundo muestreo correspondiente al inicio de la tuberización (Fig. 3). A partir del tercer muestreo y hasta la cosecha final la concentración de N, en todas las réplicas de todos los tratamientos, se sitúa por debajo de la curva de concentración crítica de Greenwood et al. (1985) para un rango de 2.0 a 7.8 Mg ha^{-1} de biomasa total (Fig. 3).

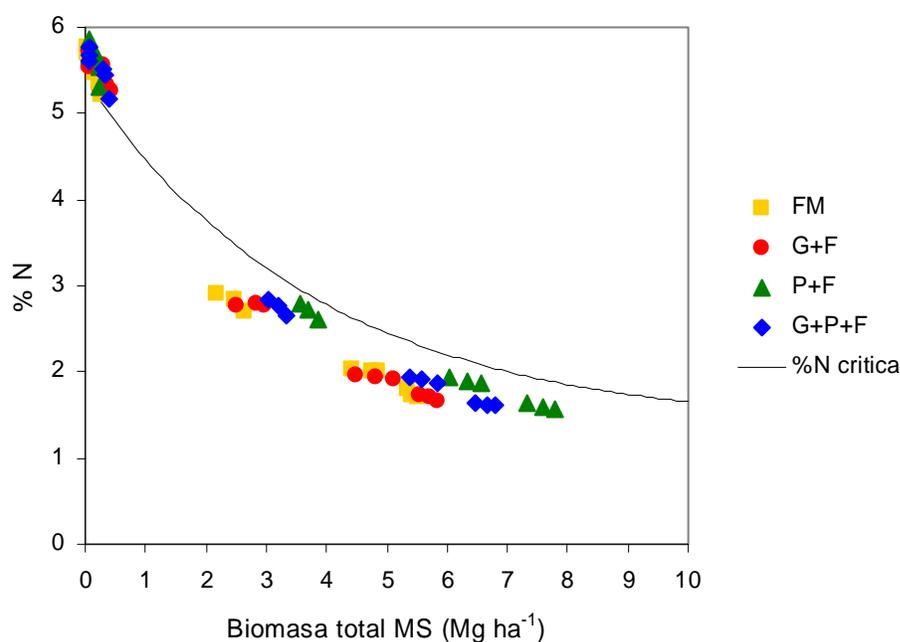


Figura 3. Relación entre la biomasa total (exceptuando las raíces fibrosas) en materia seca del cultivo (Mg ha^{-1}) y la concentración de N (% en peso en base a MS). Cada símbolo corresponde a los valores experimentales de una réplica. La línea representa los valores de la concentración de N crítica calculados mediante la ecuación (2) de Greenwood et al (1985).

En consecuencia, el NNI calculado (Ec. 1) presenta valores mayores que 1.0 y con medias similares ($P > 0.1$) para los cuatro tratamientos en las etapas de emergencia (10 DDE) e inicio de la tuberización (20 DDE) (Fig. 4). Luego disminuye bruscamente en la etapa de expansión foliar, presentándose diferencias significativas ($P < 0.05$) debido a los

tratamientos y alcanzando a los 46 DDE, valores promedio de 0.937; 0.882; 0.839 y 0.803 para los tratamientos P+F, G+P+F, G+F y FM respectivamente (Fig. 4). A partir de allí disminuye progresivamente hasta alcanzar en la cosecha final valores promedio de 0.835; 0.786; 0.746 y 0.747 para los tratamientos P+F, G+P+F, G+F y FM respectivamente (Tabla 2). Los valores de NNI promedio durante todo el ciclo del cultivo (calculados como la media de los valores promedio ponderado por los DDE en cada réplica) presentaron diferencias significativas entre los tratamientos, siendo el orden $P+F > G+P+F > G+F$ y FM (Tabla 2).

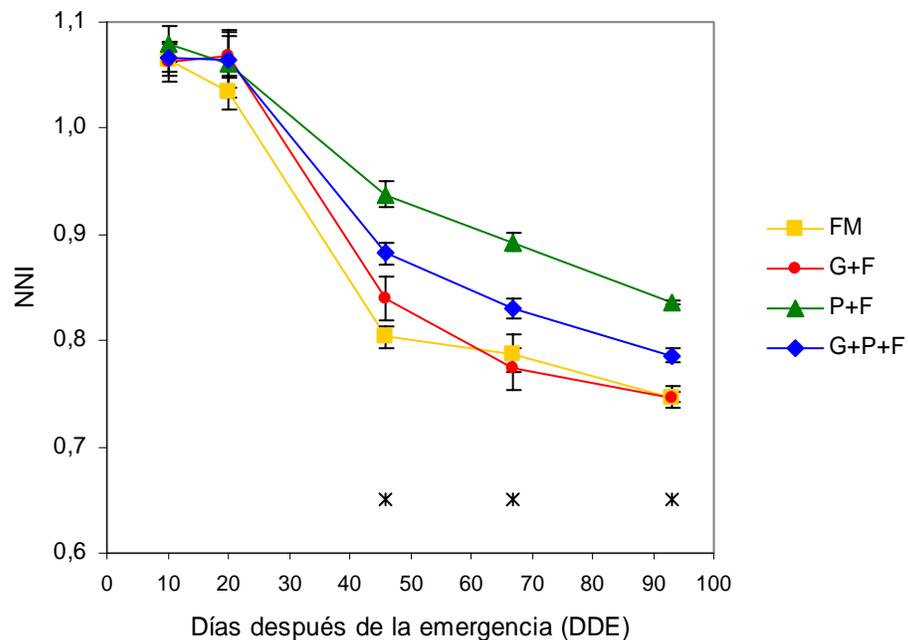
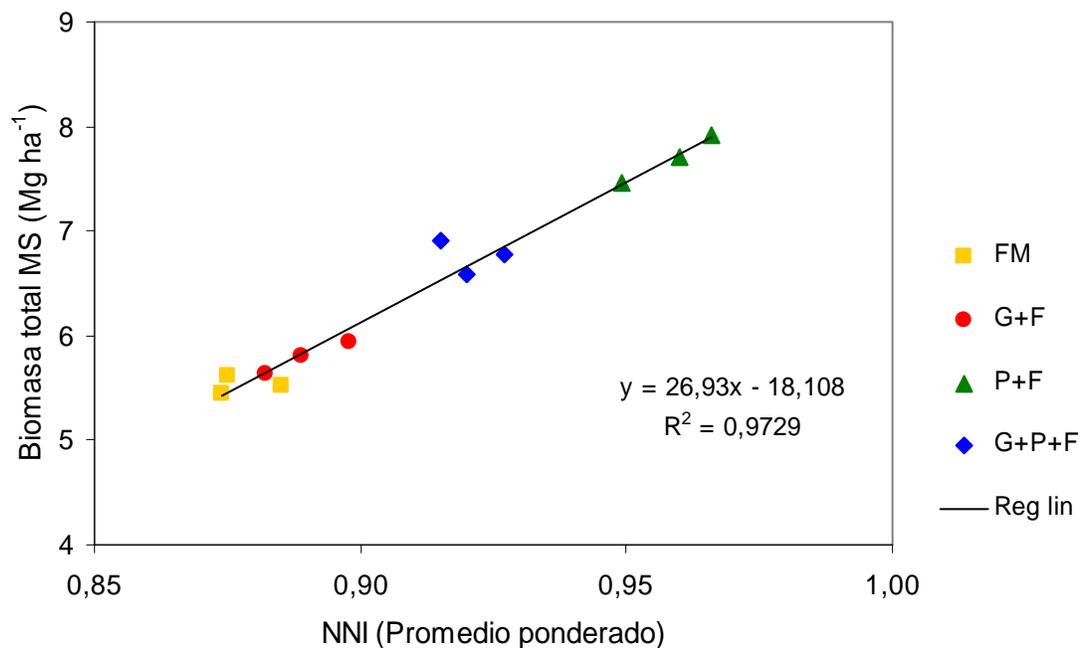


Figura 4. Índice de nutrición de nitrógeno en función de los días transcurridos después de la emergencia. Media \pm desviación normal. Las fechas de muestreo indicadas con * presentan diferencias significativas ($P < 0.05$, HSD) entre las medias de los tratamientos.

Al relacionar el NNI con la biomasa del cultivo en las figuras 5A y 5B se observa que, considerando todas las réplicas de todos los tratamientos, la biomasa total del cultivo y el rendimiento de materia seca de tubérculos en la cosecha final respectivamente aumentan linealmente a medida que aumenta el NNI promedio ponderado.

A



B

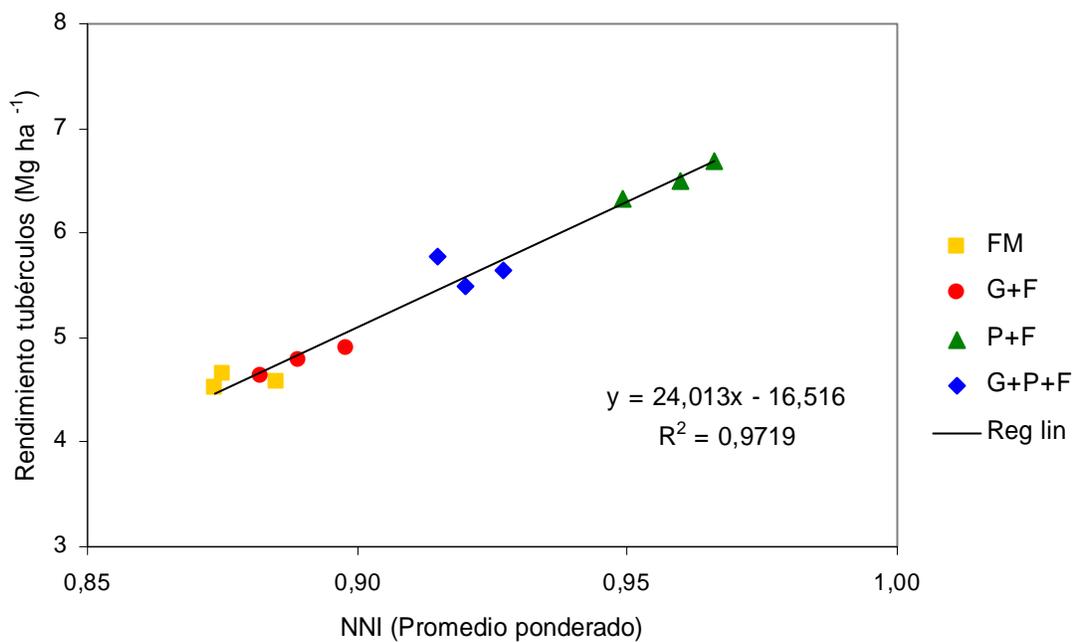


Figura 5. Relación entre el índice de nutrición de nitrógeno (INN) promedio y: **A.** Biomasa total en materia seca. **B.** Rendimiento en materia seca de tubérculos, ambos en la cosecha final. Los puntos representan los valores de cada réplica. La regresión lineal incluye todos los puntos.

Parámetros foliares y eficiencia en el uso de la luz

En la figura 6 se presenta la evolución del LAI_{campo} durante el desarrollo del cultivo para los cuatro tratamientos. Se puede observar que a partir de los 65 DDS (41 DDE) hasta la cosecha final se presentó una variación significativa ($P < 0.01$) del índice de área foliar, por efecto de los tratamientos, alcanzándose los valores máximos de LAI para todas las réplicas de todos los tratamientos entre 77 y 82 DDS (53 y 58 DDE respectivamente). En esta etapa el tratamiento P+F es el que presenta mayor LAI, seguido en orden decreciente por G+P+F y, por último, los tratamientos G+F y FM. Tanto el LAI máximo como la duración del área foliar presentaron diferencias significativas ($P < 0.05$) entre los tratamientos siendo el orden $P+F > G+P+F > G+F$ y FM (Tabla 3). Al relacionar el LAI máximo y la duración del área foliar con el NNI promedio ponderado (Fig. 7A y 7B) podemos observar que estos parámetros aumentan linealmente a medida que aumenta el NNI promedio ponderado entre 0.874 y 0.966.

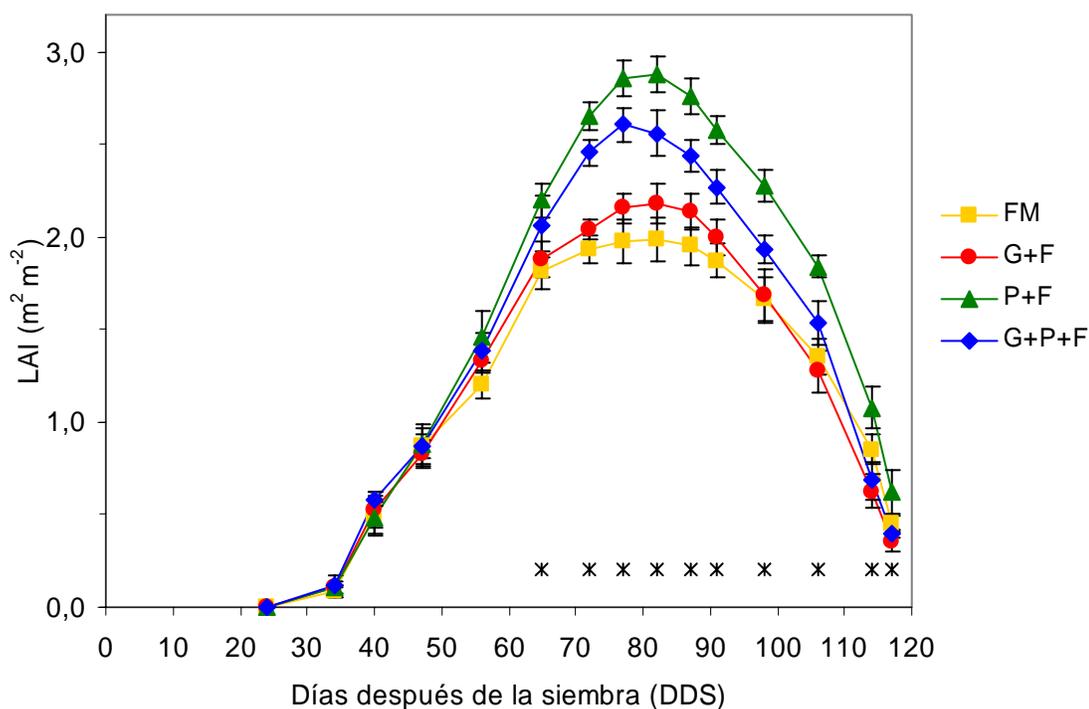


Figura 6. Índice de área foliar (LAI) en función de los días después de la siembra (DDS). Media \pm desviación normal. Las fechas de muestreo indicadas con * presentan variación significativa ($P < 0,01$) del índice de área foliar debido a los tratamientos.

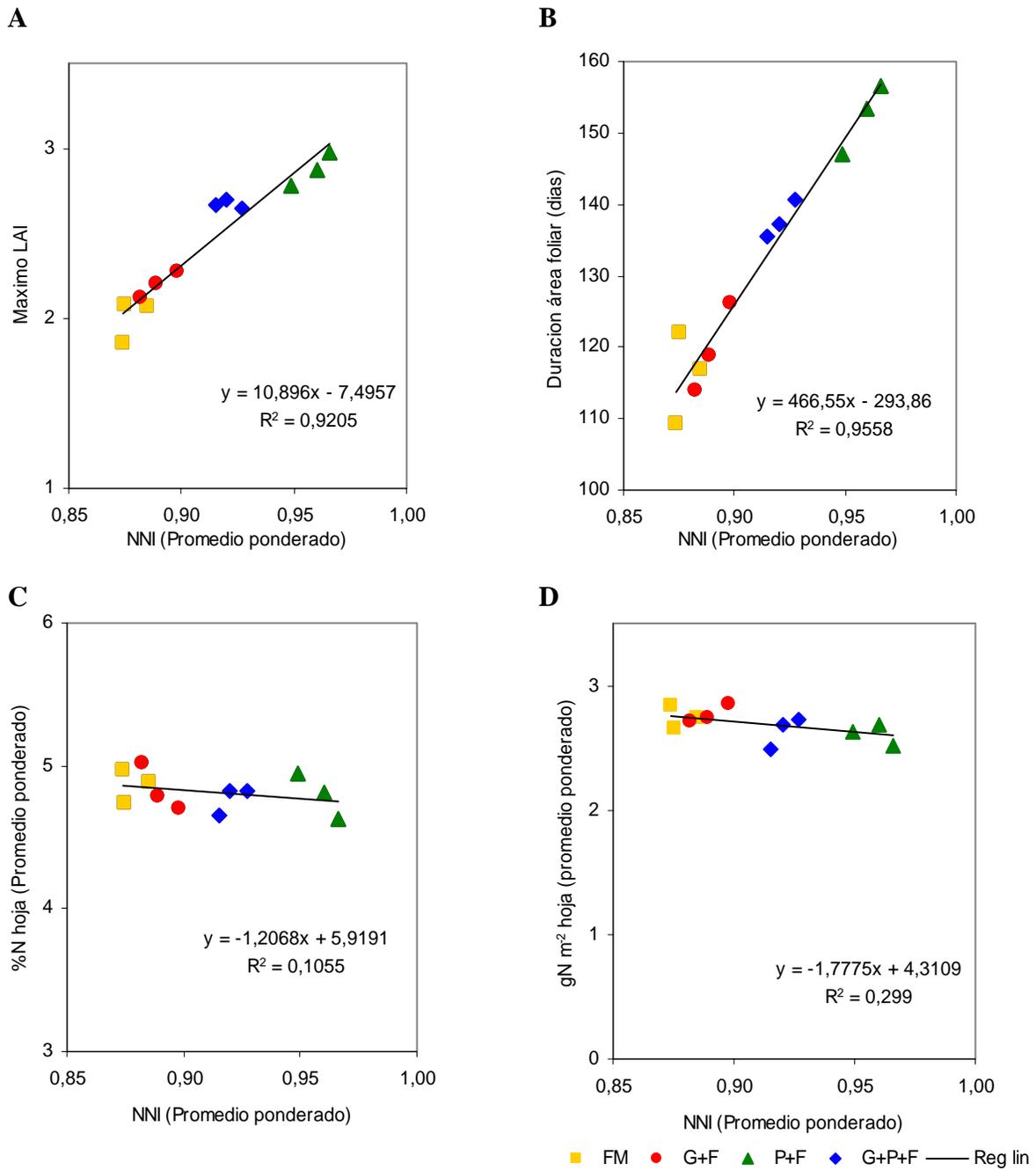


Figura 7. Relación entre el índice de nutrición de nitrógeno (NNI) promedio y: **A.** Índice de área foliar máximo (LAI). **B.** Duración del área foliar. **C.** Contenido % promedio de N en hoja. **D.** Contenido promedio de N por área foliar (g N m⁻²). Los puntos representan los valores de cada réplica.

En cuanto al contenido de N foliar podemos observar que las concentraciones promedio ponderado de N en hoja, tanto en % de N en peso en base a materia seca de hoja como en peso de N por área foliar, no presentaron diferencias significativas ($P > 0.1$) entre los tratamientos (Tabla 3) y prácticamente no variaron con el aumento del NNI promedio ponderado (Fig. 7C y 7D). Por otra parte, la IPAR acumulada hasta los 67 DDE presentó diferencias significativas ($P < 0.05$) entre los tratamientos (Tabla 3) y aumentó linealmente a medida que se incrementó el NNI promedio ponderado entre 0.874 y 0.966 (Fig. 8A). Mientras que, la RUE promedio hasta los 67 DDE no difirió significativamente ($P > 0.1$) con los tratamientos (Tabla 3) y prácticamente no cambió con el NNI promedio ponderado (Fig. 8B).

Tabla 3. Efecto de los tratamientos sobre el índice de área foliar máximo, la duración del área foliar hasta la cosecha final, la cantidad acumulada de radiación fotosintéticamente activa interceptada (IPAR) y la eficiencia en el uso de la luz (RUE) hasta 67 DDE y sobre los valores promedio ponderados por los días transcurridos después de la emergencia de: contenido % de nitrógeno en hojas y contenido de nitrógeno por área foliar. Los valores entre paréntesis corresponden a la desviación normal. Letras distintas indican diferencias significativas entre los tratamientos (Tukey HSD, $P = 0.05$). ns = diferencias no significativas ($P > 0.1$) entre los tratamientos.

Trat.	Índice de Área Foliar máximo $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$	Duración del Área Foliar días	N en hoja Prom. pond. por DDE % base MS	N en hoja Prom. pond. por DDE g m^{-2}	IPAR Acumulada a los 67 DDE MJ m^{-2}	RUE Promedio hasta los 67 DDE g MJ^{-1}
FM	2.00 (0.13) b	116 (6) c	4.87 (0.12)	2.75 (0.09)	265 (10) c	1.82 (0.03)
G+F	2.20 (0.08) b	120 (6) c	4.84 (0.16)	2.77 (0.15)	275 (9) c	1.83 (0.07)
P+F	2.88 (0.10) a	152 (5) a	4.80 (0.16)	2.61 (0.08)	350 (10) a	1.88 (0.03)
G+P+F	2.67 (0.03) a	138 (3) b	4.77 (0.10) ns	2.64 (0.13) ns	314 (4) b	1.86 (0.05) ns

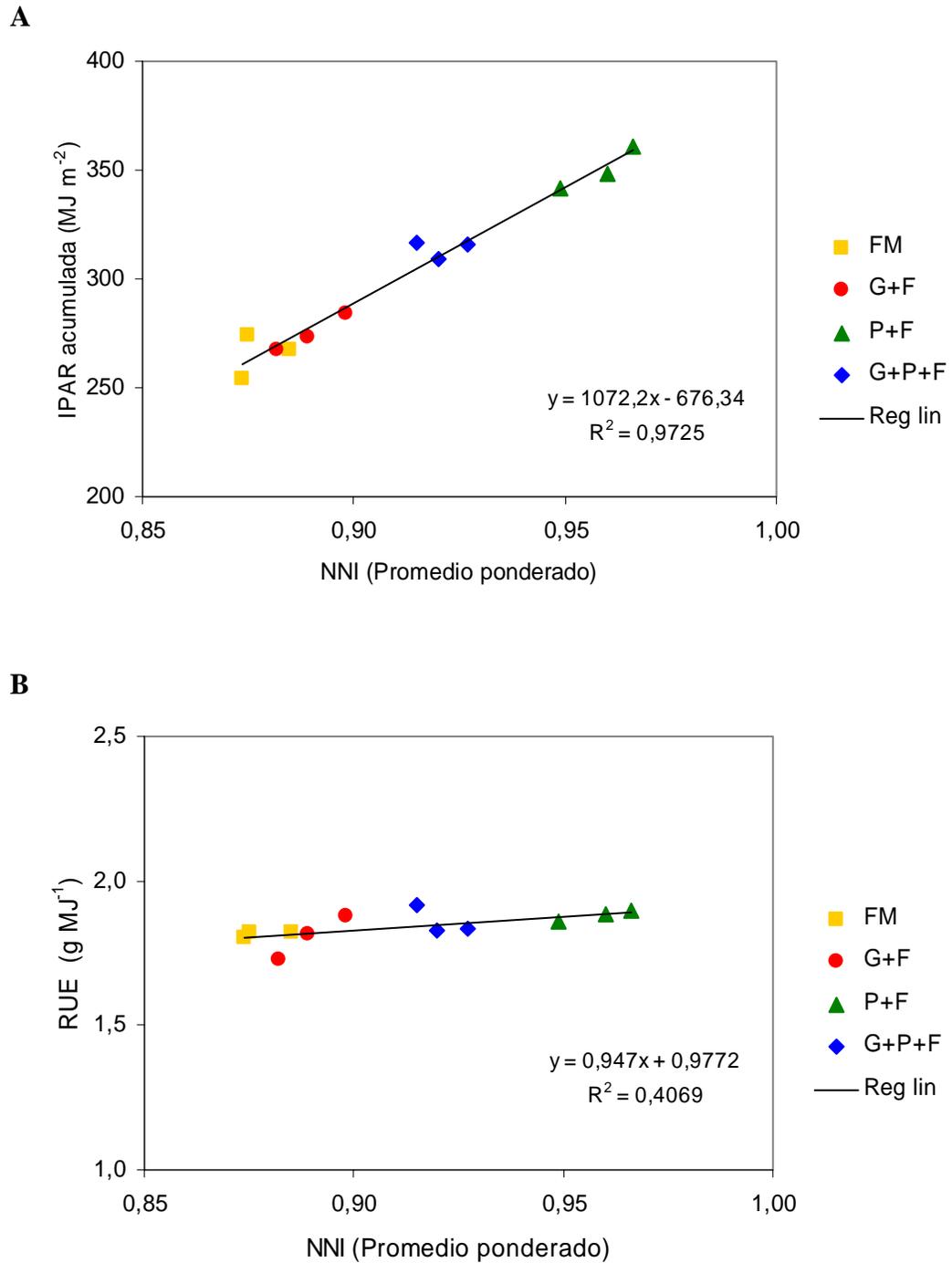


Figura 8. Relación entre el índice de nutrición de nitrógeno (NNI) promedio y: **A.** Radiación fotosintéticamente activa interceptada acumulada (IPAR). **B.** Eficiencia en el uso de la luz promedio (RUE), ambos hasta 67 DDE. Los puntos representan los valores de cada réplica.

Discusión y Conclusiones

Acumulación y deficiencia de nitrógeno. Efectos sobre el rendimiento del cultivo

Este experimento mostró claramente como el tipo de fertilización nitrogenada influye significativamente sobre el rendimiento de tubérculos, la biomasa total y la acumulación de N por el cultivo. En la literatura (Greenwood et al., 1985; Biemond y Vos, 1992; Vos, 1995; Sarmiento, 1995; Van Delden, 2001) está establecido que el rendimiento de tubérculos, la producción de materia seca y la acumulación de N por el cultivo aumentan con el suministro de nitrógeno. En este experimento, aún cuando en todos los tratamientos se suministró inicialmente la misma cantidad de N, los resultados indican que el suministro de 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 NNI 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 en todos los tratamientos 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. En la bibliografía se señala que la tuberización se inicia más temprano cuando hay deficiencia de N (Westermann y Kleinkopf 1985, Fahem y Haverkort 1988, Sarmiento 1995), lo cual corrobora que en este experimento no ocurrió déficit en esta etapa del desarrollo o que en todo caso la diferencia entre los tratamientos fue muy pequeña para producir un efecto sobre el inicio de la tuberización. Durante las siguientes etapas: expansión foliar, senescencia y maduración del tubérculo los valores de NNI fueron menores que 1, indicando que se presentó déficit de N, el cual aumentó progresivamente en todos los tratamientos. Es de hacer notar que el mayor déficit se presentó en los tratamientos con fuentes con N más rápidamente disponibles, FM

y G+F, seguidos por G+P+F y finalmente P+F donde el 60 % del N se agregó en forma menos disponible.

De la relación lineal entre el NNI 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 es encontrada por Van Delden (2001) con distintos niveles de aplicación de N que se traducen en valores de NNI promedio ponderado que varían entre 0.52 y 0.94. En nuestro caso se puede observar que variaciones pequeñas, entre 0.87 y 0.97, en el NNI promedio ponderado y valores no muy alejados de 1.0 se traducen en diferencias importantes en la producción total de materia seca y el rendimiento de materia seca de tubérculos. Este hecho indica que el NNI propuesto por Lemaire et al. (1989) es un parámetro sensible y adecuado para evaluar la deficiencia de N en el cultivo de papa, aún en los casos en que esta deficiencia sea pequeña. Por lo tanto el NNI permite evaluar los efectos de diferentes fuentes de N.

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 deben al déficit en la nutrición de nitrógeno ($P+F < G+P+F < G+F$ y FM), que se presenta por efecto del suministro de distintas enmiendas orgánicas con un mismo nivel inicial de nitrógeno aplicado. En este sentido, podemos decir que el suministro de cáscara de arroz fue determinante en la disminución del déficit de N y la obtención de mejores rendimientos, no así el suministro de gallinazo.

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

Las diferencias entre los tratamientos en la evolución del LAI y en la duración del área foliar siguieron el mismo orden en los tratamientos 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 tomamos en cuenta la tendencia encontrada por otros autores (Kleinkopf et al., 1981; Westermann y Kleinkopf, 1985; Sarmiento, 1995) en el sentido de que un mayor suministro de N permite el desarrollo de un mayor LAI, estos resultados indican que aún cuando en este experimento 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, resaltando la importancia que tiene el tipo de fuente nitrogenada sobre los rendimientos del cultivo de papa por sus efectos en la duración del área foliar (Gunaseena y Harris, 1968).

Los resultados obtenidos señalan que tanto el máximo LAI como la duración del área foliar aumentan linealmente a medida que disminuye el déficit de N (aumento del NNI promedio) mientras que las concentraciones promedio de N en hoja, expresadas tanto por unidad de masa como por unidad de área foliar prácticamente no varían con el NNI. Estas tendencias están de acuerdo con lo encontrado por Van Delden (2001) excepto para la concentración % de N en base a materia seca de hoja, para la cual informa un aumento con el incremento de NNI, sin embargo hay que tomar en cuenta que en el trabajo del citado autor los NNI disminuyen hasta valores de 0.52 es decir se produce mayor déficit de N que en este trabajo.

Estos resultados indican que el cultivo de papa responde sensiblemente a la limitación de N ajustando la expansión foliar para mantener la concentración de N en la hoja. Esta respuesta está de acuerdo con la proposición de Grindlay (1997) según la cual todas las especies C_3 cultivadas emplean esa estrategia.

La duración del área foliar condiciona directamente la IPAR (Ecuación 3) que constituye uno de los principales factores de crecimiento del cultivo. En este sentido la tendencia de la IPAR acumulada de aumentar linealmente a medida que disminuye el déficit de N y que en el presente experimento se traduce en diferencias entre los tratamientos coincide con los resultados de Van Delden (2001). Por otra parte, la tendencia de la RUE, en el sentido de no variar con el NNI (Fig. 8B), es informada por otros autores para valores de NNI por encima de 0.7 (Duchenne et al., 1997; Van Delden, 2001). Estos resultados corroboran la hipótesis de Vos y Van der Putten (1998) según la cual el cultivo de papa responde a la limitación de N reduciendo la intercepción de luz y maximizando la RUE (Van Delden, 2001).

Efectos del tipo de fertilización sobre el desarrollo del cultivo

El suministro antes de la siembra de enmiendas orgánicas de distinta calidad, gallinazo y pargana, 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

de papa ($P+F > G+P+F > G+F$ y FM), las cuales se tradujeron en distintos niveles de deficiencia de N a partir del inicio de la tuberización. El cultivo de papa respondió a la limitación de N reduciendo la expansión foliar ($LAI_{máximo}$ y duración del área foliar) y la intercepción de luz para mantener la concentración de N en la hoja y la eficiencia en el uso de la luz. Como consecuencia de una menor deficiencia de N en el cultivo y del efecto que la limitación de N causó sobre los factores de crecimiento del cultivo, especialmente sobre la intercepción de la radiación, el suministro de pargana combinada con fertilizante mineral (P+F) y de pargana con gallinazo y fertilizante mineral (G+P+F) en segundo orden, causaron mayor producción total de materia seca, 39 % y 22 % respectivamente, y mayor rendimiento de tubérculos, 43 % y 23 % respectivamente, que los obtenidos con el fertilizante mineral solo (FM). Mientras que con el suministro de gallinazo con fertilizante mineral (G+F) se obtuvieron resultados similares a los obtenidos con el suministro de fertilizante mineral solo (FM).

En conclusión, bajo una misma dosis total de fertilización nitrogenada el cultivo de papa resultó sensible a la calidad de la fuente, encontrándose una mayor utilización de N al combinar fertilizante mineral con un substrato orgánico de baja calidad como es la cáscara de arroz.

Las razones por las cuales la pargana combinada con fertilizante mineral causa un menor déficit de N en el cultivo podrían estar relacionadas con la idea de que al ser la pargana un substrato de baja calidad (alta relación C/N) puede ocurrir una mineralización más lenta o una inmovilización temporal del N mineral por parte de la microbiota del suelo que disminuyan las pérdidas por lavado del fertilizante en las etapas iniciales y por consiguiente permita una mejor disponibilidad del N en etapas posteriores. Por el contrario, al ser el gallinazo un substrato de alta calidad (baja relación C/N) puede estar mineralizando rápidamente y por lavado puede quedar fuera del alcance de las raíces del cultivo. También podría existir un efecto de la pargana sobre las propiedades fisicoquímicas del suelo, por ejemplo mejoramiento de la estructura, que aumenten la posibilidad de las raíces de tener acceso al N disponible. Los aspectos antes mencionados serán analizados en otros capítulos.

Recomendaciones

En este experimento aún cuando los rendimientos obtenidos con el tratamiento G+F fueron ligeramente mayores a los obtenidos con FM, sin embargo, no fueron significativamente diferentes. Este resultado parecería indicar que en corto plazo en términos de rendimientos sería equivalente emplear fertilizante mineral o gallinazo, dándole ventajas por su menor costo al fertilizante mineral. Sin embargo, hay que tomar en cuenta que en el caso del tratamiento G+F de los 250 kg N ha⁻¹ sólo 150 kg N ha⁻¹ estaban en la forma de gallinazo.

Por lo tanto, habría que estudiar el efecto del suministro de gallinazo a largo plazo y sin combinar con fertilizante mineral. Aún cuando de este trabajo se deduce que es recomendable el suministro de fertilizante mineral combinado con pargana para el cultivo de la papa, habría que analizar la proporción óptima de pargana y fertilizante mineral y la frecuencia de aplicación, así como el efecto a corto y mediano plazo en otros tipos de suelo.

Bibliografía

- AOAC, 1990. Nitrogen (Total) (Crude Protein) in plants. Kjeldahl methods. En: K. Helrich (Ed.). Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists. Published by the AOAC Inc. Fifteenth edition. Volumen I, p. 59.
- Biamond H., Vos J., 1992. Effects of nitrogen on the development and growth of potato plant. 2. The partitioning of dry matter, nitrogen and nitrate. *Annals of Botany*. 70: 37-45.
- Bonhomme, R., 1993. The solar radiation: characterization and distribution in the canopy. In: C. Varlet-Grancher, R. Bonhomme, H. Sinoquet (Eds.). *Crop Structure and Light Microclimate*. INRA Editions, Paris, pp. 17-28.
- Bowen W.T., Baethgen W.E., 1998. Simulation for improving nitrogen management. En: G.Y. Tsuji, G. Hoogenboom, P.K. Thornton (Eds.). *Understanding Options for Agricultural Production*. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, pp. 189-204.
- Bradstreet R.B., 1965. The Kjeldahl method for organic nitrogen. Academic Press Inc. New York, 239 p.
- Charles-Edwards, D.A., 1982. *Physiological determinants of crop growth*. Academic Press, North Ryde, North South Wales, Australia, 161 p.
- Duchenne T., Machet J.M., Martin M., 1997. Potatoes. En: G. Lemaire (Ed.), *Diagnosis of the nitrogen status in crops*. Springer-Verlag, Berlin, pp. 119-130.
- Greenwood D.J., Neeteson J.J., Draycott A., 1985. Response of potatoes to N fertilizer: Quantitative relations for components of growth. *Plant and Soil*. 85: 163-183.
- Grindlay, D.J.C., 1997. Towards an explanation of crop nitrogen demand based on the optimization of leaf N per unit leaf area. *J. Agr. Sci. Camb*. 128: 377-396.
- Fahem, M., Haverkort, A., 1988. Comparison of the growth of potato crops grown in autumn and spring in North Africa. *Potato Research*. 31: 557-568.
- Gunasena H.P.M., Harris P.M., 1968. The effect of time of application of nitrogen and potassium on the growth of second early potato, variety Craig's Royal. *Journal of Agricultural Science, Cambridge*. 71: 283-296.
- IBSNAT, 1990. International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer (IBSNAT) Project. Technical Report 2, Field and Laboratory Methods for the Collection of the IBSNAT Minimum Data Set. Department of Agronomy and Soil Science, Hawaii Institute of Tropical Agriculture and Human Resources, University of Hawaii, 67 p.

- Kleinkopf G.E., Westermann D.T., Dwelle R.E., 1981. Dry matter production and nitrogen utilization by six potato cultivars. *Agronomy Journal*. 73: 709-802.
- Kooman P.L., Spitters C.J.T., 1995. A coherent set of models to simulate potato growth. En: P.L. Kooman. Yielding ability of potato crops as influenced by temperature and daylength. Thesis Landbouw Universiteit Wageningen. The Netherlands, pp. 7-31.
- Lemaire G., Gastal F., Salette J., 1989. Analysis of the effect of nutrition on dry matter yield of sward by reference to potencial yield and optimum N content. Proc. XVI Int. Grassland Congr., 4-11 Oct. 1989, Nice, pp. 179-180.
- MacKerron D.K.L., Young M.W., Davies H.V., 1993. A method to optimize N-application in relation to soil supply of N, and yield of potato. *Plant and Soil*. 155: 139-144.
- Manrique L.A., Kiniry J.R., Hodges T., Axness D.S., 1991. Dry matter production and radiation interception of potato. *Crop Science*, 31: 1044-1049.
- Méndez R.O., 1999. Fertilización en papa. En: Compendio del curso taller “Producción y certificación de semilla de papa”, Dic. 1999, Centro de Investigaciones Agropecuarias del Estado Mérida, Mucuchíes, Venezuela, pp. 11-21.
- Myers R.J.K., Palm C.A., Cuevas E., Gunatilleke I.U.N., Brossard M., 1994. The synchronisation of nutrient demand. En: P.L. Woomer and M.J. Swift (Eds.). *The Biological Management of Tropical Soil Fertility*. John Wiley and Sons, Inc, pp. 81-116.
- Paul E.A., Clark F.E., 1989. *Soil Microbiology and Biochemistry*. Academic Press, Inc. USA, 273 p.
- Sarmiento L., 1995. Restauration de la fertilité dans un système agricole a jachère longue des hautes Andes du Venezuela. Tesis doctoral. Université de Paris-Sud, Paris, 237 p.
- Soil Survey Staff, 1992. *Keys to Soil Taxonomy*. 5th Edition. SMS Technical monograph N° 19. Blacksburg, Virginia, Pocahontas Press Inc, 556 p.
- Swift M.J. (Ed.), 1984. *Soil Biological Processes and Tropical Soil Fertility. A Proposal for Collaborative Programme of Research*. Biology International. Paris. Special Issue 5: 1-37.
- Swift M.J. (Ed.), 1987. *Tropical Soil Biology and Fertility (TSBF). Inter-Regional Research Planning Workshop*. Biology International. Paris. Special Issue 13: 28-34.
- Ünlü K., Özenirler G., Yurteri C., 1999. Nitrogen fertilizer leaching from cropped and irrigated sandy soil in Central Turkey. *European Journal of Soil Science*. 50: 609-620.
- Van Delden, A., 2001. Yielding ability and weed suppression of potato and wheat under organic nitrogen management. PhD Thesis. Wageningen University, The Netherlands, 197 p.

Vos J., 1995. Nitrogen and the growth of potato crops. En: A.J. Haverkort and D.K.L. MacKerron (Eds.). *Potato Ecology and Modelling of Crops under Conditions Limiting Growth*. Kluwer Academic Publishers, pp. 115-128.

Vos J., Van der Putten P.E.L., 1998. Effect of nitrogen supply on leaf growth, leaf nitrogen economy and photosynthetic capacity in potato. *Field Crops Res.* 59: 63-72.

Westermann D.T., Kleinkopf G.E., 1985. Nitrogen requirements of potatoes. *Agronomy Journal.* 77: 616-621.

Capítulo 4

Efecto de diferentes fuentes de fertilización sobre la distribución de la biomasa y del nitrógeno en el cultivo de papa

Resumen

El objetivo de este trabajo fue analizar el efecto de fuentes de fertilización nitrogenada de diferente calidad sobre la distribución de la biomasa y del N entre los órganos de las plantas durante el desarrollo del cultivo de papa. Este aspecto ha sido poco estudiado pese a que es necesario para lograr el entendimiento de los aspectos ecofisiológicos de la nutrición nitrogenada que controlan el desarrollo y rendimiento de este cultivo. Con este fin se cultivó papa de la variedad Granola a 2960 msnm en los Andes de Venezuela, utilizando diferentes fuentes de suministro de N: fertilizante mineral, gallinazo (baja relación C/N, alta calidad) y cáscara de arroz o pargana (alta relación C/N, baja calidad). Se emplearon cuatro tratamientos de fertilización con un mismo nivel total de aplicación de N (250 kg N ha^{-1}): 1- FM: fertilizante mineral (250 kg N ha^{-1}); 2- G+F: gallinazo (150 kg N ha^{-1}) y fertilizante mineral (100 kg N ha^{-1}); 3- P+F: pargana (150 kg N ha^{-1}) y fertilizante mineral (100 kg N ha^{-1}) y 4- G+P+F: gallinazo (75 kg N ha^{-1}), pargana (75 kg N ha^{-1}) y fertilizante mineral (100 kg N ha^{-1}). El diseño experimental fue de bloques al azar con tres réplicas por tratamiento. Se determinó la biomasa y la concentración de N en: hojas, tallos, raíces y tubérculos en distintas etapas del desarrollo del cultivo y se evaluó la distribución de la biomasa y del N en los órganos de la planta así como las tasas de crecimiento, acumulación de N y migración de asimilados y de N desde la parte aérea hacia los tubérculos una vez iniciada la senescencia. El tratamiento P+F, en primer lugar, y G+P+F, en segundo lugar, presentaron una mayor biomasa de raíces durante todo el ciclo del cultivo, así como mayores relaciones de biomasa de raíces a biomasa total y a biomasa de vástagos entre la emergencia y el inicio de la tuberización. En estos tratamientos también se observó una mayor acumulación de N y mayor biomasa de hojas, tallos y tubérculos desde el final de la expansión foliar hasta la madurez del cultivo y una mayor migración de N hacia los tubérculos durante la senescencia, respecto a los valores obtenidos con los tratamientos FM y G+F. El índice de cosecha no presentó diferencias debido a los tratamientos y la concentración de N en los distintos órganos tampoco, excepto para los tubérculos en la cosecha final. En conclusión, para una misma dosis total de fertilización nitrogenada, los patrones de distribución de la biomasa del cultivo de papa respondieron a la calidad de la fuente. Se discuten las posibles causas de esta respuesta y su efecto en diferentes fases del desarrollo del cultivo.

Palabras claves: nitrógeno, papa, distribución de biomasa, distribución de nitrógeno, relación raíces/vástagos, gallinazo, cáscara de arroz o pargana, Andes, Venezuela.

Introducción

En los Andes venezolanos los productores de papa emplean grandes cantidades de fertilizantes nitrogenados para tratar de aumentar la producción de tubérculos, combinando fertilizantes minerales con la aplicación de enmiendas orgánicas, como el gallinazo y la cáscara de arroz o pargana. Sin embargo, se tiene poco conocimiento de los efectos de las distintas fuentes de N empleadas y su posible interacción sobre los procesos que regulan la disponibilidad de N en el suelo y la dinámica de acumulación de N por el cultivo, así como sobre la dinámica del desarrollo del cultivo y el rendimiento final. Según Swift (1987) y Myers et al. (1994), un substrato orgánico de alta calidad (baja relación C/N), como el gallinazo, debería mineralizar rápidamente y causar una disponibilidad temprana de N en el suelo cuando la demanda del cultivo es baja, mientras que un material de baja calidad (alta relación C/N), como la pargana, debería descomponerse lentamente causando un posible déficit inicial y una disponibilidad tardía. El suministro combinado de los dos materiales podría promover una mejor sincronización de la disponibilidad y la demanda a través de la regulación de los procesos de mineralización e inmovilización del N (Swift, 1987; Myers, et al., 1994), contribuyendo a disminuir las pérdidas de N y a lograr una adecuada nutrición nitrogenada que mejore los rendimientos del cultivo.

En el capítulo anterior se analizó la respuesta del cultivo a diferentes fuentes de fertilización en cuanto a la dinámica de acumulación de N y el déficit presentado, la cantidad de radiación fotosintéticamente activa interceptada (IPAR) por el dosel, la eficiencia en el uso de la luz (RUE), la duración del área foliar y el rendimiento del cultivo de papa. Adicionalmente, la limitación de N puede causar cambios en los patrones de distribución de la biomasa y del N entre los distintos órganos de las plantas. En este sentido, la respuesta de las plantas va a depender de la magnitud del déficit, del tiempo en que este ocurra y de la “plasticidad arquitectónica” de la especie durante las distintas etapas de su desarrollo, que le permitan alternativas de respuesta basadas en la asignación de asimilados a distintos órganos (Ingestad y Ågren, 1991; Chapin et al., 2002). Así por ejemplo, en el caso de la papa, frente a un déficit moderado de N o hídrico durante la primera etapa de desarrollo del cultivo, las plantas pudieran responder ante la limitación invirtiendo más asimilados en la producción de raíces para tratar de contrarrestar el déficit (Vos, 1995). Sin embargo, si este déficit se acentúa, las plantas comienzan a invertir

asimilados en la producción de tubérculos que funcionan como órganos de almacenamiento y reproducción. Por ello en la literatura generalmente se señala que la tuberización ocurre más temprano cuando ocurre déficit de N o hídrico (Westermann y Kleinkopf, 1985; Fahem y Haverkort, 1988; Sarmiento, 1995). Una vez iniciada la tuberización, la asignación de asimilados a los tubérculos se hace progresivamente dominante hasta llegar a ser total.

Uno de los parámetros más utilizados para estudiar la distribución de los asimilados en el cultivo de papa es el “índice de cosecha”, calculado como el cociente de la materia seca de tubérculos entre la materia seca total. Con respecto a este parámetro los resultados encontrados en la literatura no siempre muestran la misma tendencia. Algunos investigadores (Biemond y Vos, 1992; Sarmiento, 1995; Van Delden, 2001) consiguen que con el suministro de N, el índice de cosecha disminuye en etapas tempranas a intermedias del cultivo pero no presenta diferencias cerca de la madurez. Por otra parte, Millard et al. (1989) informan de un mayor índice de cosecha para el cultivo no fertilizado comparado con el que recibió fertilización adecuada, mientras que Greenwood et al. (1985) no encuentran diferencias en la distribución de N y asimilados entre el follaje y la biomasa total (follaje + tubérculos) durante el desarrollo del cultivo y Huett y Dettmann (1991) observan que la distribución de materia seca en tubérculos tiende a aumentar, particularmente en la madurez, a medida que aumenta el suministro de N. Estos resultados reflejan la complejidad de la interdependencia entre la distribución de la biomasa y el N, entre la biomasa asimilatoria y las estructuras reproductivas o de almacenamiento de la planta, que en el caso de la papa es marcada por una importante migración de asimilados y de N desde la parte aérea hacia los tubérculos en la etapa de madurez del cultivo (Sarmiento, 1995; Kooman y Rabbinge, 1995). De acuerdo a los planteamientos anteriores se podría pensar que el índice de cosecha pudiera ser un parámetro que refleje la dinámica del déficit de N y se podría especular, por ejemplo, que si la disponibilidad inicial es baja podría ocurrir déficit inicial y el índice de cosecha sería alto, si la disponibilidad es alta al inicio y disminuye posteriormente el cultivo desarrollará mucho follaje y pocos tubérculos y el índice de cosecha sería bajo y si la disponibilidad es constante el índice debería ser intermedio.

Sin embargo, los efectos del suministro de N sobre la distribución de la biomasa y del N entre otros órganos de las plantas de papa, como por ejemplo entre hojas y tallos o

entre vástagos y raíces, han sido poco estudiados y, sin embargo, podrían afectar el desarrollo y rendimiento del cultivo, por lo tanto, es importante conocerlos para lograr el entendimiento apropiado de los aspectos fisiológicos de la nutrición nitrogenada (Biemond y Vos, 1992; Vos 1995) y para posibilitar su incorporación en los modelos de simulación del cultivo de papa que toman en cuenta la economía del nitrógeno (Vos 1995, Fishman y BarYosef, 1995; MacKerron y Lewis, 1995; Kooman y Spitters, 1995; Van Delden et al, 2003).

Por estas razones, se plantea que el estudio de la distribución de la biomasa y del nitrógeno entre los órganos de las plantas debe ser un aspecto clave para entender la respuesta del cultivo de papa al tipo de fertilización utilizada, que condiciona la disponibilidad de N en el suelo, la acumulación de este elemento y los rendimientos del cultivo en determinadas condiciones agroecológicas.

En este sentido, el objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto del suministro de distintos tipos de fertilización nitrogenada sobre la distribución de asimilados y nitrógeno entre los órganos de la planta durante su desarrollo y el efecto de esta distribución sobre el rendimiento final del cultivo de papa. Para ello, se cultivó papa con distintos tratamientos de fertilización, que consistieron en suministrar igual cantidad de N empleando distintas fuentes de fertilización de calidad contrastante, gallinazo (alta calidad) y cáscara de arroz (baja calidad) combinadas con fertilizante mineral, con la finalidad de cuantificar la cantidad de biomasa en materia seca y la concentración de nitrógeno en hojas, tallos, tubérculos y raíces, en distintas etapas del crecimiento del cultivo.

Metodología

Ubicación del experimento de campo

El experimento de campo se realizó en una finca productora de papas ubicada en la localidad de Mistique (8° 46' N, 70° 54' W) en el estado Mérida, Venezuela, a una altitud de 2960 m, con precipitación promedio anual de 640 mm, evaporación en tina promedio anual de 1416 mm y temperatura media anual de 11.1 °C. En esta finca, y en la zona circundante, se cultiva papa (una a dos cosechas por año) en rotación con hortalizas (Ej. ajo, zanahoria, repollo, coles) con alto empleo de insumos. El terreno utilizado tiene

pendientes entre 20 y 30 % y se localiza sobre un abanico situado en el fondo del valle del río Chama. De acuerdo al sistema taxonómico de los EEUU (Soil Survey Staff, 1992), el suelo es un *Antropic Ustumbrept*, de textura franca a franca-arenosa, con un contenido de materia orgánica de 4.6 a 5.8 % y pH entre 6.5 y 6.9 en la capa arable de 0-30 cm.

Tratamientos y diseño experimental

Se suministraron cuatro tratamientos (Tabla 1) con distintas fuentes de fertilización nitrogenada e igual cantidad de N total aplicada (250 kg ha^{-1}): 1- fertilizante mineral (FM); 2- gallinazo y fertilizante mineral (G+F); 3- pargana y fertilizante mineral (P+F) y 4- gallinazo, pargana y fertilizante mineral (G+P+F). Estas fuentes de fertilización se escogieron por ser de las más utilizadas por los agricultores de la zona y por la calidad contrastante, alta y baja, de las enmiendas orgánicas gallinazo y pargana respectivamente. Una parte del fertilizante mineral se aplicó en forma de fosfato diamónico con el objeto de suministrar $100 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ para garantizar el suministro de fósforo de acuerdo a las recomendaciones de Méndez (1999); además en todos los tratamientos se incluyó el suministro de sulfato de potasio a razón de $200 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}$ para cubrir las necesidades de potasio del cultivo (Tabla 1).

Tabla 1. Cantidad de materia fresca de las fuentes utilizadas en cada tratamiento y cantidad de N aportado por cada fuente para un total de 250 kg N ha^{-1} en cada tratamiento.

Nombre Del Tratamiento	Cantidad de materia fresca de las fuentes				Cantidad de N aportado por las fuentes				
	Gallinazo Mg ha^{-1}	Pargana	Fosfato diamónico kg ha^{-1}	Sulfato Amonio kg ha^{-1}	Gallinazo	Pargana	Fosfato diamónico	Sulfato amonio	Total
					kg N ha^{-1}				
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

El diseño experimental fue de bloques al azar, con tres réplicas para cada uno de los cuatro tratamientos. Los bloques se ubicaron en la dirección de la pendiente. Cada una de las réplicas se localizó en una parcela con un área de 61.2 m² (8.5 m x 7.2 m) dentro de la cual se delimitó un área efectiva de muestreo de 25.2 m². La densidad de plantas fue de 4.44 plantas m⁻² sembradas a 0.25 m de separación en hileras separadas 0.9 m y orientadas perpendicularmente a la pendiente.

Prácticas agronómicas

En el terreno utilizado el cultivo anterior fue de hortalizas. Fue preparado con arado de disco y desterronado con escardilla un mes antes de la siembra. Los tratamientos de fertilización fueron aplicados al voleo antes de la siembra, utilizando una retícula de nylon para lograr una distribución homogénea, posteriormente fueron mezclados con el suelo en una capa de aproximadamente 12 cm de espesor. La semilla de papa certificada, de la variedad Granola (producida en Alemania) calibre 35 a 55 mm y peso fresco promedio de 50 g tub⁻¹, se sembró el 18/07/2001 a una profundidad aproximada de 7 cm. El control de plagas se realizó utilizando las prácticas agrícolas normalmente empleadas en la zona: control de malezas químico preemergente y mecánico manual postemergente; control químico preventivo de insectos y nemátodos en la siembra y sintomático de insectos durante el cultivo y control químico preventivo y sintomático de *Phytophthora infestans*. Se realizó un aporque a los 65 días después de la siembra. Durante el cultivo se realizaron 4 aplicaciones de microelementos por aspersión foliar y se realizaron 17 riegos por aspersión con una lámina promedio de 10 mm.

Mediciones

Los parámetros que se indican a continuación se midieron en cada una de las tres réplicas (parcelas) de cada uno de los cuatro tratamientos.

Fechas de emergencia e inicio de la tuberización.

Para determinar la fecha de emergencia [50 % de plantas emergidas (IBSNAT, 1990)] y el % total de emergencia, se realizaron 15 conteos del número de plantas en cinco surcos de cada una de las parcelas. Los muestreos se efectuaron en los días: 15, 17, 19, 21,

23, 24, 25, 27, 28, 30, 33, 35, 37, 40, 42 y 44 después de la siembra (DDS). Para determinar la fecha del inicio de la tuberización [50 % de las plantas con por lo menos un tubérculo de diámetro ≥ 1 cm (IBSNAT, 1990)] se realizaron 3 muestreos destructivos que consistieron en cosechar 8 plantas por parcela a las cuales se les determinó el número de tubérculos con diámetro ≥ 1 cm utilizando un vernier. Los muestreos se realizaron en los días: 34, 40 y 44 DDS.

Biomasa del cultivo y concentración de nitrógeno.

Para determinar la biomasa del cultivo y la concentración de N en base a materia seca (MS) en los distintos órganos se realizaron 5 muestreos correspondientes a las etapas: 1- entre la emergencia y el inicio de la tuberización; 2- inicio de la tuberización; 3- final de la expansión foliar; 4- senescencia; y 5- madurez del tubérculo (cosecha final), efectuados los días: 34, 44, 70, 91 y 117 respectivamente. Para ello se cosecharon 8 plantas por parcela en cada muestreo excepto en la cosecha final. Se excavó el suelo alrededor de cada planta, correspondiente a una distancia de 12,5 cm desde el centro de la planta hacia cada lado en la hilera y a una distancia de 30 cm desde el centro de la planta hacia cada lado entre las hileras, hasta una profundidad de 30 cm desde el tope del camellón y se extrajeron y lavaron los tubérculos y las raíces, de las cuales se tomaron sólo las blancas y marrón claro. Cada planta fue separada en sus distintos órganos: hojas, tallos, tubérculos y raíces. En la cosecha final se tomaron 10 plantas en cada una de cuatro hileras para un total de 40 plantas por parcela. Se separaron los órganos: hojas, tallos y tubérculos y además la necromasa de las 40 plantas cosechadas pero reuniéndolos por cada hilera. Se tomaron y separaron las raíces de 4 plantas de la manera descrita anteriormente. El material fue secado a 50 °C hasta peso constante y pesado. Para determinar el contenido de N, se mezcló el material vegetal, por órgano, de los individuos colectados en cada parcela y se molió a 1 mm. Se determinó la concentración de N total, por triplicado en cada muestra, por el método de Kjeldahl (Bradstreet, 1965; AOAC, 1990).

Procesamiento de los datos

Para evaluar la distribución de biomasa y del N en el cultivo se calcularon los siguientes parámetros en cada uno de los muestreos realizados: biomasa de cada órgano y

de toda la planta (g MS m^{-2}), relación porcentual de la biomasa de cada órgano a la total, cantidad de N acumulada (g N m^{-2}) en cada órgano (como el producto de la MS de biomasa del órgano por la concentración de N correspondiente) y en toda la planta (N acumulado por el cultivo) y la relación porcentual de la cantidad de N acumulada en cada órgano a la total. A los fines de evaluar el crecimiento del cultivo y la migración de asimilados y de N hacia los tubérculos, los datos del curso de la biomasa total y de los tubérculos, el curso de la cantidad de N acumulado en la biomasa total y en los tubérculos con los días transcurridos después de la emergencia (DDE) se ajustaron a funciones matemáticas de Gompertz (Hunt, 1982) (tabla 2). Derivando las funciones así obtenidas, se calcularon las tasas diarias de crecimiento absoluto (AGR), crecimiento de tubérculos (TGR), acumulación de N en la biomasa total (NAR) y en los tubérculos (TNAR) (Hunt, 1982). Con estos valores se calcularon:

$$\text{Tasa diaria de migración de asimilados} = \text{TGR} - \text{AGR}$$

$$\text{Tasa diaria de migración de nitrógeno} = \text{TNAR} - \text{NAR}$$

cuando $\text{TGR} > \text{AGR}$ y $\text{TNAR} > \text{NAR}$ respectivamente (Sarmiento, 1995). Las cantidades totales de asimilados y de N que migran de la parte aérea hacia los tubérculos se calcularon por integración, como el área bajo la curva de la tasa de migración vs. DDE. Para estimar las cantidades máximas de biomasa y N acumuladas en la parte aérea del cultivo se ajustaron los datos del curso de estos parámetros con los DDE a funciones polinómicas de cuarto orden (tabla 2).

Análisis estadístico

Previa comprobación de la homogeneidad de las varianzas y de una baja correlación entre las medias y la desviación normal, el análisis de estos datos se realizó con el procedimiento clásico ANOVA, sin transformar los datos, utilizando como factor el tratamiento de fertilización. Las diferencias entre las medias de las distintas variables analizadas se evaluaron utilizando el “test de Tukey, HSD”. En los resultados y discusión se indica el nivel de significancia utilizado en cada caso. Los análisis de correlación entre variables se realizaron determinando los coeficientes Pearson-r, para la correlación simple lineal entre los valores de ambas variables, en los muestreos respectivos.

Tabla 2. Coeficientes de las funciones que describen el curso de la biomasa (g m^{-2}) de: toda la planta, tubérculos, vástagos y raíces y de las cantidades de N acumuladas (g N m^{-2}) en éstas, con el tiempo (t) transcurrido (DDE).

		Coeficientes de las funciones				
Variable (Y)	Tratamiento	Función de Gompertz: $Y = a \cdot e^{-b \cdot e^{-c \cdot t}}$				
		a	b	c		
Biomasa total (g MS m^{-2})	FM	$5.52 \cdot 10^2$	$2.50 \cdot 10^1$	$7.60 \cdot 10^{-2}$		
	G+F	$5.74 \cdot 10^2$	$1.80 \cdot 10^1$	$7.08 \cdot 10^{-2}$		
	P+F	$7.99 \cdot 10^2$	$1.00 \cdot 10^1$	$5.75 \cdot 10^{-2}$		
	G+P+F	$6.96 \cdot 10^2$	$1.10 \cdot 10^1$	$5.90 \cdot 10^{-2}$		
Biomasa de tubérculos (g MS m^{-2})	FM	$4.74 \cdot 10^2$	$3.82 \cdot 10^1$	$7.60 \cdot 10^{-2}$		
	G+F	$4.95 \cdot 10^2$	$2.75 \cdot 10^1$	$7.08 \cdot 10^{-2}$		
	P+F	$7.01 \cdot 10^2$	$1.58 \cdot 10^1$	$5.75 \cdot 10^{-2}$		
	G+P+F	$6.04 \cdot 10^2$	$1.68 \cdot 10^1$	$5.90 \cdot 10^{-2}$		
N acumulado total (g N m^{-2})	FM	$1.00 \cdot 10^1$	8.68	$7.11 \cdot 10^{-2}$		
	G+F	$1.00 \cdot 10^1$	7.77	$7.50 \cdot 10^{-2}$		
	P+F	$1.25 \cdot 10^1$	$1.51 \cdot 10^1$	$9.51 \cdot 10^{-2}$		
	G+P+F	$1.12 \cdot 10^1$	9.76	$8.31 \cdot 10^{-2}$		
N acumulado en Tubérculos (g N m^{-2})	FM	7.41	$4.52 \cdot 10^1$	$8.00 \cdot 10^{-2}$		
	G+F	7.33	$3.50 \cdot 10^1$	$7.73 \cdot 10^{-2}$		
	P+F	9.78	$1.77 \cdot 10^1$	$6.20 \cdot 10^{-2}$		
	G+P+F	8.64	$1.80 \cdot 10^1$	$6.24 \cdot 10^{-2}$		
		Función polinomio: $Y = a + b \cdot t + c \cdot t^2 + d \cdot t^3 + e \cdot t^4$				
		A	b	c	d	e
Biomasa de vástagos (g MS m^{-2})	FM	$2.92 \cdot 10^1$	-5.18	$3.27 \cdot 10^{-1}$	$-5.05 \cdot 10^{-3}$	$2.28 \cdot 10^{-5}$
	G+F	$1.90 \cdot 10^1$	-3.72	$2.99 \cdot 10^{-1}$	$-4.96 \cdot 10^{-3}$	$2.34 \cdot 10^{-5}$
	P+F	$7.56 \cdot 10^1$	$-1.27 \cdot 10^1$	$6.79 \cdot 10^{-1}$	$-1.02 \cdot 10^{-2}$	$4.63 \cdot 10^{-5}$
	G+P+F	$3.40 \cdot 10^1$	-5.94	$3.85 \cdot 10^{-1}$	$-5.86 \cdot 10^{-3}$	$2.57 \cdot 10^{-5}$
Biomasa de raíces (g MS m^{-2})	FM	4.57	$-6.94 \cdot 10^{-1}$	$3.90 \cdot 10^{-2}$	$-5.92 \cdot 10^{-4}$	$2.74 \cdot 10^{-6}$
	G+F	3.54	$-5.22 \cdot 10^{-1}$	$3.40 \cdot 10^{-2}$	$-5.37 \cdot 10^{-4}$	$2.52 \cdot 10^{-6}$
	P+F	3.79	$-5.18 \cdot 10^{-1}$	$3.90 \cdot 10^{-2}$	$-6.30 \cdot 10^{-4}$	$2.98 \cdot 10^{-6}$
	G+P+F	3.09	$-4.06 \cdot 10^{-1}$	$3.14 \cdot 10^{-2}$	$-4.96 \cdot 10^{-4}$	$2.28 \cdot 10^{-6}$
N acumulado en biovástagos (g N m^{-2})	FM	1.51	$-2.74 \cdot 10^{-1}$	$1.83 \cdot 10^{-2}$	$-3.07 \cdot 10^{-4}$	$1.52 \cdot 10^{-6}$
	G+F	$9.37 \cdot 10^{-1}$	$-1.92 \cdot 10^{-1}$	$1.66 \cdot 10^{-2}$	$-3.00 \cdot 10^{-4}$	$1.54 \cdot 10^{-6}$
	P+F	3.84	$-6.53 \cdot 10^{-1}$	$3.63 \cdot 10^{-2}$	$-5.84 \cdot 10^{-4}$	$2.86 \cdot 10^{-6}$
	G+P+F	1.95	$-3.51 \cdot 10^{-1}$	$2.36 \cdot 10^{-2}$	$-4.03 \cdot 10^{-4}$	$2.02 \cdot 10^{-6}$
N acumulado en raíces (g N m^{-2})	FM	$7.94 \cdot 10^{-2}$	$-1.09 \cdot 10^{-2}$	$7.02 \cdot 10^{-4}$	$-1.09 \cdot 10^{-5}$	$5.06 \cdot 10^{-8}$
	G+F	$5.56 \cdot 10^{-2}$	$-6.58 \cdot 10^{-3}$	$5.71 \cdot 10^{-4}$	$-9.33 \cdot 10^{-6}$	$4.34 \cdot 10^{-8}$
	P+F	$4.02 \cdot 10^{-2}$	$-2.54 \cdot 10^{-4}$	$5.24 \cdot 10^{-4}$	$-9.42 \cdot 10^{-6}$	$4.56 \cdot 10^{-8}$
	G+P+F	$2.55 \cdot 10^{-2}$	$-2.43 \cdot 10^{-3}$	$3.47 \cdot 10^{-4}$	$-6.16 \cdot 10^{-6}$	$2.82 \cdot 10^{-8}$

Resultados

Crecimiento y distribución de la biomasa.

Dinámica de la biomasa total y de los órganos

Se determinó como fecha de emergencia el día 24 después de la siembra y como fecha del inicio de la tuberización 20 DDE.

La biomasa total del cultivo y la de tubérculos (Fig. 1A y 1B respectivamente) presentaron diferencias significativas ($P < 0.01$) debido a los tratamientos desde los 46 DDE hasta la cosecha final, 93 DDE, siendo el orden de los tratamientos $P+F > G+P+F > G+F$ y FM. En la cosecha final la biomasa de tubérculos de los tratamientos $P+F$ y $G+P+F$ resultó 42 % y 23 % más alta respectivamente que el tratamiento FM, mientras que el tratamiento $G+F$ presentó un rendimiento similar al FM.

La biomasa de vástagos (hojas + tallos) aumentó durante las primeras etapas de desarrollo del cultivo (emergencia, inicio de la tuberización y expansión foliar) hasta alcanzar su máximo alrededor de los 56 DDE, luego disminuyó durante la etapa de senescencia hasta la cosecha final, mientras que la necromasa de vástagos aumentó (Fig. 1C). La biomasa de vástagos presentó diferencias significativas ($P < 0.01$) debido a los tratamientos en los muestreos realizados a los 46 y 67 DDE, siendo el orden de los tratamientos $P+F > G+P+F > G+F$ y FM. Es de hacer notar, que en la cosecha final, aún cuando no se presentaron diferencias significativas ($P > 0.1$) debido a los tratamientos ni para la biomasa ni para la necromasa de vástagos, si se presentaron diferencias significativas debido a los tratamientos ($P < 0.01$) para la suma de estas variables (no presentada en el gráfico), siendo el orden de los tratamientos el mismo ($P+F > G+P+F > G+F$ y FM) encontrado para la biomasa de vástagos en los muestreos anteriores.

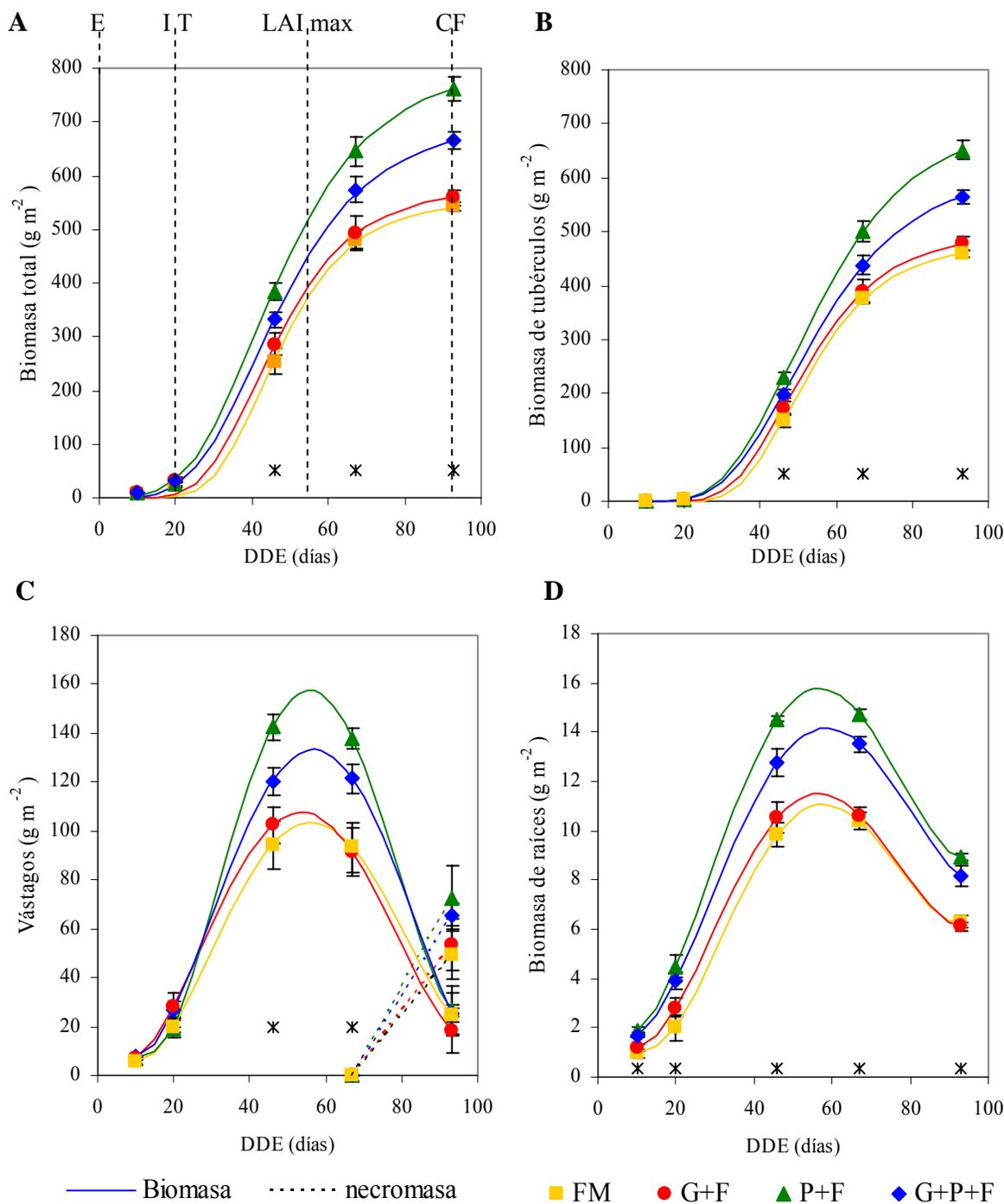


Figura 1. Curso con los días transcurridos después de la emergencia (DDE) de: **A.** Biomasa total. **B.** Biomasa de tubérculos. **C.** Biomasa y necromasa de vástagos. **D.** Biomasa de raíces. Los símbolos corresponden a los valores promedio de cada tratamiento y las barras representan el valor de la desviación normal. En las fechas de muestreo indicadas con * se presentan diferencias significativas ($P < 0.01$) debido a los tratamientos. Las curvas corresponden a las funciones de ajuste presentadas en la tabla 2 para cada variable. Líneas punteadas en **A** corresponden a las fechas de emergencia (E), inicio de la tuberización (IT), máxima área foliar (LAI max) y cosecha final (CF).

En la figura 1D se observa que la biomasa de raíces aumentó durante las primeras etapas de desarrollo del cultivo (emergencia, inicio de la tuberización y expansión foliar) hasta alcanzar un máximo alrededor de los 57 DDE y luego disminuyó en la etapa de senescencia hasta la cosecha final, presentándose diferencias significativas ($P < 0.01$) debido a los tratamientos en todos los muestreos realizados, siendo el orden de los tratamientos $P+F > G+P+F > G+F$ y FM (Tabla 3).

Tabla 3. Medias y efectos de los tratamientos sobre: la biomasa de raíces y la relación en peso de biomasa de raíces a vástagos a los 10, 20, 46, 67 y 93 DDE. Los valores entre paréntesis a un lado de las medias corresponden a la desviación normal. Letras distintas indican diferencias significativas entre las medias de los tratamientos (Tukey HSD, $P = 0.01$).

Tratamiento	Biomasa de raíces (g m^{-2})				
	10 DDE	20 DDE	46 DDE	67 DDE	93 DDE
FM	1.0 (0.2) b	2.0 (0.4) b	9.8 (0.5) c	10.4 (0.4) c	6.3 (0.3) c
G+F	1.2 (0.1) b	2.8 (0.3) b	10.5 (0.5) c	10.6 (0.3) c	6.2 (0.1) c
P+F	1.9 (0.1) a	4.5 (0.4) a	14.5 (0.2) a	14.7 (0.2) a	8.9 (0.1) a
G+P+F	1.7 (0.1) a	3.9 (0.3) a	12.8 (0.5) b	13.5 (0.3) b	8.2 (0.3) b
	Relación de biomasa de raíces a vástagos ($\times 10^2$)				
	10 DDE	20 DDE	46 DDE	67 DDE	93 DDE
FM	18.4 (1.0) c	10.0 (0.6) c	10.5 (0.5) a	11.2 (0.9) a	8.5 (0.3) a
G+F	17.7 (0.5) c	10.1 (0.6) c	10.3 (0.2) a	11.7 (0.9) a	8.6 (0.1) a
P+F	28.7 (1.0) a	23.7 (1.0) a	10.2 (0.4) a	10.7 (0.2) a	9.0 (0.4) a
G+P+F	22.9 (0.9) b	15.0 (0.8) b	10.6 (0.1) a	11.2 (0.5) a	9.0 (0.3) a

Es de hacer notar, que en términos relativos las mayores diferencias se observaron en las etapas iniciales del desarrollo del cultivo, encontrándose que los valores de la biomasa de raíces en los tratamientos P+F y G+P+F fueron, a los 10 DDE, 90 % y 70 % respectivamente mayores que para el tratamiento FM, luego a los 20 DDE fueron 150 % y 95 % respectivamente mayores, mientras que los del tratamiento G+F fueron similares a los de FM.

Distribución de la biomasa

El índice de cosecha aumentó con el tiempo (DDE) y no se presentaron diferencias significativas debido a los tratamientos ($P>0.1$) en ninguna de las etapas de desarrollo del cultivo (Fig. 2A) resultando en la cosecha final entre 84.5 y 85.4 % para todos los tratamientos. Mientras que las relaciones de biomasa de vástagos a biomasa total (Fig. 2B) y de raíces a biomasa total (Fig. 2C) disminuyeron con los DDE, presentándose diferencias significativas debido a los tratamientos ($P<0.01$) a los 10 y 20 DDE. Es de hacer notar que el orden de los tratamientos fue inverso, siendo FM y G+F > G+P+F > P+F para la relación de biomasa de vástagos a biomasa total y P+F > G+P+F > G+F y FM para la relación de biomasa de raíces a biomasa total.

En vista de estos resultados, se calculó la relación de raíces a vástagos (Tabla 3) y se encontraron diferencias significativas entre las medias de los tratamientos (Tukey HSD, $P<0.05$) para esta variable a los 10 y 20 DDE, siendo el orden P+F > G+P+F > G+F y FM. Es de hacer notar, que a los 10 DDE la relación de raíces a vástagos fue para los tratamientos P+F y G+P+F, en términos relativos, 56 % y 24 % respectivamente mayores que para el tratamiento FM y luego a los 20 DDE fueron 137 % y 50 % respectivamente mayores, mientras que los del tratamiento G+F fueron similares a los de FM. En los siguientes muestreos hasta la cosecha final, los valores varían muy poco con el tiempo y no se observan diferencias entre los tratamientos.

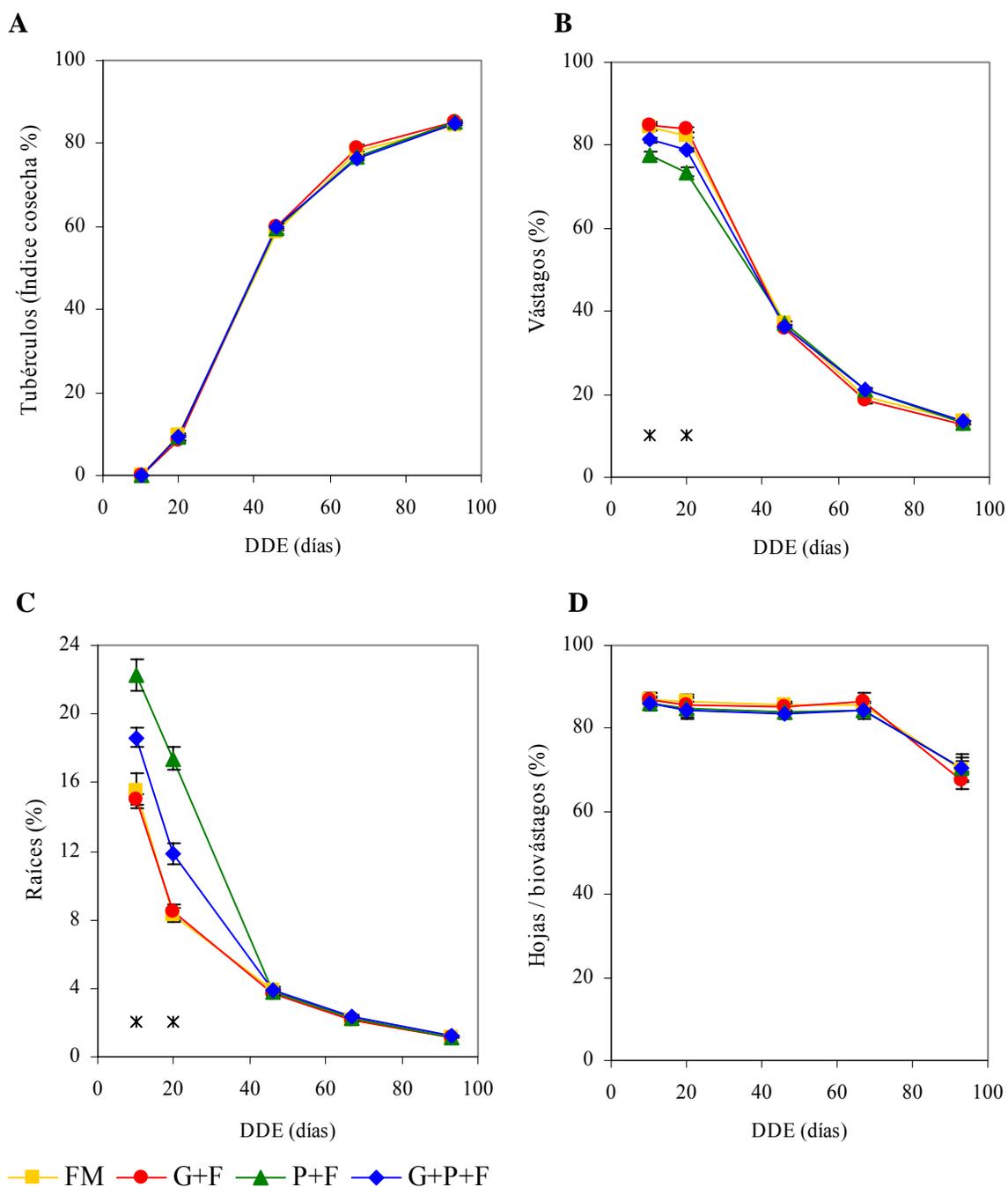


Figura 2. Curso con los días transcurridos después de la emergencia (DDE) de la relación (%) de la biomasa de tubérculos (A), de vástagos (B) y de raíces (C) a biomasa total y de la biomasa de hojas a la biomasa de vástagos (D). Las barras representan el valor de la desviación normal. En las fechas de muestreo indicadas con * se presentan diferencias significativas ($P < 0.01$) debido a los tratamientos.

Al evaluar los coeficientes de correlación entre la biomasa de raíces y de vástagos de todos los tratamientos, entre todas las fechas de muestreo (Tabla 4), podemos observar que existe una correlación positiva significativa ($P < 0.01$) entre la biomasa de vástagos en las etapas intermedia y final (desde 46 DDE hasta 93 DDE) con la biomasa de raíces en la etapa inicial (10 DDE y 20 DDE), mientras que entre la biomasa de raíces en las etapas intermedia y final (desde 46 DDE hasta 93 DDE) y la biomasa de vástagos en la etapa inicial (10 DDE y 20 DDE) no se observa correlación significativa ($P > 0.1$).

Tabla 4. Coeficientes de correlación entre la biomasa de raíces y la biomasa de la parte aérea (vástagos) en las distintas fechas de muestreo y entre estas variables y la biomasa total, el rendimiento de tubérculos (Tubers.) y la cantidad de N acumulada por el cultivo (N acum. total), en la cosecha final (CF). n = 12 para cada variable en cada fecha de muestreo.

*; ** = significativo a un nivel de probabilidad de $P < 0.05$ y $P < 0.01$ respectivamente.

ns = no significativo ($P > 0.1$).

Fecha de muestros y variables	Coeficientes de Correlación							
	Biomasa					Tubers. CF	Total CF	N acum. Total CF
	Parte aérea (Vástagos)							
10 DDE	20 DDE	46 DDE	67 DDE	93 DDE				
10 DDE								
Biomasa Raíces	0.66*	-0.24ns	0.85**	0.83**	0.91**	0.92**	0.92**	0.93**
Biom. Vástagos						0.34ns	0.34ns	0.35ns
20 DDE								
Biomasa Raíces	0.42ns	0.03ns	0.96**	0.93**	0.92**	0.93**	0.93**	0.90**
Biom. Vástagos						-0.30ns	-0.31ns	-0.36ns
46 DDE								
Biomasa Raíces	0.22ns	-0.26ns	0.98**	0.98**	0.96**	0.98**	0.98**	0.97**
Biom. Vástagos						0.98**	0.98**	0.96**
67 DDE								
Biomasa Raíces	0.37ns	-0.26ns	0.95**	0.97**	0.98**	0.98**	0.98**	0.97**
Biom. Vástagos						0.96**	0.97**	0.94**
93 DDE (CF)								
Biomasa Raíces	0.31ns	-0.31ns	0.94**	0.97**	0.98**	0.97**	0.97**	0.96**
Biom. Vástagos						0.98**	0.98**	0.97**

Para analizar la distribución de asimilados en la parte aérea de las plantas, se calculó la relación de biomasa de hojas a la biomasa de vástagos (excluyendo la necromasa) y se encontró (Fig. 2D) que esta relación se mantiene prácticamente constante alrededor de 85 % hasta los 67 DDE y luego disminuye a 70 % en la cosecha final, sin que se observen diferencias significativas debido a los tratamientos ($P>0.1$).

Tasas de crecimiento y tasas de migración de asimilados

Las tasas diarias de crecimiento absoluto (AGR) aumentaron desde la emergencia hasta alcanzar su máximo alrededor de los 41 DDE y luego disminuyeron hasta la cosecha final (Fig. 3). Los valores de AGR aumentaron más rápido para los tratamientos P+F y G+P+F que para los tratamientos FM y G+F y en cambio disminuyeron más rápido para los tratamientos FM y G+F que para los tratamientos P+F y G+P+F. De manera análoga, las tasas diarias de crecimiento de tubérculos (TGR) aumentaron desde la emergencia hasta alcanzar su máximo alrededor de los 48 DDE y luego disminuyeron hasta la cosecha final (Fig. 3). Los valores de TGR mostraron la misma tendencia entre los tratamientos que la observada para AGR.

Las tasas diarias de migración de asimilados, desde la parte aérea hacia los tubérculos, (Fig. 3), aumentan desde $0 \text{ g m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ a los 51 DDE hasta valores máximos que oscilan entre 1.3 y $1.8 \text{ g m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ alrededor de los 64 DDE, para luego disminuir lentamente hasta la cosecha final. Las cantidades de asimilados que migran hacia los tubérculos durante esta etapa, calculadas como el área bajo la curva de la tasa de migración de asimilados, presentan valores diferentes para los tratamientos: P+F (55 g m^{-2}); G+P+F (40 g m^{-2}); G+F (35 g m^{-2}) y FM (32 g m^{-2}), que en términos relativos a la biomasa aérea máxima representan entre 35 % y 30 % y en términos de la biomasa total de tubérculos representan sólo del 8 % al 7 % y son similares para todos los tratamientos.

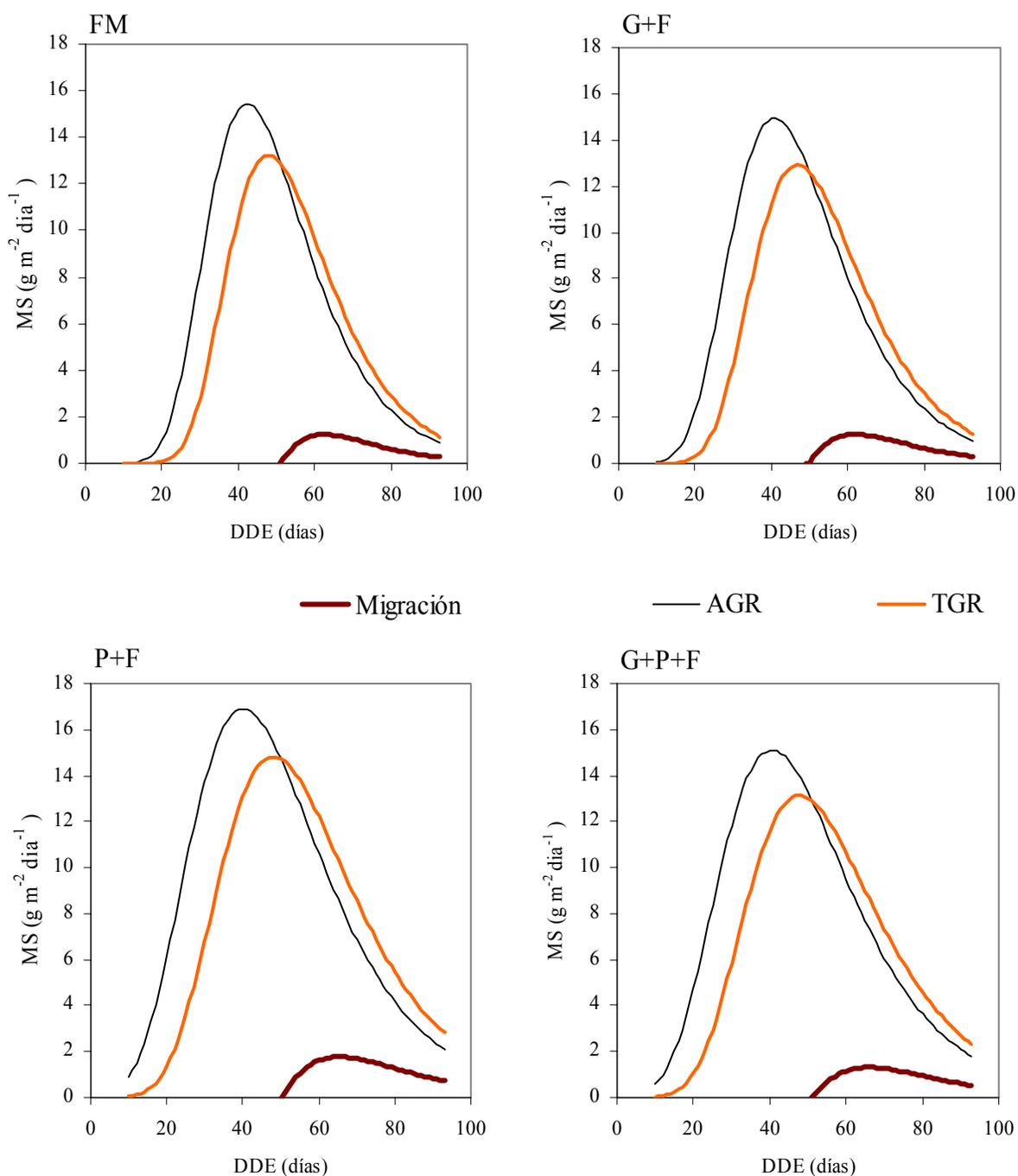


Figura 3. Curso de las tasas de crecimiento absoluto (AGR) y de tubérculos (TGR) y de las tasas de migración de asimilados hacia los tubérculos, con los días transcurridos después de la emergencia (DDE), para cada uno de los tratamientos: FM, G+F, P+F y G+P+F.

Acumulación y distribución del nitrógeno

Concentración de N

La concentración de N (%) en las hojas resultó mayor que en los demás órganos, seguida por la de los tallos, después la de las raíces y por último la de los tubérculos durante todo el curso del cultivo (Fig. 4). La concentración de N en la necromasa en la cosecha final (no se muestra en la figura) presentó valores entre los de biomasa de hojas y de tallos. La concentración de N en hojas prácticamente no cambió entre los 10 y 20 DDE, en que se presentaron los máximos valores para luego disminuir de forma continua hasta la cosecha final, mientras que la concentración de N en los tallos y en las raíces disminuyó de manera continua en el curso del tiempo.

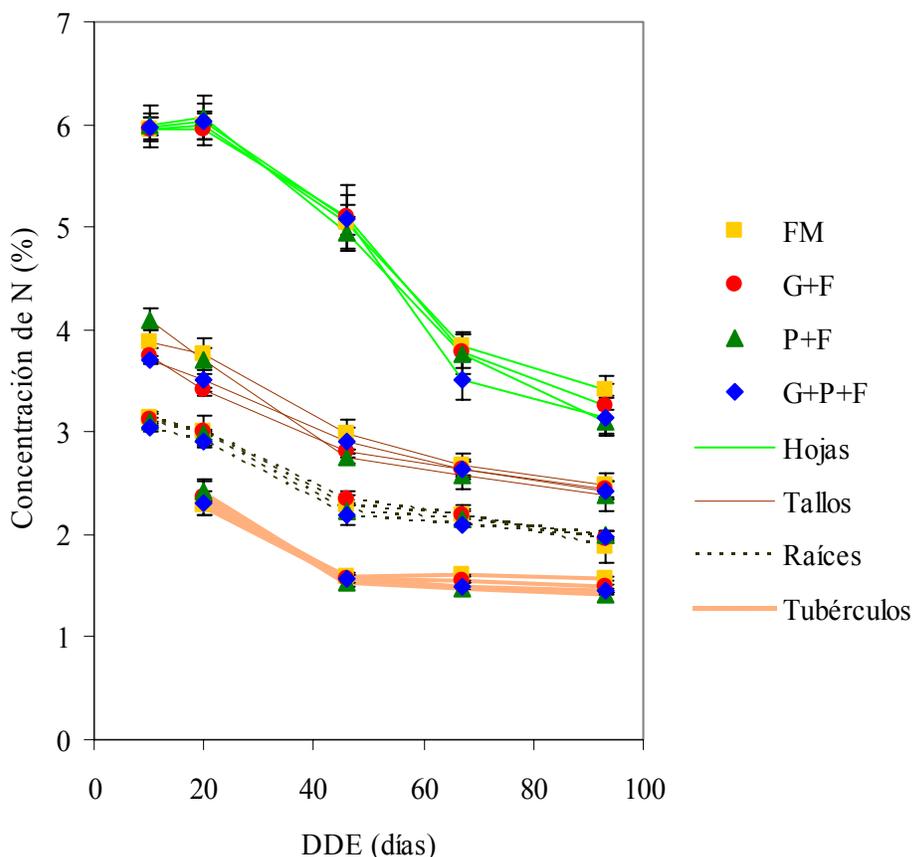


Figura 4. Curso de la concentración de nitrógeno (%) en los órganos: hojas, tallos, raíces y tubérculos, con los días transcurridos después de la emergencia (DDE). Las barras representan el valor de la desviación normal.

La concentración de N en los tubérculos disminuyó entre los 20 y 46 DDE y luego se mantuvo prácticamente constante hasta la cosecha final. Las concentraciones de N (%) en cada uno de los órganos de la planta no presentaron diferencias significativas debido a los tratamientos en los muestreos realizados, excepto en los tubérculos en la cosecha final, donde resultaron 1.57, 1.50, 1.45 y 1.42 % para los tratamientos FM, G+F, G+P+F y P+F respectivamente.

Cantidad de N acumulada y distribución en la planta

La cantidad total de N acumulada por el cultivo presentó (Fig. 5A) diferencias significativas ($P < 0.01$) debido a los tratamientos a partir de los 46 DDE hasta la cosecha final (93 DDE), siendo el orden de los tratamientos $P+F > G+P+F > G+F$ y FM, observándose un aumento de esta variable desde la emergencia hasta los 67 DDE, fecha desde la cual los valores experimentales (representados por símbolos en esta figura 5A) prácticamente no variaron respecto a los obtenidos en la cosecha final.

Las cantidades de N acumuladas en los tubérculos (Fig. 5B), los vástagos (Fig. 5C) y las raíces (Fig. 5D) presentaron las mismas tendencias y diferencias entre los tratamientos que las señaladas anteriormente para la biomasa de estos órganos. Sin embargo, es de hacer notar que las cantidades máximas de N acumuladas en los vástagos se alcanzan alrededor de los 50 DDE (Fig. 5C), es decir antes que las máximas de biomasa en vástagos (Fig. 1C) y disminuyen de manera más rápida.

La relación de la cantidad de N acumulada en cada órgano a la cantidad total de N acumulada por el cultivo presentó las mismas tendencias en el tiempo y las mismas diferencias entre los tratamientos que las encontradas para la relación de biomasa del órgano respectivo a la biomasa total que se observaron en la figura 3.

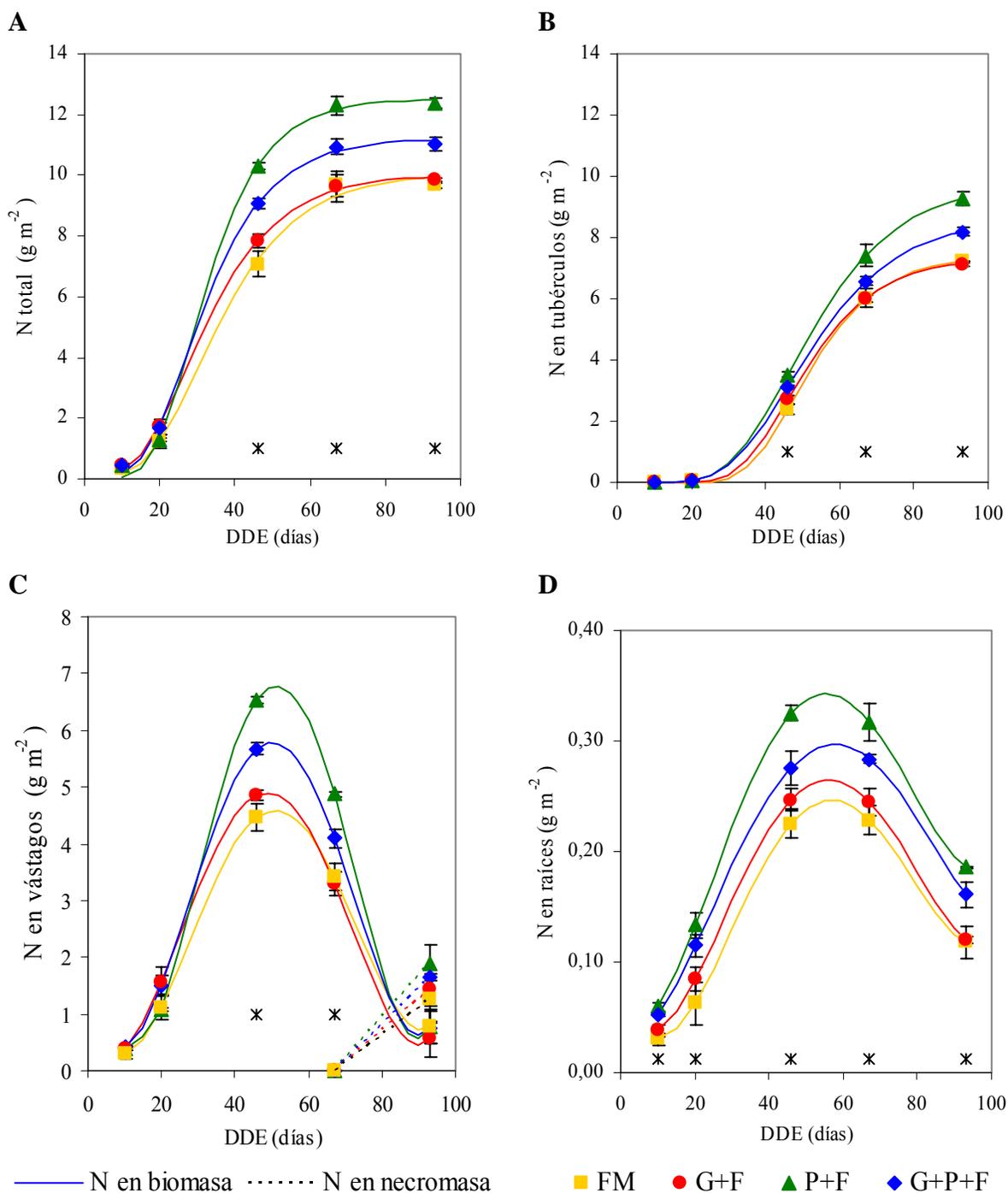


Figura 5. Curso con los días transcurridos después de la emergencia (DDE) del nitrógeno acumulado en: **A.** Biomasa total. **B.** Biomasa de tubérculos. **C.** Biomasa y necromasa de vástagos. **D.** Biomasa de raíces. Los símbolos corresponden a los valores promedio de cada tratamiento y las barras representan el valor de la desviación normal. En las fechas de muestreo indicadas con * se presentan diferencias significativas ($P < 0.01$) debido a los tratamientos. Las curvas corresponden a las funciones presentadas en la tabla 2 para cada variable.

Tasas de acumulación y migración de nitrógeno

Las tasas diarias de acumulación de N en el cultivo (NAR) aumentaron desde la emergencia hasta alcanzar su máximo alrededor de los 28 DDE y luego disminuyeron hasta la cosecha final (Fig. 6). El valor máximo de NAR para los tratamientos P+F ($0.44 \text{ g N m}^{-2} \text{ día}^{-1}$) y G+P+F ($0.34 \text{ g N m}^{-2} \text{ día}^{-1}$) resultaron 69 % y 31 % respectivamente mayores que el del tratamiento FM ($0.26 \text{ g N m}^{-2} \text{ día}^{-1}$), mientras que el del G+F ($0.28 \text{ g N m}^{-2} \text{ día}^{-1}$) fue similar a éste.

Las tasas diarias de acumulación de N en los tubérculos (TNAR) aumentaron desde la emergencia hasta alcanzar su máximo alrededor de los 47 DDE y luego disminuyeron hasta la cosecha final. Los valores máximos de TNAR fueron similares para todos los tratamientos y se encontraron en un rango entre 0.20 y $0.22 \text{ g N m}^{-2} \text{ día}^{-1}$. Sin embargo, disminuyeron más rápido para los tratamientos FM y G+F que para los tratamientos P+F y G+P+F.

Las tasas diarias de migración de nitrógeno hacia los tubérculos aumentaron desde $0 \text{ g N m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ a los 42 DDE hasta valores máximos de $0.1 \text{ g N m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ alrededor de los 58 DDE para los tratamientos P+F y G+P+F y de los 54 DDE para G+F y FM, y luego disminuyeron lentamente hasta la cosecha final (Fig. 6). Las cantidades de nitrógeno que migran hacia los tubérculos durante esta etapa, calculadas por integración como el área bajo la curva de la tasa de migración de nitrógeno, presentan valores diferentes para los tratamientos: 3.6 g N m^{-2} (P+F); 3.0 g N m^{-2} (G+P+F); 2.5 g N m^{-2} (G+F) y 2.2 g N m^{-2} (FM), que en términos relativos a la cantidad máxima de N acumulada en la parte aérea representan entre 54 % y 49 % y en términos de la cantidad total de N acumulada en los tubérculos representan 39 % (P+F); 37 % (G+P+F); 35 % (G+F) y 31 % (FM).

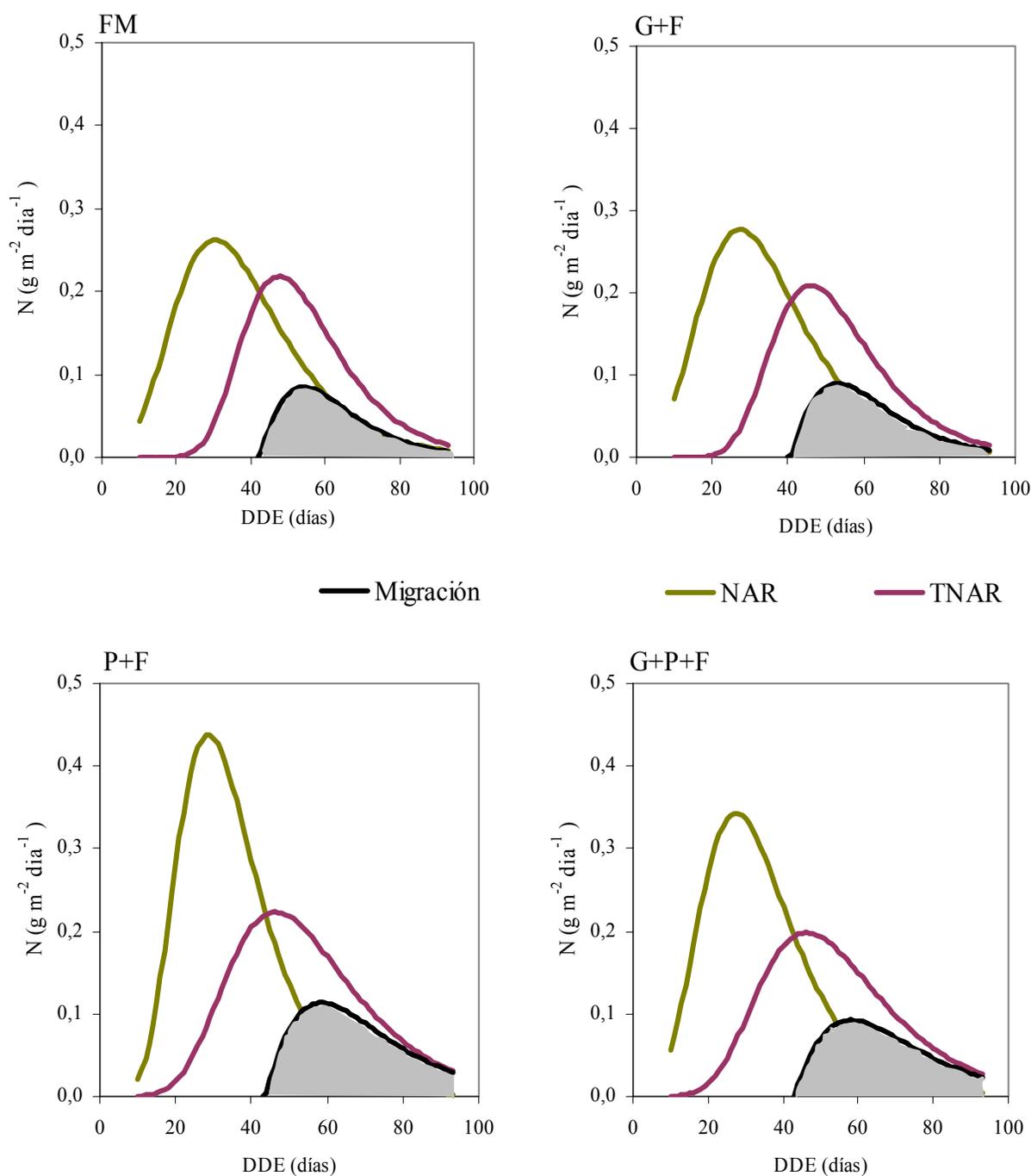


Figura 6. Curso de las tasas diarias de acumulación de nitrógeno en la biomasa total (NAR) y en los tubérculos (TNAR) y de las tasas de migración de nitrógeno hacia los tubérculos, con los días transcurridos después de la emergencia (DDE), para cada uno de los tratamientos: FM, G+F, P+F y G+P+F. El área gris bajo la curva de migración corresponde a la cantidad de N que migra hacia los tubérculos.

Correlación entre los rendimientos y la biomasa de raíces y vástagos

Al evaluar los coeficientes de correlación de el rendimiento de tubérculos, la biomasa total y la cantidad de N acumulada por el cultivo en todos los tratamientos en la cosecha final con la biomasa de raíces de todos los tratamientos en todas las fechas de muestreo, podemos observar (Tabla 4) que existe una correlación positiva significativa ($P < 0.01$) entre estos parámetros y la biomasa de raíces en todos los muestreos (desde los 10 DDE hasta la cosecha final), mientras que estos mismos parámetros presentaron alta correlación positiva significativa ($P < 0.01$) con la biomasa de vástagos solamente a partir de los 47 DDE hasta la cosecha final.

Discusión y Conclusiones

Biomasa y acumulación de nitrógeno

En la bibliografía está claramente establecido que el rendimiento de tubérculos, la producción de biomasa y la acumulación de N por el cultivo de papa aumentan con el suministro de nitrógeno (Greenwood et al, 1985; Biemond y Vos, 1992; Vos, 1995; Sarmiento, 1995; Van Delden, 2001). Sin embargo, en este experimento se demuestra que además de responder a la cantidad de N aplicada, el desarrollo y el rendimiento final del cultivo de papa es altamente dependiente del tipo de fertilización nitrogenada empleada y que el suministro de la cáscara de arroz combinado con N mineral favoreció una mayor acumulación de N por el cultivo y como consecuencia mayor biomasa total y mayor rendimiento de tubérculos, mientras que el suministro de gallinazo con fertilizante mineral no cambió sustancialmente el rendimiento con respecto al del tratamiento de fertilizante mineral sólo. Así se pone de relieve la importancia de profundizar en el entendimiento de cómo se modula la disponibilidad de N a partir de diferentes fuentes y de cómo interactúan cuando son aplicadas en forma combinada.

Efecto de la acumulación de N sobre los rendimientos

En el capítulo anterior se observó que en todos estos mismos tratamientos el cultivo presentó limitación de N a partir de los 44 DDE (fecha del inicio de la tuberización) hasta

la cosecha final, siendo el orden en cuanto al déficit $P+F < G+P+F < FM$ y $G+F$, el cual resultó inverso al obtenido por la biomasa total y de tubérculos.

En el presente trabajo, los resultados muestran que, aún cuando las concentraciones de N en hojas y tallos no presentaron diferencias entre los tratamientos, las cantidades en vástagos tanto de biomasa como de N acumulado si presentan diferencias desde la etapa de expansión foliar hasta la cosecha final, siendo el orden de los tratamientos el mismo ($P+F > G+P+F > G+F$ y FM) que el obtenido para la biomasa total y de tubérculos.

Estos resultados confirman el planteamiento según el cual el suministro de N afecta los rendimientos de tubérculos, principalmente porque a medida que se incrementa la cantidad de N acumulada también se incrementa la biomasa asimilatoria, causando mayores índices y duración de área foliar (Capítulo 3; Vos y Biemond, 1992; Sarmiento, 1995) y mayor cantidad de radiación fotosintéticamente activa interceptada por el cultivo (IPAR) (Capítulo 3 de esta Tesis; Van Delden, 2001). Además, tanto el hecho de que las tasas de acumulación de N alcanzaron su máximo valor antes que las tasas de crecimiento absoluto, como el hecho de que las cantidades de N acumuladas en los vástagos también alcanzaron su máximo valor antes que las de biomasa de vástagos, corroboran que la acumulación de N fue el principal factor que determinó el crecimiento del cultivo.

Es de hacer notar, que el incremento de la biomasa asimilatoria contribuyó al incremento del rendimiento de tubérculos, no sólo por su efecto directo sobre la cantidad de asimilados enviados a los tubérculos desde el follaje durante el desarrollo del cultivo sino también por el proceso de “migración” por el cual cantidades importantes de asimilados y de N se desplazan desde la parte aérea hasta los tubérculos durante las etapas de senescencia y madurez del cultivo (Sarmiento, 1995; Kooman y Rabbinge, 1995). Respecto a este punto, los resultados encontrados en el presente trabajo muestran que la migración de N hacia los tubérculos es mayor que la de asimilados, en términos relativos a las cantidades máximas acumuladas en la parte aérea. Además, las diferencias entre los tratamientos muestran que mientras mayor es la cantidad de N acumulada en los vástagos durante el máximo desarrollo de la parte aérea, mayor tendió a ser el aporte relativo del N que migra respecto al N total acumulado en los tubérculos en la cosecha final, poniendo de manifiesto la importancia de los vástagos como reservorio de N para el crecimiento de los tubérculos cuando las plantas no pueden satisfacer su demanda a expensas del suelo.

En este sentido, los resultados encontrados en el presente trabajo indican que en el momento de la cosecha final habían migrado mayores cantidades de asimilados y de N desde las hojas que desde los tallos, ya que la relación de hojas a vástagos disminuyó marcadamente en la cosecha final. Esta tendencia es contraria a la informada por Biemond y Vos (1992), pero se corresponde con las ideas planteadas por Kooman y Rabbinge (1995) en el sentido de que el proceso de migración comienza primero desde las hojas bajas debido a que éstas tienden a senescer antes.

Distribución de asimilados y del N en el cultivo

Aún cuando la biomasa total como la de los distintos órganos presentó importantes diferencias entre los tratamientos, las concentraciones de N en los distintos órganos variaron muy poco si se las compara con las diferencias encontradas en la literatura para distintas cantidades de N suministradas. Esto puede atribuirse al hecho de que en algunos trabajos se comparan las concentraciones de N en cultivos con o sin fertilización nitrogenada (Ej. Greenwood et al., 1985; Meyer y Marcum, 1998), y en otros trabajos se comparan tratamientos con dosis altas de N que son 5; 6 y 8 veces mayores que en los tratamientos que recibieron baja dosis, Sarmiento (1995), Biemond y Vos (1992) y Meyer y Marcum (1998), respectivamente. Así por ejemplo Biemond y Vos (1992) encuentran concentraciones de N en plantas de papa maduras de 1.1; 1.4 y 2.1 % para suministros de N en forma mineral de 2.5; 8.0 y 16.0 g N por planta. En cambio en el presente trabajo todos los tratamientos recibieron la misma dosis de N pero en distinta forma. Estos resultados indican que, cuando las diferencias en las cantidades de N suministrado no son tan grandes, las plantas ajustan la cantidad de biomasa para mantener la concentración de N. Esta tendencia se corresponde con los resultados informados por Van Delden (2001), en lo que se refiere a la concentración de N en las hojas. Además, indican que la concentración de N total en los distintos órganos no es un parámetro tan sensible al suministro de N como lo es el índice de nutrición de nitrógeno (NNI) sugerido por Lemaire (1989) (Capítulo 3).

Índice de cosecha

Aún cuando se encontraron diferencias significativas debido a los tratamientos en cuanto a la biomasa total y de tubérculos, así como para la cantidad de N acumulada en

ellas, los índices de cosecha no presentaron diferencias debido a los tratamientos en ninguna etapa del cultivo. Estos resultados coinciden con los de algunos autores (Greenwood et al., 1985; Biemond y Vos, 1992; Sarmiento, 1995; Van Delden, 2001) en el sentido de que el índice de cosecha en la madurez del cultivo no presenta diferencias con el suministro de N. Así por ejemplo, Sarmiento, 1995 encuentra índices de cosecha de 84.2 y 86.6 % en la cosecha final con suministros de N de 32 y 160 kg N ha⁻¹ respectivamente y Biemond y Vos, 1992 encuentran índices de cosecha entre 86 y 87 % con suministros de 2.5; 8.0 y 16.0 g N por planta. Sin embargo, otros autores (Millard et al., 1989; Huett y Dettmann, 1991) informan diferencias en el índice de cosecha en la madurez debido a la fertilización nitrogenada, aunque los resultados de estos dos últimos autores, son opuestos entre si, en cuanto a las tendencias encontradas. Con respecto a los índices de cosecha en etapas anteriores a la madurez, los resultados de este trabajo coinciden con los de Greenwood et al. (1985), que no encuentran diferencias durante el desarrollo del cultivo. En síntesis, estas similitudes y diferencias sugieren que el índice de cosecha no resulta un parámetro suficientemente sensible como para mostrar diferencias cuando la cantidad de N suministrada es similar en los distintos tratamientos de fertilización aplicados.

Distribución de la biomasa de vástagos y raíces

Los porcentajes obtenidos de biomasa de raíces a biomasa total, entre 1.1 y 22.3 % en distintas etapas del desarrollo del cultivo, son comparables en magnitud a los informados por Sarmiento (1995), entre 1.2 y 22.2 %, y MacKerron y Lewis (1995) entre 3 y 17 %. En el presente trabajo llama la atención que el suministro de pargana favoreció la producción de raíces frente a la producción de vástagos durante las etapas iniciales del cultivo, es decir, entre la emergencia y el inicio de la tuberización, mientras que el gallinazo no cambió sustancialmente estos parámetros respecto a la fertilización mineral. Los resultados presentados por Opeña y Porter (1999) indican que el suministro de enmiendas orgánicas de “compost” y estiércol de ganado vacuno incrementaron la biomasa de raíces y la densidad del largo de raíces, RLD (cm cm⁻³), pero no afectaron la relación de peso de raíces a vástagos, no pudiendo estos autores con sus datos establecer una relación de causalidad entre el crecimiento de las raíces y de los vástagos. En este aspecto, se ha considerado que existe una “relación funcional” entre estos órganos (Brown y Scott, 1984;

Opena y Porter, 1999), mediante la cual los cambios en el crecimiento de vástagos afectan el crecimiento de las raíces y viceversa. En el presente trabajo, los resultados indican que la cantidad de biomasa de vástagos durante la etapa en que se alcanza el máximo índice de área foliar está altamente correlacionada con la biomasa de raíces en la etapa inicial, comprendida entre la emergencia y el inicio de la tuberización, de tal manera que a mayor cantidad de biomasa de raíces y mayor relación raíces / vástagos en la etapa inicial, como fue el caso de los tratamientos con pargana, mayor fue la biomasa de vástagos en las etapas siguientes, en las cuales tendió a disminuir la relación de raíces a vástagos (Sattelmacher et al., 1990).

Efectos de los tratamientos sobre la dinámica de crecimiento del cultivo

Los resultados obtenidos confirman que el rendimiento de tubérculos y la biomasa total del cultivo son directamente proporcionales a la cantidad de biomasa asimilatoria (Vos y Biemond, 1992; Sarmiento, 1995; Van Delden, 2001). Sin embargo, el rendimiento de tubérculos, la biomasa total y la cantidad de N acumulada por el cultivo en la cosecha final presentaron una correlación mayor aún con la biomasa de raíces durante todo el desarrollo del cultivo que con la biomasa de vástagos. Estos resultados se corresponden con los presentados por Opena y Porter (1999) quienes informan que los rendimientos de tubérculos tienden a tener una mejor correlación con RLD que con LAI. Si consideramos además, que la absorción y acumulación de N por el cultivo de papa depende entre otros factores del desarrollo del sistema radicular (De Willigen et al., 1995), entonces los resultados obtenidos en el presente trabajo permiten concluir que:

El suministro de enmiendas orgánicas de baja calidad, como la pargana, combinada con fertilizante mineral, estimuló una mayor biomasa de raíces y una mayor relación de biomasa de raíces a vástagos en las etapas iniciales del desarrollo del cultivo de papa, que promovieron mayor acumulación de N y, por lo tanto, mayor producción de biomasa asimilatoria durante la expansión foliar y luego mayor migración de N hacia los tubérculos en la etapa de senescencia, las cuales trajeron como consecuencia la obtención de rendimientos de tubérculos más altos que los obtenidos con el suministro de fertilizante mineral sólo o combinado con enmiendas orgánicas de alta calidad como el gallinazo.

El hecho de haber obtenido mayor biomasa de raíces en los tratamientos con pargana podría deberse a diferentes factores que pudieran estar actuando de manera independiente o combinada, entre los cuales destacan la modificación del estado de agregación de las partículas del suelo y la concentración de nutrientes en el suelo (Opeña y Porter, 1999). Con respecto al estado de agregación de las partículas del suelo, Porter et al., (1999) informan de un incremento en este parámetro como consecuencia del suministro de enmiendas orgánicas. Este incremento en el estado de agregación pudiera promover el crecimiento de las raíces al aumentar el espacio poroso y así disminuir la resistencia física a la penetración de las raíces y aumentar el intercambio de gases (Barber, 1984) y la disponibilidad de agua (Bamford et al., 1991). Sin embargo, los parámetros medidos en el presente trabajo no son suficientes para determinar la influencia de estos factores.

Por otra parte, con respecto a la concentración de nutrientes en el suelo y particularmente de N, Sattelmacher et al. (1990) encuentran, en un experimento en el cual se cultivaron plantas de papa en solución nutritiva aireada, que el peso de las raíces se incrementa a medida que aumenta la concentración de nitrato en la solución, mientras que Asfary et al. (1983), en un experimento de campo, no encuentran un efecto de la fertilización nitrogenada sobre la RLD de la papa. Por otra parte, Vos (1995) basándose en “la teoría del equilibrio funcional de Brouwer (1983)” especula que la RLD debería incrementarse a medida que aumente la limitación de nitrógeno. En el presente experimento no se encontró déficit de N en ninguno de los tratamientos durante las etapas iniciales del cultivo (Capítulo 3), mientras que en este mismo período las concentraciones de N total extraíble (Capítulo 5) resultaron menores para los tratamientos P+F y G+P+F, en los cuales se encontraron mayor biomasa de raíces en estas misma etapas. Estos resultados podrían deberse a que al existir menor disponibilidad de N en los tratamientos P+F y G+P+F el cultivo respondió aumentando la asignación de asimilados hacia las raíces (Vos, 1995) para aumentar el volumen de suelo explorado y satisfacer la demanda del cultivo, evitando el déficit, o a que la biomasa de raíces aumentó como consecuencia de algún otro factor, como podría ser la disminución de la resistencia física del suelo a la penetración de las raíces como consecuencia de un aumento en el espacio poroso (Barber, 1984; Vos y Groenwold, 1986) o a una combinación de ambos factores.

Recomendaciones

La discusión presentada en los párrafos precedentes indica que para determinar las causas por las cuales un sustrato orgánico de baja calidad, como la cáscara de arroz, estimula un aumento de la proporción de raíces en el cultivo de papa en las etapas iniciales del cultivo, sería necesario realizar experimentos donde se determine la influencia de la cantidad de sustrato sobre el espacio poroso, la relación de raíces a vástagos y la RLD, para distintas cantidades de N suministrado.

Desde el punto de vista de prácticas agronómicas para el cultivo de papa en los suelos de los Andes venezolanos es recomendable la utilización de la cáscara de arroz combinada con otras fuentes de N mineral u orgánico lábil. Aún cuando sería necesario realizar otros experimentos de campo para optimizar la proporción a ser empleada, las cantidades aquí utilizadas pueden servir como punto de partida.

Bibliografía

- AOAC, 1990. Nitrogen (Total) (Crude Protein) in plants. Kjeldahl methods. En: K. Helrich (Ed.). Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists. Published by the AOAC Inc. Fifteen edition. Vol. I, p.59.
- Asfary A.F., Wild A., Harris P.M., 1983. Growth, mineral nutrition and water use by potato crops. *Journal of Agricultural Science, Cambridge*. 100: 87-101.
- Bamford, S.J., Parker C.J., Carr M.K.V., 1991. Effects of soil physical conditions on root growth and water use of barley grown in containers. *Soil Tillage Research*. 21: 309-323.
- Barber S.A., 1984. Soil Nutrient Bioavailability. A Mechanistic Approach. John Wiley & Sons, Inc., USA, 398 p.
- Biamond H., Vos J., 1992. Effects of nitrogen on the development and growth of potato plant. 2. The partitioning of dry matter, nitrogen and nitrate. *Annals of Botany*. 70: 37-45.
- Bradstreet R.B., 1965. The Kjeldahl method for organic nitrogen. Academic Press Inc. New York, 239 p.
- Bremmen J.M., Mulvaney C.S., 1982. Nitrogen-total. In: A.L. Page, R.H. Miller, D.R. Keeney (Eds.). *Methods of soil analysis. Part 2. 2nd Edition, Agronomy*. 9: 595-624.
- Brown, D.A., Scott H.D., 1984. Dependence of crop growth and yield on root development and activity. En: S.A. Barber, D.R. Bouldin (Eds.). *Roots, Nutrient and Water Influx, and Plant Growth. ASA Special Publication 49. SSSA, CSSA y ASA. Madison*, pp. 101-136.
- Chapin F.S.III, Matson P.A., Mooney H.A., 2002. Principles of terrestrial ecosystem ecology. Springer. New York. 436 p.
- Charles-Edwards D.A., 1982. Physiological determinants of crop growth. Academic Press, North Ryde, North South Wales, Australia, 161 p.
- De Willigen P., Heinen M., Van Den Broek B.J., 1995. Modeling water and nitrogen uptake of potato crop growing on a ridge. En: A.J. Haverkort, D.K.L. MacKerron (Eds.). *Potato Ecology and Modeling of Crops under Conditions Limiting Growth. Kluwer Academic Publishers*, pp. 75-88.
- Fahem M., Haverkort A.J., 1998. Comparison of the grow of potato crops grown in autumn and spring in North Africa. *Potato Research*. 31: 557-568.

- Fishman S., Bar-Yosef B., 1995. Simulation of nitrogen uptake from soil and partitioning in potato plants: model description and sensitivity analysis. En: A.J. Haverkort, D.K.L. MacKerron (Eds.). *Potato Ecology and Modeling of Crops under Conditions Limiting Growth*. Kluwer Academic Publishers, pp. 147-166.
- Greenwood D.J., Neeteson J.J., Draycott A., 1985. Response of potatoes to N fertilizer: Quantitative relations for components of growth. *Plant and Soil*. 85: 163-183.
- Huett D.O., Dettmann E.B., 1991. Nitrogen response surface models of zucchini squash, head lettuce and potato. I. Effect of N on growth, dry matter partitioning and on fresh yield and quality. *Plant and Soil*. 134: 243-254.
- Hunt R., 1982. *Plant Growth Curves. The Functional Approach to Plant Growth Analysis*. Edward Arnold (Publishers) Ltd., London, 226 p.
- IBSNAT, 1990. International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer (IBSNAT) Project. Technical Report 2, Field and Laboratory Methods for the Collection of the IBSNAT Minimum Data Set. Department of Agronomy and Soil Science, Hawaii Institute of Tropical Agriculture and Human Resources, University of Hawaii, 67 p.
- Ingestad T., Ågren G., 1991. The influence of plant nutrition on biomass allocation. *Ecological Applications*. 1(2): 168-174.
- Kooman P.L., Spitters C.J.T., 1995. A coherent set of models to simulate potato growth. En: P.L. Kooman. *Yielding ability of potato crops as influenced by temperature and day length*. Thesis Landbou Universiteit Wageningen. The Netherlands, pp 7-31.
- Kooman P.L., Rabbinge R., 1995. An analysis of the relation between dry matter allocation to the tuber and earliness of a potato crop. In: P.L. Kooman. *Yielding ability of potato crops as influenced by temperature and day length*. Thesis Landbou Universiteit Wageningen. The Netherlands, pp. 33-48.
- Lemaire G., Gastal F., Salette J., 1989. Analysis of the effect of nutrition on dry matter yield of sward by reference to potential yield and optimum N content. *Proc. XVI Int. Grassland Congr.*, 4-11 Oct. 1989, Nice, pp. 179-180.
- MacKerron D.K.L., Lewis G.J., 1995. Modeling to optimize the use of both water and nitrogen by potato crop. En: A.J. Haverkort and D.K.L. MacKerron (Eds.). *Potato Ecology and Modeling of Crops under Conditions Limiting Growth*. Kluwer Academic Publishers, pp. 129-146.
- Méndez R.O., 1999. Fertilización en papa. En: *Compendio del curso taller "Producción y certificación de semilla de papa"*, Dic. 1999, Centro de Investigaciones Agropecuarias del Estado Mérida, Mucuchíes, Venezuela, pp. 11-21.
- Meyer R.D., Marcum D.B., 1998. Potato yield, petiole nitrogen, and soil nitrogen response to water and nitrogen. *Agronomy Journal*. 90: 420-429.

- Millard P., Robinson D., Mackie-Dawson L.A., 1989. Nitrogen partitioning within the potato (*Solanum tuberosum* L.) plant in relation to nitrogen supply. *Ann. Bot.* 63: 289-296
- Myers R.J.K., Palm C.A., Cuevas E., Gunatilleke I.U.N., Brossard M., 1994. The synchronization of nutrient demand. En: P.L. Woomer, M.J. Swift (Eds.). *The Biological Management of Tropical Soil Fertility*. John Wiley and Sons, Inc, pp. 81-116.
- Opena, G.B., Porter G.A., 1999. Soil management and supplemental irrigation effects on potato: II. Root growth. *Agronomy Journal*. 91: 426-431.
- Porter G.A., Opena G.B., Bradbury, W.B., McBurnie J.C., Sisson J.A., 1999. Soil management and supplemental irrigation effects on potato: I. Soil properties, tuber yield and quality. *Agronomy Journal*. 91: 416-425.
- Sarmiento L., 1995. Restauration de la fertilité dans un système agricole a jachère longue des hautes Andes du Venezuela. Tesis doctoral. Université de Paris-Sud, Paris, 237 p.
- Sattelmacher B., Klotz F., Marschner, 1990. Influence of the nitrogen level on root growth and morphology of two potato varieties in nitrogen acquisition. *Plant and Soil*. 123: 131-137.
- Soil Survey Staff, 1992. *Keys to Soil Taxonomy*. 5th Edition. SMS Technical monograph N° 19. Blacksburg, Virginia, Pocahontas Press Inc, 556 p.
- Swift M.J. (Ed.), 1987. *Tropical Soil Biology and Fertility (TSBF)*. Inter-Regional Research Planning Workshop. Biology International. Paris. Special Issue 13: 28-34.
- Van Delden A., 2001. Yield and growth components of potato and wheat under organic nitrogen management. In: *Yielding ability and weed suppression of potato and wheat under organic nitrogen management*. PhD Thesis. Wageningen University, the Netherlands, pp. 9-37.
- Van Delden A., Schröder J.J., Kropff M.J., Grashoff C., Booij R., 2003. Simulated potato yield, and crop and soil nitrogen dynamics under different organic nitrogen management strategies in The Netherlands. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 96: 77-95.
- Vos J., 1995. Nitrogen and the growth of potato crops. En: A.J. Haverkort and D.K.L. MacKerron (Eds.). *Potato Ecology and Modeling of Crops under Conditions Limiting Growth*. Kluwer Academic Publishers, pp. 115-128.
- Vos J., Van der Putten P.E.L., 1998. Effect of nitrogen supply on leaf growth, leaf nitrogen economy and photosynthetic capacity in potato. *Field Crops Res.*, 59: 63-72.
- Vos J., Groenwold J., 1986. Root growth of potato crops on a marine-clay soil. *Plant and Soil*. 94: 17-33.

Westerman D.T., Kleinkopf G.E., 1985. Nitrogen requirements of potatoes. *Agronomy Journal*. 77: 616-621.

Capítulo 5

Efecto de diferentes enmiendas orgánicas combinadas con fertilizante mineral sobre el ciclado de nitrógeno en un agroecosistema de papa.

Resumen

Para aumentar la eficiencia en el uso del nitrógeno y obtener altos rendimientos de cosecha con las menores pérdidas de N, se ha propuesto combinar fertilizantes minerales y orgánicos de distinta calidad con el fin de controlar los procesos del ciclado del N y mejorar la sincronización entre la disponibilidad de N en el suelo y la demanda por el cultivo. El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de diferentes fuentes de fertilización nitrogenada sobre los procesos del ciclado del N, la disponibilidad de N en el suelo y la acumulación de N por el cultivo de papa durante su desarrollo. Con este fin se cultivó papa de la variedad Granola, a 2960 msnm en los Andes de Venezuela, utilizando diferentes fuentes de suministro de N: fertilizante mineral, gallinazo (baja relación C/N, alta calidad) y cáscara de arroz o pargana (alta relación C/N, baja calidad). Se emplearon cuatro tratamientos de fertilización con un mismo nivel total de aplicación de N (250 kg N ha^{-1}): 1- FM: fertilizante mineral (250 kg N ha^{-1}); 2- G+F: gallinazo (150 kg N ha^{-1}) y fertilizante mineral (100 kg N ha^{-1}); 3- P+F: pargana (150 kg N ha^{-1}) y fertilizante mineral (100 kg N ha^{-1}) y 4- G+P+F: gallinazo (75 kg N ha^{-1}), pargana (75 kg N ha^{-1}) y fertilizante mineral (100 kg N ha^{-1}). El diseño experimental fue de bloques al azar con tres réplicas por tratamiento. En distintas etapas del desarrollo del cultivo se determinaron: la biomasa y la concentración de N en los órganos de las plantas; la concentración en el suelo (0-30 cm) de N mineral, N total extraíble (K_2SO_4 0.5M) y N en la biomasa microbiana así como el volumen y la concentración de N total del agua drenada de lisímetros. Se evaluaron los procesos de nitrificación, mineralización-inmovilización y lixiviación del N, así como también la dinámica de acumulación y demanda de N por el cultivo, la eficiencia en el uso del nitrógeno (NUE) y un índice de uso/lavado del nitrógeno (IULN). Las tasas de nitrificación resultaron elevadas y similares para todos los tratamientos, predominando el nitrato en el compartimento mineral del suelo. En todos los tratamientos predominó el proceso de organización frente al de mineralización. El gallinazo promovió mayor inmovilización temprana del N que la pargana. En la etapa inicial del cultivo, el lavado de N resultó mayor para el tratamiento P+F que para G+F y en la etapa final se invirtieron estos resultados. En la cosecha final las pérdidas por lavado representaron entre el 30 y 49 % del N suministrado, resultando menores para el tratamiento combinado G+P+F. Para el tratamiento P+F se encontró mayor acumulación de N por el cultivo, mayor rendimiento de tubérculos y mayor NUE, 50 %, debido a que promovió mayor desarrollo del sistema radicular y mejoró la accesibilidad de las plantas al N disponible en el suelo. Sin embargo, el IULN resultó mayor con el tratamiento G+P+F (1.5), que con P+F (1.3), G+F (0.8) y FM (0.8) indicando que el tratamiento combinado fue mejor desde una perspectiva ambiental. Estos resultados permiten concluir que mediante la selección adecuada de la calidad de las enmiendas orgánicas suministradas se puede mejorar la sincronización, tanto a escala temporal como también a escala espacial, entre la disponibilidad de N en el suelo y la demanda de N por el cultivo de papa, para aumentar el rendimiento de tubérculos y la eficiencia en el uso de N y controlar las pérdidas de nitrógeno en los agroecosistemas de los Andes venezolanos.

Palabras claves: eficiencia del uso del nitrógeno, papa, sincronización, disponibilidad, demanda, gallinazo, cáscara de arroz o pargana, Andes, Venezuela.

Introducción

La producción de papa en la región andina venezolana es de gran importancia, tanto en términos económicos como de superficie cultivada. Para tratar de aumentar la producción de tubérculos, los productores de papa han venido empleando grandes cantidades de fertilizantes nitrogenados, combinando fuentes minerales con la aplicación de enmiendas orgánicas, entre las cuales se destacan el gallinazo y la cáscara de arroz (pargana) por ser las más ampliamente utilizadas. En vista de esta situación, es de importancia prioritaria optimizar la eficiencia en el uso del nitrógeno, entendida ésta como la relación entre la cantidad de N utilizada por el cultivo y la cantidad de N aplicada, no sólo debido a la repercusión en los costos económicos de la producción de tubérculos, sino también a su costo ambiental (MacKerron et al., 1993; Jarvis 1996; Bowen y Baethgen, 1998), ya que el suministro excesivo de N generalmente conlleva pérdidas de este elemento hacia el ambiente, convirtiéndose en potencial fuente de contaminación hídrica y atmosférica (Laanbroek y Gerald, 1991; Grant, 1994; Vermoesen et al., 1996; Ünlü et al., 1999). Una de las alternativas planteadas para aumentar la eficiencia en el uso del N (Swift, 1984) es lograr la mejor sincronización entre la disponibilidad de N en el suelo y la demanda de N por el cultivo durante su desarrollo, que permita lograr una adecuada nutrición nitrogenada, que aumente los rendimientos del cultivo y al mismo tiempo que contribuya a disminuir las pérdidas gaseosas o por lavado. De acuerdo a Swift (1987), la sincronización podría lograrse seleccionando, en base a su calidad, las enmiendas orgánicas suministradas para así controlar la liberación de nutrientes de manera que coincida con los requerimientos del cultivo. Este planteamiento se basa en que un substrato orgánico de alta calidad (baja relación C/N) debería mineralizar rápidamente y causar una alta disponibilidad de N en el suelo, en la etapa inicial cuando la demanda del cultivo es baja, aumentando así el riesgo de pérdidas gaseosas o por lavado, mientras que un material de baja calidad (alta relación C/N), debería producir inmovilización temprana de N en la microbiota y luego mineralización en una etapa posterior, causando un posible déficit inicial y una disponibilidad tardía de N en el suelo (Swift, 1987; Myers et al., 1994). Estos autores plantean, hipotéticamente, que con el suministro combinado de substratos de alta y

baja calidad, se podrían controlar los procesos de mineralización e inmovilización del N para promover una mejor sincronización entre la disponibilidad y la demanda.

En base a las ideas antes expuestas, se propone como hipótesis, que en los cultivos de papa de la zona alta de los Andes venezolanos, mediante la selección adecuada de la cantidad y calidad de los fertilizantes minerales y enmiendas orgánicas suministrados, se podría mejorar la sincronización entre la disponibilidad de N en el suelo y la demanda de N por el cultivo, como una alternativa para aumentar la eficiencia en el uso del nitrógeno de manera de obtener altos rendimientos de cosecha con las menores pérdidas de N.

En vista que alcanzar una buena sincronización implica satisfacer los requerimientos de N del cultivo durante su desarrollo, entonces, es necesario cuantificar la dinámica de la demanda o absorción potencial de N por el cultivo a los fines de poder evaluar en que proporción se logra satisfacer bajo distintos tratamientos agronómicos.

En este sentido, Bowen y Baethgen (1998) puntualizan que la demanda de N por un cultivo depende de las condiciones climáticas del lugar. En el caso de la papa, Bowen et al. (1999) indican que el rendimiento potencial y por lo tanto la demanda de N, dependen de la interacción de los rasgos genéticos de la variedad cultivada con factores tales como fotoperíodo, radiación solar y temperatura, cuando no existan limitaciones en la disponibilidad de agua y nutrientes y en ausencia de plagas y enfermedades.

Esto significa que la dinámica de la demanda de N por el cultivo de papa no constituye un parámetro preestablecido ni fácilmente predeterminable, debido a la variación de los requerimientos de N en las distintas etapas fenológicas de cada variedad y a su interacción con los factores ambientales o “coordenadas ecológicas” del sitio. En vista de esta dificultad, en el presente trabajo se plantea la evaluación experimental de la demanda de N por el cultivo para las condiciones agroecológicas del área de estudio.

Por otra parte, aunque la cantidad de N disponible para las plantas puede ser evaluada en un momento dado, por ejemplo, midiendo la cantidad de N mineral en el suelo, sin embargo, estos valores instantáneos por si solos no permiten predecir la dinámica de este parámetro durante el desarrollo del cultivo bajo distintos tratamientos de fertilización, ya que la cantidad de N disponible es también el resultado de la interacción de numerosos procesos de transferencia del N entre los compartimentos del agroecosistema determinados a su vez por las condiciones ambientales. Según Myers et al. (1994), los procesos del

ciclado del N más importantes que condicionan la disponibilidad de N en el suelo y por lo tanto contribuyen con la sincronización son mineralización-inmovilización, nitrificación, desnitrificación, volatilización, lavado y absorción. Sin embargo, no se tiene el conocimiento suficiente de los efectos de las enmiendas orgánicas, gallinazo y pargana, sobre los procesos que regulan el ciclado de N en los agroecosistemas de los Andes venezolanos, ni sobre su interacción con los factores ambientales, que permita plantear prácticas de manejo tendientes a optimizar la eficiencia en el uso del N.

En base a estos planteamientos, el objetivo de este trabajo fue evaluar, en un agroecosistema de papa en los Andes venezolanos, el efecto del suministro de enmiendas orgánicas de calidad contrastante, gallinazo (baja relación C/N, alta calidad) y cáscara de arroz (alta relación C/N, baja calidad) combinadas con fertilizante mineral sobre los procesos del ciclado del N: mineralización, inmovilización, nitrificación, acumulación por las plantas y lixiviación y sobre la dinámica de la disponibilidad de N en el suelo y la acumulación de N por las plantas durante su desarrollo, en relación con la demanda de N del cultivo.

Metodología

Ubicación del experimento de campo

El experimento de campo se realizó en una finca productora de papas ubicada en la localidad de Mistique (8° 46' N, 70° 54' W) en el estado Mérida, Venezuela, a una altitud de 2960 msnm, con precipitación promedio anual de 640 mm, evaporación en tina promedio anual de 1416 mm y temperatura media anual de 11.1 °C. En esta finca, y en la zona circundante, se cultiva papa en rotación con hortalizas con alto empleo de insumos. El terreno utilizado tiene pendientes entre 20 y 30 % y se localiza sobre un abanico aluvial situado en el fondo del valle del río Chama. De acuerdo al sistema taxonómico de los EEUU (Soil Survey Staff, 1992), el suelo es un *Antropic Ustumbrept*, de textura franca a franca-arenosa, con un contenido de materia orgánica de 4.6 a 5.8 % y pH entre 6.5 y 6.9 en el horizonte de 0-30 cm.

Tratamientos y diseño experimental

Se suministraron cuatro tratamientos (Tabla 1) con distintas fuentes de fertilización nitrogenada e igual cantidad de N total aplicada (250 kg ha^{-1}): 1- fertilizante mineral (FM); 2- gallinazo y fertilizante mineral (G+F); 3- pargana y fertilizante mineral (P+F) y 4- gallinazo, pargana y fertilizante mineral (G+P+F). Estas fuentes de fertilización se escogieron por ser de las más utilizadas por los agricultores de la zona y por la calidad contrastante, alta y baja, de las enmiendas orgánicas, gallinazo y pargana, respectivamente. Una parte del fertilizante mineral se aplicó en forma de fosfato diamónico, con el objeto de suministrar $100 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ para garantizar el suministro de fósforo de acuerdo a las recomendaciones de Méndez (1999); además en todos los tratamientos se incluyó el suministro de sulfato de potasio, a razón de $200 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}$ para cubrir las necesidades de potasio del cultivo (Tabla 1).

El diseño experimental fue de bloques al azar, con tres réplicas para cada uno de los cuatro tratamientos. Los bloques se ubicaron en la dirección de la pendiente. Cada una de las réplicas se localizó en una parcela con un área de 61.2 m^2 ($8.5 \text{ m} \times 7.2 \text{ m}$), dentro de la cual se delimitó un área efectiva de muestreo de 25.2 m^2 y la diferencia como bordes externos. La densidad de plantas fue de $4.44 \text{ plantas m}^{-2}$ sembradas a 0.25 m de separación en hileras separadas 0.9 m y orientadas perpendicularmente a la pendiente.

Tabla 1. Cantidad de materia fresca de las fuentes utilizadas en cada tratamiento y cantidad de N aportado por cada fuente para un total de 250 kg N ha^{-1} en cada tratamiento.

Tratamiento	Cantidad de materia fresca de las fuentes				Cantidad de N aportado por las fuentes				
	Gallinazo	Pargana	Fosfato diamónico	Sulfato amonio	Gallinazo	Pargana	Fosfato diamónico	Sulfato amonio	Total
	Mg ha^{-1}		kg ha^{-1}		kg N ha^{-1}				
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

Prácticas agronómicas

En el terreno utilizado el cultivo anterior fue de hortalizas. Fue preparado con arado de disco y desterronado con escardilla un mes antes de la siembra. Los tratamientos de fertilización fueron aplicados al voleo antes de la siembra, utilizando una retícula de nylon para lograr una distribución homogénea, posteriormente fueron mezclados con el suelo en una capa de aproximadamente 12 cm de espesor. La semilla de papa certificada, de la variedad Granola (producida en Alemania) calibre 35 a 55 mm y peso fresco promedio de 50 g tub^{-1} , se sembró el 18/07/2001 a una profundidad aproximada de 7 cm. El control de plagas se realizó utilizando las prácticas agrícolas normalmente empleadas en la zona: control de malezas químico preemergente y mecánico manual postemergente; control químico preventivo de insectos y nemátodos en la siembra y sintomático de insectos durante el cultivo y control químico preventivo y sintomático de *Phytophthora infestans*. Se realizó un aporque a los 65 días después de la siembra. Durante el cultivo se realizaron 4 aplicaciones de microelementos por aspersión foliar y se realizaron 17 riegos por aspersión con una lámina promedio de 10 mm cada uno.

Mediciones

Características edáficas iniciales

Después de delimitados los bloques y las parcelas en el área experimental, se determinó en campo la densidad aparente (g cm^{-3}) de la fracción de suelo $< 4 \text{ mm}$ y la proporción suelo-piedra a tres profundidades (0-10; 10-20 y 20-30 cm), en cada uno de los bloques del área experimental, por método gravimétrico-volumétrico. Se escogió un tamiz de 4 mm con el objeto de obtener datos del contenido de N en el suelo por unidad de superficie de terreno, mas ajustados a la realidad, ya que se trata de suelos con alto contenido de piedras.

Antes de aplicar los tratamientos de fertilización se tomaron, en cada uno de los bloques del área experimental, tres muestras de suelo (0-30 cm) compuestas cada una de 12 puntos seleccionados al azar. Se determinaron las cantidades de nitrógeno en forma de amonio, nitrato, total extraíble y en la biomasa microbiana, siguiendo la metodología que

se describe en la siguiente sección. Además, en el Laboratorio de suelos, Instituto de Geografía y Conservación de los Recursos Naturales Renovables, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Universidad de los Andes, se determinaron los siguientes parámetros: retención de humedad a 1/3 y 15 bar por método de olla y plato de presión (Klute, 1986); pH por potenciometría (IGCA, 1978); C orgánico por método de Walkley-Black (IGCA, 1978); N total por método de Kjeldahl (Bremner y Mulvaney, 1982); P disponible (extracción por el método Bray I) por determinación colorimétrica a 660 nm (ICA, 1989); Ca, Mg, K y Na disponibles (extracción con acetato de amonio 1N y pH 7) por espectrofotometría de absorción atómica (IGCA, 1978); CIC por extracción con acetato de amonio 1N a pH 7 (IGCA, 1978); textura (Bouyoucos, 1962).

Nitrógeno en el suelo

Las cantidades de nitrógeno en forma de amonio, nitrato, total extraíble y biomasa microbiana, fueron determinados, en cada parcela, en muestreos realizados a los 1, 12, 24, 34, 44, 70, 91 y 117 días después de la siembra. Para ello, se tomó, en cada parcela, una muestra compuesta de 16 puntos seleccionados, entre las plantas que serían muestreadas (4 puntos en las hileras y 4 puntos a cada 15, 30 y 45 cm de las hileras) y hasta una profundidad equivalente a 30 cm respecto a la superficie original del suelo (35 cm en los camellones y 25 cm en los surcos). Las muestras se conservaron en recipientes cerrados a 4°C hasta el día siguiente, en que fueron homogenizadas y tamizadas a 4 mm y fue determinado su contenido relativo de humedad (CRH), por triplicado por método gravimétrico. En cada muestra se determinó el contenido de N mineral (N-NH_4^+ , N-NO_3^-) y N en la biomasa microbiana, por triplicado. Para lo cual, del suelo fresco previamente tamizado y conservado a 4°C, se pesó una cantidad equivalente a 50 g de suelo seco, por réplica. El N en la biomasa microbiana fue determinado por el método de fumigación-extracción (Brookes et al., 1985), mediante la determinación de N total extraíble en suelo fumigado durante 18 h (Chaussod et al., 1988) con cloroformo libre de alcohol y en suelo no fumigado. La extracción de estas muestras de suelo, así como aquellas para la determinación de N mineral, se realizó con 150 ml de solución 0.5 M de K_2SO_4 , agitación durante 30 minutos, centrifugación a 6000 rpm durante 15 minutos y filtración. Todos los extractos fueron congelados para su posterior análisis. A los extractos de suelos, fumigados

y no fumigados, se les determinó la concentración de N total por el método de digestión-destilación Kjeldahl (Bremmen y Mulvaney, 1982). Para el N mineral se determinó el contenido de N-NH_4^+ por destilación, previa adición de MgO , y luego el contenido de N-NO_3^- , utilizando aleación Devarda para reducir los nitratos a amonio (Rojas y Castillo, 1989).

Biomasa del cultivo y concentración de nitrógeno.

Para determinar la biomasa del cultivo y la concentración de N en base a materia seca (MS) en los distintos órganos de la planta se realizaron 5 muestreos correspondientes a las etapas: 1- entre la emergencia y el inicio de la tuberización; 2- inicio de la tuberización; 3- final de la expansión foliar; 4- senescencia; y 5- madurez del tubérculo (cosecha final), efectuados los días 34, 44, 70, 91 y 117, respectivamente. Para ello, se cosecharon 8 plantas por parcela en cada muestreo, excepto en la cosecha final. Se excavó el suelo alrededor de cada planta, correspondiente a una distancia de 12.5 cm desde el centro de la planta hacia cada lado en la hilera y a una distancia de 30 cm desde el centro de la planta hacia cada lado entre las hileras, hasta una profundidad de 30 cm desde el tope del camellón, y se extrajeron y lavaron los tubérculos y las raíces, de las cuales se tomaron sólo las blancas y marrón claro. Cada planta fue separada en sus distintos órganos: hojas, tallos, tubérculos y raíces. En la cosecha final se tomaron 10 plantas en cada una de cuatro hileras, para un total de 40 plantas por parcela. Se separaron los órganos: hojas, tallos y tubérculos y además la necromasa de las 40 plantas cosechadas, pero reuniéndolos por cada hilera. Se tomaron y separaron las raíces de 4 plantas de la manera descrita anteriormente. El material fue secado a 50 °C hasta peso constante y pesado. Para determinar el contenido de N se mezcló el material vegetal, por órgano, de los individuos colectados en cada parcela y se molió a 1 mm. Se determinó la concentración de N total, por triplicado en cada muestra, por el método de Kjeldahl (Bradstreet, 1965; AOAC, 1990).

Drenaje y N lixiviado

Para determinar la lámina de agua drenada y la cantidad de N lixiviado se instalaron dos lisímetros en cada una de las parcelas, localizados en las hileras de siembra. Estos lisímetros consistieron en cilindros metálicos, con un área de 0.225 m^{-2} (correspondiente a

la densidad de siembra), abiertos a la atmósfera, cerrados en el fondo y conectados cada uno a un recipiente colector. Fueron llenados con una columna de 30 cm de suelo, de manera de tener la misma densidad aparente y proporción suelo-piedra, correspondiente al suelo de cada parcela. En cada uno se sembró una semilla. El volumen de agua drenada se midió semanalmente y se tomaron muestras de 500 ml en cada lisímetro, las cuales fueron congeladas para su análisis posterior. Para cada lisímetro, se realizaron determinaciones de N total por el método de Kjeldahl a muestras compuestas, correspondientes a las fechas de los muestreos de suelo y de biomasa vegetal. Estas muestras compuestas fueron constituidas ponderando los volúmenes de agua drenada medidos semanalmente.

Demanda de nitrógeno por el cultivo

La demanda potencial de N por el cultivo, en las condiciones ambientales en que se realizó el experimento, se estimó a los 33, 69, 89 y 119 DDS a partir de las cantidades de N acumulado, determinadas en plantas de papa cultivadas (8 por cada muestreo), con los tratamientos P+F y G+P+F, en canteros localizados al lado de las parcelas (Capítulo 6). Se justifica esta manera de determinar la demanda potencial del cultivo, en vista de que los datos obtenidos experimentalmente deben representar valores más ajustados a las condiciones agroecológicas presentes que valores calculados teóricamente. En este sentido, se aprovechó que este experimento presentó rendimientos mucho mayores y por ende más cercanos al rendimiento potencial, resultando el peso de materia fresca de tubérculos de las plantas utilizadas entre 8 y 9 kg m⁻² en la cosecha final, que equivaldría a un rendimiento entre 80 y 90 Mg ha⁻¹. Estos valores se sitúan aproximadamente en la mitad del rango de los valores calculados (45 a 140 Mg ha⁻¹) como rendimiento potencial en distintas partes del mundo y representan valores cercanos al calculado (100 Mg ha⁻¹) para el rendimiento potencial del cultivo de papa en Holanda (Beukema et al., 2004). Estos rendimientos altos encontrados en las plantas cultivadas en canteros se atribuyen a una mayor accesibilidad a los nutrientes del suelo debida a la distribución espacial de las plantas, aún cuando la densidad de siembra y la dosis de fertilización fueron equivalentes a las empleadas en el experimento en parcelas.

Procesamiento de los datos

Nitrificación

El proceso de nitrificación se cuantificó, tomando en cuenta los procesos de mineralización-inmovilización, por medio de la ecuación (Kandeler, 1996):

$$\% N = 100 * (N-NO_3^-_{t2} - N-NO_3^-_{t1}) / [N-NH_4^+_{t1} + (Nmin_{t2} - Nmin_{t1})] \quad (1)$$

donde: % N es la nitrificación porcentual durante un intervalo de tiempo (t2 - t1 días), es decir, la proporción de N-NH₄⁺ que se transforma en N-NO₃⁻; N-NO₃⁻_{t2} y N-NO₃⁻_{t1} son las cantidades de N en forma de nitrato + nitrito a los t2 días y a los t1 días de la siembra respectivamente; N-NH₄⁺_{t1} es la cantidad de N en forma de amonio a los t1 días; Nmin_{t2} y Nmin_{t1} son las cantidades de N mineral (N-NO₃⁻ + N-NH₄⁺) a los t2 días y t1 días respectivamente. Las cantidades de N se expresan en mg N kg⁻¹ de suelo seco.

Cantidad de N en la biomasa microbiana

La cantidad de N en la biomasa microbiana se calculó como (Brookes et al., 1985):

$$NBM = (N \text{ fumigado} - N \text{ control}) / k_{EN} \quad (2)$$

donde: NBM es el contenido de N en la biomasa microbiana (mg N kg⁻¹); N fumigado y N control son los contenidos de N total (mg N kg⁻¹) en los extractos de suelo fumigado y no fumigado respectivamente; y k_{EN} es el factor correspondiente al método de fumigación-extracción para la determinación de N. Se utilizó k_{EN} = 0.54 (Brookes et al., 1985; Joergensen y Muller, 1996).

Tasas de acumulación y demanda de N

A los fines de evaluar la dinámica de la acumulación de N en cada uno de los tratamientos y la dinámica de la demanda de N por el cultivo, los datos experimentales de las cantidades de N acumulado en la biomasa total, en cada uno de los tratamientos, y de las plantas en canteros en los distintas fechas de muestreo respectivamente, se ajustaron a funciones matemáticas de Richards (Hunt, 1982):

$$N = a (1 \pm e^{(b - ct)})^{-1/d} \quad (3)$$

donde: N es la cantidad de N acumulada por el cultivo (g m^{-2}), t es el tiempo transcurrido después de la siembra (DDS) y a, b, c y d son los coeficientes numéricos que se determinan por ajuste iterativo. Siendo su derivada:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{ace^{(b-ct)}}{d} \cdot (1 \pm e^{(b-ct)})^{-(1/d+1)} \quad (4)$$

Con las funciones así obtenidas, se calcularon las tasas diarias de acumulación y demanda de N por el cultivo ($\text{g N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$), y se graficaron en función del tiempo transcurrido (Hunt, 1982).

Eficiencia en el uso del nitrógeno

La eficiencia en el uso del nitrógeno (NUE) se calculó como la relación porcentual entre la cantidad de N acumulada por el cultivo en la cosecha final en cada parcela y la cantidad de N total suministrada con la fertilización (25 g N m^{-2}).

A los fines de comparar los distintos tratamientos de fertilización utilizados, tomando en cuenta, simultáneamente, su efecto sobre el uso del N por el cultivo y sobre las pérdidas de N por lixiviación, en el presente trabajo se propone la utilización de un coeficiente, calculado como la relación entre las cantidades acumuladas hasta la cosecha final de N en el cultivo y de N lixiviado, el cual se denominó índice de uso/lavado del nitrógeno (IULN).

Análisis estadístico

Previa comprobación de la homogeneidad de las varianzas y de una baja correlación entre las medias y la desviación normal, el análisis de los datos se realizó con el procedimiento clásico ANOVA, sin transformar los datos, utilizando como factor el tratamiento de fertilización y tomando en cuenta el efecto de bloque. Las diferencias entre las medias de las distintas variables analizadas se evaluaron utilizando el “test de Tukey, HSD”. En los resultados y discusión se indica el nivel de significancia utilizado en cada caso.

Resultados

Características del suelo

Para el suelo del área experimental, a la profundidad entre 0 y 30 cm, la densidad aparente promedio de la fracción de suelo < 4 mm resultó 1.245 g cm^{-3} . Dicha fracción representa el 81% en peso del suelo con piedras (partículas > 4 mm) y estas últimas ocupan en promedio el 10% del volumen total.

En la tabla 2 se presentan las características del suelo (0-30 cm de profundidad) de cada bloque. Se puede observar que los parámetros edáficos de los bloques 1 y 2 no presentaron diferencias significativas entre si, mientras que el bloque 3 resultó con contenido mayor de arcilla y menor de limo, así como contenido menor de C orgánico, N total, P y K disponibles.

El alto contenido de N total extraíble y de N-NO_3^- así como la baja relación C/N sugieren que estos suelos poseen importantes cantidades de nitrógeno en un compartimento relativamente lábil, que pudiera estar disponible para las plantas y la microbiota. También se puede observar que el contenido de P disponible es muy alto. Estos resultados pueden ser reflejo de suministros de grandes cantidades de gallinazo y fertilizantes minerales NPK, realizados en numerosos ciclos de cultivo anteriores. Es notable también en este suelo el alto contenido de Ca, lo cual se debe posiblemente a la gran cantidad de cal agrícola que han venido aplicando los productores del área para neutralizar los suelos. En este sentido si se compara el alto valor del contenido de Ca con el valor moderado de la CIC los resultados indican que se trata de un suelo saturado en iones Ca^{++} .

Tabla 2. Características principales del suelo (0-30 cm) del área experimental. Los tres valores de cada parámetro corresponden a las medias de cada uno de los bloques. Los valores entre paréntesis corresponden a la desviación normal. Letras distintas indican diferencias significativas entre las medias de los bloques ($n=3$, Tukey HSD, $P<0.05$)

Bloque	Textura (%)			% retención H ₂ O		pH 1:1 (H ₂ O)	C.O. g kg ⁻¹
	arena	Arcilla	limo	1/3 atm	15 atm		
1	49 (1)	17 (1) b	34 (1) a	22.2 (0.4)	12.6 (0.6)	6.8 (0.1)	32.6 (1.3) a
2	49 (3)	17 (1) b	34 (3) a	23.2 (1.0)	13.3 (0.9)	6.7 (0.1)	33.8 (1.3) a
3	50 (1)	23 (2) a	27 (2) b	22.6 (1.0)	12.7 (0.3)	6.7 (0.1)	28.7 (1.5) b
	Nt G kg ⁻¹	C/N	Nextraíble mg kg ⁻¹	N-NH ₄ ⁺ mg kg ⁻¹	N-NO ₃ ⁻ mg kg ⁻¹	N-BM Mg kg ⁻¹	
1	2.6 (0.1) a	12.7 (0.7) b	164 (13)	1.7 (0.4)	32 (5)	24 (4)	
2	2.5 (0.2) a	12.8 (0.9) b	158 (12)	1.0 (0.3)	26 (4)	26 (5)	
3	1.9 (0.1) b	14.8 (0.2) a	150 (11)	1.0 (0.4)	33 (5)	19 (4)	
	P disponible Mg kg ⁻¹	Ca meq /100 g	Mg meq /100 g	K meq /100 g	Na meq /100 g	CIC meq /100 g	CE μS cm ⁻¹
1	610 (50) a	30 (2) a	3.2 (0.3)	2.1 (0.1) a	0.04 (0.01)	16.5 (1.0)	1.0 (0.2) a
2	570 (50) a	29 (4) ab	3.6 (0.4)	2.2 (0.2) a	0.04 (0.01)	17.1 (3.0)	0.8 (0.1) ab
3	370 (50) b	23 (3) b	3.0 (0.5)	1.4 (0.3) b	0.04 (0.01)	16.0 (1.0)	0.5 (0.2) b

Nitrógeno en el suelo

N mineral: amonio y nitrato

En la figura 1A se puede observar que la cantidad de N mineral presentó un descenso marcado entre el inicio y los 12 DDS en el tratamiento FM, mientras que en los tratamientos G+F, P+F y G+P+F se mantuvo en el mismo nivel. Entre los 12 y 24 DDS el contenido de N mineral en todos los tratamientos disminuyó notablemente y, luego, a partir de los 24 días hasta la cosecha final, presentó poca variación (Fig. 1A), aún cuando se observa un leve descenso hasta el día 70, a partir del cual ocurre un ligero aumento hasta la cosecha final. Las cantidades de N mineral en el suelo resultaron menores para el tratamiento P+F, respecto de los demás tratamientos, particularmente desde los 34 DDS hasta la cosecha final.

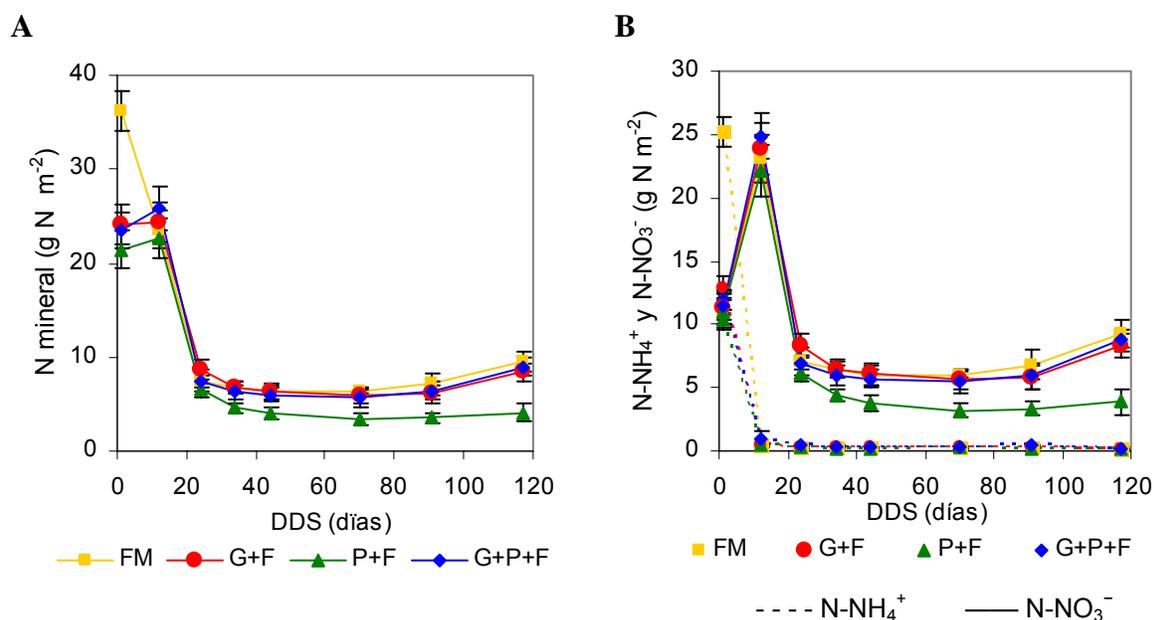


Figura 1. Curso con los días transcurridos después de la siembra (DDS) de las cantidades de N en el suelo (g N m^{-2}): **A.** Mineral total. **B.** En forma de amonio (N-NH_4^+) y de nitrato+nitrito (N-NO_3^-). Las barras representan los valores de la desviación normal ($n=3$).

En la figura 1B se puede observar que entre el inicio y los 12 DDS, en todos los tratamientos, el N-NH_4^+ disminuyó marcadamente, mientras que el N-NO_3^- aumentó en una cantidad similar. En este sentido, en la tabla 3 se puede observar que, para todos los

tratamientos, la cantidad relativa de N en forma de nitratos (% de $\text{N-NO}_3^- + \text{N-NO}_2^-$) respecto al N mineral) aumentó entre el inicio y los 12 días. Desde esta última fecha hasta la cosecha final, estas cantidades representaron entre el 93 y 98% del nitrógeno mineral, considerando todos los tratamientos y sin diferencias significativas entre estos. También se puede observar que los porcentajes de nitrificación calculados (Ec. 1) entre el inicio y los 12 días resultaron de 94 a 96% y entre los 12 y 24 días resultaron de 102 %. Estos valores mayores a 100 % se deben al error en la determinación de concentraciones de $\text{N-NH}_4^+ < 1.0 \text{ mg kg}^{-1}$ a los 24 días.

Tabla 3. Relación porcentual de las concentraciones (g m^{-2}) de N-NO_3^- y N-mineral a determinados días (d) después de la siembra y porcentaje de nitrificación calculado (Ec. 4, cap. 2) desde el inicio hasta los 12 días (0-12 d) y desde los 12 hasta los 24 días (12-24 d), para los distintos tratamientos.

Trat.	N- NO_3^- / N-mineral (%)								Nitrificación (%) N- $\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{N-NO}_3^-$	
	1 d	12 d	24 d	34 d	44 d	70 d	91 d	117 d	0-12 d	12-24 d
FM	30	98	95	95	95	96	96	98	96	102
G+F	47	98	96	96	96	95	96	98	96	102
P+F	51	98	95	96	95	94	94	95	96	102
G+P+F	49	96	94	94	95	93	93	98	94	102

N total extraíble.

En la figura 2A se puede observar que las cantidades de N total extraíble (orgánico + mineral), en todos los tratamientos, variaron poco entre el inicio y la fecha de la emergencia (24 DDS), a partir de la cual disminuyeron gradualmente hasta la cosecha final, resultando en este lapso mayores para los tratamientos FM y G+F, seguidas por las del tratamiento G+P+F y menores para el tratamiento P+F.

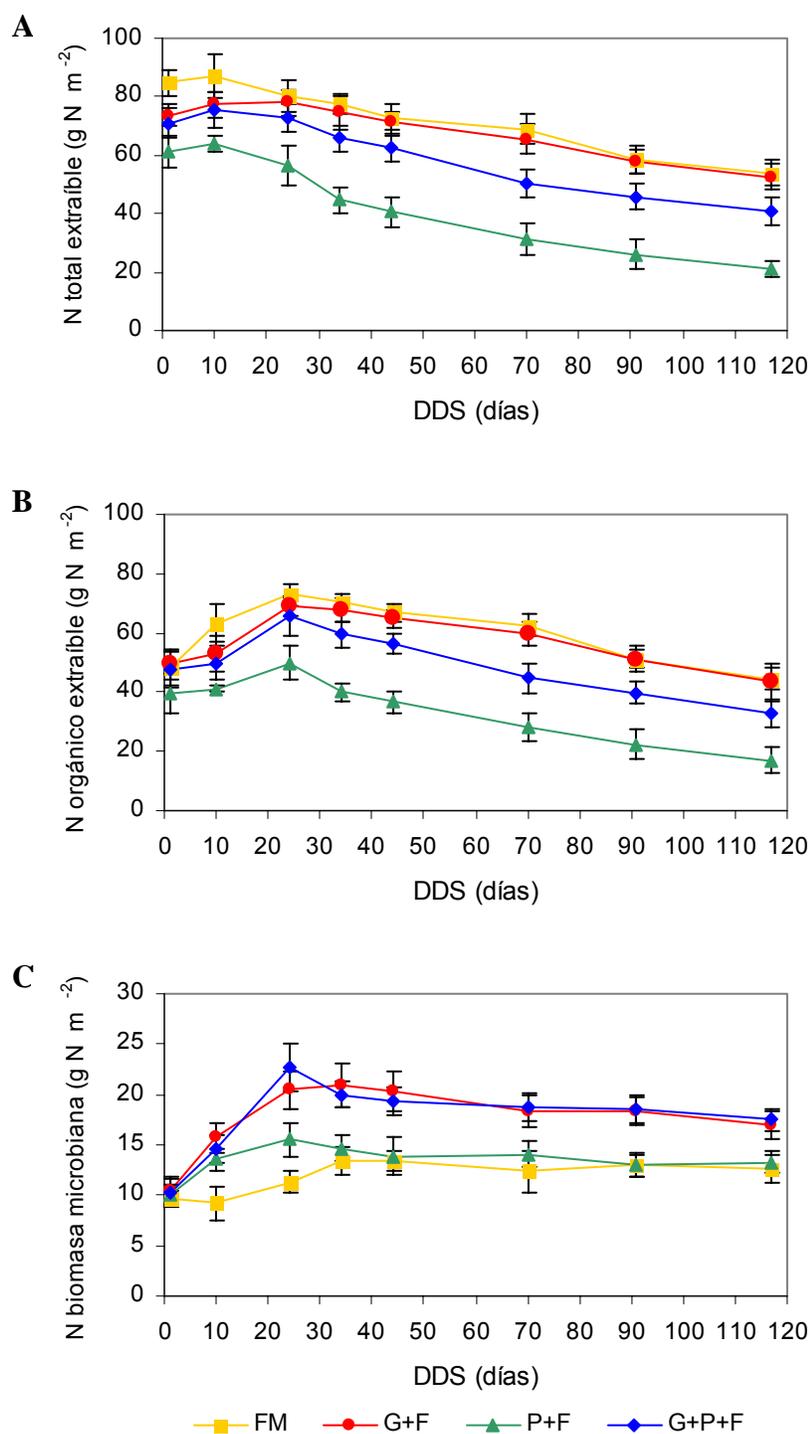


Figura 2. Curso con los días transcurridos después de la siembra (DDS) de las cantidades de N en el suelo (g N m⁻²): **A.** Total extraíble. **B.** Orgánico extraíble. **C.** En la biomasa microbiana; para cada tratamiento. Las barras representan los valores de la desviación normal (n=3).

En la tabla 4 se observa que las cantidades de N mineral representaron entre el 33 y el 43% del N total extraíble (mineral + orgánico) en el momento de la siembra, en cambio desde los 24 DDS hasta la cosecha final el porcentaje de N mineral se mantuvo entre 9 y 21% para todos los tratamientos, lo cual significa que el N orgánico extraíble, calculado como la diferencia entre el N total extraíble y el N mineral (Zhong y Makeschin, 2003), representó en esta etapa la mayor parte del N total extraíble (entre el 79 y 91 %). En la figura 2B se puede observar que, para todos los tratamientos, el N orgánico extraíble tendió a aumentar entre el inicio y los 24 DDS, mientras en este mismo período, como se indicó antes, el N mineral disminuyó (Fig. 1A). Con respecto al N total del suelo, las cantidades de N orgánico extraíble se situaron en un rango entre 2 y 9 %.

Tabla 4. Relación (%) de las concentraciones (mg kg^{-1}) de N mineral y N total extraíble a determinados días (d) del inicio de la incubación para los distintos tratamientos.

Trat.	N mineral / N total extraíble (%)							
	0 d	12 d	24 d	34 d	44 d	70 d	91 d	117 d
FM	43	27	9	9	9	9	12	17
G+F	33	31	11	9	9	9	11	17
P+F	35	35	11	10	10	11	14	17
G+P+F	33	34	10	10	10	11	13	21

N en la biomasa microbiana.

En la figura 2C se observa que las cantidades determinadas de N en la biomasa microbiana (Ec. 2) en el tratamiento FM variaron poco durante el período de cultivo; sin embargo, se puede observar una tendencia al aumento en la primera etapa. En cambio, en los otros tratamientos se observó un marcado aumento de la cantidad de N en la biomasa microbiana hasta los 24 DDS, siendo $G+F$ y $G+P+F > P+F > FM$, y luego los valores presentaron poca variación hasta el final de la incubación. Con respecto al N total del suelo, las cantidades de N en la biomasa microbiana se situaron en un rango entre 1.0% y 2.4%.

En la tabla 5 se presentan las variaciones (Δ) desde la siembra hasta la cosecha, de la cantidad de N mineral, N total extraíble y N en la biomasa microbiana, para cada tratamiento. Se puede observar que con el tratamiento FM el N mineral disminuyó más que con los otros tratamientos, mientras que con el tratamiento G+F, el N total extraíble disminuyó menos y, además, se observa que los tratamientos con gallinazo G+F y G+P+F presentaron mayor incremento del N en la biomasa microbiana que los tratamientos FM y P+F.

Tabla 5. Variación (Δ) entre la siembra y la cosecha en las cantidades de N total extraíble, N mineral y N en la biomasa microbiana. Cantidades de N en el cultivo y de N lixiviado, acumuladas entre la siembra y la cosecha. Eficiencia en el uso del nitrógeno (NUE). Índice de uso y lavado del nitrógeno (IULN). Rendimiento de tubérculos en materia fresca, para cada uno de los tratamientos. Los valores entre paréntesis corresponden a la desviación normal. Letras distintas indican diferencias significativas entre las medias de los tratamientos ($n=3$, Tukey HSD, $P<0.05$).

Parámetros	Tratamientos			
	FM	G+F	P+F	G+P+F
Δ N mineral en suelo (g N m ⁻²)	- 27 (3) a	- 15 (3) b	- 17 (3) b	- 15 (3) b
Δ N total extraíble (g N m ⁻²)	- 31 (5) a b	- 21 (4) b	- 39 (3) a	- 30 (5) a b
Δ N biomasa microbiana (g N m ⁻²)	2.9 (1.3) b	6.5 (1.3) a	3.3 (1.1) b	7.3 (1.1) a
N acumulado en cultivo (g N m ⁻²)	9.7 (0.1) c	9.9 (0.1) c	12.4 (0.2) a	11.0 (0.2) b
N lixiviado acumulado (g N m ⁻²)	12.2 (1.2) a	12.2 (1.2) a	9.9 (0.8) b	7.5 (0.9) c
NUE (%)	38.7 (0.3) c	39.4 (0.3) c	49.5 (0.7) a	44.1 (0.8) b
IULN	0.80 (0.05) c	0.82 (0.08) c	1.25 (0.04) b	1.48 (0.11) a
Rendimiento tubérculos Materia fresca (Mg ha ⁻¹)	26.2 (0.7) c	27.9 (1.7) c	38.9 (1.2) a	33.4 (0.6) b

N acumulado por el cultivo

En la figura 3A se puede observar que, para todos los tratamientos, la cantidad de N acumulado por el cultivo hasta la fecha de inicio de la tuberización (44 DDS) fue similar a la demanda potencial del cultivo. Entre los 70 DDS y la cosecha final las cantidades de N acumuladas presentaron diferencias entre los tratamientos (Capítulo 3), resultando menores que la demanda potencial acumulada (Fig. 3A). En la cosecha final las cantidades de N acumuladas por el cultivo fueron 12.4, 11.0, 9.9 y 9.7 g N m⁻² para los tratamientos P+F, G+P+F, G+F y FM, respectivamente (Tabla 5), que representan valores de 45.2, 40.3, 36.0 y 35.4 % de la demanda potencial de N del cultivo hasta la cosecha final.

En la figura 3B se puede observar que, para todos los tratamientos, las tasas diarias de acumulación de N (g N m⁻² d⁻¹) fueron similares a la correspondiente demanda diaria potencial de N por el cultivo (g N m⁻² d⁻¹) hasta los 44 DDS, a partir del cual las tasas diarias de acumulación de N resultaron menores que la demanda diaria del cultivo.

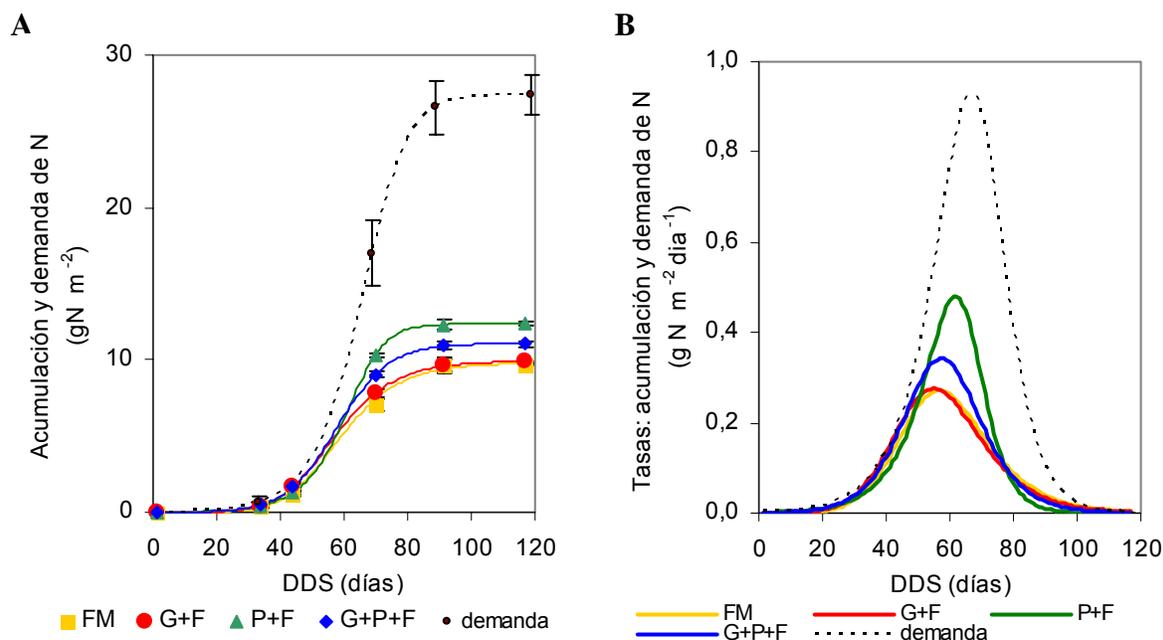


Figura 3. Curso con los días transcurridos después de la siembra (DDS) de: **A.** Cantidad de N acumulado en el cultivo para cada uno de los tratamientos y de la demanda de N por el cultivo (g N m⁻²). Las barras representan los valores de la desviación normal (n=3, para acumulación y n=8 para demanda). Las curvas corresponden a las funciones ajustadas (Ec. 3). **B.** Tasas diarias de acumulación de N en el cultivo para cada uno de los tratamientos y tasa diaria de demanda de N por el cultivo (g N m⁻² d⁻¹), calculadas (Ec. 4).

Se observa que las tasas máximas de acumulación presentaron el mismo orden encontrado para las cantidades de N acumulado, rendimiento de tubérculos, IAF máximo y duración del área foliar, $P+F > G+P+F > G+F$ y FM, (Capítulo 3), resultando menores al 52 % de la demanda diaria máxima del cultivo. Estos resultados indican que, si bien existió un efecto de los tratamientos sobre las cantidades de N acumuladas por el cultivo, en ninguno de ellos fue cubierta la demanda potencial de N.

La eficiencia en el uso del nitrógeno (NUE) en la cosecha final resultó diferente entre los tratamientos, siendo el orden encontrado $P+F > G+P+F > G+F$ y FM (Tabla 5).

Drenaje y N lixiviado

En la figura 4A se observa que el tratamiento P+F presentó mayor lámina de agua drenada acumulada (mm) que los otros tratamientos, principalmente en las primeras etapas de desarrollo del cultivo. El drenaje total acumulado resultó de 32.3, 29.3, 27.6 y 19.8 mm para los tratamientos P+F, G+F, FM y G+P+F respectivamente, los cuales representan, en términos relativos a la lámina total acumulada (425.2 mm) que ingresó por riego (176.6 mm) y precipitación (248.6 mm), valores de 7.6, 6.9, 6.5 y 4.6 %, respectivamente.

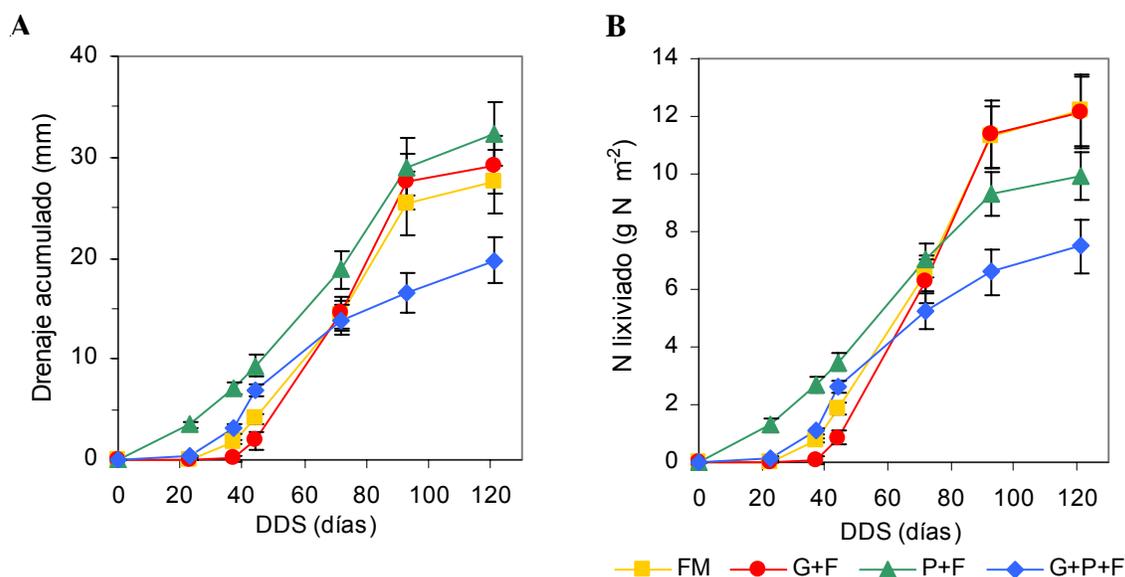


Figura 4. Curso con los días transcurridos después de la siembra (DDS) de: **A.** Cantidad de agua drenada (mm). **B.** Cantidad de N lixiviada (g N m^{-2}); para cada uno de los tratamientos. Las barras representan los valores de la desviación normal ($n=3$).

En la figura 4B se observa que en la primera etapa del cultivo las cantidades acumuladas de N lixiviado resultaron mayores para el tratamiento P+F que para los demás. Sin embargo, hasta la cosecha final la cantidad acumulada de N lixiviado resultó para los tratamientos FM y G+F > P+F > G+P+F, siendo los valores 12.2, 12.2, 9.9 y 7.5 g N m⁻² respectivamente, los cuales constituyen pérdidas elevadas que representaron el 48.8, 48.6, 39.7 y 30.0 %, respectivamente en relación a la cantidad de N suministrada (25 g m⁻²).

El IULN en la cosecha final presentó diferencias significativas entre los tratamientos ($P<0.05$), resultando 1.48, 1.25, 0.82 y 0.80 para los tratamientos G+P+F, P+F, G+F y FM respectivamente (Tabla 5).

Disponibilidad, acumulación y demanda de N

En la figura 5A se observa que, considerando todos los tratamientos, la cantidad de N total extraíble presente en el suelo durante todo el ciclo del cultivo resultó más de 25 veces mayor que la demanda diaria de N por el cultivo.

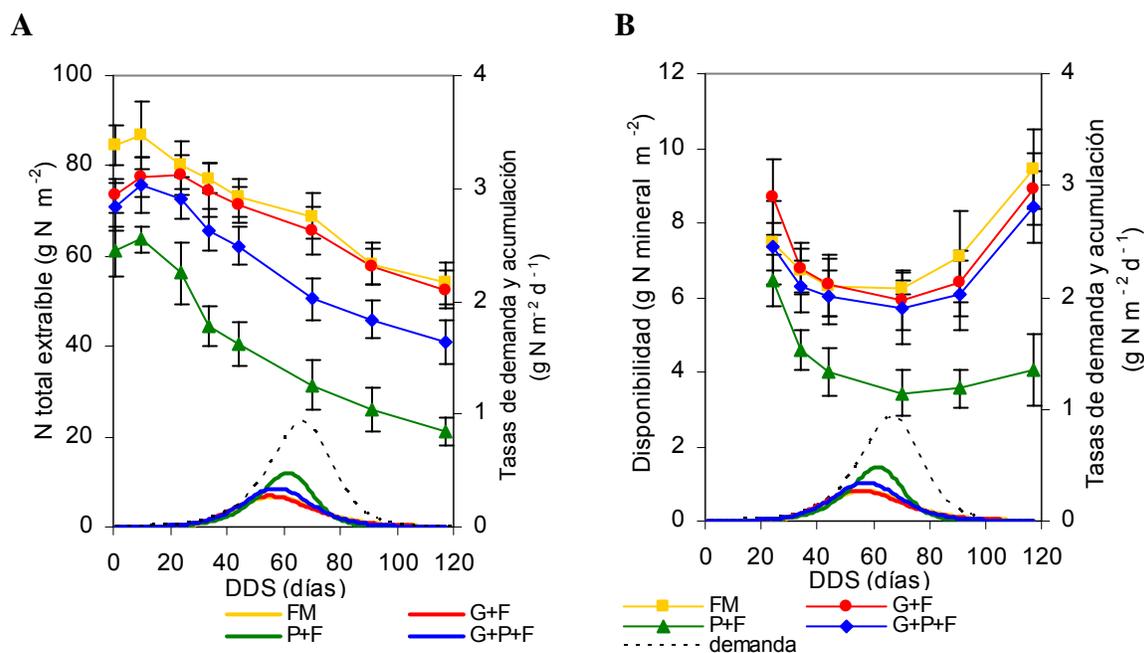


Figura 5. Curso con los días transcurridos después de la siembra (DDS) de: **A.** Cantidad de N total extraíble en el suelo (g N m⁻²) en eje Y principal, tasas de demanda y acumulación de N en el cultivo (g N m⁻² d⁻¹) en eje Y secundario. **B.** Disponibilidad de N mineral en el suelo (g N m⁻²) en eje Y principal, tasas de demanda y acumulación de N en el cultivo en eje Y secundario. Las barras representan los valores de la desviación normal (n=3).

Así mismo, en la figura 5B se observa que la cantidad de N disponible en el suelo en forma de N mineral, durante todo el ciclo del cultivo, resultó más de 3 veces la demanda diaria de N por el cultivo. Además, la disponibilidad de N mineral en el suelo resultó menor para el tratamiento P+F que para los demás tratamientos tanto en la primera etapa de desarrollo del cultivo, cuando la demanda y la acumulación de N fueron bajas, como también en las etapas siguientes en que estas últimas aumentaron, mientras que el mismo tratamiento P+F presentó tanto tasas máximas de acumulación de N mayores (Fig. 3B), como también mayores cantidades de N acumuladas que los demás tratamientos (Fig. 3A).

En este sentido, en la figura 6A se puede observar que las cantidades de N acumuladas en el cultivo durante su desarrollo, particularmente hasta los 70, 91 y 117 DDS, tendieron a correlacionarse negativamente con las cantidades de N mineral disponible en el suelo en esas fechas. En cambio, en la figura 6B se puede observar que las cantidades de N acumuladas en el cultivo presentaron en estas mismas fechas una correlación alta con la biomasa de raíces, resultando que a mayor biomasa de raíces mayor cantidad de N acumulado, siendo el orden de los tratamientos para estos dos parámetros en la etapa final del cultivo $P+F > G+P+F > G+F$ y FM.

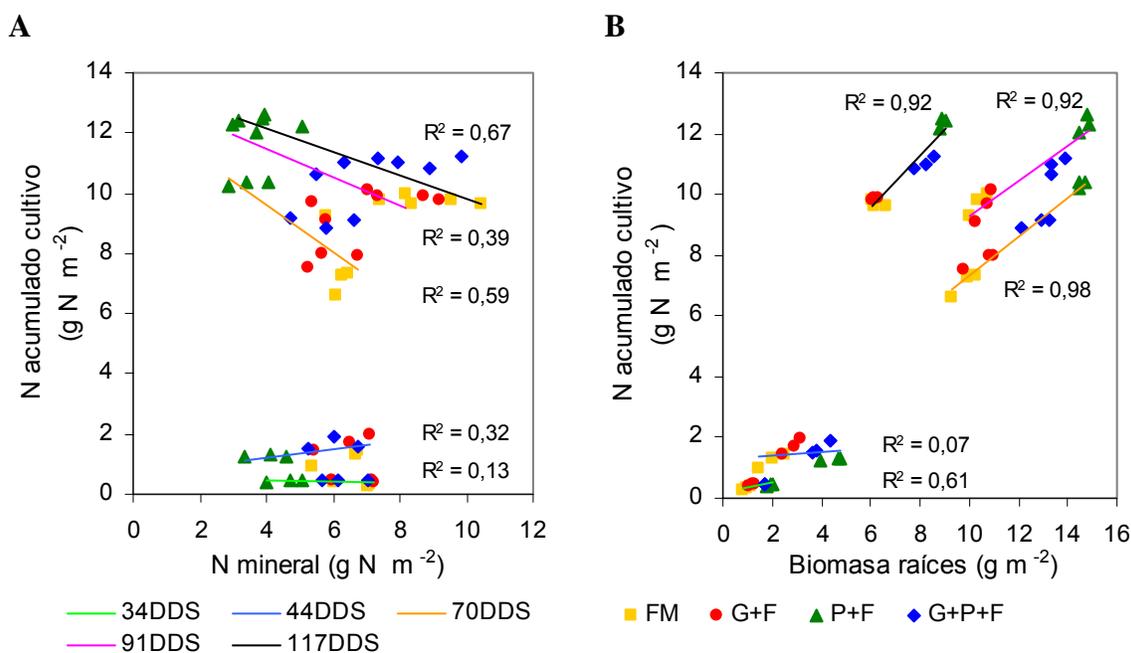


Figura 6. Regresión lineal de la cantidad de N acumulado en el cultivo (g N m^{-2}) respecto: **A.** Cantidad de N mineral disponible en el suelo (g N m^{-2}). **B.** Biomasa de raíces (g m^{-2}) para cada uno de los muestreos efectuados en los días (DDS) indicados.

Discusión y Conclusiones

Procesos del ciclado del nitrógeno

Nitrificación

Los resultados encontrados en el presente trabajo coinciden con los resultados obtenidos en el experimento de incubación en el laboratorio (Capítulo 2), en el sentido de que este suelo posee un alto potencial de nitrificación, que se traduce en la práctica en una transformación rápida a nitrato, del amonio que ingresa a la solución del suelo, bien sea de manera directa con el suministro de fertilizantes minerales amoniacales y gallinazo o de manera indirecta como producto de la amonificación de los residuos orgánicos y de la materia orgánica del suelo. En este sentido, Nishio y Fujimoto (1990) encuentran en sus experimentos que la nitrificación se convierte en el proceso más activo en el suelo cuando se aplican fertilizantes nitrogenados; Laanbroek y Gerards (1991) concluyen que la nitrificación es estimulada por el uso de estiércol orgánico, presumiblemente por el aumento en la mineralización del amonio que no es inmediatamente consumido por el cultivo o inmovilizado por la microflora heterótrofa del suelo y Rasmussen (1998) en experimentos establecidos en suelos agrícolas de Oregon, USA, con distintos manejos, con 30 a 60 años de duración, de rotación de cultivos, arado y suministro de fertilizantes y residuos orgánicos encuentran que las concentraciones de N-NH_4^+ resultaron menores a 1 mg kg^{-1} y, por lo tanto, considera el $\text{N mineral} = \text{N-NO}_3^-$.

Estos resultados evidencian que este suelo reúne condiciones óptimas para el crecimiento de las bacterias nitrificantes, debido a que posee valores de pH cercanos a la neutralidad (Paul y Clark, 1989), y una textura franco arenosa que unida a la práctica del arado favorece las condiciones aeróbicas (Hatch et al., 1998). Ahora bien, el hecho de que la mayor parte del N mineral del suelo se encontró en forma de nitrato, en lugar de amonio, y dada la textura franca a franco-arenosa de estos suelos, aumentan el riesgo de pérdida de N por lixiviación, debido a que el ión nitrato presenta más movilidad que el amonio en la solución del suelo (Paul y Clark, 1989; Ünlü et al., 1999) y, por lo tanto, contribuyen a disminuir la disponibilidad de N para el cultivo. Estos resultados sugieren que para estos suelos, el suministro de N en forma amoniacal en lugar de N en forma de nitrato, no pareciera representar una ventaja práctica para disminuir las pérdidas de N por lixiviación.

Mineralización, “organización” e inmovilización del N

El hecho de que entre el inicio y los 24 DDS, para todos los tratamientos, el N orgánico extraíble tendió a aumentar, mientras en este mismo período el N mineral disminuyó, y que además, desde los 24 DDS hasta 91 DDS, el N mineral representó una fracción relativamente baja (< 16%) del N total extraíble, coincide con las tendencias observadas en el experimento de incubación en el laboratorio (Capítulo 2), en el sentido de que en este suelo el N mineral suministrado tiende a transformarse en N orgánico “soluble” (extraíble con solución 0.5 M de K_2SO_4). Se plantea, entonces, que en las condiciones en que fue realizado el experimento, para todos los tratamientos, predominó la “organización” frente a la “mineralización” (N mineral $\leftarrow\rightleftharpoons\rightarrow$ N orgánico extraíble). El hecho que el proceso de “organización” es notable en la primera etapa del cultivo, cuando también se observa un aumento en el N en la biomasa microbiana, sugiere que ese proceso de organización está estrechamente relacionado con la actividad microbiana (Friedel et al., 2001; Zhong y Makeschin, 2003).

Los resultados de las cantidades de N en la biomasa microbiana indican que el suministro de las enmiendas orgánicas, gallinazo o pargana y de estos dos substratos combinados, promovió mayor inmovilización de N respecto al tratamiento FM durante los primeros 24 DDS. El hecho de que con el tratamiento FM se observó un ligero aumento del N en la biomasa microbiana durante los primeros 34 DDS difiere de los resultados obtenidos en la incubación (Capítulo 2), donde no se observó este efecto, lo cual podría atribuirse a la presencia en el suelo del experimento de campo de residuos vegetales, dejados por el cultivo anterior de hortalizas, que constituyeron una fuente tanto de energía como de C asimilable para la microbiota y que promovieron la inmovilización de N, procedente tanto del fertilizante mineral como de los mencionados residuos (Myers et al., 1994). Además, el que se haya encontrado mayor inmovilización de N para los tratamientos con gallinazo, G+F y G+P+F, con respecto al tratamiento P+F, refuerza el planteamiento realizado en el Capítulo 2, en el sentido de que el gallinazo contiene compuestos orgánicos fácilmente degradables y asimilables por microorganismos de baja relación C/N y que constituyen una fuente tanto de energía como de C asimilable que permiten un rápido incremento de la biomasa microbiana y, por lo tanto, de la demanda de N por la microbiota, el cual es incorporado en su biomasa (inmovilizado) no sólo desde el substrato sino también

desde el suelo, donde en este caso se encuentra disponible tanto en forma mineral (amonio y nitratos) como en forma de N orgánico extraíble (Hadas et al., 1992; Mary et al., 1996). Por otra parte, en ninguno de los tratamientos se observó una marcada disminución del N en la biomasa microbiana en la etapa final del cultivo; sin embargo, se observó un ligero incremento de la cantidad de N mineral en la etapa final del cultivo que pudiera estar asociado a un incipiente proceso de remineralización.

En resumen, los resultados confirman que la dinámica de la disponibilidad de N mineral en el suelo durante el ciclo del cultivo depende de la calidad de los substratos a través de los procesos de mineralización-inmovilización, los cuales son modulados por la acción de la microbiota (Myers et al., 1994). Sin embargo, contrariamente a lo esperado de acuerdo a la relación C/N baja del gallinazo, este substrato promovió mayor inmovilización temprana del N que la pargana (alta relación C/N) y, en este sentido, el suministro de gallinazo contribuyó a proteger más al N mineral del riesgo de ser lixiviado en la primera etapa de desarrollo del cultivo, en la cual la demanda por el cultivo es baja.

Drenaje y lixiviación del N

Los resultados indican que la lámina de agua que ingresó por riego + precipitación fue adecuada a los requerimientos hídricos del cultivo puesto que, aún cuando ocurrió drenaje, el mismo resultó bajo en todos los tratamientos tanto en términos absolutos como relativos a la lámina ingresada. Sin embargo, las cantidades de N lixiviadas resultaron elevadas, tanto en términos absolutos como relativos a la cantidad de N suministrado en los tratamientos, debido a las altas concentraciones de N encontradas en el agua de drenaje, las cuales no son de extrañar si consideramos que en el suelo se encontraron altos contenidos de N total extraíble que incluyen compuestos solubles de N (minerales y orgánicos).

Si comparamos los resultados acumulados de lámina de drenaje (entre 19.8 y 32.3 mm) y cantidad de N lixiviado (entre 7.5 y 12.2 g N m⁻²) obtenidos en el presente trabajo, en un agroecosistema intensivo, con los encontrados en condiciones de mayor precipitación en un agroecosistema papero tradicional de secano en el páramo de Gavidia, Edo. Mérida, por Abreu (2004): 408 mm y 5.3 g N m⁻² respectivamente y por Sarmiento (1995): entre 427 y 484 mm y entre 0.3 y 4.3 g N m⁻² respectivamente, se puede observar que en el

agroecosistema intensivo (este trabajo), si bien las láminas drenadas fueron entre 13 y 24 veces menores que en el agroecosistema tradicional, en cambio las pérdidas por drenaje fueron entre 1.4 y 40 veces mayores que en el tradicional. Estos resultados son indicativos de las altas pérdidas de N por lavado en estos agroecosistemas intensivos y del riesgo de que puedan ocurrir pérdidas aún mayores, en casos de riego excesivo o de eventos de alta precipitación. En este sentido, vale la pena destacar que, durante la realización del presente experimento, se controló cuidadosamente la lámina de riego aplicada y, por otra parte, durante todo el cultivo solamente se presentó un evento de lluvia (31 mm d^{-1}) que puede ser considerado como de alta precipitación en la zona, el cual ocurrió antes de la emergencia, cuando todavía no se había suministrado riego y el suelo se encontraba relativamente seco y, por lo tanto, no causó drenaje inmediato.

Por otra parte, desde el punto de vista de las distintas enmiendas utilizadas, los resultados sugieren que, aún cuando la pargana pareciera favorecer el drenaje y contribuir a que ocurran mayores pérdidas de N por lixiviación en la etapa inicial del cultivo, sin embargo, en etapas posteriores causó menores pérdidas por lixiviación que los tratamientos con gallinazo y fertilizante mineral, posiblemente debido a que la pargana promovió mayor acumulación de N en el cultivo y menor concentración de N total extraíble en el suelo.

Disponibilidad, acumulación y demanda

Los resultados encontrados indican que la calidad de los substratos suministrados afectó los procesos de mineralización-inmovilización, lixiviación y acumulación de N, que determinan la dinámica de la disponibilidad de N mineral en el suelo.

Por otra parte, el hecho de que en todos los tratamientos las cantidades de N mineral presentes en el suelo durante todo el ciclo del cultivo resultaron más de tres veces la demanda diaria de N por el cultivo y el que, en todos los tratamientos, a partir de los 44 DDS las tasas de acumulación de N fueron menores que la demanda diaria por el cultivo, son importantes ya que indican que la disponibilidad de N mineral en el suelo no resultó limitante durante todo el ciclo del cultivo para ninguno de los tratamientos y, sin embargo, la demanda potencial no pudo ser satisfecha desde el inicio de la tuberización (44 DDS) hasta la cosecha final. Si consideramos, además, que las cantidades de N acumuladas en el

cultivo tendieron a correlacionarse negativamente con las cantidades de N mineral disponible en el suelo y, en cambio, aumentaron con el incremento de la biomasa de raíces, estos resultados son de particular relevancia, ya que sugieren que, para todos los tratamientos, aún cuando aparentemente existió suficiente disponibilidad de N mineral en el suelo en relación con la demanda durante todo el ciclo del cultivo, es decir a escala temporal, sin embargo, las raíces de las plantas de papa pudieron acceder y absorber solamente una parte (N accesible) de ese N disponible, la cual resultó insuficiente para satisfacer la demanda.

En vista de que tanto Lesczynski y Tanner (1976), como también Opena y Porter (1999), encontraron que para el cultivo de papa la densidad del largo de raíces (RLD) aumentó junto con la biomasa de raíces y, además, que Vos y Groenwold (1986) encontraron que el largo específico (largo por unidad de peso seco) de las raíces de papa resultó prácticamente constante en el tiempo y con la profundidad del suelo y que la distribución de los diámetros de las raíces, en experimentos con la misma variedad en contenedores grandes o en potes, era similar a la encontrada por Lesczynski y Tanner (1976), entonces podemos suponer que en el presente experimento, mientras mayor fue la biomasa de raíces mayor fue la densidad del largo de raíces y la superficie radical y, por lo tanto, mayor fue la accesibilidad de las raíces al N mineral disponible en el suelo, es decir, mayor fue la disponibilidad a escala espacial. Así, los tratamientos con suministro de pargana P+F y G+P+F, que estimularon mayor biomasa de raíces durante el desarrollo del cultivo, promovieron mayor accesibilidad al N disponible en el suelo, mayor acumulación de nitrógeno por el cultivo y, por lo tanto, permitieron cubrir la demanda en mayor proporción que los tratamientos G+F y FM.

El aumento en la biomasa de raíces por el suministro de pargana podría deberse a que, al existir menor disponibilidad de N en los tratamientos P+F y G+P+F, el cultivo respondió incrementando la producción de raíces para satisfacer la demanda del cultivo y evitar el déficit (Vos, 1995), o a que la biomasa de raíces aumentó como consecuencia de algún otro factor, como podría ser la disminución de la resistencia física del suelo a la penetración de las raíces debido a un aumento en el espacio poroso (Barber, 1984; Vos y Groenwold, 1986), o una combinación de ambos factores. Por otra parte, la absorción del nitrato por las raíces del cultivo depende de la interacción compleja de numerosos factores,

entre los cuales caben destacar en este caso: la disponibilidad de agua en el suelo y la demanda transpirativa del cultivo, que determinan el transporte de nutrientes por flujo de masa y la velocidad de difusión de solutos (De Willigen et al., 1995; Buysse et al., 1996); la concentración de nitrato en el suelo (Schenk, 1996); la distribución de las plantas en el terreno; la estructura de los camellones y surcos; la distribución de las raíces (De Willigen et al., 1995) y la heterogeneidad del suelo derivada del suministro de fertilizantes minerales y residuos orgánicos diferentes (Van Vuuren, 1996; Fitter et al., 2000).

En conclusión, en el presente trabajo se plantea que la calidad de los substratos suministrados no solamente controla la disponibilidad temporal de N mineral en el suelo por su efecto sobre los procesos de mineralización-inmovilización y lixiviación, sino también condiciona la disponibilidad espacial del N a través del efecto de estas enmiendas sobre el desarrollo del sistema radicular, el cual determina la accesibilidad de las plantas al N mineral disponible en el suelo y, por lo tanto, la absorción y acumulación de N por el cultivo.

Sincronización de la disponibilidad y la demanda de N

En el programa Tropical Soil Biology and Fertility, TSBF (Swift, 1987) el término sincronización, en su concepción mas amplia, se refiere a la concurrencia de la disponibilidad y la demanda de nutrientes en el tiempo y en el espacio (Myers et. al, 1994). Entre los distintos aspectos incluidos en la “escala espacial” de la sincronización destacan el espaciamiento entre las plantas cultivadas y la ubicación de los residuos, ya sea en la superficie o enterrados, debido a que estos factores determinan la localización de los nutrientes respecto a las raíces de las plantas (Myers et. al, 1994). En este sentido, en el presente trabajo los resultados indican que el suministro de un substrato de baja calidad, como la pargana, promovió el desarrollo radicular de las plantas de papa y, por lo tanto, mayor accesibilidad al N disponible en el suelo, mayor acumulación de N por el cultivo y mejor satisfacción de la demanda, es decir, promovió la sincronización a escala espacial.

En base a las ideas de Swift (1984, 1987) y Myers et al. (1994), en el presente trabajo se planteó combinar enmiendas orgánicas de distinta calidad con fertilizante mineral

para mejorar la sincronización entre la disponibilidad de N en el suelo y la demanda de N por el cultivo, como una alternativa para aumentar la eficiencia en el uso del nitrógeno en el agroecosistema, con el objetivo de obtener rendimientos altos de cosecha con las menores pérdidas de N. Desde esta perspectiva y tomando como referencia el tratamiento FM, en que todo el N fue suministrado en forma mineral, los resultados muestran que el suministro del substrato de alta calidad, gallinazo, con fertilizante mineral, no causó un aumento significativo en el rendimiento de cosecha, ni en el NUE ni tampoco disminuyó las pérdidas de N por lavado. En cambio, el suministro del substrato de baja calidad, pargana, con fertilizante mineral (P+F) o combinado con gallinazo y fertilizante mineral (G+P+F), sí causó un aumento respecto a FM y G+F en el rendimiento de tubérculos y en el NUE y, además, una reducción en las pérdidas de N por lavado. Comparando los dos tratamientos que contenían substrato de baja calidad, pargana, aún cuando el tratamiento P+F resultó mejor que el G+P+F, en términos de rendimiento de tubérculos y NUE, sin embargo, el tratamiento combinado G+P+F presentó menores pérdidas por lavado y mayor IULN, resultando entonces más ventajoso desde una perspectiva ambiental.

Por otra parte, los rendimientos de materia fresca de tubérculos obtenidos con los distintos tratamientos, entre 26.2 y 38.9 Mg ha⁻¹, resultaron mayores que los promedios encontrados, entre 12.3 y 17.9 Mg ha⁻¹, en el estado Mérida entre los años 1983 y 1994 (Gutiérrez et al., 1996).

Estos resultados permiten concluir que mediante la selección adecuada de la calidad de las enmiendas orgánicas suministradas se puede mejorar la sincronización, tanto a escala temporal como también a escala espacial, entre la disponibilidad de N en el suelo y la demanda de N por el cultivo de papa, para aumentar el rendimiento de tubérculos y la eficiencia en el uso de N y controlar las pérdidas de nitrógeno, en los agroecosistemas de los Andes venezolanos.

Recomendaciones

Aún cuando los resultados obtenidos en un experimento como este no son extrapolables directamente a cultivos de papa con condiciones agroecológicas distintas, sin embargo, estos resultados pueden servir como punto de partida para plantear nuevos experimentos en otros suelos de la zona andina. Por otra parte, el diseño de las parcelas, así como el diseño de muestreo empleado en la realización de este trabajo, se fundamentó en las recomendaciones del Proyecto “Internacional Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer” (IBSNAT, 1990), con el objeto de utilizar un diseño previamente probado y, además, de obtener datos que permitan, en una etapa posterior, calibrar y validar el modelo de simulación DSSAT-SUBSTOR-papa (Tsuji et al., 1994). Entonces, sería recomendable calibrar y validar este modelo con los datos de este trabajo, como punto de partida para utilizar el enfoque agroecosistémico, para tratar de optimizar las cantidades y proporciones de las distintas fuentes de fertilización aquí estudiadas. El empleo de este u otro modelo de simulación constituye una herramienta necesaria para explorar prácticas de manejo alternativas para la optimización de la fertilización nitrogenada en la región andina, ya que debería permitir reducir el número de experimentos que habría que hacer para cubrir la diversidad de condiciones agroecológicas de la zona.

Bibliografía

- Abreu Z., 2004. Aspectos del ciclado del nitrógeno en un sistema agrícola con descansos largos de los páramos venezolanos. Tesis de Magíster Scientiae, Postgrado en Ecología Tropical, Instituto de Ciencias Ambientales y Ecológicas, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela, 114 p.
- AOAC, 1990. Nitrogen (Total) (Crude Protein) in plants. Kjeldahl methods. En: K. Helrich (Ed.). Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists. Published by the AOAC Inc. Fifteen edition. Vol. I, p. 59.
- Barber S.A., 1984. Soil Nutrient Bioavailability. A Mechanistic Approach. John Wiley & Sons, Inc., USA, 398 p.
- Beukema H.P. Turkensteen L.J., Peeten J.M.G., 2004. Comparison potential yield and actual yield. En: NIVAP, HOLLAND.
<http://www.aardappelpagina.nl/explorer/pagina/pot1.htm>, Octubre 2004.
- Bouyoucos G.J., 1962. Hydrometer Method Improved for Making Particle Size Analyses of Soils. Agron. J. 54: 464-465.
- Bowen W.T., Baethgen W.E., 1998. Simulation for improving nitrogen management. En: G.Y. Tsuji, G. Hoogenboom, P.K. Thornton (Eds.). Understanding Options for Agricultural Production. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, pp. 189-204.
- Bowen W., Cabrera H., Barrera V., Baigorria G., 1999. Simulating the response of potato to applied nitrogen. En: CIP Program Report 1997-1998. International Potato Center. Lima, Perú, pp. 381-386.
- Bradstreet R.B., 1965. The Kjeldahl method for organic nitrogen. Academic Press Inc. New York, 239 p.
- Bremmen J.M., Mulvaney C.S., 1982. Nitrogen-total. In: A.L. Page, R.H. Miller, D.R. Keeney (Eds.). Methods of soil analysis. Part 2. 2nd Edition, Agronomy. 9: 595-624.
- Brookes P.C., Landman A., Pruden G., Jenkinson D.S., 1985. Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: a rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil. Soil Biol. Biochem. 1: 837-842.
- Buyse J., Smolders E., Merckx R., 1996. Modeling the uptake of nitrate by a growing plant with an adjustable root nitrate uptake capacity. Plant and Soil. 181: 19-23.
- Chaussod R., Houot S., Guiraud G., Hetier J.M., 1988. Size and turnover of the microbial biomass in agricultural soils: laboratory and field measurements. En: D.S. Jenkinson and

- K.A. Smith (Eds.). Nitrogen Efficiency in Agricultural Soils. Elsevier Applied Science, Amsterdam, pp. 312-326.
- De Willigen P., Heinen M., Van Den Broek B.J., 1995. Modeling water and nitrogen uptake of potato crop growing on a ridge. En: A.J. Haverkort, D.K.L. MacKerron (Eds.). Potato Ecology and Modeling of Crops under Conditions Limiting Growth. Kluwer Academic Publishers, pp. 75-88.
- Fitter A., Hodge A., Robinson D., 2000. Plant response to patchy soils. En: M.J. Hutchings, E.A. John, A.J.A. Stewart (Eds.). The Ecological Consequences of Environmental Heterogeneity. Blackwell Science Ltd. Cambridge, Great Britain, pp. 71-90.
- Friedel J.K., Gabel D., Stahr K., 2001. Nitrogen pools and turnover in arable soils under different durations of organic farming: II. Source-and-sink function of the soil microbial biomass or competition with growing plants? J. Plant Nutr. Soil Sci. 164: 421-429.
- Grant R.F., 1994. Simulation of Ecological Controls on Nitrification. Soil Biology & Biochemistry. 26, N° 3: 305-315.
- Gutiérrez A.A., García L.N., León R., 1996. Ajustes macroeconómicos y reconversión de la producción de papa en el estado Mérida. Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias Económicas y Sociales, CIAAL. Mérida, Venezuela. 33 p.
- Hatch D.J., Jarvis S.C., Parkinson R.J., 1998. Concurrent measurements of net mineralization, nitrification, denitrification and leaching from field incubated soil cores. Biol. Fertil Soils. 26: 323-330.
- Haverkort A.J., MacKerron D.K.L. (Eds.), 1995. Potato Ecology and Modeling of Crops under Conditions Limiting Growth. Kluwer Academic Publishers, 379p.
- Hunt R., 1982. Plant Growth Curves. The Functional Approach to Plant Growth Analysis. Edward Arnold (Publishers) Ltd., London, 226 p.
- IBSNAT, 1990. International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer (IBSNAT) Project. Technical Report 2, Field and Laboratory Methods for the Collection of the IBSNAT Minimum Data Set. Department of Agronomy and Soil Science, Hawaii Institute of Tropical Agriculture and Human Resources, University of Hawaii, 67 p.
- ICA, 1989. El Análisis de suelos, plantas y aguas para riego. Manual de Asistencia Técnica N° 47. Instituto Colombiano Agropecuario. Bogotá, pp. 42-56.
- IGAC, 1978. Métodos analíticos del laboratorio de suelos. Instituto Geográfico “Agustín Codazzi”. Ministerio de Hacienda y Crédito Público. Bogotá, Colombia, 663 p.
- Jarvis, S.C. 1996. Future trends in nitrogen research. Plant and Soil. 181: 47-56.

- Kandeler E., 1996. Nitrification during long-term incubation. En: F. Schinner, R. Öhlinger, E. Kandeler, R. Margesin (Eds.). *Methods in Soil Biology*. Springer. Germany, pp. 149-151.
- Joergensen R.G., Mueller T., 1996. The fumigation-extraction method to estimate soil microbial biomass: calibration of the k_{EN} value. *Soil Biol. Biochem.* 28: 33-37.
- Klute A., 1986. Water retention: Laboratory methods. En: Klute A. (Ed.), *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods*. Agronomy. 9: 635-662.
- Laanbroek H.J. y S. Gerards, (1991). Effects of organic manure on nitrification in arable soils. *Biology and Fertility of Soils.* 12: 147-153.
- Lemaire G., Gastal F., Salette J., 1989. Analysis of the effect of nutrition on dry matter yield of sward by reference to potential yield and optimum N content. *Proc. XVI Int. Grassland Congr.*, 4-11 Oct. 1989, Nice, pp. 179-180.
- Lesczynski D.B., Tanner C.B., 1976. Seasonal variation of root distribution of irrigated field grown Russet Burbank potato. *Am. Potato J.* 53: 69-78.
- MacKerron D.K.L., Young M.W., Davies H.V., 1993. A method to optimize N-application in relation to soil supply of N, and yield of potato. *Plant and Soil.* 155: 139-144.
- Méndez R.O., 1999. Fertilización en papa. En: Compendio del curso taller “Producción y certificación de semilla de papa”, Dic. 1999, Centro de Investigaciones Agropecuarias del Estado Mérida, Mucuchíes, Venezuela, pp. 11-21.
- Myers R.J.K., Palm C.A., Cuevas E., Gunatilleke I.U.N., Brossard M., 1994. The synchronization of nutrient demand. En: P.L. Woomer and M.J. Swift (Eds.). *The Biological Management of Tropical Soil Fertility*. John Wiley and Sons, Inc, pp. 81-116.
- Nishio T. y Fujimoto T., 1990. Kinetics of Nitrification of Various Amounts of Ammonium Added to Soils. *Soil Biology & Biochemistry.* 22, N° 1: 51-55.
- Opena, G.B., Porter G.A., 1999. Soil management and supplemental irrigation effects on potato: II. Root growth. *Agronomy Journal.* 91: 426-431.
- Paul E.A., Clark F.E., 1989. *Soil Microbiology and Biochemistry*. Academic Press, Inc. USA, 273 p.
- Rojas L.A., Castillo L.E., 1989. Determinación de amonio, nitratos y nitritos. En: Instituto Colombiano Agropecuario, ICA (Ed.). *El Análisis de Suelos, Plantas y Aguas para Riego. Manual de Asistencia Técnica N° 47*. Bogotá, pp. 27-40.
- Sarmiento L., 1995. Restauration de la fertilité dans un système agricole à jachère longue des hautes Andes du Venezuela. Docteur en Sciences Thèse. Université de Paris-Sud, Paris, 237 p.

- Schenk M.K., 1996. Regulation of nitrogen uptake on the whole plant level. *Plant and Soil*. 181: 131-137.
- Soil Survey Staff, 1992. *Keys to Soil Taxonomy*. 5th Edition. SMS Technical monograph N° 19. Blacksburg, Virginia, Pocahontas Press Inc. 556 p.
- Swift M.J. (Ed.), 1984. *Soil Biological Processes and Tropical Soil Fertility. A Proposal for Collaborative Programme of Research*. Biology International. Paris. Spec. Issue. 5: 1-37.
- Swift M.J. (Ed.), 1987. *Tropical Soil Biology and Fertility (TSBF)*. Inter-Regional Research Planning Workshop. Biology International. Paris. Special Issue. 13:28-34.
- Travasso M.I., Caldiz D.O., Saluzzo J.A., 1996. Yield prediction using the SUBSTOR-potato model under Argentinean conditions. *Potato Research* 39: 305-312.
- Tsuji G.Y., Uehara G., Balas S., (Eds.), 1994. *DSSAT v3*. University of Hawaii, Honolulu, Hawaii, USA.
- Ünlü K., Özenirler G., Yurteri C., 1999. Nitrogen fertilizer leaching from cropped and irrigated sandy soil in Central Turkey. *European Journal of Soil Science*. 50: 609-620.
- Van Vuuren M.M.I., Robinson D., Griffiths B.S., 1996. Nutrient inflow and root proliferation during the exploitation of a temporally and spatially discrete source of nitrogen in soil. *Plant and Soil*. 178: 185-192.
- Van Delden, A., 2001. *Yielding ability and weed suppression of potato and wheat under organic nitrogen management*. PhD Thesis. Wageningen University, The Netherlands, 197 p.
- Vermoesen A., Groot C., Nollet L., Boeck P., Van Cleemput O., 1996. Effect of ammonium and nitrate application on the NO and N₂O emission out of different soils. *Plant and Soil*. 181: 153-162.
- Vos J., 1995. Nitrogen and the growth of potato crops. En: A.J. Haverkort and D.K.L. MacKerron (Eds.). *Potato Ecology and Modeling of Crops under Conditions Limiting Growth*. Kluwer Academic Publishers, pp. 115-128.
- Vos J., Groenwold J., 1986. Root growth of potato crops on a marine-clay soil. *Plant and Soil*. 94: 17-33.
- Zhong Z., Makeshin F., 2003. Soluble organic nitrogen in temperate forest soils. *Soil Biol. Biochem.* 35: 333-338.

Capítulo 6

Balance de nitrógeno en un cultivo de papa fertilizado con distintas fuentes nitrogenadas.

Resumen

El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de diferentes fuentes de fertilización nitrogenada sobre el balance y los procesos de transferencia del N en el cultivo de papa. Con este fin se cultivaron plantas de papa de la variedad Granola en canteros de $0.225 \text{ m}^2 \text{ planta}^{-1}$ a cielo abierto a 2960 msnm en los Andes de Venezuela, utilizando diferentes fuentes de suministro de N: fertilizante mineral con $(^{15}\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ como trazador isotópico, gallinazo (baja relación C/N, alta calidad) y cáscara de arroz o pargana (alta relación C/N, baja calidad). Se emplearon cuatro tratamientos de fertilización con un mismo nivel total de aplicación de N (250 kg N ha^{-1}): 1- FM: fertilizante mineral (250 kg N ha^{-1}); 2- G+F: gallinazo (150 kg N ha^{-1}) y fertilizante mineral (100 kg N ha^{-1}); 3- P+F: pargana (150 kg N ha^{-1}) y fertilizante mineral (100 kg N ha^{-1}) y 4- G+P+F: gallinazo (75 kg N ha^{-1}), pargana (75 kg N ha^{-1}) y fertilizante mineral (100 kg N ha^{-1}). Se determinó la distribución del fertilizante mineral (%Nf) entre los distintos compartimientos del agroecosistema: suelo, planta y agua de drenaje, en distintas etapas del desarrollo de las plantas y se evaluaron los procesos de acumulación de N por las plantas, pérdidas por lixiviación y por vía gaseosa, así como los procesos de mineralización-inmovilización, nitrificación y organización del N en el suelo. Los tratamientos con pargana, P+F y G+P+F, presentaron mayor cantidad de N acumulada y rendimiento de tubérculos en la cosecha final, así como mayor biomasa de raíces y mayor relación de raíces a vástagos en la etapa inicial respecto a los tratamientos FM y G+F. Las cantidades de N total acumuladas resultaron altas, sin embargo, la mayor parte, entre 82 y 91 %, del N provino del suelo o de los substratos orgánicos añadidos. En todos los tratamientos la eficiencia en el uso del N del fertilizante mineral (%NUEf) resultó baja, entre 16 y 25 %, siendo menor en FM. Las pérdidas del N del fertilizante mineral ocurrieron principalmente en forma gaseosa en la primera etapa del cultivo, representando en la cosecha final valores altos para FM y P+F, 52 y 39 % respectivamente, mientras que en los tratamientos con gallinazo, G+F y G+P+F fueron de 12 y 13 % respectivamente. En los tratamientos con gallinazo se encontró mayor cantidad de N en la biomasa microbiana y como N total extraíble. El % Nf residual en el suelo en la cosecha final resultó alto para los tratamientos con gallinazo, G+F y G+P+F, 61 %, mientras que para los tratamientos FM y P+F fue de 25 y 26 % respectivamente, predominando las formas orgánicas en todos. Los resultados encontrados permiten concluir que el substrato de alta calidad, gallinazo, mejora la sincronización, a escala temporal, entre la disponibilidad de N en el suelo y la demanda de N por el cultivo de papa, debido a que promueve la rápida inmovilización y organización del N mineral disponible en el suelo, disminuyendo así el riesgo de pérdidas de N cuando la demanda por el cultivo es baja, mientras que el substrato de baja calidad, pargana, mejora la sincronización, a escala espacial, debido a que promueve el desarrollo radicular de las plantas y aumenta así la eficiencia en el uso del nitrógeno disponible en el suelo. El suministro combinado de gallinazo y pargana mejora la sincronización, tanto a escala temporal como espacial, contribuyendo así a la obtención de altos rendimientos de tubérculos con menores pérdidas de N y un mayor índice uso/pérdidas de nitrógeno.

Palabras claves: balance de nitrógeno, papa, sincronización, disponibilidad, eficiencia en el uso del nitrógeno, gallinazo, cáscara de arroz o pargana, Andes, Venezuela.

Introducción

Durante las últimas tres décadas los productores de papa de la región andina venezolana han venido empleando grandes cantidades de fertilizantes nitrogenados, combinando fertilizantes minerales con la aplicación de enmiendas orgánicas, entre las cuales se destacan el gallinazo y la cáscara de arroz (pargana) por ser las más ampliamente utilizadas (CORPOANDES, 1995).

Mundialmente se reconoce que el uso eficiente de los fertilizantes nitrogenados es esencial para la rentabilidad de los cultivos de papa y para minimizar los posibles efectos negativos sobre la calidad del agua y del aire (Bélanger et al., 2003) derivados del suministro excesivo de N que generalmente conlleva a pérdidas de este elemento hacia el ambiente, convirtiéndose en fuente potencial de contaminación hídrica y atmosférica (Grant, 1994; Vermoesen et al., 1996; Ünlü et al., 1999; Halitligil et al., 2002). En los Andes venezolanos existe poca información sobre la eficiencia en el uso del nitrógeno (NUE) en los cultivos de papa y sobre las pérdidas de N del agroecosistema. En el páramo de Gavidia, Mérida, en cultivos de papa realizados con bajos insumos y períodos de descanso del terreno, Sarmiento (1995) encontró una NUE menor a 20% con fertilización nitrogenada promedio de 288 kg N ha⁻¹, y Abreu (2004) obtuvo un valor de 23% con suministro de 288 kg N ha⁻¹ de fertilizante mineral amoniacal, encontrando que el 6 % del fertilizante aplicado se perdió por lixiviación mientras que el 32 % no fue recuperado en el sistema y posiblemente se perdió por otras vías. Mientras que para cultivos de papa en zona templada con diferentes dosis de aplicación de N se han encontrado valores de NUE proveniente del fertilizante mineral que oscilan entre 35 y 69 % (Maidl et al., 2002); 61 % (MacDonald et al., 1997) y 20 a 42 % (Halitligil et al., 2002) y valores de % de N mineral no recuperado que incluye pérdidas por lixiviación que oscilan entre 12 y 40 % (Maidl et al., 2002); 19 % (MacDonald et al., 1997) y 14 a 18 % (Halitligil et al., 2002).

Estos resultados y el hecho que muchos productores de papa de la zona andina suministran grandes cantidades de fertilizantes nitrogenados para tratar de aumentar y mantener los rendimientos de tubérculos, hace pensar que en general las NUE son bajas y/o las pérdidas de N son altas en estos agroecosistemas.

Se ha planteado hipotéticamente (Swift, 1984; Swift, 1987; Myers et al., 1994) que con el suministro combinado de substratos orgánicos de alta calidad (baja relación C/N) y baja calidad (alta relación C/N) se podrían regular los procesos de mineralización e inmovilización del N, de tal manera de mejorar la sincronización entre la disponibilidad de N en el suelo y la demanda de N por el cultivo, y así minimizar las pérdidas de N y aumentar los rendimientos de cosecha y la eficiencia en el uso del N. De acuerdo a estos planteamientos, los procesos del ciclo del N más importantes involucrados en la sincronización y que condicionan la disponibilidad de N en el suelo y el balance de N en el agroecosistema son: mineralización-inmovilización, nitrificación, desnitrificación, volatilización, lixiviación y absorción (Myers et al., 1994).

En base a las ideas antes expuestas, en el presente trabajo se plantea que en los cultivos de papa de la zona alta de los Andes venezolanos, mediante la selección adecuada de la cantidad y calidad de los fertilizantes minerales y enmiendas orgánicas suministrados, se podría aumentar la eficiencia en el uso del nitrógeno suministrado y al mismo tiempo obtener rendimientos altos de cosecha con pérdidas bajas de N. Sin embargo, no se tiene el conocimiento suficiente de los efectos de las enmiendas orgánicas más utilizadas, gallinazo y pargana, sobre los procesos que regulan el balance de N, ni sobre su interacción con los factores ambientales en los agroecosistemas de los Andes venezolanos, que permitan a priori plantear prácticas de manejo tendientes a optimizar la eficiencia en el uso del N, aumentar los rendimientos y disminuir las pérdidas.

El objetivo de este trabajo fue evaluar, en un agroecosistema de papa en los Andes venezolanos, el efecto del suministro de enmiendas orgánicas de calidad contrastante, gallinazo y cáscara de arroz, combinadas con fertilizante mineral, sobre el balance de N en el agroecosistema. Con esta finalidad se cultivaron en campo plantas de papa en canteros con distintos tratamientos de fertilización: mineral sola y mineral + orgánica, suministrando $(^{15}\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ como trazador isotópico, el cual permitió distinguir el N proveniente del fertilizante mineral del N proveniente de otras fuentes (substratos orgánicos + N del suelo). Se determinó la distribución del fertilizante mineral entre los distintos compartimientos del agroecosistema: suelo, planta y agua de drenaje, en distintas etapas del desarrollo de las plantas. Además se evaluaron los procesos de acumulación de N por las plantas, pérdidas

por lixiviación y por vía gaseosa, así como los procesos de mineralización-inmovilización, nitrificación y organización del N en el suelo.

Metodología

Ubicación del experimento de campo

El experimento de campo se realizó en una finca productora de papas ubicada en la localidad de Misteque (8° 46' N, 70° 54' W) en el estado Mérida, Venezuela, a una altitud de 2960 msnm, con precipitación promedio anual de 640 mm, evaporación en tina promedio anual de 1416 mm y temperatura media anual de 11.1 °C. En esta finca, y en la zona circundante, se cultiva papa en rotación con hortalizas con alto empleo de insumos. El terreno utilizado tiene pendientes entre 20 y 30 % y se localiza sobre un abanico situado en el fondo del valle del río Chama. De acuerdo al sistema taxonómico de los EEUU (Soil Survey Staff, 1992), el suelo es un *Antropic Ustumbrept*, de textura franca a franca-arenosa, con un contenido de materia orgánica de 4.6 a 5.8 % y pH entre 6.3 y 6.9 en la capa arable de 0-30 cm.

Diseño experimental y tratamientos

Se suministraron cuatro tratamientos (Tabla 1) con distintas fuentes de fertilización nitrogenada e igual cantidad de N total aplicada (25.0 g m^{-2}): 1- fertilizante mineral (FM); 2- gallinazo y fertilizante mineral (G+F); 3- pargana y fertilizante mineral (P+F) y 4- gallinazo, pargana y fertilizante mineral (G+P+F). Una parte del fertilizante mineral nitrogenado se aplicó en forma de $(^{15}\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ con una abundancia isotópica (%A) de 10 % átomo ^{15}N . La otra parte del fertilizante mineral nitrogenado se aplicó en forma de fosfato diamónico, con el objeto de suministrar $10.0 \text{ g P}_2\text{O}_5 \text{ m}^{-2}$ para garantizar el suministro de fósforo de acuerdo a las recomendaciones de Méndez (1999). El exceso isotópico (%E) calculado (Guiraud, 1984) en el fertilizante mineral resultó 8.165 % para FM y 5.965 % para los otros tratamientos. Además en todos los tratamientos se incluyó el suministro de sulfato de potasio, a razón de $20.0 \text{ g K}_2\text{O m}^{-2}$ para cubrir las necesidades de potasio del cultivo (Tabla 1).

La semilla de papa fue sembrada en canteros de 8.5 m x 0.48 m para cada tratamiento, contruidos con láminas metálicas enterradas hasta 0.3 m de profundidad para evitar el intercambio de N entre las plantas de distintos tratamientos y 0.1 m sobre la superficie del suelo para evitar la escorrentía superficial. Dentro de cada cantero se sembraron 17 semillas a una distancia de 0.475 m para obtener la misma densidad de siembra, 4.44 plantas m^{-2} , que en el experimento en parcelas (Capítulo 5).

Tabla 1. Cantidad de materia fresca de las fuentes utilizadas en cada tratamiento y cantidad de N aportado por cada fuente para un total de 25.0 g N m^{-2} en cada tratamiento. Sulfato amonio = $(^{15}NH_4)_2SO_4$.

Trata- miento	Cantidad de materia fresca de las fuentes				Cantidad de N aportado por las fuentes				
	Gallinazo	Pargana	Fosfato diamónico	Sulfato amonio	Gallinazo	Pargana	Fosfato diamónico	Sulfato amonio	Total
	g m^{-2}		g m^{-2}		g N m^{-2}				
FM	0	0	23.8	101.0	0	0	3.8	21.2	25.0
G+F	554	0	23.8	29.5	15.0	0	3.8	6.2	25.0
P+F	0	3049	23.8	29.5	0	15.0	3.8	6.2	25.0
G+P+F	277	1524	23.8	29.5	7.5	7.5	3.8	6.2	25.0

Prácticas agronómicas

En el terreno utilizado el cultivo anterior fue de hortalizas. Fue preparado con arado de disco y desterronado con escardilla antes de construir los canteros. Los tratamientos de fertilización fueron aplicados antes de la siembra en el área correspondiente a cada planta (0.48 m x 0.48m) en una capa de suelo de aproximadamente 10 cm de profundidad. La semilla de papa certificada, de la variedad Granola (producida en Alemania) calibre 35 a 55 mm y peso fresco promedio de 50 g tub^{-1} , se sembró el 18/07/2001 a una profundidad aproximada de 7 cm. El control de plagas se realizó utilizando las prácticas agrícolas normalmente empleadas en la zona: control de malezas químico preemergente y mecánico

manual postemergente; control químico preventivo de insectos y nemátodos en la siembra y sintomático de insectos durante el cultivo y control químico preventivo y sintomático de *Phytophthora infestans*. Se realizó un aporque a los 65 días después de la siembra. Durante el cultivo se realizaron 4 aplicaciones de microelementos por aspersión foliar y se realizaron 17 riegos por aspersión con una lámina promedio de 10 mm.

Mediciones

Características edáficas iniciales

En el área total ocupada por los canteros se tomaron 3 muestras de suelo (0-30 cm), compuestas cada una de 3 puntos seleccionados al azar. Se determinaron las cantidades de nitrógeno en forma de amonio, nitrato, total extraíble y en la biomasa microbiana, siguiendo la metodología descrita en el Capítulo 5. Además, en el Laboratorio de suelos, Instituto de Geografía y Conservación de los Recursos Naturales Renovables, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Universidad de los Andes, se determinaron los siguientes parámetros: retención de humedad a 1/3 y 15 bar por método de olla y plato de presión (Klute, 1986); pH por potenciometría (IGCA, 1978); C orgánico por método de Walkley-Black (IGCA, 1978); N total por método de Kjeldahl (Bremner y Mulvaney, 1982); P disponible (extracción por el método Bray I) por determinación colorimétrica a 660 nm (ICA, 1989); Ca, Mg, K y Na disponibles (extracción con acetato de amonio 1N a pH 7) por espectrofotometría de absorción atómica (IGCA, 1978); CIC por extracción con acetato de amonio 1N a pH 7 (IGCA, 1978); textura (Bouyoucos, 1962).

Biomasa vegetal y concentración de nitrógeno.

Para determinar la biomasa de las plantas y la concentración de N en base a materia seca (MS) en los distintos órganos de la planta se realizaron 4 muestreos correspondientes a las etapas: 1- entre la emergencia y el inicio de la tuberización; 2- final de la expansión foliar; 3- senescencia; y 4- madurez del tubérculo (cosecha final), efectuados los días 33, 69, 89 y 119, respectivamente. Para ello, se cosecharon cuatro plantas por tratamiento en cada muestreo, excepto en la cosecha final en que fueron cinco. Se excavó el suelo

alrededor de cada planta, correspondiente al área delimitada (0.48 m x 0.48 m) hasta una profundidad de 30 cm y se extrajeron y lavaron los tubérculos y las raíces, de las cuales se tomaron sólo las blancas y marrón claro. Cada planta fue separada en sus distintos órganos: hojas, tallos, tubérculos, raíces y necromasa. El material fue secado a 50 °C hasta peso constante y pesado. Para determinar el contenido de N total y ^{15}N de cada planta se prepararon muestras compuestas de 2 g, mezclando cantidades de materia seca de cada órgano ponderadas de acuerdo a su contribución porcentual a la biomasa de toda la planta. Las muestras se homogeneizaron y molieron a 125 μm en molino de bolas y fueron enviadas a la Unidad de Laboratorio del Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias, INIA, Maracay, Venezuela donde se determinaron la concentración de N total (%) por el método de Kjeldahl (Bremner, 1965) y la abundancia isotópica (% ^{15}N átomo) por espectrometría óptica (Axmann et al., 1990).

Nitrógeno en el suelo

Las cantidades de nitrógeno total y en forma de amonio, nitrato, total extraíble y biomasa microbiana, fueron determinadas en el suelo de cada una de las plantas muestreadas. Para ello, se colectó todo el suelo correspondiente al área delimitada para cada planta hasta una profundidad de 30 cm. El suelo fue pesado y homogeneizado en campo y se tomó una muestra de aproximadamente 1 kg. Las muestras se conservaron en recipientes cerrados a 4°C hasta el día siguiente en que fueron tamizadas y determinados el % en peso de la fracción < 4 mm y su contenido relativo de humedad (CRH) por triplicado por método gravimétrico. En cada muestra se determinó el contenido de N mineral (N-NH_4^+ , N-NO_3^-) y de N en la biomasa microbiana. Para ello, del suelo fresco previamente tamizado y conservado a 4°C, se pesó una cantidad equivalente a 50 g de suelo seco, por réplica. El N en la biomasa microbiana fue determinado por el método de fumigación-extracción (Brookes et al., 1985), mediante la determinación de N total extraíble en suelo fumigado durante 18 h con cloroformo libre de alcohol y en suelo no fumigado. La extracción de estas muestras de suelo, así como aquellas para la determinación de N mineral, se realizó con 150 ml de solución 0.5 M de K_2SO_4 , agitación durante 30 minutos, centrifugación a 6000 rpm durante 15 minutos y filtración. Todos los extractos fueron congelados para su análisis posterior. A los extractos de suelos fumigados y no fumigados,

se les determinó la concentración de N total por el método de digestión-destilación Kjeldahl (Bremner y Mulvaney, 1982). Para el N mineral se determinó el contenido de N-NH_4^+ por destilación, previa adición de MgO, y luego el contenido de N-NO_3^- , utilizando aleación Devarda para reducir los nitratos a amonio (Rojas y Castillo, 1989). Todos los destilados fueron recogidos en solución de H_2SO_4 previamente valorada y la determinación de N se realizó mediante titulación por retroceso con solución de NaOH. A las soluciones ya tituladas se les ajustó el pH entre 3 y 4 con H_2SO_4 y fueron evaporadas a sequedad para obtener cristales de $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ en viales herméticos, los cuales fueron enviados al Instituto de Investigaciones Agrobiológicas de Galicia en Santiago de Compostella, España, donde se determinó la abundancia isotópica ($\% \text{ }^{15}\text{N}$ átomo) por espectrometría óptica. (Guiraud y Fardeaux, 1980; Preston, 1999).

Para determinar los contenidos totales de N y ^{15}N en el suelo de cada planta, las muestras de suelo previamente tamizadas a 4 mm se dejaron secar al aire, se homogeneizaron y de cada una se tomó una submuestra de 10 g, las cuales fueron molidas con mortero hasta 125 μm y fueron analizadas para N total y ^{15}N por combustión, cromatografía de gases y espectrometría de masas en “Scottish Crop Research Institute”, Escocia.

Drenaje y N lixiviado

Para determinar la lámina de agua drenada y la cantidad de N lixiviado se utilizaron seis lisímetros por tratamiento. Estos lisímetros consistieron en cilindros metálicos, con un área de 0.225 m^2 , correspondiente a la densidad de siembra, abiertos a la atmósfera, cerrados en el fondo y conectados cada uno a un recipiente colector. Fueron llenados con una columna de 30 cm de suelo, respetando la densidad aparente y la proporción suelo-piedra, del suelo original. En cada lisímetro se sembró una semilla. El volumen de agua drenada se midió semanalmente y se tomaron muestras de 500 ml en cada lisímetro, las cuales fueron congeladas para su análisis posterior. Se realizaron análisis de N total y ^{15}N en muestras compuestas, correspondientes a las fechas de los muestreos de suelo y de biomasa vegetal. Se tomaron alícuotas de 50 ml y se concentraron por evaporación, previa adición de H_2SO_4 y aleación Devarda. Las determinaciones de N total y ^{15}N fueron realizadas de la manera descrita en la sección anterior para el N total extraíble del suelo.

Procesamiento de los datos

Nitrificación

El proceso de nitrificación se cuantificó, tomando en cuenta los procesos de mineralización-inmovilización, por medio de la ecuación (Kandeler, 1996):

$$\% N = 100 * (N\text{-NO}_3^-_{t2} - N\text{-NO}_3^-_{t1}) / [N\text{-NH}_4^+_{t1} + (N_{\text{min } t2} - N_{\text{min } t1})] \quad (1)$$

donde: % N es la nitrificación porcentual durante un intervalo de tiempo (t2 - t1 días), es decir, la proporción de N-NH₄⁺ que se transforma en N-NO₃⁻; N-NO₃⁻_{t2} y N-NO₃⁻_{t1} son las cantidades de N en forma de nitrato + nitrito a los t2 días y a los t1 días de la siembra respectivamente; N-NH₄⁺_{t1} es la cantidad de N en forma de amonio a los t1 días; N_{min t2} y N_{min t1} son las cantidades de N mineral (N-NO₃⁻ + N-NH₄⁺) a los t2 días y t1 días respectivamente. Las cantidades de N se expresan en mg N kg⁻¹ de suelo seco.

Cantidad de N en la biomasa microbiana

La cantidad de N en la biomasa microbiana se calculó como (Brookes et al., 1985):

$$\text{NBM} = (\text{N fumigado} - \text{N control}) / k_{\text{EN}} \quad (2)$$

donde: NBM es el contenido de N en la biomasa microbiana (mg N kg⁻¹); N fumigado y N control son los contenidos de N total (mg N kg⁻¹) en los extractos de suelo fumigado y no fumigado respectivamente; y k_{EN} es el factor correspondiente al método de fumigación-extracción para la determinación de N. Se utilizó k_{EN} = 0.54 (Brookes et al., 1985; Joergensen y Muller, 1996).

Acumulación de N en las plantas

A los fines de evaluar la dinámica de acumulación de N, en cada uno de los tratamientos, los datos experimentales de las cantidades promedio de N acumulado en la biomasa total de las plantas correspondientes a las distintas fechas de muestreo, se ajustaron a funciones matemáticas de Richards (Hunt, 1982):

$$N = a (1 \pm e^{(b - c \cdot t)})^{-1/d} \quad (3)$$

donde: N es la cantidad de N acumulada por el cultivo (g m⁻²), t es el tiempo transcurrido después de la siembra (DDS) y a, b, c y d son los coeficientes numéricos que se determinan por ajuste iterativo. Siendo su derivada:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{ace^{(b-ct)}}{d} \cdot (1 \pm e^{(b-ct)})^{-(1/d+1)} \quad (4)$$

Con las funciones así obtenidas, se calcularon las tasas diarias de acumulación de N por las plantas ($\text{g N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) y se graficaron en función del tiempo transcurrido (Hunt, 1982).

Trazador isotópico

Con los valores determinados de la abundancia isotópica (%A), en cada muestra, se calculó el exceso isotópico (%E) como (Guiraud, 1984):

$$\%E = \%A - \%a \quad (5)$$

donde %a es la abundancia isotópica natural (% átomo ^{15}N) determinada en un patrón de referencia con el mismo instrumento con el cual se realizó la medida de %A.

Para cada fecha de muestreo y para cada una de las plantas cosechadas, se calcularon los siguientes parámetros:

La proporción de N que provino del fertilizante mineral en cada compartimiento (%Ndff compartimiento) fue calculada (Halitligil et al., 2002) como:

$$\%Ndff \text{ compartimiento} = 100 * (\%E \text{ compartimiento} / \%E \text{ fertilizante}) \quad (6)$$

donde: %E compartimiento y %E fertilizante son los valores del exceso isotópico en el compartimiento y en el fertilizante mineral, respectivamente. Los compartimientos medidos fueron: planta (N planta), suelo (N total, N mineral, N total extraíble, N biomasa microbiana) y agua de drenaje (N lixiviado).

La cantidad de N (g N m^{-2}) que provino del fertilizante mineral en cada compartimiento (Nf compartimiento) fue calculada como:

$$Nf \text{ compartimiento} = \%Ndff * N \text{ compartimiento} / 100 \quad (7)$$

donde N compartimiento es la cantidad total de N (g N m^{-2}) en el compartimiento.

Respecto a la distribución del N del fertilizante en los distintos compartimientos, es decir, la proporción del N del fertilizante localizada en cada compartimiento (%Nf compartimiento) se calculó como:

$$\%Nf \text{ compartimiento} = 100 * (Nf \text{ compartimiento} / N \text{ fmin}) \quad (8)$$

donde: N fmin es la cantidad de N suministrado en forma de fertilizante mineral en cada tratamiento, siendo 25 g N m⁻² para FM y 10 g N m⁻² para los demás tratamientos G+F, P+F y G+P+F.

Suponiendo que la proporción del N del fertilizante no recuperado en los compartimientos suelo y planta se perdió del sistema por distintas vías, esta pérdida se calculó como:

$$\%Nf \text{ pérdidas total} = 100 - (\%Nf \text{ planta} + \%Nf \text{ suelo}) \quad (9)$$

Y por lo tanto:

$$\%Nf \text{ otras pérdidas} = 100 - (\%Nf \text{ planta} + \%Nf \text{ suelo} + \%Nf \text{ lixiviado}) \quad (10)$$

El balance de N entre los distintos compartimientos se realizó en base al modelo conceptual para la regulación de la sincronización presentado por Myers et al. (1994), en el cual los procesos de descomposición y mineralización de la materia orgánica son mediados por la microbiota. Se introdujo una modificación que consistió en dividir el compartimiento de N en la materia orgánica, el cual constituye fuente y sumidero de N para la microbiota, en dos compartimientos: N orgánico extraíble y N orgánico no extraíble.

La cantidad de N orgánico extraíble se calculó como la diferencia de la cantidad de N total extraíble menos la cantidad de N mineral (Zhong y Makeschin, 2003). Mientras que la diferencia de la cantidad total de N proveniente del fertilizante encontrada en el suelo (Nf suelo) menos la suma de las cantidades Nf biomasa microbiana y Nf total extraíble, se consideró como Nf orgánico no extraíble, formado a partir del Nf (Abreu, 2004) y se calculó como:

$$Nf \text{ orgánico no extraíble} = Nf \text{ suelo} - (Nf \text{ biomasa microbiana} + Nf \text{ total extraíble}) \quad (11)$$

En base a estos planteamientos y utilizando las ecuaciones matemáticas antes indicadas, se calcularon para cada tratamiento las cantidades de N inmovilizado (inmovilización bruta en g N m⁻²) entre la siembra (t0) y 33 DDS (t1) y las cantidades de N

mineralizado (mineralización bruta en g N m^{-2}) entre los 33 DDS (t_1) y la cosecha final (t_2):

$$\text{N inmovilizado} = (\text{N}_{\text{fmin}} + \text{N}_{\text{minsub}}) - \Delta \text{N min suelo} - \Delta \text{N planta} - \Delta \text{N pérdidas} \quad (12)$$

$$\text{N mineralizado} = \Delta \text{N min suelo} + \Delta \text{N planta} + \Delta \text{N pérdidas} \quad (13)$$

Donde N_{fmin} es la cantidad de N suministrado en forma de fertilizante mineral en cada tratamiento; N_{minsub} es la cantidad de N en forma mineral presente en las enmiendas orgánicas suministradas; Δ es la diferencia de la cantidad de N en el compartimiento indicado determinada en el tiempo t_n menos la cantidad determinada en el tiempo t_{n-1} , siendo N min suelo la cantidad de N mineral en el suelo, N planta la cantidad de N acumulada en planta y N pérdidas la cantidad de N lixiviado + la cantidad de N no recuperada, suponiendo que las pérdidas se producen a partir del N en forma mineral.

Eficiencia en el uso del nitrógeno

La eficiencia en el uso del nitrógeno (NUE) se calculó como la relación porcentual entre la cantidad promedio de N acumulado por las plantas de cada tratamiento en la cosecha final y la cantidad de N total suministrada con la fertilización (25 g N m^{-2}).

A los fines de comparar los distintos tratamientos de fertilización utilizados, tomando en cuenta, simultáneamente, su efecto sobre el uso del N por el cultivo y sobre las pérdidas totales de N (gaseosas + lixiviación), en el presente trabajo se propone la utilización de un coeficiente, calculado como el cociente entre las cantidades acumuladas hasta la cosecha final de N en el cultivo y de N perdido, el cual se denominó índice de uso-pérdidas del nitrógeno (IUPN). También se calculó el índice de uso-lavado del nitrógeno (IULN) como el cociente entre las cantidades acumuladas hasta la cosecha final de N en el cultivo y de N lixiviado (Capítulo 5).

De manera similar se calcularon la eficiencia en el uso del fertilizante mineral (NUEf), el índice de uso-lavado del nitrógeno del fertilizante mineral (IULNf) y el índice de uso-pérdidas del nitrógeno del fertilizante mineral (IUPNf) referidos a las cantidades añadidas, acumuladas y pérdidas de N del fertilizante mineral, correspondientes.

Análisis estadístico

A los fines estadísticos cada planta constituyó una réplica. Las variables calculadas a partir de determinaciones de N en planta y de N en suelo (Ej. %Nf orgánico extraíble, %Nf orgánico no extraíble y %Nf pérdidas total) fueron evaluadas para cada planta y, por lo tanto, la media y la desviación normal de la nueva variable fue calculada a partir de sus réplicas y no de los valores promedio de las variables que le dieron origen, siendo el número de réplicas $n = 4$ para los tres primeros muestreos y $n = 5$ para la cosecha final. En cambio para las variables calculadas a partir de la determinación de N lixiviado (Ej. IULN e IUPN) tanto la media como la desviación normal de la nueva variable fueron calculadas a partir de las medias y desviaciones normales de las variables que le dieron origen. Esto fue debido a que la determinación de N lixiviado fue realizada por método no destructivo, en plantas distintas a las utilizadas para la determinación de N en planta y N en suelo realizadas por métodos destructivos.

Previa comprobación de la homogeneidad de las varianzas y de una baja correlación entre las medias y la desviación normal, el análisis de los datos se realizó con el procedimiento clásico ANOVA, sin transformar los datos, utilizando como factor el tratamiento de fertilización. Las diferencias entre las medias de las distintas variables analizadas se evaluaron utilizando el “test de Tukey, HSD”. En los resultados y discusión se indica el nivel de significancia utilizado en cada caso.

Resultados

Características del suelo

En la tabla 2 se presentan las características del suelo (0-30 cm de profundidad) del cantero. Es notable en estos suelos el alto contenido de N total extraíble (150 mg N kg^{-1} equivalente a 56 g N m^{-2}), el cual posiblemente se deba a la gran cantidad de enmiendas orgánicas, principalmente gallinazo y pargana, que los productores han aplicado en numerosos ciclos de cultivos anteriores. También se destacan los altos contenidos de Ca y P, los cuales deben ser consecuencia de la gran cantidad de cal agrícola y fertilizantes minerales NPK, respectivamente, que han venido aplicando los productores del área.

Tabla 2. Características principales del suelo (0-30 cm) de los canteros. La densidad aparente y el contenido de piedras se refieren a la fracción de suelo menor y mayor de 4mm respectivamente. Los valores entre paréntesis a un lado de las medias corresponden a la desviación normal.

Textura (%)			% retención H ₂ O		d aparente	Piedras	pH
arena	Arcilla	limo	1/3 atm	15 atm	g cm ⁻³	% v/v	1:1 (H ₂ O)
49 (1)	17 (1)	34 (1)	22.7 (0.7)	13.0 (0.8)	1.245	10	6.7 (0.1)
C orgánico	N total	C/N	Nextraíble	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻	N-BM	
g kg ⁻¹	g kg ⁻¹		mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	
30.2 (1.3)	2.2 (0.1)	13.7 (0.7)	150 (10)	1.5 (0.3)	30 (4)	26 (4)	
P	Ca	Mg	K	Na	CIC	CE	
mg kg ⁻¹	ceq kg ⁻¹	ceq kg ⁻¹	cmol kg ⁻¹	cmol kg ⁻¹	cmol kg ⁻¹	μS cm ⁻¹	
510 (50)	29 (3)	3.4 (0.3)	2.1 (0.1)	0.04 (0.01)	16.8 (1.0)	0.9 (0.1)	

Biomasa y cantidad de N acumulada por las plantas

En la tabla 3 se presentan los valores del rendimiento de tubérculos en peso fresco y seco, la biomasa total y la cantidad de N acumulada por las plantas en la cosecha final. Se puede observar que para todos estos parámetros el orden de los tratamientos, P+F > G+P+F > G+F y FM, resultó el mismo encontrado en el experimento de campo en parcelas (Capítulo 3). Sin embargo, los rendimientos de tubérculos y la cantidad de N acumulada, resultaron en promedio 2,5 veces mayores que las encontradas en el experimento en parcelas. Las plantas con los tratamientos P+F y G+P+F también presentaron mayor biomasa de raíces en todas las fechas de muestreo y mayor relación de raíces a vástagos en la primera etapa del cultivo (Tabla 4) de manera similar a las plantas del experimento en parcelas (Capítulo 4).

Tabla 3. Medias de los rendimientos en materia fresca (MF) y materia seca (MS) de tubérculos, biomasa total en MS y cantidad de nitrógeno en la biomasa total, con los distintos tratamientos, en la cosecha final. Los valores entre paréntesis corresponden a la desviación normal. Letras distintas indican diferencias significativas entre los tratamientos (Tukey HSD, $P = 0.05$)

Tratamiento	Rendimiento tubérculos MF kg m ⁻²	Rendimiento tubérculos MS kg m ⁻²	Biomasa total MS kg m ⁻²	Cantidad de N en la biomasa del cultivo g N m ⁻²
FM	6.95 (0.35) b	1.20 (0.07) c	1.44 (0.09) c	22.8 (0.9) c
G+F	7.60 (0.46) b	1.23 (0.06) c	1.45 (0.05) c	23.8 (0.6) c
P+F	9.03 (0.48) a	1.64 (0.05) a	1.96 (0.08) a	28.2 (0.8) a
G+P+F	8.50 (0.38) a	1.51 (0.06) b	1.78 (0.09) b	26.6 (0.7) b

Tabla 4. Biomasa de raíces y relación en peso de biomasa de raíces a vástagos con los distintos tratamientos a los 33, 69, 89 y 119 DDS. Los valores entre paréntesis corresponden a la desviación normal. Letras distintas indican diferencias significativas entre los tratamientos (Tukey HSD, $P = 0.05$).

Tratamiento	Biomasa de raíces (g m^{-2})			
	33 DDS	69 DDS	89 DDS	119 DDS
FM	1.1 (0.2) c	10.1 (0.9) b	12.5 (3.7) b	7.2 (1.0) b
G+F	0.8 (0.2) c	9.3 (1.4) b	11.4 (2.4) b	8.3 (1.8) b
P+F	2.2 (0.2) b	19.4 (1.5) a	22.5 (2.4) a	13.4 (1.4) a
G+P+F	3.2 (0.3) a	16.3 (2.0) a	19.0 (1.8) a	12.7 (1.8) a
	Relación de biomasa de raíces a vástagos ($\times 10^2$)			
	33 DDS	69 DDS	89 DDS	119 DDS
FM	18.9 (1.8) c	6.1 (0.6) b	4.4 (0.3) b	3.1 (0.7) a
G+F	16.3 (1.9) c	5.6 (0.4) b	4.8 (0.9) b	3.9 (0.5) a
P+F	30.3 (2.3) a	9.2 (0.9) a	6.7 (0.2) a	4.6 (0.9) a
G+P+F	24.0 (2.0) b	8.9 (0.9) a	6.3 (0.4) a	4.9 (0.9) a

En la figura 1A se presenta la dinámica de acumulación de N en las plantas de cada uno de los tratamientos. Se puede observar que las tendencias de los tratamientos, $P+F > G+P+F > G+F$ y FM fueron similares a las encontradas en el experimento en parcelas, aunque en el experimento en canteros las desviaciones normales resultaron mayores, debido a que en éste las réplicas son plantas y, por lo tanto, el error experimental incluye la variación entre individuos. Aún cuando las cantidades de N acumuladas resultaron elevadas, sin embargo, las cantidades de N disponible en el suelo en forma mineral resultaron más de dos veces las tasas diarias de acumulación de N (figura 1B).

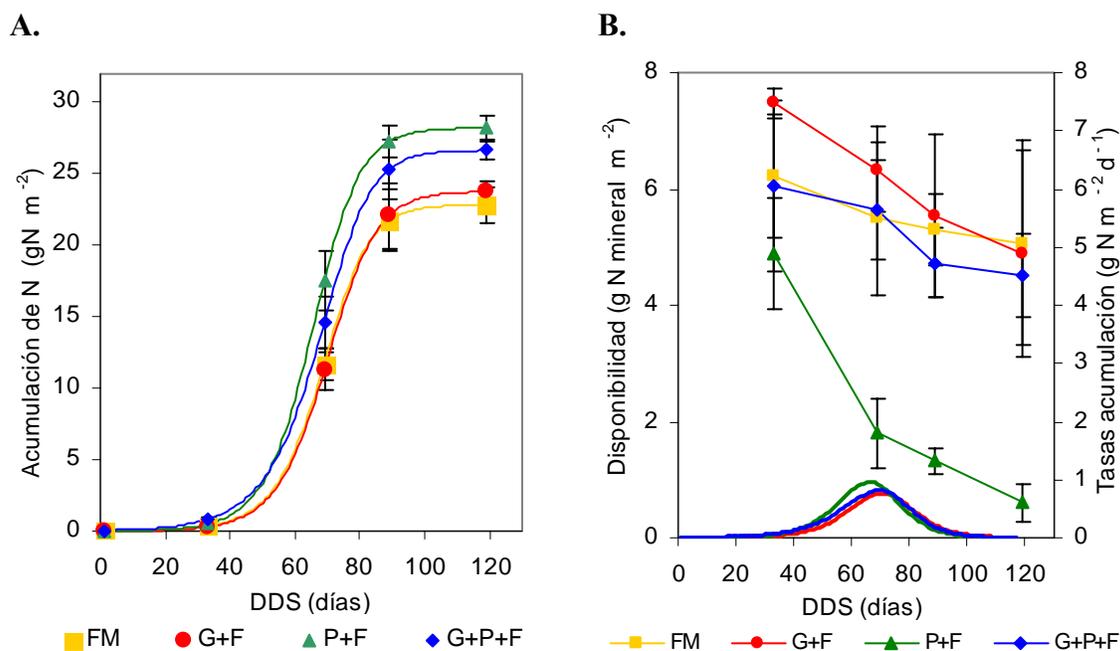


Figura 1. Curso con los días transcurridos después de la siembra (DDS) de: **A.** Cantidad de N acumulado (g N m^{-2}) en las plantas de cada uno de los tratamientos. Las barras representan los valores de la desviación normal. Las curvas corresponden a las funciones ajustadas correspondientes (Ec. 3). **B.** Disponibilidad de N mineral en el suelo (g N m^{-2}), puntos en eje Y principal, las barras representan los valores de la desviación normal. Tasas de acumulación de N en las plantas ($\text{g N m}^{-2} \text{d}^{-1}$), curvas calculadas (Ec. 4) en eje Y secundario.

En este sentido, y de manera similar a la tendencia encontrada en el experimento en parcelas, en la figura 2 se puede observar que en cada uno de los muestreos realizados las cantidades de N acumuladas en cada planta presentaron una correlación mayor con la biomasa de raíces que la encontrada con las cantidades de N mineral disponible en el suelo, resultando que a mayor biomasa de raíces mayor cantidad de N acumulado siendo el orden de los tratamientos para estos dos parámetros en la etapa final del cultivo $P+F > G+P+F > G+F$ y FM (Fig. 2A).

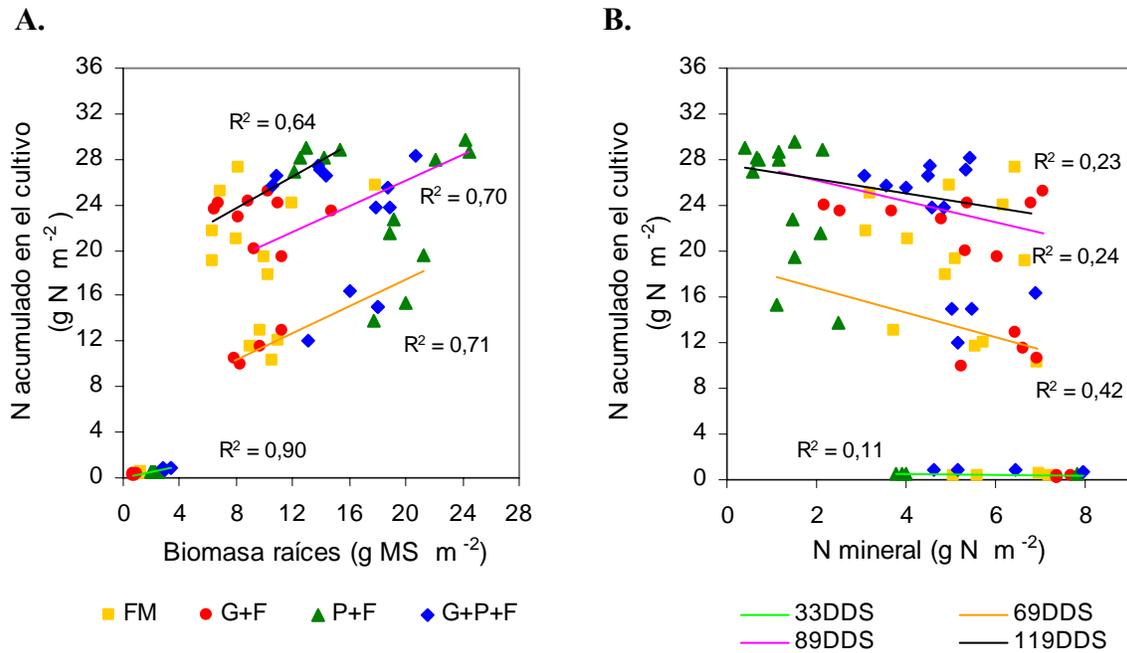


Figura 2. Regresión lineal de la cantidad de N acumulado en las plantas (g N m^{-2}) respecto: **A.** Biomasa de raíces (g m^{-2}). **B.** Cantidad de N mineral disponible en el suelo (g N m^{-2}) para cada uno de los muestreos efectuados en los días (DDS) indicados.

Balance de nitrógeno

Distribución del N del fertilizante mineral

En la figura 3 se presenta, para cada tratamiento, la dinámica de la distribución porcentual del N proveniente del fertilizante mineral (% Nf) entre las plantas y distintos compartimientos del suelo: N mineral, N orgánico extraíble, N en la biomasa microbiana y N orgánico no extraíble, así como las pérdidas por lixiviación y otras pérdidas. Estas últimas se consideraron como pérdidas gaseosas (volatilización de amoníaco + desnitrificación) por dos razones: primero porque no debieron haber ocurrido pérdidas por escurrimiento ni por erosión ya que los canteros fueron construidos con láminas laterales que impedían estos procesos; segundo porque en todos los tratamientos, la mayor parte de esas pérdidas (aproximadamente 80%) ocurrieron en la primera etapa del cultivo (Fig. 3), cuando las concentraciones de amonio y nitrato eran altas. Se puede observar que estas pérdidas gaseosas resultaron mayores para los tratamientos FM y P+F respecto a las de los tratamientos G+F y G+P+F. Por otra parte, los porcentajes del N proveniente del fertilizante mineral acumulado en las plantas y del N lixiviado aumentaron de manera gradual durante el desarrollo del cultivo. En la figura 3, se puede observar como disminuyó el % Nf en el suelo a medida que ocurrían los procesos de acumulación por las plantas y de pérdidas, tanto gaseosas como por lixiviación. Otro hecho notable fue que el % Nf en forma mineral disminuyó desde 100 %, en el momento de la siembra, hasta menos del 6 %, a los 33 DDS (fecha 17/08, Fig. 3), mientras que el % Nf en formas orgánicas aumentó bruscamente, resultando el N orgánico extraíble la forma predominante para dicha fecha. A partir de ésta, para todos los tratamientos, el % Nf en forma de N orgánico extraíble tendió a disminuir, mientras que el % Nf en forma de N orgánico no extraíble tendió a aumentar. Además, se puede observar que el % Nf en forma de N orgánico extraíble resultó mayor en los tratamientos con gallinazo G+F y G+P+F que en los tratamientos FM y P+F durante todo el ciclo del cultivo (Fig. 3). En cuanto a los valores del % Nf de la biomasa microbiana, estos aumentaron en la primera etapa y luego resultaron variables en el tiempo, tendiendo a ser más bajos para el tratamiento FM.

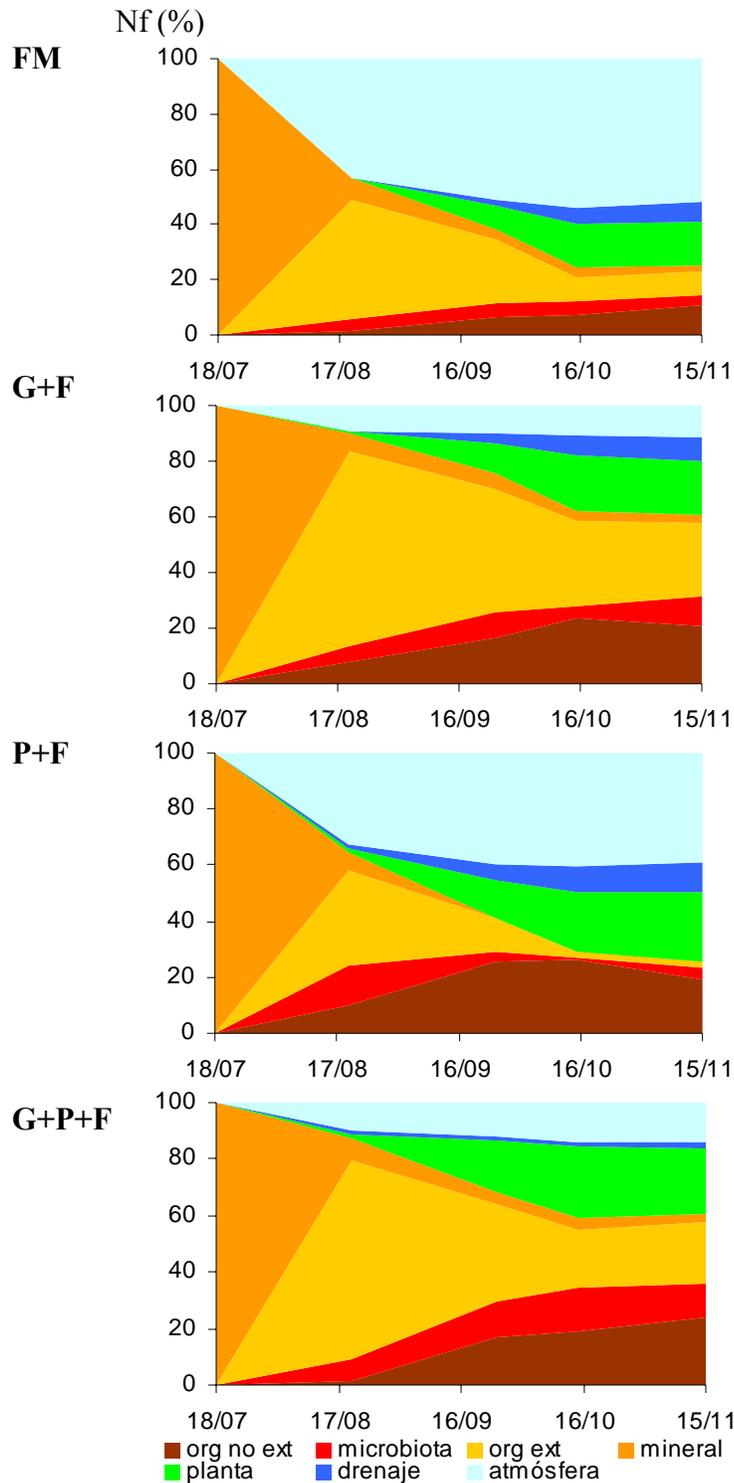


Figura 3. Curso a partir de la fecha de siembra (dd/mm), de la distribución porcentual del N proveniente del fertilizante mineral (% Nf) entre plantas (■) y distintos compartimientos del suelo: N mineral (■), N orgánico extraíble (■), N en la biomasa microbiana (■) y N orgánico no extraíble (■), así como % Nf perdido por lixiviación (■) y por volatilización de amoníaco + desnitrificación (■) para cada uno de los tratamientos.

En la figura 4 se presentan los valores del % Nf de los distintos compartimientos en la cosecha final, para los cuatro tratamientos.

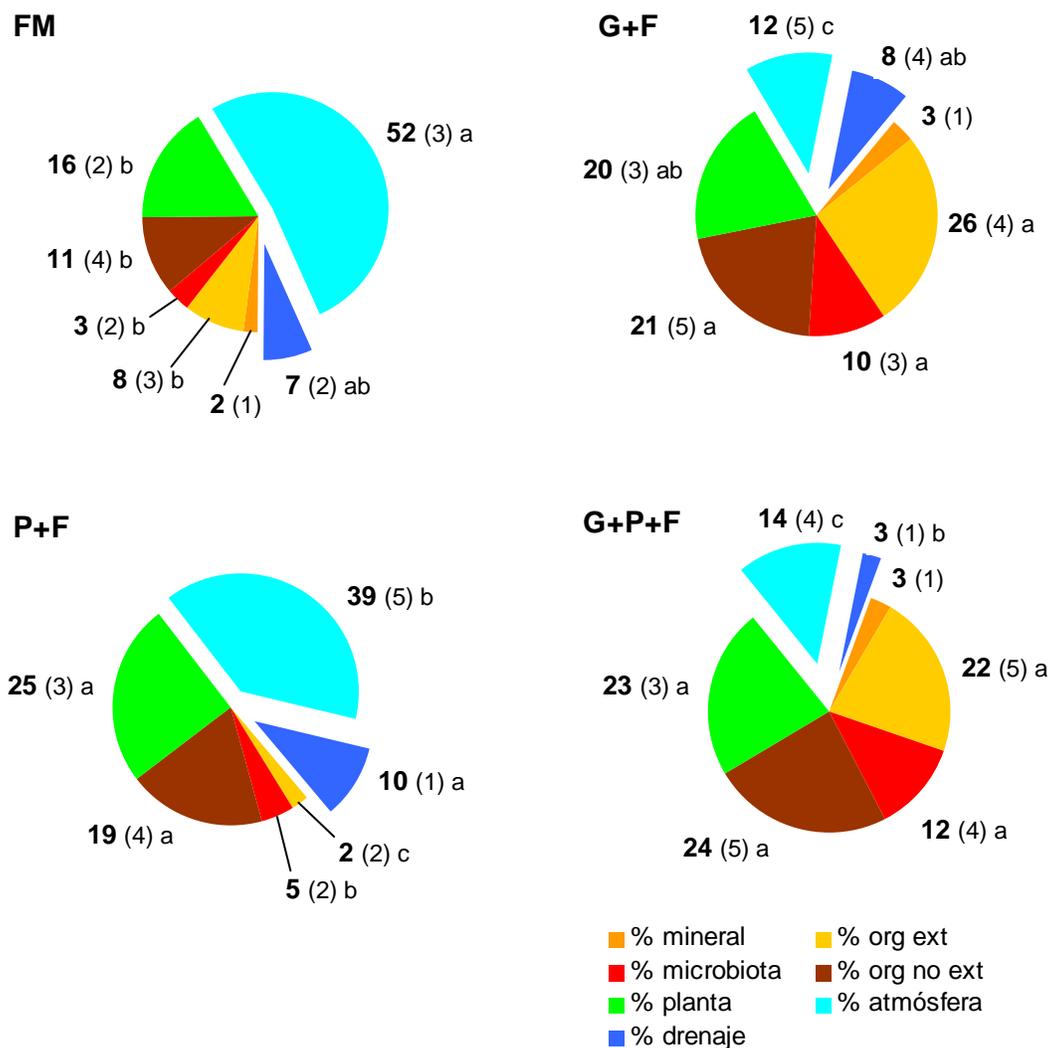


Figura 4. Distribución porcentual del N proveniente del fertilizante mineral (% Nf) en la cosecha final, entre plantas (■) y distintos compartimientos del suelo: N mineral (■), N orgánico extraíble (■), N en la biomasa microbiana (■) y N orgánico no extraíble (■), así como % Nf perdido por lixiviación (■) y por volatilización de amoníaco + desnitrificación (■) para cada uno de los tratamientos. Los valores entre paréntesis corresponden a la desviación normal. Letras distintas indican diferencias significativas entre los tratamientos (Tukey HSD, $P = 0.05$).

Los resultados mas destacados son los siguientes:

- El % Nf acumulado en las plantas, resultó menor para el tratamiento FM que para P+F y G+P+F, mientras que para G+F resultó intermedio y no fue significativamente diferente a los otros tratamientos.
- El % Nf que se perdió en forma gaseosa con el tratamiento FM resultó bastante elevado (52 %) y significativamente mayor ($P < 0.05$) que el de P+F (39 %), el cual también resultó significativamente mayor ($P < 0.05$) que los de G+P+F (13 %) y G+F (12 %). Mientras que los % Nf que se perdieron por lixiviación fueron menores que las pérdidas gaseosas siendo el más bajo para G+P+F (3 %) y el más alto para P+F (10 %).
- El % Nf que se encontró en el suelo resultó significativamente mayor ($P < 0.05$) para los tratamientos G+P+F (61 %) y G+F (61 %) que para P+F (26 %) y FM (25 %). Se puede observar que los % Nf en forma de N orgánico extraíble y en la biomasa microbiana resultaron significativamente mayores ($P < 0.05$) para G+P+F y G+F que para P+F y FM y además los % Nf en forma mineral representaron una fracción muy pequeña (< 4 %) en todos los tratamientos.

Procesos del ciclado del nitrógeno

Los porcentajes de nitrificación calculados (Ec. 1) entre el inicio y los 33 DDS resultaron de 102 % para todos los tratamientos. La cantidad relativa de N en forma de nitratos (% de $\text{N-NO}_3^- + \text{N-NO}_2^-$ respecto al N mineral) que inicialmente fue de 30, 47, 51 y 49 % para los tratamientos FM, G+F, P+F y G+P+F respectivamente, resultó a los 33 DDS, entre 98 y 99 % para todos los tratamientos. Desde esta última fecha hasta la cosecha final, estas cantidades representaron entre el 95 y 98 % del nitrógeno mineral.

En las siguientes figuras se presenta el balance de N correspondiente al intervalo comprendido entre la siembra y 33 DDS, etapa I, (Fig. 5) y el período comprendido entre los 33 DDS y la cosecha final, etapa II, (Fig. 6). Para realizar estos balances se hicieron las siguientes consideraciones: 1- no se tomó en cuenta la cantidad de N que ingresó por precipitación + deposición seca ni por riego ya que, si bien estas cantidades fueron determinadas, sin embargo resultaron valores de 0.3 y 0.1 g N m⁻² respectivamente, los cuales pueden ser omitidos sin introducir mayor error; 2- no se tomó en cuenta la cantidad de N que pudo haber ingresado al suelo por el proceso de fijación de N₂ y 3- sólo se

tomaron en cuenta las pérdidas gaseosas del N del fertilizante mineral suministrado y no de otras fuentes ya que las segundas no fueron evaluadas.

En la etapa I los procesos más importantes en cuanto a su magnitud resultaron: la nitrificación (antes referida), los procesos de pérdidas gaseosas (volatilización + desnitrificación) y la inmovilización (Fig. 5), mientras que en la etapa II los procesos más importantes fueron: la mineralización, la acumulación en las plantas y la lixiviación (Fig.6).

En la figura 5 se puede observar que durante la etapa I la inmovilización neta y la inmovilización bruta relativa expresadas como porcentaje del N mineral, tanto suministrado como inicialmente presente en el suelo, que se transformó en formas orgánicas bien sea en la biomasa microbiana, en N orgánico extraíble o en N orgánico no extraíble, resultaron mayores para los tratamientos con gallinazo, G+F y G+P+F, respecto a los tratamientos P+F y FM. Además se puede observar que el tratamiento G+F presentó el mayor incremento de la cantidad de N orgánico extraíble, el cual se debió no sólo al aporte directo de este substrato sino más aún al aporte causado por la transformación tanto de N mineral como de N orgánico no extraíble. En cambio el tratamiento P+F presentó el mayor incremento de la cantidad de N orgánico no extraíble, debido al aporte directo de este substrato y también al aporte causado por la transformación tanto de N mineral como de N orgánico extraíble. Por otra parte, con el tratamiento G+P+F ambos compartimientos se incrementaron.

Si se compara para el tratamiento FM, la cantidad bruta de N inmovilizado durante la etapa I (Fig. 5), con las cantidad bruta de N mineralizado durante la etapa II (Fig. 6) podemos observar que la segunda resultó mayor que la primera, lo cual indica que parte del N mineralizado en la etapa II provino de N orgánico presente en el suelo antes de la siembra. En el caso de los otros tratamientos, aún tomando en cuenta la cantidad de N orgánico suministrado, los resultados indican una situación similar aunque en menor cuantía. Además en la figura 6 se puede observar que durante la etapa II, en todos los tratamientos excepto en el P+F, la mayor parte de la mineralización bruta provino del N orgánico extraíble, lo cual indica la importancia de esta forma de N potencialmente mineralizable como fuente de N para las plantas. Por otra parte, los resultados indican que del N del fertilizante mineral que se transformó en N orgánico durante la etapa I una fracción importante, entre el 26 % y 56 %, fue remineralizada durante la etapa II.

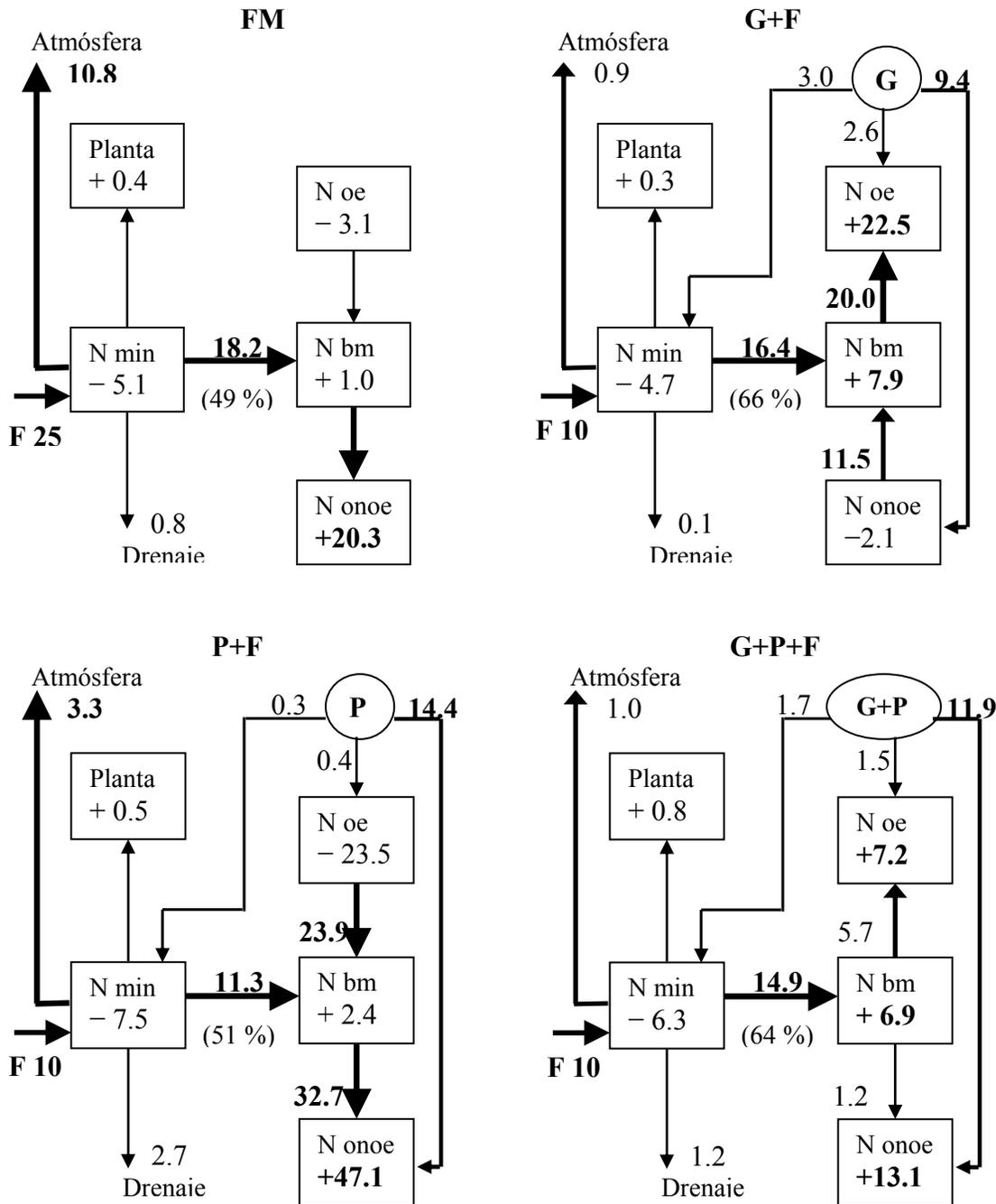


Figura 5. Balance de N en el agroecosistema entre la siembra y 33 DDS. Se representan con flechas los flujos (g N m^{-2}) de entrada de N por fertilizante mineral (F) y enmiendas orgánicas (G, P, y G+P) así como de salida hacia la atmósfera y el drenaje y entre los compartimientos del suelo: N mineral (N min), N en la biomasa microbiana (N bm), N orgánico extraíble (N oe) y N orgánico no extraíble (N onoe). Los valores en los compartimientos corresponden a la cantidad de N ganada (+) o perdida (-) en el intervalo. Los valores entre paréntesis representan el % de N mineral tanto suministrado como inicialmente presente en el suelo, que se transformó en formas orgánicas

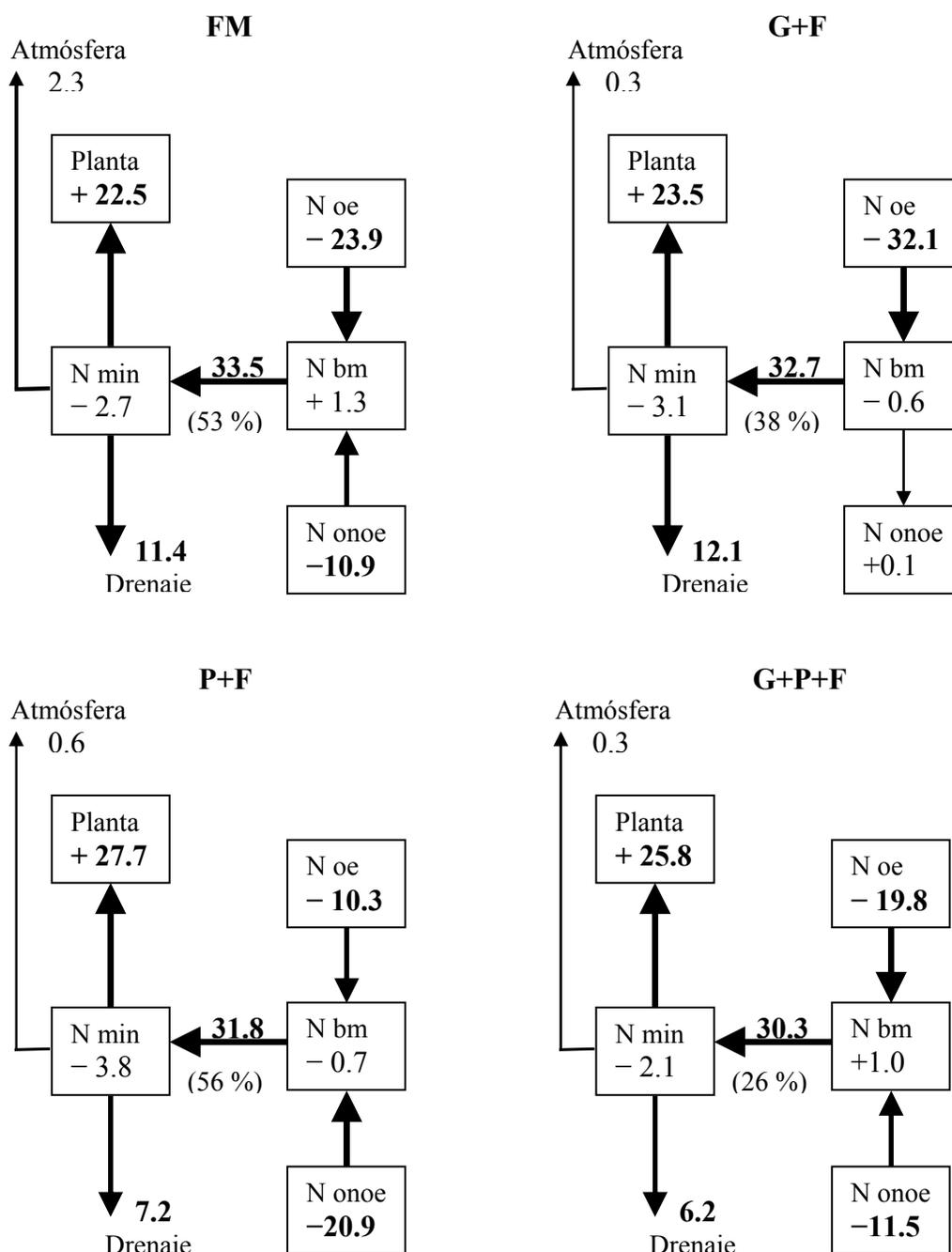


Figura 6. Balance de N en el agroecosistema entre 33 DDS y la cosecha final. Se representan con flechas los flujos (g N m^{-2}) de salida hacia la atmósfera y el drenaje y entre los compartimientos del suelo: N mineral (N min), N en la biomasa microbiana (N bm), N orgánico extraíble (N oe) y N orgánico no extraíble (N onoe). Los valores en los compartimientos corresponden a la cantidad de N ganada (+) o perdida (-) en el intervalo. Los valores entre paréntesis representan el % del N del fertilizante mineral que remineralizó durante la etapa II respecto a la cantidad bruta de N inmovilizada en la etapa I.

Eficiencia en el uso del N

Eficiencia en el uso del N del fertilizante mineral

En la tabla 5 se puede observar que en la cosecha final la eficiencia en el uso del nitrógeno proveniente del fertilizante mineral (NUEf) resultó menor para el tratamiento FM (16 %) que para P+F (25 %) y G+P+F (23 %), mientras que para G+F resultó intermedio (20 %) y no fue significativamente diferente a los demás tratamientos, mientras que el % Ndff resultó mayor para FM (18 %) y similar para los otros (entre 8 y 9 %). Por otra parte, en la cosecha final el índice de uso-lavado del nitrógeno proveniente del fertilizante mineral (IULNf) resultó mayor para el tratamiento G+P+F respecto a los demás tratamientos mientras que el índice de uso-pérdida del nitrógeno proveniente del fertilizante mineral (IUPNf) resultó mayor para los tratamientos con gallinazo G+P+F y G+F, seguidos por el tratamiento P+F y menor para FM.

Eficiencia en el uso del nitrógeno total suministrado

En la tabla 5 además se presenta, para los distintos tratamientos, la cantidad total de N: acumulada por las plantas, lixiviada, perdida en forma gaseosa, perdida por ambas vías (lixiviación + en forma gaseosa) así como los índices, NUE, IUL y IUP, calculados a partir de esos parámetros.

Las pérdidas totales resultaron muy altas para FM, 25 g N m^{-2} , que representa para este tratamiento el 100 % de la cantidad de N total añadida. Las menores pérdidas ocurrieron para G+P+F (35 %), siendo las de P+F (55 %) y G+F (53 %) intermedias entre las anteriores. Es de hacer notar que aún cuando para P+F y G+F las pérdidas totales resultaron similares, sin embargo, para P+F resultó menor la pérdida por lixiviación y mayor la pérdida gaseosa que para G+F.

A los fines de estimar las pérdidas gaseosas de fuentes distintas al N del fertilizante mineral se supuso para cada tratamiento que durante el período comprendido entre la siembra y la cosecha final, de la cantidad de N mineral inicial (N mineral en suelo + N mineral en los substratos orgánicos suministrados) se podría perder el mismo porcentaje de Nf que se perdió durante la etapa II, entre 33 DDS y la cosecha final, más una cantidad adicional atribuible a volatilización de NH_3 para los tratamientos con gallinazo, equivalente al % Nf que se perdió durante la etapa I. Las cantidades así calculadas (g N m^{-2}) resultaron

1.1 (FM), 0.7 (G+F), 0.8 (P+F) y 0.6 (G+P+F) que en términos de las pérdidas totales (gaseosas + lavado) representan valores menores que los valores de desviación normal calculados para ese parámetro (Tabla 5) y por lo tanto, en este caso, no constituyen un error importante adicional en cuanto a los balances e índices calculados.

La eficiencia en el uso del nitrógeno (NUE) en la cosecha final resultó diferente entre los tratamientos, siendo el orden encontrado $P+F$ y $G+P+F > G+F$ y FM. Destacan los altos valores NUE cercanos e incluso superiores a 100 %.

Los índices IULN y IUP en la cosecha final presentaron diferencias significativas entre los tratamientos ($P < 0.05$) siendo el orden $G+P+F > P+F > G+F$ y FM para el primero y $G+P+F > P+F$ y $G+F > FM$ para el segundo.

Tabla 5. Eficiencia en el uso del nitrógeno del fertilizante (%NUEf); proporción de N del fertilizante acumulado en la biomasa (%Ndff); índice de uso-lavado del N del fertilizante mineral (IULNf); índice de uso-pérdidas del N del fertilizante mineral (IUPNf); Cantidades totales de N acumuladas en planta y de N lixiviado (g N m^{-2}); cantidad de N del fertilizante mineral perdido por vía gaseosa (g N m^{-2}); cantidad total de N perdido (g N m^{-2}); eficiencia en el uso del N total suministrado (%NUE); índice de uso-lavado del N total (IULN); índice de uso-pérdidas del N total (IULPN), para cada uno de los tratamientos en la cosecha final. Los valores entre paréntesis corresponden a la desviación normal. Letras distintas indican diferencias significativas entre los tratamientos (Tukey HSD, $P < 0.05$).

Parámetros	Tratamientos			
	FM	G+F	P+F	G+P+F
NUEf (%)	16 (2) b	20 (3) ab	25 (3) a	23 (3) a
Ndff (%)	18 (2) a	8 (1) b	9 (2) b	9 (1) b
IULNf	2.4 (0.9) b	2.5 (0.9) b	2.5 (0.5) b	9.0 (1.0) a
IUPNf	0.3 (0.1) c	1.0 (0.3) a	0.5 (0.1) b	1.4 (0.4) a
N acumulado en planta (g N m^{-2})	22.8 (0.9) c	23.8 (0.6) c	28.2 (0.8) a	26.6 (0.7) b
N lixiviado acumulado (g N m^{-2})	12.2 (1.2) a	12.2 (1.2) a	9.9 (0.8) b	7.5 (0.9) c
Nf pérdidas gaseosas (g N m^{-2})	13.0 (0.8) a	1.2 (0.6) c	3.9 (0.5) b	1.3 (0.4) c
N pérdidas totales (g N m^{-2})	25.2 (2.0) a	13.3 (1.8) b	13.8 (1.3) b	8.8 (1.3) c
NUE (%)	91 (5) b	95 (2) b	113 (3) a	107 (3) a
IULN	1.9 (0.2) c	2.0 (0.2) c	2.8 (0.3) b	3.6 (0.4) a
IUPN	0.9 (0.1) c	1.8 (0.3) b	2.0 (0.2) b	3.0 (0.4) a

Discusión y Conclusiones

El hecho de que las cantidades de N acumuladas en las plantas presentaron diferencias entre los tratamientos y además aumentaron con el incremento de la biomasa de raíces, mientras que presentaron una correlación baja con las cantidades de N mineral disponible en el volumen de suelo analizado, y el hecho de que estas últimas fueron más del doble que las tasas diarias de acumulación de N, indican que la acumulación de N por las plantas dependió principalmente de la biomasa de raíces, la cual determinó la accesibilidad de las plantas al N disponible. Así, los tratamientos con suministro de pargana P+F y G+P+F, que estimularon mayor biomasa de raíces durante el desarrollo del cultivo, promovieron mayor accesibilidad al N disponible en el suelo y mayor acumulación de nitrógeno por las plantas y, por lo tanto, mayor producción de biomasa y tubérculos que los tratamientos G+F y FM.

En vista de estos resultados, se puede concluir que el suministro del sustrato de baja calidad, pargana, promueve el desarrollo radicular del cultivo de papa y, por lo tanto, mejora la sincronización, a escala espacial, entre la disponibilidad de N en el suelo y los requerimientos de N por las plantas.

Este efecto positivo de la pargana sobre la acumulación de N por las plantas se tradujo en mayor eficiencia en el uso del nitrógeno, tanto del N proveniente del fertilizante mineral (% NUEf) como también en relación al N total suministrado (% NUE). Es de hacer notar, que para todos los tratamientos mientras los % NUEf estuvieron en un rango entre 16 y 25 % en cambio los valores de % NUE resultaron mayores encontrándose en un rango entre 91 y 113 %. Esta gran diferencia encontrada entre los % NUEf y % NUE, así como los valores de % Ndff en la biomasa total, los cuales resultaron en la cosecha final entre 8 y 9 % para los tratamientos G+F, P+F y G+P+F y 18 % para el tratamiento FM, indican que las plantas en todos los tratamientos, acumularon mayor cantidad de nitrógeno desde otras fuentes que desde el fertilizante mineral suministrado. Para el tratamiento FM, en el cual todo el N (250 kg N ha^{-1}) fue suministrado en forma mineral amoniacal (NH_4^+), este valor de 18 % Ndff en la cosecha final representa un valor muy pequeño si se compara con los encontrados en cultivos de papa con suministro de fertilizante mineral marcado: 70 %

obtenido por Abreu (2004) con suministro de 288 kg N ha⁻¹ en el páramo de Gavidia en Mérida, Venezuela; valores entre 53 y 60 % encontrados por Tran y Giroux (1991) con suministro de 140 kg N ha⁻¹ en Canadá y valores entre 59.9 y 67.2 % obtenidos por Halitligil et al. (2002) en Turquía con suministro de 400 y 1000 kg N ha⁻¹, respectivamente. Estos resultados indican que, para el tratamiento FM, la mayor parte (82 %) del N encontrado en las plantas provino del N que se encontraba originalmente presente en el suelo en cantidades importantes, tanto en forma mineral (11.8 g N m⁻²) como en forma de N orgánico extraíble (44.3 g N m⁻²). Para los otros tratamientos, aún cuando el trazador isotópico empleado no permite distinguir el N proveniente de los substratos orgánicos, gallinazo y pargana, del N proveniente del suelo, sin embargo, los balances indican que por lo menos entre 30 y 40 % del N acumulado en las plantas provino del N originalmente presente en el suelo.

Además, los % NUEf encontrados, entre 16 y 25 % para todos los tratamientos, resultaron bajos comparados con muchos de los valores encontrados en la literatura: 63 a 76 % obtenidos por Tran y Giroux (1991); 61 a 67 % encontrados por Roberts et al. (1991) con suministro de 336 kg N ha⁻¹ en EEUU; 42 % obtenido por Halitligil et al. (2002) con suministro de 400 kg N ha⁻¹; 61 % encontrado por MacDonald et al. (1997) con suministro de 223 kg N ha⁻¹ en Rothamsted, Inglaterra y valores de 35.9 a 68.5 % obtenidos por Maidl et al. (2002) con suministro de 150 kg N ha⁻¹ en Alemania, pero resultaron similares al valor de 23 % encontrado por Abreu (2004) con suministro de 288 kg N ha⁻¹ en un suelo de páramo y al valor de 20.8 % encontrado por Halitligil et al. (2002) con suministro de 1000 kg N ha⁻¹.

Estos resultados demuestran que, previamente a la aplicación de los tratamientos, el suelo utilizado en el experimento tenía un alto contenido de N potencialmente disponible para las plantas que contribuyó en gran medida a su nutrición nitrogenada y a la obtención de altos rendimientos de tubérculos que representaron valores entre 70 y 90 Mg ha⁻¹, aún cuando se perdieron cantidades importantes de N del sistema.

Respecto a las pérdidas del N del fertilizante mineral, los resultados indican que éstas ocurrieron principalmente en forma gaseosa en la primera etapa del cultivo para todos los tratamientos, especialmente para FM y P+F en los cuales representaron en la cosecha final 52 y 39 % Nf respectivamente, que constituyen valores elevados si se comparan con

los valores de 12 y 13 % Nf obtenidos en el presente experimento en los tratamientos con gallinazo, G+F y G+P+F respectivamente, también con el valor de 32 % Nf no recuperado, excluyendo pérdidas por lixiviación, encontrado por Abreu (2004) y los valores de % Nf no recuperado, incluyendo pérdidas por lixiviación, de 12 a 40 % obtenidos por Maidl et al. (2002); 19 % encontrado por MacDonald et al. (1997) y 14 a 18 % obtenidos por Halitligil et al. (2002), en cultivos de papa.

Estas pérdidas gaseosas, pudieron haber ocurrido por volatilización de NH_3 y por desnitrificación. En el presente experimento no se realizaron determinaciones que permitan evaluar la contribución de los procesos mencionados a las pérdidas gaseosas encontradas. Sin embargo las condiciones ecológicas presentes al inicio del cultivo parecen mas propicias para la volatilización de NH_3 , a partir del NH_4^+ del fertilizante mineral suministrado. Principalmente por el pH cercano a la neutralidad y las altas temperaturas diurnas del suelo (Paul y Clark, 1989; Kroeze et al. 2003), que seguramente ocurrieron como producto de la radiación interceptada por un suelo de color oscuro, sin cobertura vegetal y con baja humedad. Por otra parte, la desnitrificación también pudiera haber ocurrido debido a que este proceso es favorecido por concentraciones de nitrato altas (Ruser et al., 2001), que pudieran haber existido en los primeros días después del suministro del fertilizante mineral, ya que durante la primera etapa se determinaron porcentajes de nitrificación altos, así como también por la presencia de substratos orgánicos que proveen de C disponible para las bacterias desnitrificantes (Wheatley et al., 1991; Ambus, 1996) y temperaturas del suelo entre 4 °C (nocturnas) y 40 °C (diurnas) (Malih et al., 1990). Sin embargo, el referido proceso de desnitrificación pudiera haber sido limitado por las condiciones de baja humedad, presentes en el suelo durante los primeros días después de la siembra durante los cuales no se aplicó riego, ya que generalmente se considera que este proceso ocurre en condiciones anaeróbicas de saturación de agua en el suelo (Paul y Clark, 1989). Es de hacer notar que algunos autores (Malih et al., 1990) han planteado que en condiciones aparentemente aeróbicas existen “micrositios” con condiciones anaeróbicas que permiten la desnitrificación y Ruser et al. (1998) encontraron que en cultivos de papa con suministros de 50 y 150 kg N ha⁻¹ en forma mineral en un suelo con limo fino, se perdió durante un año 8 y 16 kg N ha⁻¹ respectivamente, como consecuencia de la desnitrificación resultando la mayor parte de estas pérdidas (68 %)

desde los surcos compactados por el paso del tractor y 23 % desde los camellones. En un trabajo posterior Ruser et al. (2001) encontraron que en cultivos de papa con las mismas dosis de fertilización anteriores, en un suelo de arcilla fina las pérdidas anuales por desnitrificación representaron 4.4 y 10.9 % del N suministrado, respectivamente.

Estos resultados sugieren que en el presente experimento las altas pérdidas gaseosas encontradas en la etapa inicial ocurrieron principalmente por volatilización de NH_3 .

Si consideramos que durante la primera etapa del cultivo, en los tratamientos con gallinazo, resultaron pérdidas gaseosas menores y % Nf mayores en el suelo, que se corresponden con una mayor inmovilización neta y bruta relativa del N mineral, que las encontradas con FM y P+F, entonces estos resultados sugieren que el gallinazo, debido a su contenido de compuestos orgánicos fácilmente degradables y asimilables por los microorganismos del suelo (Capítulo 2) estimuló un aumento rápido de la biomasa microbiana que causó la inmovilización de una fracción importante del N mineral protegiéndolo de perderse por volatilización y desnitrificación.

Es importante destacar que los resultados sugieren que el gallinazo causó no sólo mayor aumento en la cantidad de N en la biomasa microbiana (inmovilización neta) sino también mayor aumento en la cantidad de N orgánico extraíble (organización), posiblemente como producto de la actividad microbiana. Esta idea se corresponde con los resultados de Appel y Mengel (1993) que plantean que “las fracciones de N orgánico extraíble del suelo reflejan la actividad microbiana del suelo” y con los resultados de Friedel et al. (2001) que encuentran que “la biomasa microbiana ejerce una función de fuente-sumidero para el N orgánico extraíble en algunas parcelas de campo”.

Además, los valores encontrados, en el presente trabajo, del % Nf residual en el suelo en la cosecha final para los tratamientos con gallinazo, G+F con 60.7 % y G+P+F con 60.8 %, resultaron altos si se comparan con los valores de 25 y 26 % encontrados para los tratamientos FM y P+F, respectivamente, y con los valores: 39 % obtenido por Abreu (2004); 46 % encontrado por Halitligil et al. (2002) con suministro de 400 kg N ha^{-1} ; 21 % encontrado por MacDonald et al. (1997) y 19.5 a 24.6 % obtenidos por Maidl et al (2002). En vista de que una importante fracción de este Nf residual se encontró en la cosecha final en forma de N orgánico extraíble y en la biomasa microbiana, se plantea que el alto

contenido de N, potencialmente disponible para las plantas, encontrado inicialmente en el suelo es consecuencia del gallinazo suministrado a este suelo en ciclos de cultivo anteriores.

Por otra parte, los resultados indican que, en todos los tratamientos, en una etapa posterior, entre 33 DDS y la cosecha final, parte del N orgánico mineraliza y es absorbido por las plantas, evidenciándose además el proceso de remineralización del N previamente inmovilizado en la materia orgánica. Este ciclo de inmovilización-mineralización concuerda con los resultados obtenidos por Trehan y Wild (1993) en un experimento con plantas de papa cultivadas en potes con suministro de $(^{15}\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ + purin de vacuno. Con respecto a la mineralización bruta encontrada en la segunda etapa, ésta podría ocurrir como consecuencia de algún tipo de interacción entre las plantas y la microbiota del suelo a nivel de la rizósfera (Friedel et al., 2001).

En vista de que el gallinazo promueve la rápida inmovilización y organización del N mineral durante la etapa inicial del cultivo cuando la demanda del cultivo es baja, disminuyendo así el riesgo de pérdidas de N en formas gaseosas, y considerando que el N en forma orgánica lábil posteriormente puede ser mineralizado y absorbido por las plantas al aumentar sus requerimientos, se puede concluir que el suministro de gallinazo favorece la sincronización, a escala temporal, entre la disponibilidad de N en el suelo y la demanda de N por el cultivo.

En cuanto a las pérdidas de N por lixiviación, el % Nf resultó bajo, entre 3 y 10 % para todos los tratamientos, siendo similares al valor de 6 % Nf encontrado por Abreu (2004) y menores a los valores de 20 a 28 % Nf obtenidos por Ünlü et al. (1999) en Turquía con dosis de 400 y 1000 kg N ha⁻¹, respectivamente. Sin embargo, las pérdidas de N total por lixiviación fueron elevadas, tanto en valor absoluto como relativo, entre 30 y 49 % de la cantidad de N total suministrado, siendo menores para los tratamientos con pargana, G+P+F y P+F, que para los tratamientos G+F y FM, posiblemente debido a que la pargana promovió mayor acumulación de biomasa y de N en las plantas y menor concentración de N total extraíble en el suelo.

Tomando como referencia el tratamiento FM, en que todo el N fue suministrado en forma mineral y considerando los distintos efectos de las enmiendas orgánicas sobre la

acumulación de N por las plantas y las pérdidas de N del agroecosistema, los resultados muestran que en este suelo, el cual tiene un alto contenido de N potencialmente disponible para las plantas, la pargana mejoró la eficiencia en el uso del N del fertilizante mineral y del N total del sistema, incrementó el rendimiento de tubérculos y, aunque disminuyó las pérdidas por lixiviación, no resultó tan efectivo para controlar las pérdidas gaseosas derivadas del fertilizante mineral suministrado. En cambio, el gallinazo no mejoró significativamente la NUEf, la NUE, ni el rendimiento de tubérculos ni las pérdidas por lixiviación pero disminuyó sensiblemente las pérdidas gaseosas del fertilizante mineral. Como resultado de estas tendencias diferentes, con el tratamiento combinado de gallinazo, pargana y fertilizante mineral se incrementaron la NUEf, la NUE y el rendimiento de tubérculos y disminuyeron las pérdidas gaseosas y por lixiviación, las cuales resultaron menores que en los demás tratamientos. Aunque con el tratamiento combinado, G+P+F, se obtuvo un rendimiento de materia fresca de tubérculos menor al del tratamiento P+F, sin embargo, se obtuvieron mayores índices de uso/lavado y uso/pérdidas, que indican que el tratamiento combinado resultó más ventajoso desde un punto de vista ambiental.

Por otra parte, los resultados encontrados muestran que, previamente a la aplicación de los tratamientos, el suelo utilizado en el experimento tenía un alto contenido de N potencialmente disponible para las plantas que contribuyó en gran medida a su nutrición nitrogenada y a la obtención de altos rendimientos de tubérculos en todos los tratamientos. En vista de este hecho, se podría pensar que las diferencias encontradas entre los tratamientos en cuanto a las cantidades de N acumulado y los rendimientos de tubérculos obtenidos, podrían cambiar para cultivos en suelos que hayan recibido menores suministros de gallinazo y fertilizantes nitrogenados en el pasado y que por lo tanto presenten menores contenidos de N potencialmente disponible para las plantas. En este sentido y considerando los resultados y tendencias encontradas en este experimento en cuanto a los procesos de transferencia del N, especialmente de acumulación por las plantas, inmovilización por la microbiota y pérdidas gaseosas y por lixiviación, se podría especular que en esos suelos, con el tratamiento G+F podría obtenerse mayor acumulación de N y mayor rendimiento de cosecha que con el tratamiento FM, mientras que con el tratamiento G+P+F podría lograrse mayor rendimiento que con P+F.

Los resultados encontrados en este trabajo permiten concluir que el substrato de alta calidad (baja relación C/N), gallinazo, mejora la sincronización, a escala temporal, entre la disponibilidad de N en el suelo y la demanda de N por el cultivo de papa, debido a que promueve la rápida inmovilización y organización del N mineral disponible en el suelo, disminuyendo así el riesgo de pérdidas de N cuando la demanda por el cultivo es baja, mientras que el substrato de baja calidad (alta relación C/N), pargana, mejora la sincronización, a escala espacial, debido a que promueve el desarrollo radicular de las plantas y aumenta así la eficiencia en el uso del nitrógeno disponible en el suelo. El suministro combinado de gallinazo y pargana mejora la sincronización tanto a escala temporal como espacial, contribuyendo así a la obtención de altos rendimientos de tubérculos con menores pérdidas de N y un mayor índice uso-pérdidas del nitrógeno.

Estos resultados demuestran que mediante la selección adecuada de la calidad y cantidad de las enmiendas orgánicas y fertilizantes minerales suministrados se puede mejorar la sincronización entre la disponibilidad de N en el suelo y la demanda de N por el cultivo de papa, para aumentar así el rendimiento de tubérculos y la eficiencia en el uso de N y controlar las pérdidas de nitrógeno, en los agroecosistemas de los Andes venezolanos.

Recomendaciones

Desde el punto de vista práctico, los resultados aquí obtenidos sugieren que a los fines de evaluar la fertilidad de los suelos de la región andina, que vienen siendo manejados con altos suministros de gallinazo, sería conveniente analizar su contenido de N total extraíble, por cuanto esta fracción del N del suelo aparentemente representa un compartimiento del N del suelo que se relaciona mejor con el N potencialmente disponible para las plantas y con la actividad microbiana en el suelo.

Desde el punto de vista agroecosistémico los resultados obtenidos, plantean algunas interrogantes que sería importante resolver mediante la realización de experimentos de campo y laboratorio. Sería necesario:

- Evaluar el comportamiento de los substratos gallinazo y pargana, combinados o no con fertilizantes minerales, en suelos de la región andina con contenidos bajos de N mineral y N orgánico extraíble y evaluar la respuesta del cultivo de papa en estos suelos.
- Evaluar el proceso de volatilización de amoníaco de los fertilizantes minerales amoniacales y del gallinazo y el proceso de desnitrificación.

Bibliografía

- Abreu Z., 2004. Aspectos del ciclado del nitrógeno en un sistema agrícola con descansos largos de los páramos venezolanos. Tesis de Magíster Scientiae, Postgrado en Ecología Tropical, Instituto de Ciencias Ambientales y Ecológicas, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela, 114 p.
- Ambus P., 1996. Production of N₂O in soil during descomposition of dead yeast cells with different spatial distributions. *Plant and Soil*. 181: 7-12.
- Appel T., Mengel K., 1993. Nitrogen fractions in sandy soils in relation to plant nitrogen uptake and organic matter incorporation. *Soil Biol. Biochem.* 25, 6: 685-691.
- Axmann H., Sebastianelli A., Arrillaga J.L., 1999. Simple preparation techniques of biological material for isotopes analysis. In: IAEA. Use nuclear techniques in studies of soil-plant relationship. Vienna. TCS-2.
- Bélangier G., Ziadi N., Walsh J. R., Richards J. E., Milburn P. H., 2003. Residual Soil Nitrate after Potato Harvest. *Journal Envirom. Qual.* 32: 607-612.
- Bouyoucos G.J., 1962. Hydrometer Method Improved for Making Particle Size Analyses of Soils. *Agron. J.* 54: 464-465.
- Bremner J.M., Mulvaney C.S., 1982. Nitrogen-total. In: A.L. Page, R.H. Miller, D.R. Keeney (Eds.). *Methods of soil analysis. Part 2.* 2nd Edition, Agronomy. 9: 595-624.
- Bremner J.M., 1965. Total nitrogen. In: C.A. Black (Ed.). *Methods of Soil analysis.* American Society of Agronomy. Madison WI. 1149-1178.
- Brookes P.C., Landman A., Pruden G., Jenkinson D.S., 1985. Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: a rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil. *Soil Biol. Biochem.* 1: 837-842.
- CORPOANDES, 1995. Proyecto Desarrollo Integral Las Cuadras. Mérida, Venezuela. 156p.
- Friedel J.K., Gabel D., Stahr K., 2001. Nitrogen pools and turnover in arable soils under different durations of organic farming: II. Source-and-sink function of the soil microbial biomass or competition with growing plants? *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 164: 421-429.
- Grant R.F., 1994. Simulation of Ecological Controls on Nitrification. *Soil Biology & Biochemistry.* 26, N° 3: 305-315.
- Guiraud G. and Fardeaux J.C., 1980. Détermination isotopique par espectrométrie optique de composés faiblement enrichis en azote 15. *Analisis* 8, 148-152.

- Guiraud G., 1984. Contribution du marquage isotopique a l'évaluation des transferts d'azote entre les compartiments organiques et minéraux dans les systèmes sol-plante. Docteur es Sciences Thèse. Université Pierre et Marie Curie. Paris. 335 p.
- Halitligil M.B., Akin A., Ýlbeyi A., 2002. Nitrogen balance of nitrogen-15 applied as ammonium sulphate to irrigated potatoes in sandy texture soils. *Biol. Fertil. Soils*. 35: 369-378.
- Hunt R., 1982. *Plant Growth Curves. The Functional Approach to Plant Growth Analysis*. Edward Arnold (Publishers) Ltd., London, 226 p.
- ICA, 1989. El Análisis de suelos, plantas y aguas para riego. Manual de Asistencia Técnica N° 47. Instituto Colombiano Agropecuario. Bogotá, pp. 42-56.
- IGAC, 1978. Métodos analíticos del laboratorio de suelos. Instituto Geográfico "Agustín Codazzi". Ministerio de Hacienda y Crédito Público. Bogotá, Colombia, 663 p.
- Joergensen R.G., Mueller T., 1996. The fumigation-extraction method to estimate soil microbial biomass: calibration of the k_{EN} value. *Soil Biol. Biochem.* 28: 33-37.
- Kandeler E., 1996. Nitrification during long-term incubation. En: F. Schinner, R. Öhlinger, E. Kandeler, R. Margesin (Eds.). *Methods in Soil Biology*. Springer. Germany, pp. 149-151.
- Klute A., 1986. Water retention: Laboratory methods. En: Klute A. (Ed.), *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods*. Agronomy. 9: 635-662.
- Kroeze C., Aerts R., van-Bremen N., van-Dam D., van-der-Hoek K., Hofschreuder P., Hoosbeek M., de-Klein J., Kros H., van-Oene H., Oenema O., Tietema A., van-der-Veeren R., de-Vries W., 2003. Uncertainties in the fate of nitrogen: I: An overview of sources of uncertainty illustrated with a Dutch case study. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 66: 43-69.
- MacDonald A.J., Poulton P.R., Powlson D.S., Jenkinson D.S., 1997. Effects of season, soil type and cropping on recoveries, residues and losses of ^{15}N -labelled fertilizer applied to arable crops in spring. *Journal of Agricultural Science*. 129: 125-154.
- Maidl F. -X., Brunner H., Sticksel E., 2002. Potato uptake and recovery of ^{15}N - enriched ammonium nitrate. *Geoderma*. 105: 167-177.
- Malih S.S., McGill W.B., Nyborg M., 1990. Nitrate losses in soils: Effect of temperature, moisture and substrate concentration. *Soil Biol. Biochem.* 22, 6: 733-737.
- Méndez R.O., 1999. Fertilización en papa. En: Compendio del curso taller "Producción y certificación de semilla de papa", Dic. 1999, Centro de Investigaciones Agropecuarias del Estado Mérida, Mucuchíes, Venezuela, pp. 11-21.

- Myers R.J.K., Palm C.A., Cuevas E., Gunatilleke I.U.N., Brossard M., 1994. The synchronization of nutrient demand. En: P.L. Woomer and M.J. Swift (Eds.). *The Biological Management of Tropical Soil Fertility*. John Wiley and Sons, Inc, pp. 81-116.
- Paul E.A., Clark F.E., 1989. *Soil Microbiology and Biochemistry*. Academic Press, Inc. USA, 273 p.
- Preston, C.M., 1999. Optical emission análisis of ^{15}N : pressure effects and identification of NO and Gaydon-Herman N_2 bands in the discharge. *Applied Spectroscopy* 53, 1628-1637.
- Roberts S., Cheng H.H., Farrow F.O., 1991. Potato Uptake and Recovery of Nitrogen-15-Enriched Ammonium Nitrate from Periodic Applications. *Agronomy Journal*. 83: 378-381.
- Rojas L.A., Castillo L.E., 1989. Determinación de amonio, nitratos y nitritos. En: Instituto Colombiano Agropecuario, ICA (Ed.). *El Análisis de Suelos, Plantas y Aguas para Riego*. Manual de Asistencia Técnica N° 47. Bogotá, pp. 27-40.
- Ruser R., Flessa H., Schilling R., Steindl H., Beese F., 1998. Soil compaction and fertilization effects on nitrous oxide and methane fluxes in potato fields. *Soil Science Society American Journal*. 62: 1587-1595.
- Ruser R., Flessa H., Schilling R., Beese F., Munch, J.C., 2001. Potato uptake and recovery of Nitrogen-15-enriched ammonium nitrate from periodic applications. *Agronomy Journal*. 83: 378-381.
- Sarmiento L., 1995. Restauration de la fertilité dans un système agricole à jachère longue des hautes Andes du Venezuela. Docteur en Sciences Thèse. Université de Paris-Sud, Paris, 237 p.
- Soil Survey Staff, 1992. *Keys to Soil Taxonomy*. 5th Edition. SMS Technical monograph N° 19. Blacksburg, Virginia, Pocahontas Press Inc. 556 p.
- Swift M.J. (Ed.), 1984. *Soil Biological Processes and Tropical Soil Fertility. A Proposal for Collaborative Programme of Research*. Biology International. Paris. Spec. Issue. 5: 1-37.
- Swift M.J. (Ed.), 1987. *Tropical Soil Biology and Fertility (TSBF)*. Inter-Regional Research Planning Workshop. Biology International. Paris. Special Issue. 13:28-34.
- Tran T. Sen, Giroux M., 1991. Effects of N rates and harvest dates on the efficiency of ^{15}N -labelled fertilizer on early harvested potatoes (*Solanum tuberosum* L.). *Canadian Journal of Soil Science*. 71: 519-532.
- Trehan S.P., Wild A., 1993. Effects of an organic manure on the transformations of ammonium nitrogen in planted and unplanted soil. *Plant and Soil*. 151: 287-294.

- Ünlü K., Özenirler G., Yurteri C., 1999. Nitrogen fertilizer leaching from cropped and irrigated sandy soil in Central Turkey. *European Journal of Soil Science*. 50: 609-620.
- Vermoesen A., Groot C., Nollet L., Boeck P., Van Cleemput O., 1996. Effect of ammonium and nitrate application on the NO and N₂O emission out of different soils. *Plant and Soil*. 181: 153-162.
- Wheatley R.E., Griffiths B.S., Ritz K. 1991. Variations in the rates of nitrification and denitrification during the growth of potatoes (*Solanum tuberosum* L.) in soils with different carbon inputs and the effect of these inputs on soil nitrogen and plant yield. *Biology and Fertility of Soils*. 11: 157-162.
- Zhong Z., Makeschin F., 2003. Soluble organic nitrogen in temperate forest soils. *Soil Biol. Biochem.* 35: 333-338.

Capítulo 7

Discusión general y conclusiones

Análisis del problema

Con la finalidad de contribuir a la búsqueda de prácticas de manejo que permitan optimizar la fertilización nitrogenada en los cultivos de papa en los Andes venezolanos se planteó investigar la posibilidad de mejorar la sincronización entre la disponibilidad de N en el suelo y la demanda de N por el cultivo. En la literatura se encuentran distintas maneras que han sido empleadas en diferentes agroecosistemas para tratar de mejorar la sincronización tanto a escala espacial como a escala temporal (Myers et al., 1994). En cuanto a la escala espacial se han utilizado distintas prácticas las cuales se basan fundamentalmente en la localización de los nutrientes respecto a las raíces de las plantas cultivadas. Por ejemplo, el suministro de residuos orgánicos y fertilizantes minerales en la superficie del terreno o enterrados (Myers et al., 1994) o distribuidos al boleó o en bandas (Westermann y Sojka, 1996; Maidl et al., 2002). En cuanto a la escala temporal, esta es determinada principalmente por la dinámica de la demanda de N de cada cultivo. Entre las distintas maneras utilizadas destacan la fertilización en dosis fraccionadas en el tiempo (Roberts et al., 1991; Maidl et al., 2002) y también la propuesta por Swift (1984, 1987) quién plantea hipotéticamente que la combinación de materiales orgánicos de alta y baja calidad debería regular los procesos de mineralización e inmovilización que controlan la disponibilidad de N en el suelo para lograr una mejor sincronización con la demanda del cultivo que la obtenida con el suministro separado de esos mismos substratos orgánicos. Sin descartar la utilidad potencial de las distintas alternativas para mejorar la sincronización tanto a escala espacial como temporal y en base a la hipótesis de la sincronización de Swift (Swift, 1984; Swift, 1987; Myers et al., 1994), en el presente trabajo se planteó como objetivo general evaluar la hipótesis que mediante el suministro combinado de las enmiendas orgánicas gallinazo y cáscara de arroz (pargana), conjuntamente con fertilizante mineral se podría promover la sincronización entre la disponibilidad de N en el suelo y la demanda de N por el cultivo de papa, para aumentar el rendimiento de tubérculos, disminuir las pérdidas de nitrógeno e incrementar la eficiencia en el uso del N en la zona alta de los Andes venezolanos.

Para estimar las cantidades de fertilizantes nitrogenados que deben ser suministrados a los cultivos, tradicionalmente se ha utilizado un enfoque metodológico que consiste en evaluar en experimentos de campo la respuesta del rendimiento de cosecha del cultivo a cantidades crecientes de los fertilizantes que se investigan, ajustar los datos obtenidos a una ecuación matemática y utilizar esta última junto a la información económica para explorar la relación costo beneficio en términos de la cantidad del fertilizante o nitrógeno suministrado. Aún cuando este enfoque ha resultado útil desde el punto de vista económico en condiciones ambientales y prácticas de manejo particulares o específicas, sin embargo, aporta poca o ninguna información sobre los factores y procesos que controlan la disponibilidad de N en el suelo y la demanda por el cultivo. Estos procesos deben ser bien entendidos para optimizar las prácticas de suministro de N en distintas condiciones ambientales y de manejo de los cultivos (Bowen y Baethgen, 1998).

En vista de esta situación en este trabajo se planteó abordar el problema de la optimización de la fertilización nitrogenada en los cultivos de papa en los Andes venezolanos utilizando un enfoque agroecosistémico, es decir basándose en el entendimiento del funcionamiento del agroecosistema a través del conocimiento de los factores y procesos que determinan el flujo de N entre sus distintos compartimentos y el ambiente que lo rodea.

Como no se disponía de información suficiente en relación con los efectos del suministro de las enmiendas orgánicas gallinazo y pargana sobre el desarrollo del cultivo de papa ni sobre los procesos de transferencia que condicionan el balance de N en las condiciones ecológicas de esta zona, en el Capítulo 1 de este trabajo se plantearon una serie de objetivos específicos dirigidos a recabar parte de esta información y a comprobar las hipótesis propuestas. Con la finalidad de lograr estos objetivos se diseñaron, propusieron y realizaron tres experimentos. En cada uno de los capítulos desde el 2 hasta el 6 se presentaron los objetivos abordados, los resultados encontrados así como su análisis y discusión y las conclusiones obtenidas. En la tabla 1 se presenta de manera resumida la secuencia de objetivos planteados y conclusiones obtenidas en estos capítulos.

Tabla 1. Objetivos y conclusiones de los capítulos de la tesis. Para cada capítulo se presenta la conclusión general más importante y entre corchetes la conclusión más relevante para las condiciones experimentales particulares.

Objetivos	Conclusiones
Capítulo 2	
<p>Caracterizar las enmiendas orgánicas gallinazo y cáscara de arroz en cuanto a su calidad y estudiar, en condiciones de incubación en laboratorio, los efectos del suministro separado y combinado de estos sustratos sobre los procesos de mineralización del C y de mineralización e inmovilización del N.</p>	<p>El gallinazo constituye un sustrato de alta calidad y la pargana de baja. La dinámica de los procesos de mineralización del C y de inmovilización del N, involucrados en la descomposición de las enmiendas orgánicas dependen no sólo de la relación C/N sino más aún de la composición bioquímica, la cual condiciona la actividad de la comunidad microbiana descomponedora. [El gallinazo tiene una fracción mayor de C más lábil que la pagana y además promueve mayor inmovilización temprana del N].</p>
Capítulo 3	
<p>Analizar el efecto del suministro de diferentes fuentes de fertilización nitrogenada sobre el desarrollo del cultivo de papa y su dinámica de acumulación de N, evaluando el déficit de N.</p>	<p>El desarrollo del cultivo de papa es afectado sensiblemente por la calidad de la fuente de N. El cultivo responde a niveles moderados de déficit de N reduciendo la expansión foliar y la IPAR para mantener la concentración de N en la hoja y la RUE. [Al combinar fertilizante mineral con el sustrato orgánico de baja calidad, pargana, resultó mayor acumulación de N, menor deficiencia de este nutriente y mayor producción de biomasa y de tubérculos].</p>
Capítulo 4	
<p>Analizar el efecto del suministro de diferentes fuentes de fertilización nitrogenada sobre la distribución de la biomasa y del N entre los órganos de las plantas de papa durante su desarrollo y analizar su relación con el rendimiento final del cultivo.</p>	<p>Los patrones de distribución de la biomasa del cultivo de papa responden a la calidad de la fuente de N y afectan el rendimiento final del cultivo. [El sustrato de baja calidad, pargana, estimuló mayor biomasa de raíces y mayor relación de biomasa de raíces a vástagos en las etapas iniciales del desarrollo del cultivo, que promovieron mayor acumulación de N y, por lo tanto, mayor producción de biomasa asimilatoria durante la expansión foliar y en consecuencia la obtención de rendimientos de tubérculos más altos en la cosecha final].</p>

Objetivos	Conclusiones
<p>Capítulo 5</p> <p>Evaluar el efecto de diferentes fuentes de fertilización nitrogenada sobre los procesos del ciclo del N en el cultivo de papa y sobre la dinámica de la disponibilidad de N en el suelo y la acumulación de N por las plantas, en relación con la demanda de N del cultivo, durante su desarrollo.</p>	<p>La calidad de los substratos suministrados afecta la dinámica de la disponibilidad de N mineral en el suelo, por su influencia sobre los procesos de mineralización-inmovilización y lixiviación así como también condiciona la accesibilidad de las plantas al N disponible en el suelo, a través del efecto de estas enmiendas sobre el desarrollo del sistema radicular el cual determina la absorción y acumulación de N por el cultivo de acuerdo a la demanda. [El suministro del substrato de baja calidad, pargana, promovió el desarrollo radicular de las plantas de papa y, por lo tanto, mayor accesibilidad al N disponible en el suelo y mejor satisfacción de la demanda. Con el suministro combinado de gallinazo, pargana y fertilizante mineral se obtuvieron altos rendimientos de tubérculos con menores pérdidas de N por lavado].</p>
<p>Capítulo 6</p> <p>Evaluar en el cultivo de papa el efecto de diferentes fuentes de fertilización nitrogenada sobre el balance de N y los procesos de transferencia que lo determinan</p>	<p>La calidad de los substratos suministrados regula los procesos de transferencia del N y como consecuencia determina el balance de N en el cultivo. [El substrato de alta calidad, gallinazo, promovió la rápida inmovilización y organización del N mineral disponible en el suelo, disminuyendo así el riesgo de pérdidas gaseosas de N cuando la demanda por el cultivo fue baja, mientras que el substrato de baja calidad, pargana, promovió el desarrollo radicular de las plantas y aumentó así la eficiencia en el uso del N disponible. El suministro combinado de gallinazo y pargana mejoró la sincronización, tanto a escala temporal como espacial, contribuyendo así a la obtención de altos rendimientos de tubérculos con menores pérdidas de N y un mayor índice uso/pérdidas del N].</p>

Comprobación de las hipótesis

Hipótesis I

“La eficiencia en la utilización, por parte del cultivo de papa, del N aplicado como fertilizante mineral o gallinazo, en el piso andino venezolano puede ser baja debido a que el proceso de mineralización del N orgánico contenido en el gallinazo y el proceso de nitrificación del NH_4^+ , procedente de este abono y/o del fertilizante mineral, posiblemente transcurren de manera rápida en una etapa temprana del desarrollo del cultivo en la que la demanda de N es mucho menor que la disponibilidad de este nutriente en el suelo, contribuyendo a que una fracción importante del NO_3^- así producido se pierda por lixiviación u otras vías”.

Los resultados de los análisis realizados (Capítulo 2) indican que ciertamente el gallinazo es un sustrato de alta calidad tanto por su baja relación C/N (10.5) como también por su composición bioquímica en cuanto al contenido de compuestos orgánicos hidrosolubles (18.9 %), celulosa (23.1 %) y lignina (7.9 %). Por otra parte en los tres experimentos se encontró que el suministro de gallinazo causó mayor inmovilización temprana de N que la pargana (Capítulos 2, 5 y 6). Este resultado contrasta con los resultados generalmente informados en la literatura (Myers et al., 1994; Janssen, 1996; Henriksen y Breland, 1999) en el sentido que los sustratos de alta calidad deberían causar poca o ninguna inmovilización neta en la etapa inicial de su descomposición.

En vista de estos resultados, en el presente trabajo se plantea que el gallinazo contiene compuestos orgánicos fácilmente degradables y asimilables por microorganismos de baja relación C/N y que constituyen una fuente tanto de energía como de C asimilable que permiten un rápido incremento de la biomasa microbiana y, por lo tanto, de la demanda de N, el cual es incorporado en la biomasa (inmovilizado) en parte, desde el sustrato por “asimilación directa” (Barak et al., 1990; Hadas et al., 1992; Mary et al., 1996) y otra parte desde el suelo, donde en este caso se encuentra disponible tanto en forma mineral como en forma de N orgánico extraíble.

Además los resultados del experimento con ^{15}N (Capítulo 6) indican que el gallinazo promovió mayor inmovilización bruta (inmovilización neta en la biomasa

microbiana + organización) del N proveniente del fertilizante mineral (Nf) que permitió protegerlo de perderse en forma gaseosa y que causó que la mayor parte (60 %) de este Nf permaneciera en el suelo, principalmente en formas orgánicas, al final del cultivo. Estos resultados también sugieren que el alto contenido de N total extraíble en estos suelos se debe al suministro de cantidades importantes de gallinazo en cultivos anteriores. Parte de ese N podría ser utilizado por cultivos siguientes como aparentemente ocurrió en el presente experimento según se desprende de los resultados obtenidos con el tratamiento FM donde la mayor parte del N acumulado por las plantas (82 %) provino del N presente en el suelo antes del experimento (Capítulo 6).

En cuanto al proceso de nitrificación, los resultados de los % de nitrificación encontrados en los experimentos realizados tanto en condiciones de incubación (Capítulo 2) como en condiciones de campo (Capítulos 5 y 6) muestran que este suelo posee un potencial de nitrificación muy alto. En consecuencia, el NH_4^+ suministrado como fertilizante mineral o procedente de la mineralización de la materia orgánica del suelo y de los substratos orgánicos añadidos, se transforma rápidamente en nitratos. Esto se debe a que este suelo reúne condiciones óptimas para el crecimiento de las bacterias nitrificantes, debido a que posee materia orgánica que constituye fuente potencial de CO_2 (Grant, 1994), así como valores de pH cercanos a la neutralidad (Paul y Clark, 1989), y una textura franco arenosa que unida a la práctica del arado favorece las condiciones aeróbicas (Hatch et al., 1998). En este sentido, los resultados encontrados en la literatura generalmente indican que el proceso de nitrificación parece ser estimulado por las prácticas agrícolas (Laanbroek y Gerards, 1991; Jarvis, 1996; Rasmussen et al., 1998; Burger y Jackson, 2003). Por ejemplo Burger y Jackson (2003) en distintos suelos de California, EEUU, usando dos sistemas agrícolas: convencional y orgánico, encuentran que la nitrificación representa el mayor consumo de NH_4^+ en ambos suelos. También, Sarmiento (1995), LLambí (1997) y Abreu (2004) encontraron altos potenciales de nitrificación en suelos agrícolas manejados con descansos en Gavidia en los Andes venezolanos.

El hecho de que la mayor parte del N mineral del suelo se haya encontrado en forma de nitratos, en lugar de amonio y dada la textura franca a franco-arenosa de estos suelos, aumenta el riesgo de pérdida de N por lixiviación, debido a que el ión nitrato presenta más

movilidad que el amonio en la solución del suelo (Paul y Clark, 1989; Ünlü et al., 1999). De hecho, los resultados encontrados en el presente trabajo indican que aún cuando las pérdidas por lixiviación del N proveniente del fertilizante mineral fueron menores al 10 % del N suministrado en forma mineral (Capítulo 6), sin embargo, las pérdidas totales de N por lixiviación fueron altas y representaron entre 30 y 49 % del N total suministrado (Capítulo 5). Es de destacar que ocurrieron pérdidas altas de N por lavado aún cuando la lámina de agua drenada fue baja tanto en términos absolutos (entre 19 y 33 mm) como también en términos relativos (entre 5 y 9 %) a la lámina total que ingresó por riego + precipitación (Capítulo 5). Estos resultados sugieren que, en la región andina, posiblemente ocurren importantes pérdidas de N por lavado en los cultivos de papa manejados con riego y alto suministro de fertilizantes e indican que existe alto riesgo de que puedan ocurrir pérdidas aún mayores, en casos de precipitación y riego excesivo.

Además, el nitrato producido podría perderse por otras vías, entre las cuales destacan la escorrentía y las pérdidas gaseosas por desnitrificación. En cuanto a las primeras, Sarmiento et al. (2004) encontraron, en este mismo experimento de campo en parcelas, que las pérdidas de N por escorrentía para el tratamiento combinado G+P+F resultaron 0.8 kg ha^{-1} que representan el 0.3 % de la cantidad total de N suministrada, lo cual indica que esta vía de salida puede considerarse despreciable en las condiciones del presente experimento de campo. En cuanto a las pérdidas por desnitrificación, en el experimento de campo en canteros (Capítulo 6) se encontró que se perdió por vía gaseosa entre 12 y 52 % del N suministrado en forma mineral. Estas altas pérdidas gaseosas pudieron haber ocurrido por volatilización de NH_3 como también por desnitrificación. Las condiciones ecológicas presentes al inicio del cultivo parecieran más favorables para la volatilización que para la desnitrificación (Capítulo 6). Sin embargo, en el experimento no se realizaron determinaciones que permitan evaluar la contribución individual de los procesos mencionados a las pérdidas gaseosas encontradas.

En conclusión, el gallinazo suministrado en vez de favorecer la mineralización rápida del N orgánico, más bien promueve los procesos de inmovilización y organización del N, protegiéndolo de perderse del agroecosistema en una etapa temprana del desarrollo del cultivo en la que la demanda es baja. En etapas posteriores el N orgánico puede mineralizar y contribuir con la nutrición nitrogenada del cultivo o cultivos siguientes. En cambio, el proceso de nitrificación del NH_4^+ suministrado o mineralizado desde la materia orgánica, si transcurre de manera rápida y una fracción importante del NO_3^- así producido se pierde, principalmente por lavado, contribuyendo a disminuir la eficiencia en el uso del N por los cultivos de papa en el piso andino venezolano.

Hipótesis II

“El N suministrado al cultivo, a través de la fertilización mineral, podría ser protegido mediante la adición de sustratos de baja calidad que inicialmente estimulen el proceso de inmovilización microbiana del N, disminuyendo de esta manera las pérdidas de N por lixiviación del NO_3^- y por otras vías. El N podría ser mineralizado en una etapa posterior, de manera gradual, contribuyendo con la nutrición nitrogenada del cultivo”.

Los análisis realizados (Capítulo 2) indican que ciertamente la pargana es un sustrato de baja calidad tanto por su alta relación C/N (91.7) como también por su composición bioquímica, en cuanto al contenido de compuestos orgánicos hidrosolubles (3.6 %), celulosa (39.2 %) y lignina (21.9 %).

Los resultados encontrados en los tres experimentos (Capítulos 2, 5 y 6) indican que la pargana causó inmovilización de N en la biomasa microbiana. Sin embargo las cantidades de N inmovilizadas con la pargana resultaron menores que con el gallinazo en la primera etapa después del suministro de los sustratos. Este hecho se atribuye, mas que a la relación C/N, al alto contenido de C estable y recalcitrante en la pargana (Capítulo 2) que condiciona la cinética de descomposición de este sustrato y la dinámica de inmovilización del N (Hadas et al., 2004). Por estas razones, la inmovilización causada por la pargana durante la etapa inicial del desarrollo del cultivo no fue suficientemente alta para proteger

al N-NH_4^+ suministrado como fertilizante mineral, de perderse en forma gaseosa, representando estas pérdidas el 39 % del N mineral suministrado (Capítulo 6). Los resultados indican que en todos los tratamientos posteriormente se produjo remineralización del Nf (Capítulo 6). Posiblemente, parte de este proceso se deba a algún tipo de interacción bioquímica entre las plantas y la microbiota del suelo a nivel de la rizósfera (Bottner et al., 1999; Friedel et al., 2001; Fontaine et al., 2003).

Por otra parte la pargana aparentemente estimula el drenaje y por consiguiente también las pérdidas por lavado del N del fertilizante mineral y del suelo (Capítulos 5 y 6). Sin embargo, estas pérdidas se contrarrestan gracias al efecto positivo de la pargana sobre el desarrollo de las raíces, el cual promueve la accesibilidad de las plantas de papa al N disponible en el suelo y por lo tanto favorece la absorción y acumulación de N por el cultivo y el crecimiento del mismo (Capítulos 3 y 4).

Cuando se planteó esta hipótesis se pensó en que la pargana por ser un substrato orgánico de baja calidad, promovería la inmovilización temprana del N, sin embargo, la pargana resultó menos efectiva que el gallinazo en cuanto a la protección inicial brindada, a través del proceso de inmovilización, contra las pérdidas gaseosas del N mineral suministrado. En cambio en etapas siguientes la pargana resultó efectiva en cuanto a la protección brindada contra las pérdidas totales por lavado, no tanto por su efecto sobre la inmovilización sino más bien por su efecto sobre el desarrollo radicular que promueve la acumulación de N y reduce las pérdidas por lavado.

En conclusión, el N suministrado al cultivo, a través de la fertilización mineral puede ser protegido mediante el suministro de substratos orgánicos que inicialmente estimulen el proceso de inmovilización microbiana del N, disminuyendo de esta manera las pérdidas de N. La selección del substrato utilizado debe fundamentarse en el conocimiento de la composición bioquímica y más aún de la dinámica de inmovilización de N y no solo en base a la relación C/N.

Hipótesis alternativa

Con respecto a la función protectora de los substratos orgánicos sobre las pérdidas gaseosas, se podría pensar en mecanismos adicionales al proceso de inmovilización. El intervalo de tiempo que transcurrió entre el inicio y el primer muestreo (33 DDS) en que se realizó la determinación de N en las distintas formas (amonio, nitrato, total extraíble y en la biomasa microbiana) en el experimento en canteros con trazador isotópico, no permitió determinar la diferencia en la velocidad de los procesos de nitrificación, inmovilización, organización y pérdidas gaseosas (volatilización + desnitrificación) durante los primeros días inmediatos al suministro de los tratamientos.

Por una parte, la magnitud de las pérdidas gaseosas encontradas en la primera etapa del experimento en canteros (entre el inicio y 33 DDS) para los tratamientos FM y P+F, que resultaron respectivamente 43 y 33 % del N-NH₄⁺ suministrado, hace pensar que estas pérdidas ocurrieron principalmente por volatilización de NH₃ y en menor cantidad por desnitrificación, ya que Ruser et al. (1998, 2001) en cultivos de papa, en Alemania, realizados sobre suelos finos limosos y arcillosos que tienen mayor posibilidad de compactación, encuentran pérdidas anuales por desnitrificación entre 4.4 y 10.9 % del N suministrado, mas aún si se considera que en esos suelos emplean tractor durante el manejo del cultivo.

Por otra parte, Laanbroek y Gerards (1991) encuentran que la aplicación de enmiendas orgánicas en suelos agrícolas en Holanda aumenta el potencial de nitrificación y Burger y Jackson (2003) en distintos suelos de California, EEUU, usando dos sistemas agrícolas: convencional y orgánico, encuentran que la nitrificación bruta resultó mayor con el sistema orgánico que con el convencional aunque no se presentaron diferencias estadísticamente significativas debido a la alta variación en los datos experimentales. Sin embargo encuentran altas tasas de asimilación microbiana de NO₃⁻ con diferencias significativas entre ambos sistemas que representaron entre 32 y 35 % de las tasas de nitrificación bruta en el sistema convencional, mientras que en el sistema orgánico representaron mayores valores, entre 37 y 46 %.

Además, Grant (1994) plantea que en el proceso de nitrificación autotrófica el NH₄⁺ constituye la fuente de energía para la microbiota mientras que el CO₂ constituye el substrato para el crecimiento microbiano y por lo tanto la concentración de este substrato

[CO₂] controla la velocidad del proceso de nitrificación. Al mismo tiempo indica que la concentración de CO₂ depende, entre otros factores de la mineralización del C orgánico por parte de la microbiota heterótrofa.

En base a estos planteamientos se podría pensar hipotéticamente que el gallinazo protegió mejor al amonio de perderse por volatilización de NH₃ no solo porque inmovilizó rápidamente el N mineral (NH₄⁺ y NO₃⁻) sino también porque haya inducido una mayor velocidad del proceso de nitrificación debido a que suministró mayor cantidad del substrato CO₂ como producto de la rápida mineralización del C orgánico lábil que contiene, como lo evidencian los resultados de la incubación en el laboratorio (Capítulo 2). Esta hipótesis habría que confirmarla con el objeto de dilucidar el mecanismo de interacción entre los procesos antes referidos para poder entender mejor la función protectora del gallinazo sobre las pérdidas gaseosas del N suministrado en forma mineral.

Hipótesis III

“Mediante la aplicación combinada de enmiendas orgánicas de calidad contrastante, gallinazo y cáscara de arroz, se podría promover una mayor sincronización entre la disponibilidad de N en el suelo y la demanda de N por el cultivo que la obtenida mediante la aplicación de estas enmiendas de manera separada. Esta mayor sincronización debería mejorar los rendimientos y disminuir las pérdidas de N desde el agroecosistema”.

Tomando como referencia el tratamiento FM, en que todo el N fue suministrado en forma mineral y considerando los distintos efectos de las enmiendas orgánicas sobre la acumulación de N por las plantas y las pérdidas de N del agroecosistema, los resultados encontrados (Capítulos 5 y 6) muestran que el gallinazo no mejoró significativamente la eficiencia en el uso del nitrógeno del fertilizante mineral (NUEf) y del N total (NUE), ni el rendimiento de tubérculos ni las pérdidas por lixiviación pero disminuyó sensiblemente las pérdidas gaseosas del fertilizante mineral. En cambio, la pargana mejoró la NUEf y la NUE, incrementó el rendimiento de tubérculos y, aunque disminuyó las pérdidas por lixiviación, no resultó tan efectivo para controlar las pérdidas gaseosas derivadas del fertilizante mineral suministrado. Como resultado de estas tendencias diferentes, con el

tratamiento combinado de gallinazo, pargana y fertilizante mineral se incrementaron la NUEf, la NUE y el rendimiento de tubérculos y disminuyeron las pérdidas gaseosas y por lixiviación, las cuales resultaron menores que en los demás tratamientos. Aunque con el tratamiento combinado, se obtuvo un rendimiento de materia fresca de tubérculos menor al del tratamiento con pargana y fertilizante mineral, sin embargo, se obtuvieron mayores índices de uso/lavado y uso/pérdidas, que indican que el tratamiento combinado resultó más ventajoso desde un punto de vista agroecológico.

Otro aspecto a ser tomado en cuenta es que los resultados del experimento en canteros (Capítulo 6) indican que con el tratamiento combinado se alcanza un mejor balance en cuanto a las formas orgánicas en que se encuentra el N, lábiles (N orgánico extraíble) y estables (N orgánico no extraíble), que pueden contribuir tanto a un mejor control de las pérdidas por lavado como también al mantenimiento de un nivel adecuado de N potencialmente mineralizable y disponible para el cultivo.

Es de hacer notar que el hecho de que estos suelos agrícolas, como producto del manejo intensivo y aparente sobrefertilización, contenían gran cantidad de N en forma mineral y orgánica extraíble, potencialmente disponible para las plantas (Capítulos 2, 5 y 6), influyó de manera determinante para mejorar la sincronización a escala espacial, a tal punto que con el tratamiento P+F se obtuvieron rendimientos mas altos que con el tratamiento combinado G+P+F. Se podría pensar que en suelos que hayan recibido en el pasado menores cantidades de gallinazo y fertilizantes minerales posiblemente el tratamiento combinado resulte mejor no solo en cuanto a las pérdidas sino también en cuanto a la NUE y el rendimiento de tubérculos.

En base a los resultados encontrados en todos los experimentos y a la discusión realizada en la comprobación de las hipótesis I y II, se puede concluir que el substrato de alta calidad, gallinazo, mejora la sincronización, a escala temporal, entre la disponibilidad de N en el suelo y la demanda de N por el cultivo de papa, debido a que promueve la rápida inmovilización y organización del N mineral disponible en el suelo (y posiblemente la nitrificación del NH_4^+), disminuyendo así el riesgo de pérdidas de N (principalmente por volatilización de NH_3) cuando la demanda por el cultivo es baja, mientras que el substrato de baja calidad, pargana, mejora la sincronización, a escala espacial, debido a que

promueve el desarrollo radicular de las plantas y aumenta así la eficiencia en el uso del nitrógeno disponible en el suelo.

En conclusión, el suministro combinado de enmiendas orgánicas de calidad contrastante gallinazo y pargana, mejora la sincronización tanto a escala temporal como espacial, contribuyendo así a la obtención de altos rendimientos de tubérculos con menores pérdidas de N y una relación mayor entre la cantidad de N utilizada por el cultivo y la cantidad de N que se pierde del agroecosistema respecto a las obtenidas con el suministro de estas enmiendas de manera separada.

Hipótesis general

“En los cultivos de papa de la zona alta de los Andes venezolanos se puede aumentar el rendimiento de tubérculos, disminuir las pérdidas de nitrógeno e incrementar la eficiencia en el uso del N, mejorando la sincronización entre la disponibilidad de N en el suelo y la demanda de N por el cultivo mediante la selección adecuada de la cantidad y calidad de los fertilizantes minerales y enmiendas orgánicas suministrados”.

Las conclusiones presentadas en este capítulo y en particular en la hipótesis III constituyen una comprobación en sí de la hipótesis general propuesta.

Ahora bien, es necesario destacar la importancia que tiene el componente espacial de la sincronización entre la disponibilidad y la demanda. En este sentido, los resultados obtenidos en los experimentos de campo del presente trabajo indican que el suministro de la pargana promueve el desarrollo radicular y aumenta la accesibilidad de las plantas al N disponible del suelo y por lo tanto mejora la nutrición nitrogenada en relación con la demanda del cultivo. Este efecto se considera como un tipo de sincronía (Myers et al., 1994).

Por otra parte, si se analizan los resultados obtenidos en los experimentos de campo podemos observar que los rendimientos de tubérculos y la cantidad de N acumulada, encontrados en el experimento en canteros (Capítulo 6) presentaron la misma tendencia en cuanto a los tratamientos que los encontrados en el experimento en parcelas (Capítulo 5).

Sin embargo en los canteros estos parámetros resultaron en promedio de todos los tratamientos 2,5 veces mayores que en las parcelas, lo cual indica una mejor satisfacción de la demanda. Si se detallan las condiciones experimentales, se tiene que la siembra de la semilla fue realizada al mismo tiempo y los canteros estaban localizados en la misma área experimental de las parcelas y recibieron la misma lámina de riego y prácticas agronómicas. Los tratamientos de fertilización fueron los mismos con la diferencia que el sulfato de amonio suministrado a las plantas de los canteros estaba marcado [$(^{15}\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$]. Por otra parte aún cuando las láminas de los canteros evitaron el escurrimiento y la erosión, las pérdidas de N por estas vías resultaron muy bajas (Sarmiento et al, 2004) y pueden considerarse despreciables en el experimento en parcelas (Capítulos 5 y 6). En cuanto a la densidad de siembra empleada, esta fue la misma ($4.44 \text{ plantas m}^{-2}$, equivalente a $0.225 \text{ m}^2 \text{ planta}^{-1}$) en los dos experimentos pero con distinta distribución espacial, es decir diferente distancia entre plantas. Mientras en el experimento de campo en parcelas las plantas estaban separadas 90 cm entre hileras y 25 cm en la hilera, en cambio en el experimento en canteros las plantas estaban separadas por laminas entre hileras y separadas 47.5 cm en la hilera. Estos resultados confirman que el espaciamiento entre plantas puede influir en la sincronización al modificar la distribución de las raíces y la dinámica de la absorción de nutrientes en relación con la demanda (Myers et al., 1994).

En el caso de la papa, en algunos casos se ha atribuido la baja recuperación de N por el cultivo (Van Delden et al., 2003) a que parte del suelo no es explorado por las raíces de las plantas como consecuencia de la separación entre las hileras y a la práctica de construcción de camellones (Vos y Groenwold, 1986; De Willigen et al., 1995). También se ha encontrado que la localización del fertilizante nitrogenado en los camellones tiene un efecto positivo sobre la recuperación de N por el cultivo (Westermann y Sojka, 1996; Maidl et al., 2002) y que en la zona de suelo compactado entre los camellones pueden ocurrir emisiones de óxido nítrico (Ruser et al., 1998).

Estos resultados, así como las diferencias encontradas en este trabajo en los experimentos con distintos espaciamientos entre plantas, indican que la escala espacial puede ser determinante y debe ser tomada en cuenta para lograr la sincronización en los cultivos de papa en los andes venezolanos.

Otro aspecto importante a considerar en relación con la hipótesis general planteada, es que el enfoque agroecosistémico utilizado en la realización de este trabajo representa una importante contribución a mejorar la comprensión de los procesos que afectan el balance de nitrógeno en el agroecosistema papa en los Andes venezolanos y de los efectos que tiene el suministro de enmiendas orgánicas de distinta calidad sobre estos procesos.

Además muchos de los resultados y datos obtenidos permitirán, en una etapa posterior, evaluar alguno de los modelos de simulación existentes para el cultivo de papa (Bowen et al., 1999). Con esta finalidad, el diseño experimental y de muestreos del experimento de campo en parcelas se fundamentó en las recomendaciones del Proyecto “Internacional Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer” (IBSNAT, 1990), no solo para utilizar un diseño previamente probado sino también para obtener datos que permitirán calibrar y validar el modelo de simulación DSSAT-SUBSTOR-papa (Tsuji et al., 1994).

Una vez calibrado y validado este u otros modelos de simulación, estos podrían ser utilizados para simular diferentes alternativas de manejo del N para un amplio rango de prácticas agrícolas y para la diversidad de condiciones climáticas y edáficas existentes en el piso andino venezolano (Bowen et al., 1999; Machado et al., 2001; Sarmiento y Bowen, 2002). Mediante la simulación se podrían explorar y plantear alternativas de manejo de las enmiendas orgánicas y los fertilizantes minerales en relación con la calidad, cantidad y momento de aplicación, que permitan optimizar su empleo en la región Andina en cuanto a la eficiencia en la utilización del N en términos ambientales y económicos (Bowen et al., 2004). Por el contrario, el método tradicional de ensayo y error de la experimentación en campo no permite la extrapolación de los resultados a otras localidades.

Por estas razones el enfoque agroecosistémico utilizado para alcanzar los objetivos planteados en esta tesis, constituye una estrategia de investigación que ofrece como principal ventaja la posibilidad de emplear los conocimientos generados para explorar mediante modelos de simulación, el desarrollo potencial del cultivo de papa en distintas condiciones climáticas, edáficas y de manejo. Con estas perspectivas, se justifica el gran esfuerzo realizado en términos de recursos humanos, económicos, materiales y tiempo invertidos en la implementación de los experimentos, evaluación de parámetros, toma de

muestras, análisis e interpretación de resultados, que implicó el enfoque agroecosistémico utilizado.

En conclusión, en esta tesis se confirma que mediante la selección adecuada de la cantidad y calidad de los fertilizantes minerales y enmiendas orgánicas suministrados a los cultivos de papa de la zona alta de los Andes venezolanos, se puede mejorar la sincronización, tanto a escala temporal como espacial, entre la disponibilidad de N en el suelo y la demanda de N por el cultivo para aumentar el rendimiento de tubérculos, disminuir las pérdidas de nitrógeno e incrementar la eficiencia en el uso del nitrógeno.

Recomendaciones

Prioridades de Investigación

- Estudiar los procesos de transferencia del N: nitrificación, mineralización-inmovilización y pérdidas gaseosas (volatilización y desnitrificación) a corto plazo, es decir a escala diaria o interdiaria en la etapa inicial después del suministro de los substratos, mediante la realización de experimentos de incubación y empleando modelos de simulación que permitan analizar los procesos.

- Estudiar el efecto de las enmiendas orgánicas en suelos de la zona andina con distintas historias de manejo que incluyan manejos menos intensivos en cuanto al suministro de fertilizantes minerales y enmiendas orgánicas como el gallinazo.

- Calibrar y validar el modelo de simulación DSSAT-SUBSTOR-papa (Tsuji et al., 1994) con los datos de este trabajo, como punto de partida para utilizar el enfoque agroecosistémico, para tratar de optimizar las cantidades y proporciones de las distintas fuentes de fertilización aquí estudiadas. El empleo de este u otro modelo de simulación constituye una herramienta necesaria para explorar prácticas de manejo alternativas para la optimización de la fertilización nitrogenada en la región andina, ya que debería permitir reducir el número de experimentos que habría que hacer para cubrir la diversidad de condiciones agroecológicas de la zona. Una vez calibrado y validado alguno de estos modelos se deberían hacer simulaciones tomando en cuenta tanto la escala espacial como la escala temporal de la sincronización en relación con la distribución de las plantas en el terreno y la calidad, cantidad, localización y momento de aplicación de las enmiendas orgánicas y los fertilizantes minerales, que permitan posteriormente hacer recomendaciones de fertilización tendientes a optimizar la eficiencia en la utilización del nitrógeno en los Andes venezolanos.

Bibliografía

- Abreu Z., 2004. Aspectos del ciclado del nitrógeno en un sistema agrícola con descansos largos de los páramos venezolanos. Tesis de Magíster Scientiae, Postgrado en Ecología Tropical, Instituto de Ciencias Ambientales y Ecológicas, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela, 114 p.
- Barak P., Molina J.A.E., Hadas A., Clapp C.E., 1990. Mineralization of amino acids and evidence of direct assimilation of organic nitrogen. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54: 769-774.
- Bottner P., Pansu M., Sallih Z., 1999. Modelling the effect of active roots on soil organic matter turnover. *Plant and Soil.* 216: 15-25.
- Bowen W.T., Baethgen W.E., 1998. Simulation as a tool for improving nitrogen management. In: G.Y. Tsuji, G. Hoogenboom, P.K. Thornton (Eds.). *Understanding options for Agricultural Production.* Kluwer Academic Publishers. The Netherlands, pp. 189-204.
- Bowen W., Cabrera H., Barrera V., Baigorria G., 1999. Simulating the response of potato to applied nitrogen. En: CIP Program Report 1997-1998. International Potato Center. Lima, Perú, pp. 381-386.
- Bowen W., Baigorria G., Jaramillo R., Sarmiento L., 2004. La simulación del crecimiento de papa en los andes. En: R. Andressen, M. Monasterio (Eds.). *IV Simposio Internacional de Desarrollo Sustentable en Los Andes. La estrategia para el siglo XXI. Memorias.* 6, 38-49.
- Burger J., Jackson L.E., 2003. Microbial immobilization of ammonium and nitrate in relation to ammonification and nitrification rates in organic and conventional cropping systems. *Soil Biol. Biochem.* 35: 29-36.
- De Willigen P., Heinen M., Van Den Broek B.J., 1995. Modeling water and nitrogen uptake of potato crop growing on a ridge. En: A.J. Haverkort, D.K.L. MacKerron (Eds.). *Potato Ecology and Modeling of Crops under Conditions Limiting Growth.* Kluwer Academic Publishers, pp. 75-88.
- Fontaine S., Mariotti A., Abbadie L., 2003. The priming effect of organic matter: a question of microbial competition? *Soil Biol. Biochem.* 35: 837-843.
- Friedel J.K., Gabel D., Stahr K., 2001. Nitrogen pools and turnover in arable soils under different durations of organic farming: II. Source-and-sink function of the soil microbial biomass or competition with growing plants? *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 164: 421-429.
- Grant R.F., 1994. Simulation of ecological controls on nitrification. *Soil Biol. Biochem.* 26: 305-315.

- Hadas A., Sofer M., Molina J.A.E., Barak P., Clapp C.E., 1992. Assimilation of nitrogen by soil microbial population: NH_4 versus organic N. *Soil Biol. Biochem.* 24: 137-143.
- Hadas A., Kautsky L., Goek M., Kara E.E., 2004. Rates of decomposition of plant residues and available nitrogen in soil, related to residue composition through simulation of carbon and nitrogen turnover. *Soil Biol. Biochem.* 36: 255-266.
- Hatch D.J., Jarvis S.C., Parkinson R.J., 1998. Concurrent measurements of net mineralization, nitrification, denitrification and leaching from field incubated soil cores. *Biol. Fertil Soils.* 26: 323-330.
- Henriksen T.M., Breland T.A., 1999. Evaluation of criteria for describing crop residue degradability in a model of carbon and nitrogen turnover in soil. *Soil Biol. Biochem.* 31: 1135-1149.
- IBSNAT, 1990. International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer (IBSNAT) Project. Technical Report 2, Field and Laboratory Methods for the Collection of the IBSNAT Minimum Data Set. Department of Agronomy and Soil Science, Hawaii Institute of Tropical Agriculture and Human Resources, University of Hawaii, 67p.
- Janssen B.H., 1996. Nitrogen mineralization in relation to C/ N ratio and decomposability of organic materials. *Plant and Soil.* 181: 39-45.
- Jarvis S.C., 1996. Future trends in nitrogen research. *Plant and Soil.* 181: 47-56.
- Laanbroek H.J., Gerards S., 1991. Effects of organic manure on nitrification in arable soils. *Biology and Fertility of Soils.* 12: 147-153.
- Llambí L.D., 1997. Recuperación de la fertilidad en una sucesión en el Páramo: Biomasa microbiana y Ciclaje de nitrógeno. Trabajo especial de grado. Universidad Simón Bolívar, Sartenejas, Venezuela, 128 p.
- Machado D., Díaz C., Sarmiento L., Bowen W., 2001. Calibración y validación del modelo SUBSTOR-papa para la variedad granola en los andes venezolanos. IV Simposio Internacional de Desarrollo Sustentable en Los Andes. La estrategia para el siglo XXI. Programa, Resúmenes. pp. 222-223.
- Maidl F. -X., Brunner H., Sticksel E., 2002. Potato uptake and recovery of ^{15}N - enriched ammonium nitrate. *Geoderma.* 105: 167-177.
- Mary B., Recous S., Darwis D., Robin D., 1996. Interactions between decomposition of plant residues and nitrogen cycling in soil. *Plant and Soil.* 181: 71-82.
- Myers R.J.K., Palm C.A., Cuevas E., Gunatilleke I.U.N., Brossard M., 1994. The synchronization of nutrient demand. En: P.L. Woormer and M.J. Swift (Eds.). *The Biological Management of Tropical Soil Fertility.* John Wiley and Sons, Inc, pp. 81-116.

- Paul E.A., Clark F.E., 1989. *Soil Microbiology and Biochemistry*. Academic Press, Inc. USA, 273 p.
- Rasmussen P.E., Douglas C.L., Collins H.P., Albrecht S.L., 1998. Long-term cropping system effects on mineralizable nitrogen in soil. *Soil Biol. Biochem.* 30: 1829-1837.
- Ruser R., Flessa H., Schilling R., Steindl H., Beese F., 1998. Soil compaction and fertilization effects on nitrous oxide and methane fluxes in potato fields. *Soil Science Society American Journal.* 62: 1587-1595.
- Ruser R., Flessa H., Schilling R., Beese F., Munch, J.C., 2001. Potato uptake and recovery of Nitrogen-15-enriched ammonium nitrate from periodic applications. *Agronomy Journal.* 83: 378-381.
- Roberts S., Cheng H.H., Farrow F.O., 1991. Potato Uptake and Recovery of Nitrogen-15-Enriched Ammonium Nitrate from Periodic Applications. *Agronomy Journal.* 83: 378-381.
- Sarmiento L., 1995. *Restauration de la fertilité dans un système agricole à jachère longue des hautes Andes du Venezuela*. Docteur en Sciences Thèse. Université de Paris-Sud, Paris, 237 p.
- Sarmiento L., Bowen W., 2002. Desarrollo de una variedad de papa andígena en los andes venezolanos y su simulación por el modelo SUBSTOR. *Ecotrópicos.* 15: 111-122.
- Sarmiento L., Díaz C., Machado D., 2004. Efecto de las enmiendas orgánicas y de la topografía sobre el balance hídrico, el ciclado de nitrógeno y los procesos erosivos en agroecosistemas de los andes venezolanos. Proyecto FONACIT S1-2000000810. Informe Final. 98 p.
- Swift M.J. (Ed.), 1984. *Soil Biological Processes and Tropical Soil Fertility. A Proposal for Collaborative Programme of Research*. Biology International. Paris. Spec. Issue. 5: 1-37.
- Swift M.J. (Ed.), 1987. *Tropical Soil Biology and Fertility (TSBF). Inter-Regional Research Planning Workshop*. Biology International. Paris. Special Issue. 13: 28-34.
- Tsuji G.Y., Uehara G., Balas S., (Eds.), 1994. *DSSAT v3*. University of Hawaii, Honolulu, Hawaii, USA.
- Ünlü K., Özenirler G., Yurteri C., 1999. Nitrogen fertilizer leaching from cropped and irrigated sandy soil in Central Turkey. *European Journal of Soil Science.* 50: 609-620.
- Vos J., Groenwold J., 1986. Root growth of potato crops on a marine-clay soil. *Plant and Soil.* 94: 17-33.

Van Delden A., Schröder J.J., Kropff M.J., Grashoff C., Booij R., 2003. Simulated potato yield, and crop and soil nitrogen dynamics under different organic nitrogen management strategies in The Netherlands. *Agriculture Ecosystems and Environment*. 96: 77-95.

Westermann D.T., Sojka R.E., 1996. Tillage and nitrogen placement effects on nutrient uptake by potato. *Soil Science Society American Journal*. 60: 1448-1453.