

**Optimización en el uso de los recursos hídricos y nutricionales por el
tabaco Virginia en el departamento de Chicoana (Salta)**

*Tesis presentada para optar al título de Magister de la Universidad de Buenos Aires,
Área Producción Vegetal*

Josefina Diez

Ingeniera Agrónoma (2004, Universidad Nacional de Salta)

Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria



Escuela para Graduados Ing. Agr. Alberto Soriano
Facultad de Agronomía – Universidad de Buenos Aires



COMITÉ CONSEJERO

Directora de tesis

Mónica Beatriz Rodríguez

Ingeniera Agrónoma (FAUBA)

Magister Scientiae en Ciencias del Suelo (Escuela para Graduados. FAUBA)

Doctora en Ciencias Biológicas (Depto Cs Biológicas- FCEYN UBA)

Consejera de Estudios

María Elena Toncovich

Ingeniera Agrónoma (Universidad Nacional de Salta)

JURADO DE TESIS

Mónica Beatriz Rodríguez

Ingeniera Agrónoma (UBA)

Magister Scientiae en Ciencias del Suelo (Escuela para Graduados. FAUBA)

Doctora en Ciencias Biológicas (Depto Cs Biológicas- FCEYN UBA)

Diego Julián Cosentino

Ingeniero Agrónomo (UBA)

Magister Scientiae en Ciencias del Suelo (Escuela para Graduados. FAUBA)

Docteur en Sciences (AgroParisTech) Francia

Pedro Insausti

Ingeniero Agrónomo (UBA)

Doctor en Ciencias Agropecuarias (Escuela para Graduados FAUBA)

Fecha de defensa de la tesis: 19 de Diciembre de 2011

A mi familia

AGRADECIMIENTOS

Nunca me imaginé que en el desarrollo de una tesis estarían involucradas tantas personas, espero no olvidarme de ninguna de ellas. Quiero agradecer:

- A los productores de Chicoana por permitirme trabajar con ellos y por los agradables momentos que compartimos juntos.
- A los extensionistas de la Agencia del Valle de Lerma, ingenieros Irma Fiore y Raúl Miore por presentarme a los productores de Chicoana.
- A los técnicos y profesionales del Laboratorio de suelos y agua y de tejidos vegetales de la EEA Salta por realizar los análisis en tiempo y forma.
- A Mercedes Alemán y Trinidad Figueroa por su colaboración.
- Al Prof. Bianchi, Tec. Met. Ignacio Nieva, Carlos y Germán Guanca, por su colaboración en la parte climatológica.
- A Laura Vale, Ing. Rec. Nat. Silvana Castrillo y Mercedes Sylvester por la elaboración de los mapas de esta tesis.
- A Federico Chocobar y José Luis Barrios por haberme acompañado a tomar las muestras necesarias para el desarrollo de esta tesis.
- A la Ing. Agr. Rosa Mintzer, a Jorge Paz y José Antonio Mamaní por la construcción del invernadero para el trabajo en condiciones controladas.
- A la Lic. Silvia Sührling y a la Ing. Agr. Susana Perelman por asesorarme y ayudarme con los análisis estadísticos.
- Al Ing. Agr. Raúl Lavado por sus consejos.
- A los ingenieros Héctor Paoli, Carlos Yáñez y Fernando Ledesma por su colaboración y asesoramiento en todo lo referido al agua.
- A los Ing. Agr. Cristian Despósito, Alejandra Kemerer y Salvador Prieto por sus grandes aportes.
- A la Ing. Agr. María Elena Toncovich por su apoyo incondicional en todo momento y por su asesoramiento tanto en lo personal como en lo profesional.
- A la Dra. Mónica Rodríguez por enseñarme y guiarme en mi carrera de investigador y por la amistad que me brindó.
- A mi familia por acompañarme y apoyarme durante este período.
- A mi marido por apoyarme y ayudarme a que siga desarrollándome profesionalmente.

Declaro que el material incluido en esta tesis es, a mi mejor saber y entender, original producto de mi propio trabajo (salvo en la medida en que se identifique explícitamente las contribuciones de otros), y que este material no lo he presentado, en forma parcial o total, como una tesis en ésta u otra institución.

ÍNDICE GENERAL

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. El cultivo de tabaco: su importancia en Argentina	1
1.2. Características del cultivo de tabaco	1
1.2.1. Almácigo	3
1.2.2. Trasplante – rápido crecimiento	4
1.2.3. Floración – Desflore	6
1.2.4. Maduración – Cosecha	7
1.3.El tabaco y sus requerimientos nutricionales e hídricos	8
1.3.1. Los requerimientos nutricionales	8
Nitrógeno	9
Potasio	9
Fósforo	10
1.3.2. Los requerimientos hídricos	11
1.4. Objetivos e hipótesis	13

CAPITULO 2. CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO

2.1. Ubicación	15
2.2. Clima	15
2.2.1. Temperatura media mensual	17
2.2.2. Otras Variables Climáticas de Interés	18
2.3.Caracterización edáfica	19

CAPÍTULO 3. DINAMICA DE LOS NUTRIENTES EN EL SUELO Y LA PLANTA DE TABACO EN LOTES DE PEQUEÑOS PRODUCTORES DE CHICOANA (SALTA)

3.1. Introducción	21
3.2. Objetivos e hipótesis	21
3.3. Materiales y métodos	22
3.3.1. Características del sitio experimental	22
3.3.2. Muestreo, determinaciones y estimaciones	22
Muestreo	22
Determinaciones en planta	22
Determinaciones en suelo	23
Estimaciones	26

Tiempo térmico	26
Radiación fotosintéticamente active	26
Contenidos de nutrientes	27
Balance de Nitrógeno	29
Eficiencias fisiológica y agronómica	29
3.3.3. Análisis estadístico	30
3.4. Resultados	30
3.4.1. Estados fenológicos y duración de las fases	30
3.4.2. Producción de MS y absorción de nutrientes (N, K, P)	32
3.4.3. Dinámica de acumulación de nutrientes	38
3.4.4. Dinámica de los nutrientes en el sistema suelo-planta	40
Nitrógeno	40
Potasio	44
Fósforo	46
3.5. Discusión	49
3.6. Conclusiones del capítulo	53
CAPITULO 4. DINAMICA DEL AGUA EN LOTES DE TABACO EN CHICOANA	
4.1. Introducción	55
4.2. Objetivos e hipótesis	56
4.3. Materiales y métodos	56
4.3.1. Muestreo, determinaciones y estimaciones	56
Muestreo	56
Determinaciones	56
Densidad aparente	56
Contenido gravimétrico de humedad en el suelo:	56
Estimaciones	57
a) Disponibilidad de agua en el suelo	57
Agua disponible total	57
Agua fácilmente aprovechable	58
b) Demanda evapotranspiratoria	59
Evapotranspiración del cultivo de referencia	59
Evapotranspiración en condiciones estándar	59
Evapotranspiración ajustada a condiciones de estrés hídrico	60

c) Relación productividad/estrés hídrico	61
4.3.2. Análisis estadístico	62
4.4. Resultados	62
4.4.1. Variación de las precipitaciones durante el ciclo del tabaco	62
4.4.2. Dinámica del agua en el perfil durante el ciclo del tabaco	63
4.4.3. Demanda evapotranspiratoria	66
4.4.4. Agotamiento de humedad en la zona radical	67
4.4.5. Relación productividad – estrés hídrico	70
4.5. Discusión	71
4.6. Conclusiones del capítulo	72

CAPITULO 5. AJUSTE EN CONDICIONES CONTROLADAS DE NIVELES OPTIMOS DE NUTRIENTES ANTE VARIACIONES DEL NIVEL DE RIEGO Y MATERIA ORGANICA INICIAL DEL SUELO.

5.1. Introducción	73
5.2. Objetivo	73
5.3. Materiales y métodos	73
5.3.1. Descripción general del ensayo	73
5.3.2. Diseño experimental y tratamientos	76
Dosis de fertilizante aplicado	77
Nitrógeno	77
Fósforo	78
Potasio	78
5.3.3. Muestreo, determinaciones y estimaciones	79
Muestreo y determinaciones	79
5.3.4. Análisis estadístico	79
5.4. Resultados	80
5.4.1. Evolución de las temperaturas en el invernadero	80
5.4.2. Crecimiento de la planta (altura y número de hojas)	81
5.4.3. Materia seca producida y nutrientes absorbidos	83
Producción de MS y absorción de nutrientes en función de los contenidos iniciales de materia orgánica en el suelo	84
Producción de MS y absorción de nutrientes de acuerdo a la disponibilidad hídrica (nivel de riego) y la fertilización	85
5.5. Discusión	88
5.6. Conclusiones del capítulo	90

CAPITULO 6. CONCLUSIONES GENERALES	91
PERSPECTIVAS FUTURAS	94
BIBLIOGRAFÍA	95
ANEXO 1	100
ANEXO 2	102

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Temperaturas medias mensuales (°C) para diferentes localidades del Valle de Lerma	17
Tabla 2.2. Valores medios de variables climáticas para la localidad de Cerrillos	18
Tabla 3.1. Momentos de muestreo y número de muestras tomadas	22
Tabla 3.2. Datos analizados para los primeros 40cm del suelo (Campaña 2006/07)	24
Tabla 3.3. Datos analizados para los primeros 40cm del suelo (Campaña 2007/08)	25
Tabla 3.4. Radiación fotosintéticamente activa disponible en diferentes momentos del ciclo de la campaña 2006/07 para los grupos AP y BP (alta y baja producción de MS).	32
Tabla 3.5. Proporción de MS en hoja, tallo y raíz (%) para grupos de baja y alta producción en dos campañas diferentes para el momento MC.	40
Tabla 3.6. Nitrógeno de nitratos inicial, mineralizado, del fertilizante, de nitratos final, absorbido en planta para el período considerado y lixiviado aparente expresados en kg/ha para grupos de baja y alta producción en diferentes momentos del ciclo.	43
Tabla 4.1. Contenidos hídricos (volumétricos y mátricos) para diferentes tipos de suelo.	58
Tabla 4.2. Duración (días) y valores de coeficiente único de cultivo para el tabaco tipo Virginia.	60
Tabla 4.3. Factor del efecto sobre el rendimiento para el cultivo de tabaco en diferentes momentos del ciclo.	62
Tabla 5.1. Características físico-química de los suelos utilizados en el estudio en condiciones controladas.	75
Tabla 5.2. Tratamientos correspondientes al ensayo en invernadero.	76
Tabla 5.3. Valores del coeficiente <i>a</i> para cada nutriente en particular.	77
Tabla 5.4. Dosis de potasio a aplicar en función de la disponibilidad de K para suelos francos.	78
Tabla 5.5. Dosis de N, P y K y de fertilizantes expresadas en g/pl y kg/ha.	79
Tabla 5.6. ANOVA (análisis de varianza) de materia seca, nitrógeno, fósforo y potasio para hojas y tallo+raíz afectadas por el nivel inicial de materia orgánica del suelo, fertilización y disponibilidad hídrica.	84
Tabla 5.7. Coeficientes a, b y c correspondientes a las funciones calculadas para dos niveles de MO en el suelo. La variable dependiente es materia seca y las variables independientes Fertilidad y Humedad.	86

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Producción de tabaco (Tn) para la campaña 2008/2009 en las provincias tabacaleras de la República Argentina.	1
Figura 1.2. Períodos de crecimiento en tabaco.	2
Figura 1.3. Procesos de desarrollo y eventos relacionados con la iniciación floral en el cultivo de tabaco.	7
Figura 2.1. Precipitaciones anuales y mensuales (mm) de una serie de años y de los años 2006, 2007 y 2008 de la estación agrometeorológica ubicada en INTA EEA Salta (Cerrillos).	17
Figura 2.2. Temperaturas máximas y mínimas (°C) de una serie de años (1971-2000) y de los años 2006, 2007 y 2008 de la estación agrometeorológica del INTA EEA Salta (Cerrillos).	18
Figura 3.1. Duración de las diferentes fases de cultivo para los grupos productivos AP y BP correspondientes a la campaña 2006/07	31
Figura 3.2. Producción de MS y acumulación de nutrientes (N, P y K) en la planta de tabaco y sus diferentes órganos para diferentes momentos (adaptación, altura de rodilla, floración-desflore, maduración cosecha) en dos grupos productivos (AP y BP) durante la campaña 2006/07.	33
Figura 3.3. Materia seca y nutrientes absorbidos (N, K, P) en planta, hoja, tallo y raíz (kg/ha) para grupos de baja y alta producción en dos campañas diferentes para el momento MC.	35
Figura 3.4. Relaciones de MS producida, N, K y P absorbido entre las diferentes partes de la planta para los grupos de alta y baja producción en dos campañas (medias \pm error estándar).	37
Figura 3.5. Porcentaje de nitrógeno, potasio y fósforo absorbido en diferentes órganos de la planta de tabaco en función de los días después del transplante para los grupos de alta y baja producción en diferentes momentos del ciclo (campaña 2006/07).	39
Figura 3.6. Modelo de la dinámica del N en el tabaco de Chicoana. Promedios de materia seca en hoja, eficiencias agronómica y fisiológica y nitrógeno del fertilizante, absorbido en planta, disponible, del suelo, mineralizado, de nitratos inicial, de nitratos final y aparentemente lixiviado para grupos de baja y alta producción en dos campañas diferentes.	41
Figura 3.7. Promedio \pm error estándar de niveles de reposición de nitrógeno en el cultivo de tabaco para grupos de alta y baja producción de materia seca.	42
Figura 3.8. Evolución de las precipitaciones diarias a lo largo del ciclo de la campaña 2006/07 y contenidos de MS en hoja para grupos de baja y alta en cuatro momentos del ciclo.	43
Figura 3.9. Diferencia entre la precipitación efectiva y la lámina de reposición del suelo (mm) para cada momento de lluvia en los diferentes lotes evaluados durante la campaña 2006/07.	44
Figura 3.10. Modelo de la dinámica de K en el tabaco en Chicoana. Promedios	45

(kg/ha) de materia seca en hoja, eficiencias agronómica y fisiológica, potasio del fertilizante, absorbido en planta, disponible, inicial y final del suelo para grupos de baja y alta producción en dos campañas diferentes.

- Figura 3.11.** Promedio \pm error estándar de niveles de reposición de potasio en el cultivo de tabaco para grupos de alta (AP) y baja (BP) producción de materia seca (medias \pm error estándar). 46
- Figura 3.12.** Distribución en profundidad del fósforo extractable en grupos de alta (AP) y baja (BP) producción de materia seca. 47
- Figura 3.13.** Modelo de la dinámica del P en el tabaco de Chicoana. Promedios (kg/ha) de materia seca en hoja, eficiencias agronómica y fisiológica, fósforo del fertilizante, absorbido en planta, disponible, inicial y final del suelo para grupos de baja y alta producción en dos campañas diferentes 48
- Figura 3.14.** Niveles de reposición de fósforo en el cultivo de tabaco para grupos de alta y baja producción de materia seca. 49
- Figura 4.1.** Precipitaciones correspondientes a las campañas 2006/07 y 2007/08 registradas en la estación meteorológica de la EEA Salta. 63
- Figura 4.2.** Contenidos hídricos en mm de lámina para lotes de alta producción a lo largo del ciclo de cultivo (campaña 06/07). 64
- Figura 4.3.** Contenidos hídricos en mm de lámina para lotes de baja producción a lo largo del ciclo de cultivo (campaña 06/07). 65
- Figura 4.4.** Evapotranspiración (promedio y desvío estándar) en condiciones estándar y ajustada para los grupos de alta y baja producción de materia seca en diferentes períodos del ciclo de cultivo. 67
- Figura 4.5.** Agotamiento en la zona radical, lámina total utilizable y lámina fácilmente utilizable considerando un umbral de 60% para lotes de alta producción a lo largo del ciclo de cultivo (campaña 06/07). 68
- Figura 4.6.** Agotamiento en la zona radical, lámina total utilizable y lámina fácilmente utilizable considerando un umbral de 60% para lotes de baja producción a lo largo del ciclo de cultivo. Las líneas verticales indican diferentes momentos fenológicos. 69
- Figura 4.7.** Disminución del rendimiento relativo para lotes de alta producción y baja producción a lo largo del ciclo de cultivo (campaña 06/07). 70
- Figura 5.1.** Agotamiento en la zona radical para niveles de riego medio y bajo, lámina fácilmente utilizable, lámina total utilizable. 77
- Figura 5.2.** Promedios decádicos de temperaturas máximas y mínimas del invernadero bajo estudio registradas en la estación meteorológica del INTA Salta. 81
- Figura 5.3.** Altura de plantas (cm) para diferentes niveles de riego y fertilización. 82
- Figura 5.4.** Número de hojas por planta para diferentes niveles de riego y fertilización. 83
- Figura 5.5.** MS y nutrientes absorbidos (g/pl) para dos tipos de suelo con adecuados y medio-bajo contenido de MO. 85

- Figura 5.6.** Materia seca de hoja producida (g/pl) para las combinaciones entre los factores de fertilidad y nivel de riego. 86
- Figura 5.7.** Nitrógeno absorbido (g/pl) para las combinaciones entre los factores de fertilidad y nivel de riego. 87
- Figura 5.8.** Fósforo absorbido en hoja (g/pl) para las combinaciones entre los factores de fertilidad y nivel de riego. 87
- Figura 5.9.** Potasio absorbido en hoja (g/pl) para las combinaciones entre los factores de fertilidad y nivel de riego. 88

INDICE DE FOTOS

Foto 1.1. Cultivo de tabaco tipo Virginia en la provincia de Salta	2
Foto 1.2. Almácigo flotante y convencional de tabaco tipo Virginia en Chicoana (Salta)	4
Foto 1.3. Cultivo de tabaco aporcado	6
Foto 1.4. Cosecha escalonada en el cultivo de tabaco en el departamento de Chicoana (Salta).	8
Foto 3.1. Cultivo de tabaco en Chicoana donde pueden apreciarse los fragmentos pedregosos en superficie.	26
Foto 5.1. Invernadero montado para el ensayo en condiciones controlada con plantas de tabaco en macetas	74

INDICE DE MAPAS

Mapa 2.1. Ubicación geográfica del departamento Chiriquí.	15
Mapa 2.2. Isoyetas de la zona bajo estudio.	16
Mapa 2.3. Unidades de suelo correspondientes a los grupos estudiados (Clasificación USDA).	19

RESUMEN DE LA TESIS

El aprovechamiento de los nutrientes y el agua por el tabaco en lotes de pequeños productores de Chicoana (Salta) puede ser optimizado según lo sugieren diagnósticos preliminares. El objetivo de esta tesis fue investigar la dinámica de los nutrientes y el agua con el fin de optimizar el uso de dichos recursos. La dinámica de los nutrientes y el agua se investigó en condiciones de campo mientras que el ajuste de dichos factores para el tabaco se desarrolló en condiciones controladas. Los estudios de campo se realizaron en 13 lotes de pequeños productores los cuales fueron separados en dos grupos AP y BP (alta y baja producción). Antes y durante el cultivo se determinaron en suelo: textura, N-nitratos, N, P y K total y en planta: N, P y K absorbido y materia seca en planta entera, hoja, tallo y raíz del tabaco. En condiciones controladas se aplicó un diseño factorial (n=3): MO inicial, fertilización según modelo zonal y nivel de riego. A cosecha, se evaluaron MS y N, P y K absorbidos. Los resultados mostraron que la MS, N, P y K absorbido en AP resultaron significativamente superiores a BP. La oferta de nutrientes fue muy superior a la demanda generándose excedentes en el balance de N. Las dosis de K y P aplicadas fueron superiores a las recomendadas aunque no se observaron excedentes en el suelo. El muy bajo nivel de P absorbido pudo deberse al escaso desarrollo radicular. El estudio de la dinámica del agua mostró que la disminución del 30% de rendimiento pudo relacionarse con el riego deficitario. El estudio en condiciones controladas demostró que los criterios utilizados (modelo generado en la zona y umbrales de humedad) permiten optimizar el uso de los nutrientes y el agua por el tabaco en lotes de pequeños productores de Chicoana.

Palabras clave: tabaco- fertilización-agua-pequeños productores-optimización.

ABSTRACT

As previous diagnostics in smallholder farmers of Chicoana (Salta) suggests, the use of nutrients and water by tobacco plants can be optimized. The objective of this thesis was to study the nutrient and water dynamics in order to optimize the use of these resources. The dynamics of nutrients and water were studied in field conditions while the adjustment of these factors for tobacco was developed under controlled conditions. Field studies were conducted in 13 smallholder farmers' lots which were separated into two groups HP and LP (high and low production). Soil texture, N-nitrates, N, P and total K in soil; N, P and K absorbed in plant and dry matter (whole plant, leaf, stem and root) were measured before and after cultivation. A factorial design (n=3) was applied under controlled conditions: initial organic matter (OM), fertilization according to a model of the area and level of irrigation. DM, N, P and K absorbed were assessed at harvest. The results showed that dry matter (DM), N, P and absorbed K were significantly higher in HP than in LP. Nutrient offer was much higher than the demand generating surpluses in the balance of N. Doses of K and P applied were higher than recommended although there was no surplus in the soil. The very low level of P uptake may be due to poor root development. The study of water dynamics showed that the 30% reduction in performance could be related to an irrigation deficit. The study under controlled conditions showed that the criteria used (model generated in the area and humidity thresholds) enable to optimize the use of nutrients and water by tobacco plants in lots of Chicoana's smallholder farmers.

Keywords: tobacco-fertilization-water-smallholders-optimization.

CAPITULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1. El cultivo de tabaco: su importancia en Argentina

El tabaco, *Nicotiana tabacum* L. tuvo su origen en América Central y ya se consumía con anterioridad a la era cristiana. La mayor producción se concentra entre los 45° N y 30° S. Es el cultivo industrial no alimentario líder en el mundo, debido a su gran adaptabilidad a las diferentes condiciones climáticas y de suelos. Por ello, se cultiva en más de cien países distribuidos en todos los continentes (González Martín 2001).

La Argentina ocupa el octavo lugar entre los países productores. El 92 % de la producción local corresponde a tipos Burley y Virginia siendo ésta última cultivada casi exclusivamente en las provincias de Salta y Jujuy (Rodríguez 2008).

En la campaña 2008/09 estas dos provincias representaron el 61,5 % de la producción nacional, siendo el volumen total producido de 135.531 toneladas para la mencionada campaña (SAGPyA 2010). La figura 1.1. presenta la producción de tabaco en la República Argentina.

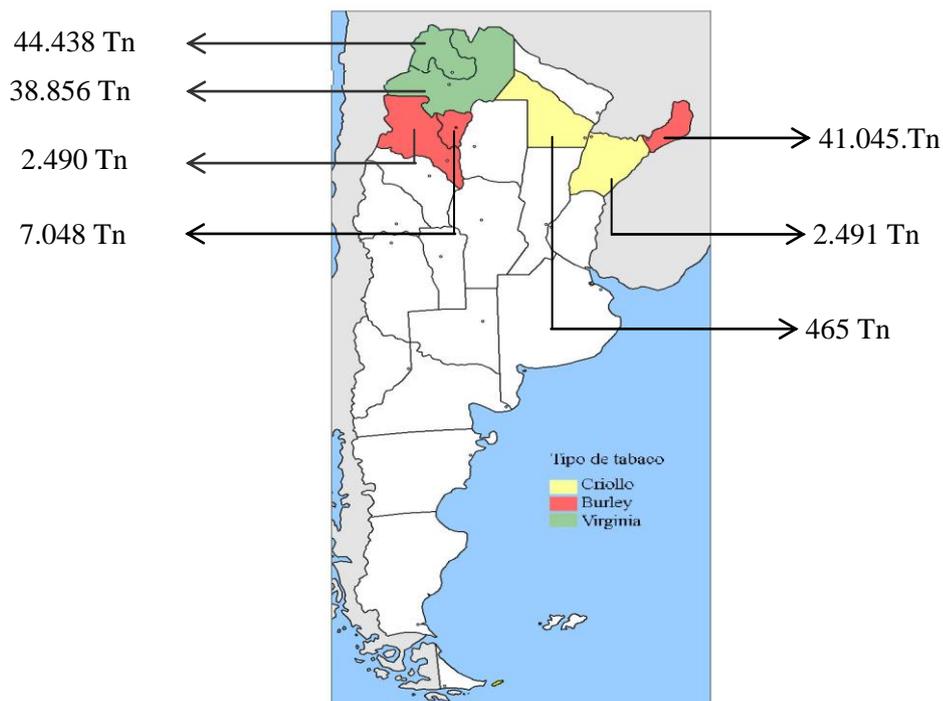


Figura 1.1. Producción de tabaco (Tn) para la campaña 2008/2009 en las provincias tabacaleras de la República Argentina (SAGPyA 2010)

1.2. Características del cultivo de tabaco

El tabaco crece normalmente como una planta anual. Posee un tallo delgado, algo leñoso, que puede desarrollar desde 0,8 a 3 m de altura con largos entrenudos variables según los tipos y variedades. Las hojas están asentadas en cada nudo a lo largo del tallo en una espina ascendente, con una filotaxia de 3/8. En general, las hojas

inferiores están asentadas en un ángulo muy abierto quedando casi horizontales mientras que las superiores se insertan con ángulos más cerrados (Foto 1.1.) (Fernández de Ulivarri 1990).



Foto 1.1. Cultivo de tabaco tipo Virginia en la provincia de Salta

El cultivo de tabaco puede ser dividido en dos fases: 1) la fase de almácigo para la producción de plantines y 2) la fase de crecimiento en el campo, la cual incluye distintos períodos (Ceotto y Castelli 2002) (Figura 1.2.).

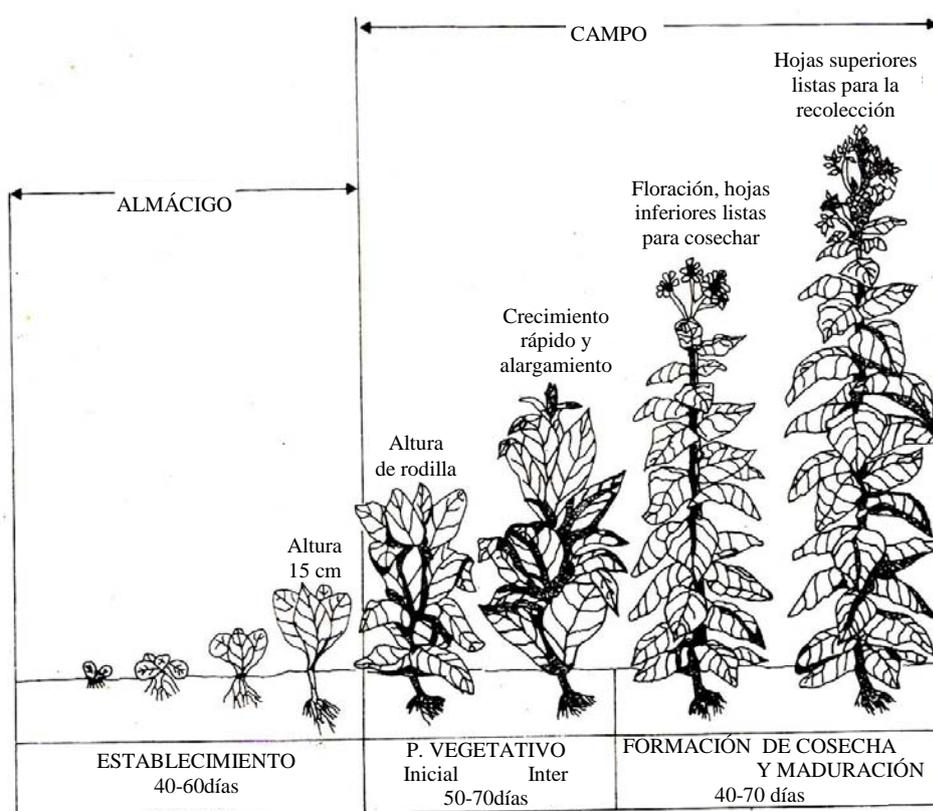


Figura 1.2. Períodos de crecimiento en tabaco (Doorembos y Kassam 1979).

Como puede observarse en la figura 1.2., la fase de crecimiento en el campo puede subdividirse en distintos períodos (Moustakas y Ntzanis 2005):

- Adaptación: 30 a 35 días
- Altura de rodilla: 10 a 15 días
- Rápido crecimiento y elongación: 10 a 15 días
- Floración y desflore: 35 a 35 días
- Maduración: 20 a 25 días

1.2.1. Almacigo

La siembra de tabaco se realiza en almacigo y luego las plántulas son trasladadas al campo (Tso 1990). Las pequeñas dimensiones de la semilla no permiten realizarla directamente en el campo ya que un gramo contiene 8.000 a 10.000 semillas (Fernández de Ulivarri 1990).

Los almacigos de tabaco pueden ser convencionales o flotantes (Foto 1.2.). La mayoría de los pequeños productores tabacaleros utilizan almacigos convencionales, si bien los flotantes se están difundiendo paulatinamente en el Valle de Lerma (Nadir *et al.* 2004). Los almacigos convencionales presentan un ciclo de producción de 90 días, y utilizan como desinfectante de suelos el Vapam. Este sistema de almacigo requiere de buena disponibilidad de nutrientes y adecuadas condiciones físicas del suelo (aireación y permeabilidad) (Ullivarri 1990). Los almacigos flotantes se realizan en estructuras de macro o micro túneles, y entre sus principales ventajas se puede mencionar la menor duración del ciclo, la obtención de plantas útiles en un porcentaje igual o superior al 90% y la menor cantidad de mano de obra utilizada en las diferentes etapas de producción de plantines (Galli 2010).



Foto 1.2. Almácigo flotante y convencional de tabaco tipo Virginia en Chicoana (Salta)

La fecha de siembra para tabaco Virginia, particularmente en el Valle de Lerma, no debe ser muy temprana debido al riesgo de heladas tardías. En general, se inicia en la segunda quincena de junio y algunas veces se realiza escalonada para optimizar el uso de las estufas. La provisión de semillas híbridas por parte de las acopiadoras permite disponer de plantas resistentes a diferentes virus y enfermedades (Nadir *et al.* 2004).

1.2.2. Trasplante – rápido crecimiento

Cumplida la etapa de almácigo, los plantines son trasladados al terreno destinado para la plantación, el cual fue previamente preparado en otoño – invierno. La preparación del suelo en general consiste en la utilización de cincel o arado de disco (1-2), rastra cruzada y rayado⁽¹⁾. Algunos productores procuran rayar cortando la pendiente, pero en general los suelos no son nivelados ni los campos sistematizados con curvas de nivel (Nadir *et al.* 2004).

En el Valle de Lerma, el trasplante se inicia a partir de los primeros días de septiembre. En Chicoana la plantación es principalmente manual, para el tabaco Virginia la distancia entre filas es de 1,2 m, mientras que entre plantas varía de 0,4 a 0,5m (Fernández de Ulivarri 1990).

La respuesta del tabaco a la fecha de plantación es altamente dependiente de la estación de crecimiento. Por ejemplo, en plantaciones tardías de tabaco comparadas con

⁽¹⁾ Rayado: armado de un pequeño surco para realizar la plantación

plantaciones tempranas se ha observado que el aumento de la temperatura y la radiación fotosintéticamente activa, causan un crecimiento más rápido, aceleran la iniciación floral, producen hojas más finas, posiblemente aceleran la senescencia y reducen el rendimiento (Wilkinson *et al.* 2007/2008).

Las altas temperaturas en asociación con la longitud del período de crecimiento y la luz del sol son esenciales para la producción y acumulación de materia seca. Temperaturas medias de 18 a 22 °C con máximas de 28 a 32 °C son consideradas ideales para el estadio crítico de crecimiento y expansión foliar, 5 a 8 semanas después del trasplante (Tso 1999 en Edwards 2005). A medida que las temperaturas disminuyen de 30 °C día/26 °C noche a 18 °C día/14 °C noche, el área de la hoja disminuye y el peso específico aumenta (Raper *et al.* 1971 en Edwards 2005).

Desde el trasplante hasta finalización de cosecha, el cultivo de tabaco necesita aproximadamente 125 días libres de heladas, ya que una vez transplantado se muestra sensible a temperaturas inferiores a 0 °C. La planta de tabaco tolera altas temperaturas (40-45°C), si dispone de buena humedad en el suelo y no hay limitaciones en la circulación de savia por enfermedades o plagas, en tallos o raíces (Fernández de Ulivarri 1990).

La temperatura también incide sobre la absorción de agua y solutos por parte de las raíces, y sobre su crecimiento, anatomía y sin dudas, la actividad sintetizadora de éstas (Ballari 2005). El efecto más importantes de la baja temperatura del suelo es el aumento de la resistencia hidráulica de las membranas celulares de las raíces, debido a que a bajas temperaturas las cadenas hidrófobas de los ácidos grasos de la membrana estarán en su fase de gel (Azcón-Bieto y Talón 2000). En el ámbito radical el umbral a partir del cual hay alargamiento es de 14 °C. La temperatura óptima fisiológica, si bien debe estar en sincronía con la temperatura ambiente, se ubica entre los 21 y 28 °C (Ballari 2005).

Una vez que las plantas se han establecido (7 a 10 días) se inician los trabajos de cultivo. Se realizan a razón 6 o 7 carpidas durante el ciclo con el fin de controlar malezas y producir aireación en el suelo para favorecer el desarrollo de raíces secundarias, logrando así mayor anclaje y aumento en la eficiencia de absorción de agua y nutrientes (Fernández de Ulivarri 1990).

Cuando la planta alcanza 40 – 50 cm de altura (aproximadamente a los 50 días después del trasplante) se efectúa el último movimiento de suelo, el aporque, que consiste en mover tierra sobre la base de la planta, formando un camellón de aproximadamente 35 cm de alto y 20 cm de ancho en su cima. El objeto del aporque es lograr un mejor afianzamiento de la planta en el suelo, permitir la formación de una mayor cabellera radical y mantener el suelo más aireado para evitar problemas de asfixia radical, en situaciones de excesivas lluvias (Foto 1.3.) (Fernández de Ulivarri 1990).



Foto 1.3. Cultivo de tabaco aporcado

Durante las ocho semanas posteriores al trasplante, las raíces crecen rápidamente y se estabilizan un corto período de tiempo (Ballari 2005). El tabaco Virginia es un cultivo cuyas raíces no son muy profundas. La mayor parte de las raíces, incluso en época de la madurez, se encuentran en los primeros 30 a 40 cm del suelo (Jauregui 1973, Hawks y Collins 1986). La masa de mayor funcionalidad se concentra entre los 5 y 25 cm de profundidad. Las numerosas raíces que se apartan del eje principal en dirección centrífuga, se subdividen hasta conformar las raíces periféricas, de gran actividad, al menos hasta la floración, momento en el que alcanza también la máxima profundidad (Ballari 2005).

Normalmente el 75 % de la absorción de agua se produce en los 30 cm superiores del perfil y el 100 % en los primeros 50 a 100 cm ($D=0,5$ a 1 m). El desarrollo de las raíces se estimula retirando el suministro de agua durante el comienzo del período vegetativo. También la extracción de las yemas florales y la supresión de rebrotes favorecen el desarrollo de las raíces. La profundidad total de enraizamiento se alcanza a los 40 a 50 días después del trasplante. En condiciones en que la evapotranspiración máxima (ET_m) es de 5 a 6 mm/día, la absorción de agua se verá afectada cuando se haya agotado del 50 al 60 % del agua útil del suelo ($p=0,6$) (Doorenbos y Kassam 1979).

1.2.3. Floración - Desflore

La mayoría de las variedades de tabaco Flue-cured son indiferentes al fotoperíodo y florecen independientemente de la proporción día/noche (Hawks y Collins 1986, Doorenbos y Kassam 1979, Edwards 2005).

La formación de la flor en el meristema apical es una secuencia de procesos iniciados en la embriogénesis. El cambio de un meristema vegetativo implica al menos dos señales y dos estados de desarrollo. Las raíces emiten una señal que mantiene el crecimiento vegetativo o impide la floración en las plántulas jóvenes. Además, las primeras hojas exportan escaso o ningún estímulo floral. A medida que la planta crece, el meristema vegetativo adquiere mayor aptitud para responder al estímulo floral de las hojas. Las hojas basales que se expanden a más de 10 cm de longitud comienzan a exportar inductivamente niveles activos de estímulo floral. Tanto la aptitud del meristema como la fuerza del estímulo floral exportada por las hojas varía en función del genotipo. El tiempo de determinación floral es función de la aptitud del meristema y de la fuerza del estímulo floral. Una vez que la floración se ha determinado, el meristema promueve varios nudos más y luego forma la flor terminal (Mc Daniel 1996).

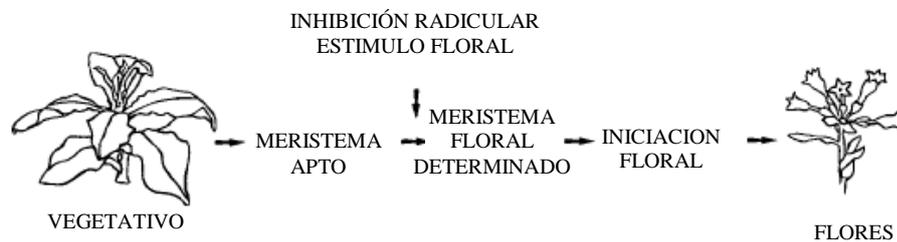


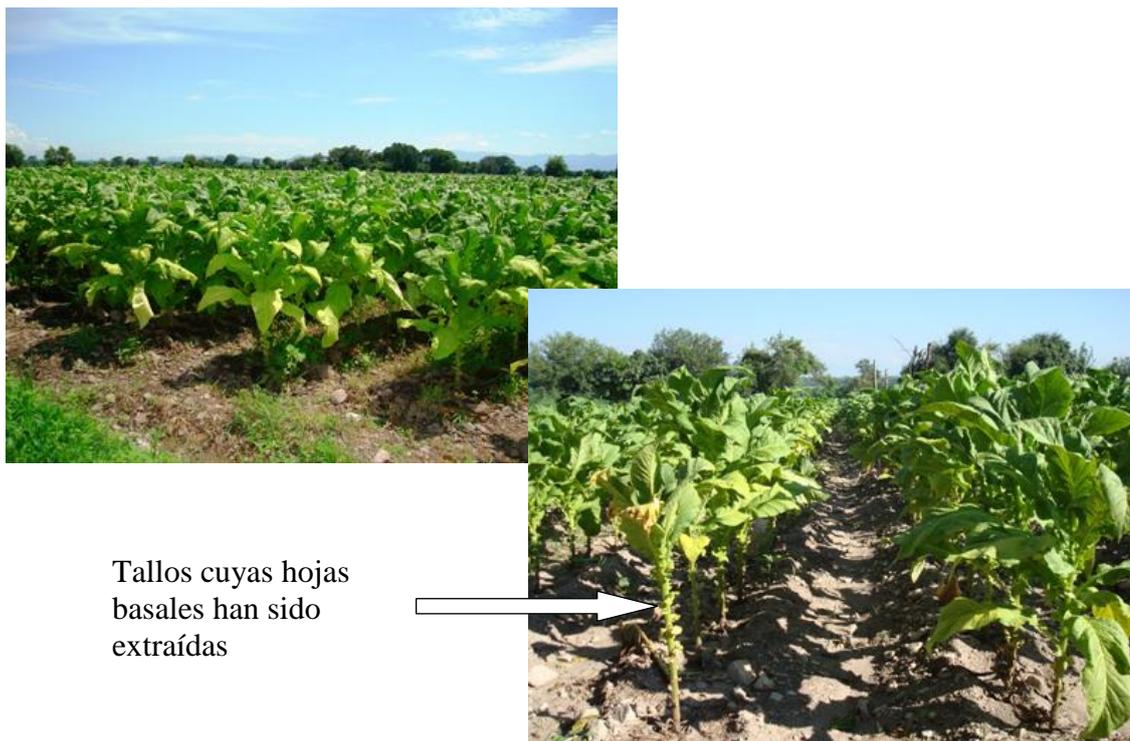
Figura 1.3. Procesos de desarrollo y eventos relacionados con la iniciación floral en el cultivo de tabaco (Mc Daniel 1996).

El tabaco se encuentra entre los cultivos donde las hojas representan la porción de importancia económica de la planta en lugar de los órganos reproductivos, (Wilkinson *et al.* 2007/2008). Desde que se produce la floración, si no se desflora, se disminuyen diariamente entre 25 a 30 kg/ha de tabaco de buena calidad (Arias 1984).

La yema terminal de la planta de tabaco inhibe el desarrollo de los rebrotes ya que al ser extraída se desarrollan los tres o cuatro rebrotes superiores. Si se quitan estos rebrotes, otros se desarrollarán más abajo en el tallo, y saldrán otros rebrotes secundarios en las axilas de las hojas superiores. Una planta de tabaco potencialmente puede producir tres rebrotes en la axila de cada hoja (Hawks y Collins 1986). La producción de brotes afecta las características de las hojas, el rendimiento y la calidad de la cosecha (Tso 1990). Es por ello, que el desflore debe ser acompañado por un control químico de los brotes (Ceotto y Castelli 2002).

1.2.4. Maduración - Cosecha

El tabaco flue-cured comienza a madurar cuando las hojas verdes pierden color y se transforman en hojas amarillo-verdosas. A medida que las hojas maduran son cosechadas en lotes de 3 a 5 hojas por planta por cosecha (Foto 1.4.). Normalmente la maduración se da en intervalos semanales o de 4 a 5 días, requiriéndose 4 a 6 semanas para cosechar el cultivo en forma completa (Tso 1990).



Tallos cuyas hojas
basales han sido
extraídas

Foto 1.4. Cosecha escalonada en el cultivo de tabaco en el departamento de Chicoana (Salta).

La cosecha es una labor que debe realizarse respetando la oportunidad para obtener una buena calidad de producto. Implica un elevado costo en mano de obra, empleándose 26 jornales/ha por lo que generalmente se debe contratar mano de obra extrapredial (Nadir *et al.* 2004).

Una vez cosechada la hoja se inicia el proceso de curado, el mismo tiene dos objetivos principales. Primero, crear condiciones de temperatura y humedad para ayudar a que se produzcan en la hoja los cambios químicos y biológicos deseados. Segundo, conseguir que la hoja, por medio de un secado adecuado, pueda mantener su calidad potencial. Curar es algo más que un simple secado, implica cambios químicos y físicos, que son necesarios para obtener tabaco de alta calidad (Hawks y Collins 1986).

1.3. El tabaco y sus requerimientos nutricionales e hídricos

La disponibilidad de nutrientes y agua afecta tanto la calidad como el rendimiento del tabaco Virginia. Esta variedad se caracteriza por poseer una restringida ventana de oportunidad de captación de los recursos hídricos y nutricionales en virtud de su corto ciclo de vida (90 a 120 días) (Moustakas y Ntzanis 2005).

1.3.1. Los requerimientos nutricionales

La demanda de nutrientes varía con el tipo de tabaco, el estado de los nutrientes en el suelo, la densidad de plantación, el riego, el clima y otros factores ambientales (Ceotto y Castelli 2002). Esta información debe ser tomada en cuenta para lograr el

manejo apropiado de la nutrición en el cultivo a fin de evitar desbalances que incidan en los rendimientos y la calidad.

Nitrógeno

Entre los elementos esenciales, el nitrógeno tiene la mayor incidencia en el desarrollo de la planta de tabaco Virginia (Edwards 2005). La disponibilidad de este nutriente es un factor clave para este cultivo y su balance, si bien complicado y versátil, es muy necesario como instrumento de planificación (Ballari 2005).

La fertilización nitrogenada determina el tamaño de la hoja (Edwards 2005); y es esencial en la formación de proteína, multiplicación celular y crecimiento de la planta debido a que participa en la formación de moléculas particulares como clorofila y alcaloides (nicotina). Además, el nivel de nutrición nitrogenada gobierna el equilibrio proteína-carbohidratos (Hawks & Collins 1986). La facilidad con que el tabaco toma iones nitratos del suelo puede producir un consumo de lujo y acumulación de nitratos en las hojas, especialmente en la nervadura central. Aplicaciones de N mejoran el crecimiento de la planta ya que las hojas se ensanchan y el peso por unidad de área, se reduce (Rodríguez 2008). Sin embargo, no sólo los rendimientos deben maximizarse, sino que es preciso lograr un crecimiento equilibrado que conduzca a la formación de un producto de alta calidad (Bozhinova 2006).

En general, la eficiencia de uso del nitrógeno depende de los procesos del suelo, las prácticas de fertilización (cantidad, forma química, forma y momento de la distribución del fertilizante) y de la fisiología (absorción, traslocación, asimilación y partición) (Sifola y Postiglione 2003). La cantidad de N absorbido, su acumulación en la biomasa total producida, como también el contenido relativo en los distintos órganos pueden variar con la oferta del medio ambiente agro-cultural. Una investigación realizada en la Argentina mostró que un rendimiento biológico medio de 409 gr de MS/planta, se correspondió con un consumo total de N de 167,5 kg/ha siendo las hojas, los órganos de mayor participación porcentual (Ballari 2005). Dado que el tabaco es un cultivo que forma su producción exclusivamente como material foliar (Bozhinova 2006), este punto toma especial importancia. La literatura científica presenta escasos estudios realizados sobre eficiencia de uso de nitrógeno en el tabaco (Sifola y Postiglione 2003). En el noroeste argentino, puede tomarse como referencial el rango de eficiencia fisiológica entre 16-20 kg de hoja curada por kg de N absorbido (Ballari 2005).

Potasio

El potasio es el elemento mineral que la planta de tabaco absorbe en mayor cantidad. Durante el ciclo vegetativo su ritmo de absorción varía considerablemente. El índice de absorción es muy alto en las primeras fases de crecimiento y disminuye rápidamente durante las últimas (Hawks y Collins 1986). Es absorbido en cantidades similares al nitrógeno y distribuido a través de la planta quedando un 65 % en tallos y raíces después de la cosecha (Moustakas y Nzanis 2005). Equilibrados contenidos afectan de manera positiva características deseables en hojas curadas, como elasticidad e intensidad del color, la combustibilidad es posiblemente la propiedad más favorecida (Ballari 2005).

La distribución de potasio en la planta de tabaco indica que este nutriente es importante inclusive después del desflor. La aplicación de fertilizantes que contengan potasio después de 3 a 4 semanas del trasplante favorece la producción de tabaco de alta calidad. La máxima absorción diaria de potasio distribuida en las hojas se encontró a los 54 días después del trasplante con $1,91\text{g/m}^2$ demostrando que el K debe estar presente en cantidades adecuadas inclusive en las etapas tempranas de desarrollo (Mc Cants y Woltz 1967 en Moustakas y Nzanis 2005).

Fósforo

A diferencia del nitrógeno y del potasio, la absorción de fósforo se realiza de un modo bastante constante durante todo el período de desarrollo del tabaco. No obstante ello, la influencia de la fertilización fosforada sobre el desarrollo de la planta de tabaco es más importante al principio del período de crecimiento (Hawks y Collins 1986). Es importante que la planta tenga acceso a este nutriente en sus estadíos tempranos de desarrollo. La respuesta de tabaco al fertilizante fosforado se ha visto reflejada más claramente en los períodos tempranos de desarrollo que al final de la cosecha o en la calidad (Tso 1990). El efecto principal del fósforo en el tabaco es la disminución del tiempo requerido para que la planta llegue a la madurez (Fernandez de Ulivarri 1990).

Los contenidos usuales de fósforo en las hojas de tabaco varían entre 0,4 y 0,9% de P_2O_5 de la materia seca. Este elemento tiene una función estructural importante en muchas moléculas y estructuras celulares, como en el caso de los enlaces diéster presentes en los ácidos nucleicos y en los fosfolípidos en las estructuras membranosas. El fosfato se redistribuye fácilmente en la mayoría de las plantas de un órgano a otro, es por ello que los síntomas de deficiencia se presentan primero en las hojas adultas (Azcón-Bieto y Talón 2000). Es vital en el metabolismo de la planta, fotosíntesis, fotofosforilación y los subsecuentes procesos vitales asociados al ciclo de Krebs, siendo considerado uno de los elementos esenciales en el crecimiento. En el cultivo de tabaco el fósforo podría mejorar el color de la hoja curada. Con respecto a la calidad presenta una relación positiva con el contenido de azúcar (Tso 1990).

Para desarrollar un programa de fertilización, además de la condición de nutrientes de los suelos, se necesita la siguiente información: a) la máxima cantidad de nutriente absorbido que corresponde con el máximo rendimiento, b) la tasa de absorción de nutrientes en toda la vida útil de la planta para determinar el período máximo de absorción y c) la distribución de nutrientes dentro de las partes de la planta (hojas, tallos y raíces) durante la maduración a fin de determinar la cantidad que será extraída del suelo a la cosecha (Moustakas y Ntzanis 2005). En Chicoana no se dispone aún de esta información que es requerida para conocer los reales requerimientos de nutrientes del cultivo a fin de optimizar el uso de los mismos en las condiciones locales.

En el departamento de Chicoana, los pequeños productores tabacaleros cultivan tabaco Virginia en sistema de monocultivo. La fertilización comienza con un abonado a los 7 a 10 días de efectuado el trasplante, con dosis promedios de 600 kg de fertilizante base (N-P-K) por hectárea y a los 45 días se aplican 100 a 150 kg/ha de fertilizante (repique) que aporta N y K (Nadir *et al.* 2004). En general, las mezclas utilizadas para la fertilización son provistas por las acopiadoras siendo los grados más utilizados: 11-09-24 y 11-17-24 como fertilizante de base mientras que el nitrato de potasio (NO_3K) se aplica en el repique.

Respecto del manejo de la nutrición del cultivo, un estudio llevado a cabo en la zona concluyó que para determinar los requerimientos de fertilización, la realización de un diagnóstico mediante un análisis de los suelos del lote no es en general, una práctica previa utilizada por los pequeños productores tabacaleros. Por ello, es común que se empleen dosis de fertilizantes que en general sobreestiman los requerimientos reales generando de esta manera excedentes en el sistema. Por otra parte, los altos niveles de degradación que presentan algunos lotes limitan la profundización de las raíces del tabaco afectando negativamente la absorción de los nutrientes (Nadir *et al.* 2004).

En cultivos estivales, la tasa de mineralización se eleva aumentando el pool de nitratos en el suelo. En lotes de pequeños productores tabacaleros es frecuente que la dosis de fertilizante nitrogenado sea determinada sin considerar el N mineralizado. En consecuencia se estaría generando así un excedente de N a fin de ciclo. En el caso del K los niveles de K intercambiable son en general elevados en virtud de su material original (Ballari 2005). No obstante ello, son fertilizados con este nutriente con fines de garantizar la calidad del tabaco. Sin embargo, no se conoce en que medida el balance de K en el suelo se acerca o se aleja del óptimo. Del mismo modo que sucede con el K, los suelos de Chicoana poseen elevados niveles de P, no obstante lo cual son fertilizados con el nutriente en base a los requerimientos del cultivo.

1.3.2. Los requerimientos hídricos

El agua es uno de los elementos esenciales para el crecimiento de las plantas, y el tabaco Virginia no constituye la excepción (Hawks y Collins 1986). Este cultivo requiere de un continuo suplemento ya que refleja los estados hídricos a que estuvo expuesto en el transcurso del ciclo ontogénico (Ballari 2005). El agua está involucrada en todo proceso del crecimiento de la planta, su aplicación es una práctica indispensable para abastecer al cultivo y debe ser manejada con especial precaución ya que su exceso puede afectar negativamente la composición química de la hoja. La absorción de agua regula los contenidos de nitrógeno del suelo previos a cosecha que a su vez inciden directamente en el nivel de almidón y alcaloides (Maw *et al.* 1997). El tabaco que recibe riego, generalmente tendrá las hojas más grandes, con entrenudos ligeramente más separados en el tallo. El tallo probablemente será más alto y tendrá una mayor cantidad de hojas cosechables por planta y producirá menos rebrotes (Hawks y Collins 1986).

La falta de humedad, especialmente en ciertas fases de crecimiento, puede afectar la producción y la calidad (Hawks y Collins 1986). Sin contar la etapa de almácigo y desde el punto de vista biológico, los períodos más críticos del tabaco respecto al requerimiento de agua son los de trasplante, el período de rápido crecimiento (desde que la planta alcanza la altura de la rodilla hasta la floración) y la etapa de comienzos de cosecha (Yáñez 1984). Para las condiciones del noroeste argentino, Ballari (2005) mencionó que los valores máximos del coeficiente de cultivo se alcanzan entre la novena y treceava semana posteriores al trasplante, correspondientes a un período donde la materia seca evoluciona a muy alta tasa.

La madurez de la hoja también se ve afectada por la disponibilidad hídrica. Una oferta abundante de agua contribuye a un incremento en el contenido de azúcar, alcalinidad, contenido de cenizas y potasio, mientras que al mismo tiempo disminuye los de nitrógeno, nicotina y cloro dentro de la hoja. Tanto la calidad (clase) como el rendimiento mejoran durante aquellos años en que están provistos de adecuados contenidos de agua y declinan durante los años en los que son insuficientes (Maw *et al.* 1997).

La etapa de trasplante es el momento más crítico, el riego inmediatamente después del trasplante contribuye a que la tierra se asiente alrededor de las raíces de las plantas y aporte un nivel adecuado de humedad para favorecer un desarrollo radical más rápido, mejorando la viabilidad de las plantas y favoreciendo el crecimiento precoz. No se considera perjudicial una pequeña falta de humedad en el período que va desde que las plantas se han establecido hasta que éstas alcancen la altura de la rodilla (de 50 a 60 centímetros). Esta falta de humedad inducirá a las raíces a crecer más en profundidad que superficialmente, lo que puede ser muy beneficioso cuando la planta se encuentre en el período de rápido crecimiento. Cuando el tabaco está en dicha fase, normalmente en el segundo mes después del trasplante desde la altura de la rodilla hasta el principio de la floración, la humedad es extremadamente importante para conseguir un buen desarrollo de las hojas, lo que mejorará a la vez la producción y la calidad (Hawks y Collins 1986).

Una sequía moderada no reduce el rendimiento debido a que la disminución en tamaño de hoja está compensada por su incremento en peso por unidad de área. Los tejidos de la planta requieren un adecuado contenido de agua para mantenerse turgentes, siendo una condición necesaria para la máxima expansión y mínimo espesor de la hoja. El contenido de agua en hoja es relativamente alto, usualmente en el orden de los 88 a 90 % del peso verde. Una pérdida del 6 a 8 % de esta humedad puede producir los primeros síntomas de marchitamiento (Tso 1990). El cuerpo (grosor), la estructura y la relación nervadura/lámina (en % de peso) son en gran parte, consecuencias de las relaciones mutuas entre la propuesta hídrica edafoambiental y el cultivo (Ballari 2005). Las evaluaciones de evapotranspiración de cultivo realizadas en la región tabacalera del NOA, desde trasplante a cosecha del último piso foliar, permitieron estimar un consumo hídrico promedio de $495 \text{ mm} \pm 21 \text{ mm}$ anuales (Ballari 2005).

La problemática del agua en la zona de Chicoana es uno de los aspectos principales en esta producción. En las principales zonas dedicadas a ese cultivo en las provincias del noroeste argentino, el riego se efectúa en forma total para los primeros estadios de crecimiento (almácigo y primeras etapas de plantación), como práctica complementaria en las etapas intermedias (hasta la floración o cosecha de hojas inferiores) y a secano, es decir abastecido por las lluvias, en los períodos finales de maduración y cosecha. Esto determina que, en lo que a disponibilidad hídrica para el cultivo se refiere, sea preciso programar los riegos solamente para una parte de su ciclo, quedando luego los resultados finales más dependientes de las condiciones generales de la estación lluviosa (Yáñez 1984). En el departamento de Chicoana en particular, la frecuencia y número de riegos depende de los turnados establecidos por cada consorcio, pudiendo variar entre 7 a 10 riegos. Estos turnos de riego resultan excesivamente largos debido a que el pico de demanda coincide con el período de estiaje (Nadir *et al.* 2004). Dicha circunstancia afecta la provisión de agua en los momentos adecuados afectando al cultivo. No se dispone en Chicoana de datos que permitan confirmar en que medida esta situación podría influir negativamente sobre el rendimiento del tabaco y la absorción de los nutrientes aplicados.

Por lo antedicho, se considera que el aprovechamiento de los nutrientes y el agua sería baja lo cual podría repercutir negativamente en la productividad de los lotes tabacaleros del departamento de Chicoana. La optimización del uso de los recursos en el tabaco requiere de estudios que serán desarrollados en esta tesis.

1.4. Objetivos e hipótesis

1.4.1. Objetivo general

Investigar la dinámica de los nutrientes y el agua en lotes tabacaleros de pequeños productores de Chicoana (Salta). Optimizar el uso de dichos recursos a través del ajuste de los niveles de nutrientes y agua necesarios.

1.4.2. Objetivos, hipótesis y predicciones

La tesis se desarrolla en base a los siguientes interrogantes

¿Cómo será la dinámica de los nutrientes y del agua en lotes tabacaleros en Chicoana?

¿Cómo es posible optimizar el uso de dichos recursos?

Objetivo A

Determinar el nivel de nutrientes absorbidos por el tabaco (N, P y K) y relacionarlo con la oferta nutricional del suelo con el fin de detectar excedentes o deficiencias.

Hipótesis A.1.

El nivel de nitrógeno absorbido por el tabaco es muy inferior a la oferta nutricional (N del suelo+N fertilizante) dado que en la estimación del requerimiento de fertilización, la oferta de N del suelo proveniente de la mineralización de la materia orgánica es subestimada.

Hipótesis A.2.

El nivel de K inicial del suelo es elevado en virtud de la mineralogía del suelo. El agregado de fertilizante genera excedentes de K en el suelo.

Hipotesis A.3.

La restringida expansión de las raíces de tabaco limita la absorción de P por la planta con la consecuente generación de excedentes en el suelo.

Objetivo B

Estimar la oferta de agua del suelo y compararla con la demanda hídrica del tabaco en lotes de pequeños productores.

Hipótesis B

Existe una importante desincronización entre la oferta de agua y el requerimiento del cultivo que impide satisfacer la demanda hídrica del tabaco compatible con el objetivo de rendimiento.

Objetivo C

Establecer bajo dos niveles de materia orgánica inicial del suelo y disponibilidad de agua, la respuesta del cultivo de tabaco a la fertilización calculada en base a un modelo desarrollado en la zona.

Hipótesis C (vinculada a las hipótesis A y B)

La respuesta del cultivo de tabaco a la fertilización calculada en base a un modelo será significativa aún en condiciones limitantes de humedad, lo que confirma la versatilidad del modelo y optimiza la dosis de nutriente aplicada.

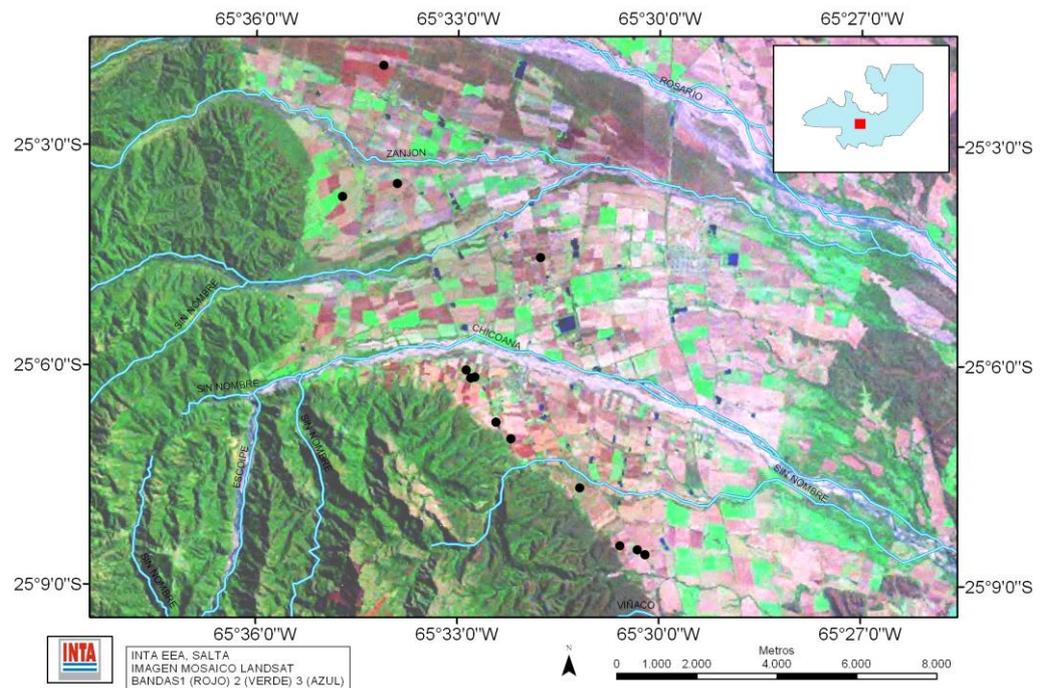
Para responder a los objetivos A y B se realizaron estudios en condiciones de campo mientras que el objetivo C se desarrolló en condiciones controladas.

CAPITULO 2

CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO

2.1. Ubicación

El estudio se llevó a cabo en lotes de pequeños productores del departamento Chicoana, provincia de Salta. Este departamento se encuentra ubicado en el Valle de Lerma (Mapa 2.1.).



Mapa 2.1. Ubicación geográfica del departamento Chicoana. Los puntos negros indican los lotes evaluados en esta tesis.

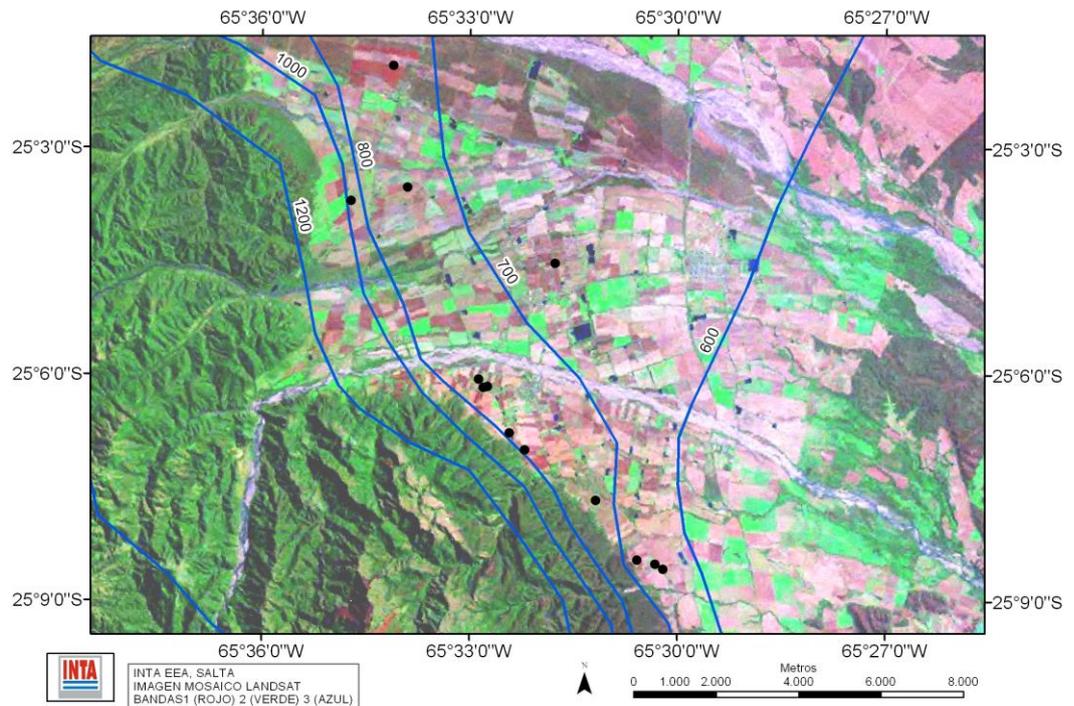
Este valle abarca un área de 170.000 ha y está ubicado entre los paralelos 24° 30' y 25° 37' de latitud sur y los meridianos 65° 22' y 65° 40' oeste, a una altitud entre los 1100 y 1450 m. Es una llanura aluvial originada por el aporte continuo de sedimento de los ríos que descienden del relieve montañoso (Vargas Gil 1999).

2.2. Clima

El Valle de Lerma, de acuerdo al método de Thornthwaite, presenta un tipo climático de condiciones mesotérmicas subhúmedo-seco con pequeños excesos de agua al final del verano (Vargas Gil 1999). Está gobernado por la dinámica de los vientos húmedos y cálidos provenientes del anticiclón del Atlántico que descargan precipitaciones en forma de lluvias orográficas y estacionales a lo largo de las sierras subandinas. Los vientos predominantes

corresponden al cuadrante N→S y NE→SW, con importantes manifestaciones de vientos muy cálidos e hiperdesecantes, del oeste que se presentan como fenómenos andinos del efecto Föen, durante la primavera temprana (Bianchi y Yáñez 1992).

Las precipitaciones anuales varían entre 600 a 800 mm (Vargas Gil 1999). El valle es más seco al este aumentando sus precipitaciones hacia el oeste. Se encuentra rodeado en casi en toda su periferia por altas montañas. Solo en su parte Noreste, las alturas son menores y en ella se encuentran además valles transversales como los del Portezuelo, Quebrada de Chacha poyas y Quebrada del Mojotoro que descargan su humedad sobre el alto contrafuerte occidental. En Salta Capital, los registros señalan 695 mm, en tanto que en San Lorenzo, a sólo 11 km de distancia hacia el Oeste, llueven 1395 mm. Más hacia el Sur, al elevarse la cadena montañosa por el Este, se hace sentir la sombra eólica que provoca, alcanzándose sólo precipitaciones del orden de los 400 mm (Bianchi y Yáñez 1992) (Mapa 2.2.).



Mapa 2.2. Isohietas de la zona bajo estudio. Los puntos representan los lotes evaluados

Las precipitaciones anuales y mensuales para una serie de años (1971-2000) y para los años durante los cuales se llevó a cabo esta tesis se presentan en la figura 2.1.

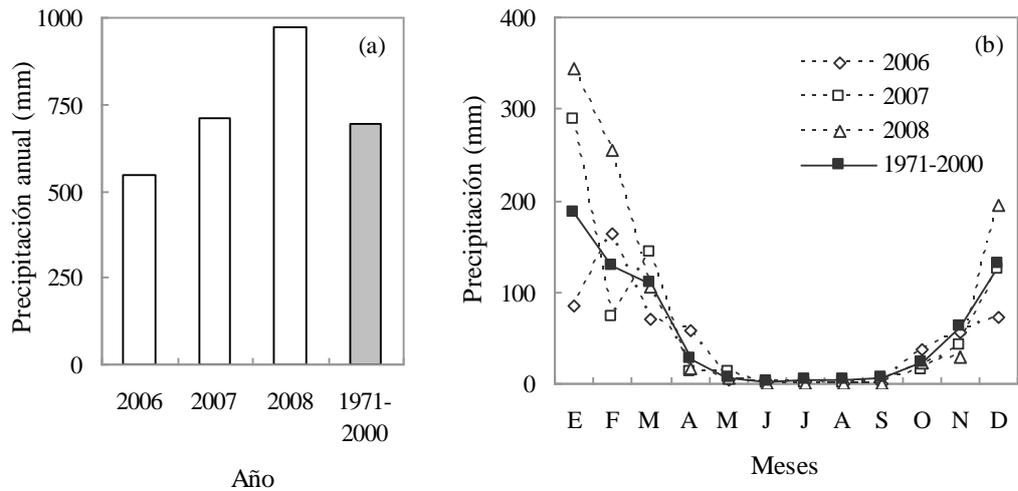


Figura 2.1. Precipitaciones anuales y mensuales (mm) de una serie de años y de los años 2006, 2007 y 2008 de la estación agrometeorológica ubicada en INTA EEA Salta (Cerrillos).

Las precipitaciones anuales 2008 superaron a la media anual de una serie de años, se puede observar que para ese año las precipitaciones registradas en los meses de enero, febrero y diciembre superan los valores de las medias mensuales de la serie 1971-2000. En el año 2007, solo la media mensual del mes de enero sobrepasó a la media histórica (Figura 2.1.). En todos los casos mencionados de precipitaciones mensuales se superó la media histórica en más de un 50%.

2.2.1. Temperatura media mensual

En el Valle de Lerma el factor orográfico regula la temperatura que disminuye con la altitud (Bianchi 1996). En la tabla 2.1. se muestran las temperaturas medias mensuales estimadas.

Tabla 2.1. Temperaturas medias mensuales (°C) para diferentes localidades del Valle de Lerma (Bianchi 1996, Arias y Bianchi 1996)

Localidad	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	AÑO
Campo Quijano	20,2	19,6	18,2	15,3	12,4	9,5	9,2	11,0	13,4	16,6	18,5	19,9	15,3
INTA Cerrillos	21,2	20,1	19,4	16,8	13,6	10,7	10,3	13,1	15,0	18,7	20,4	21,5	16,7
Rosario de Lerma	21,3	20,6	19,1	16,1	13,2	10,2	10,0	11,9	14,4	17,6	19,6	21,0	16,2
El Carril	21,6	20,9	19,9	17,1	14,1	11,2	11,3	13,3	15,8	19,4	20,9	21,9	17,3

La figura 2.2. presenta las temperaturas mínimas y máximas para una serie de años y para los años en los que se realizó el estudio.

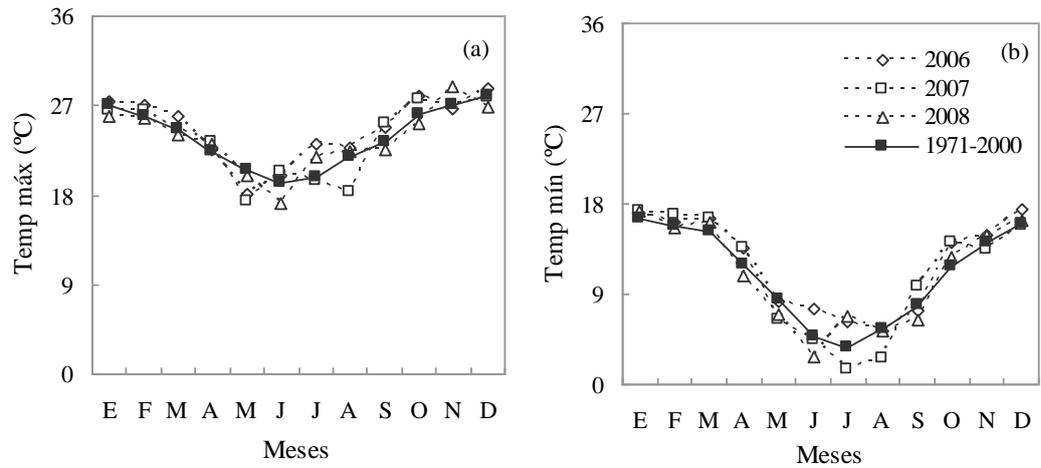


Figura 2.2. Temperaturas máximas (a) y mínimas (b) (°C) de una serie de años (1971-2000) y de los años 2006, 2007 y 2008 de la estación agrometeorológica de la Estación Experimental Agropecuaria del INTA Salta (Cerrillos).

La evolución de las temperaturas máximas y mínimas para los años considerados durante el período de plantación de cultivo (septiembre-marzo) son similares a la media a lo largo de todo el ciclo. No se observaron valores superiores o inferiores mayores en un 25% con respecto a la media de la serie de años (Figura 2.2.).

2.2.2. Otras Variables Climáticas de Interés

La tabla 2.2. presenta valores medios de las variables climáticas para una serie de años correspondientes a INTA Cerrillos.

Tabla 2.2. Valores medios de variables climáticas para la localidad de Cerrillos

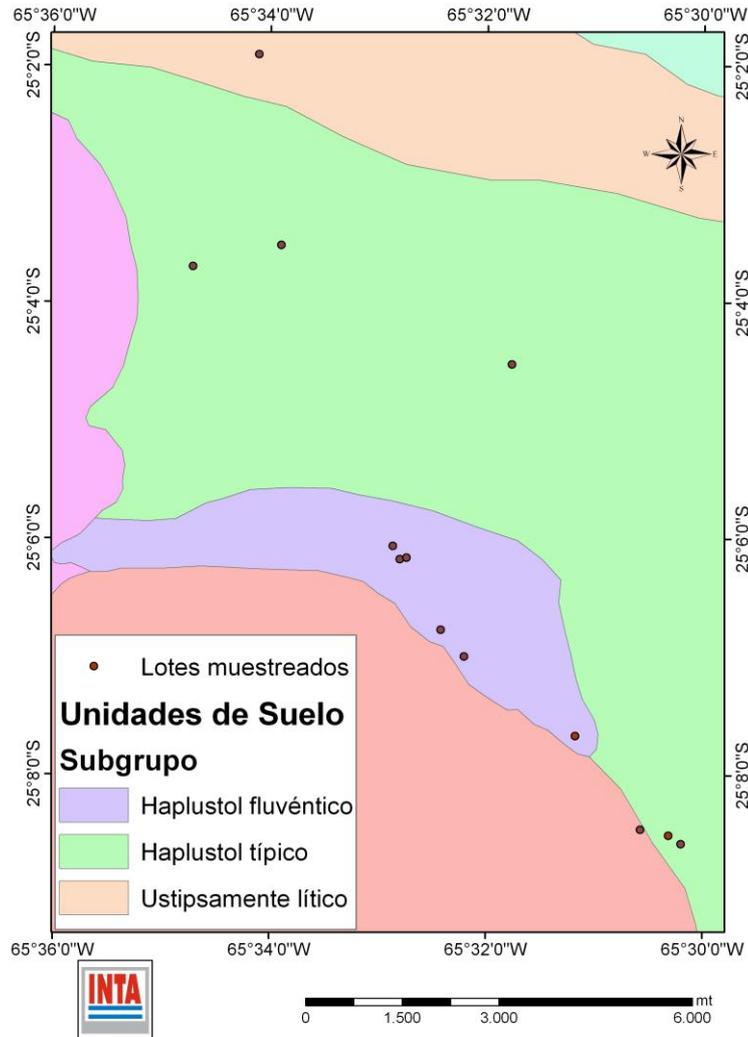
Meses	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	AÑO
T (°C) ¹	21	20	19	17	13	11	11	13	15	19	20	21	17
HR (%) ¹	78	80	82	81	78	75	68	61	57	60	67	71	72
Vel. viento (km/día) ²	90	87	81	86	91	96	113	121	130	134	126	108	105
Heliofanía relativa (%) ¹	46	46	40	43	48	53	61	62	59	55	51	49	51
PP (mm/mes) ¹	188	131	105	27	7	2	3	4	7	24	58	1320	683
ETo P-M (mm/mes) ²	136	100	90	66	53	42	52	71	93	121	124	131	1067

¹Estación meteorológica del INTA Cerrillos (Serie 1969/2008)

²Yáñez (2002) (Serie 1981/1996)

2.3. Caracterización edáfica

Los lotes estudiados se encuentran sobre tres subgrupos de suelos: Haplustoles típicos, Haplustoles fluvénticos y Ustipsamientos líticos (Mapa 2.3.). Considerando la cartografía de suelos (1:500000) propuesta por Nadir y Chafatinos (1990) pertenecen a las Asociaciones de suelos: Ampascachi, Chicoana y Quijano respectivamente.



Mapa 2.3. Unidades de suelo correspondientes a los grupos estudiados (Clasificación USDA).

Las series de suelo citadas por Nadir y Chafatinos (1990) se caracterizan por:

Suelo Ampascachi (Am)

A₁ 0-24 cm. Pardo rojizo oscuro (5YR 4/2) en seco y pardo rojizo oscuro (5YR 3/3) en húmedo. Franco arenoso. Bloques subangulares, medios, fuertes a moderados. Ligeramente duro, friable, ligeramente plástico, no adhesivo. pH 8. Abundantes carbonatos. Límite claro y suave.

- C₁ 24-74cm. Pardo rojizo (5YR 5/3) en seco y pardo rojizo (5YR 4/4) en húmedo. Franco arenoso. Bloques subangulares, medios, débiles. Ligeramente duro, muy friable, no plástico, no adhesivo. pH 8,1. Abundantes carbonatos. Límite claro y suave.
- C₂ 74-123cm. Pardo rojizo claro (5YR 6/4) en seco y pardo rojizo (5YR 4/4) en húmedo. Franco limoso. Bloques subangulares, gruesos, moderados. Extremadamente duro, firme, ligeramente plástico, no adhesivo. pH 8,1. Abundantes carbonatos en la masa y en forma de miscelios. Límite claro y suave.
- C₃ 123-149cm. Pardo rojizo (5YR 4/4) en seco y pardo rojizo oscuro (5YR 3/4) en húmedo. Franco arcillo limoso. Masivo. Muy duro, firme, ligeramente plástico, ligeramente adhesivo. pH 7,9. Abundante cantidad de carbonatos.

Suelo Chicoana (Chi)

- Ap 0-24cm. Pardo a pardo oscuro (10YR 4/3) en seco y pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2) en húmedo. Franco. Bloques subangulares, medios, moderados. Ligeramente duro, friable, plástico, no adhesivo. Abundantes carbonatos. Límite claro y suave. pH 8.
- AC 24-40cm. Pardo a pardo oscuro (10YR 4/3) en seco y pardo muy oscuro en húmedo (10YR 3/2). Franco. Bloques subangulares medios, moderados a fuertes. Duro, friable, ligeramente plástico, no adhesivo. pH 8,1. Abundantes carbonatos. Límite abrupto.
- C₁ 40-59cm. Pardo (7,5YR 5/4) en seco y pardo oscuro (7,5YR 3/2) en húmedo. Franco. Masivo. Blando, muy friable, ligeramente plástico, no adhesivo. pH 8,1. Abundante carbonato. Límite abrupto y suave.
- 2C₂ 59-84cm. Pardo a pardo oscuro (7,5YR 4/4) en húmedo. Gravilloso con matriz tipo franco, plástico, ligeramente adhesivo. Gran cantidad de carbonatos en la matriz y miscelios. Límite abrupto y suave.
- 3C₃ 84-125cm. Pardo a pardo oscuro (7,5YR 4/4) en húmedo. Franco a franco arenoso. Masivo. Friable, plástico, no adhesivo. Abundantes carbonatos. Perfil fresco a partir de los 59cm.

Quijano (Qj)

- A₁: (0-5cm). Gravillosos a pedregoso, con matriz areno franco, pH 6,3.
- C₁: (5-80cm). Pedregoso con rodados de hasta 20 cm de diámetro.

CAPÍTULO 3

DINAMICA DE LOS NUTRIENTES EN EL SUELO Y LA PLANTA DE TABACO EN LOTES DE PEQUEÑOS PRODUCTORES DE CHICOANA (SALTA).

3.1. Introducción

Los lotes de tabaco de los pequeños productores de Chicoana son fertilizados con el fin de obtener determinados objetivos de producción y calidad. Diagnósticos previos realizados en la zona sugieren que la fertilización dista de ser la óptima. En general no se realizan estudios de suelos, razón por la cual la disponibilidad de nutrientes puede ser sobre o subestimada. En el primer caso, se producen excesos de nutrientes que reducen la sustentabilidad económica y ambiental de la práctica, mientras que en el segundo se ve reducida la productividad (Nadir *et al.* 2004). Consecuentemente, se considera que el aprovechamiento de los nutrientes por el tabaco en estos lotes de Chicoana puede ser mejorado aunque aún no se dispone de la información necesaria. Es por ello, que en el presente capítulo se realizó un estudio de los destinos de los nutrientes y su dinámica en el tabaco en condiciones de campo. Los interrogantes que se plantearon fueron:

¿Cómo será la dinámica de los nutrientes y el agua en lotes tabacaleros en Chicoana?

¿Es preciso optimizar el uso de los nutrientes por el tabaco en Chicoana?

3.2. Objetivos e hipótesis

Objetivo A

Determinar el nivel de nutrientes absorbidos por el tabaco (N, P y K) y relacionarlo con la oferta nutricional del suelo con el fin de detectar excedentes o deficiencias.

Hipótesis A.1.

El nivel de nitrógeno absorbido por el tabaco es muy inferior a la oferta nutricional (N del suelo+N fertilizante) dado que en la estimación del requerimiento de fertilización, la oferta de N del suelo proveniente de la mineralización de la materia orgánica es subestimada.

Hipótesis A.2.

El nivel de K inicial del suelo es elevado en virtud de la mineralogía del suelo. El agregado de fertilizante genera excedentes de K en el suelo.

Hipotesis A.3.

La restringida expansión de las raíces de tabaco limita la absorción de P por la planta con la consecuente generación de excedentes en el suelo.

3.3. Materiales y métodos

Las características climáticas y edáficas de la zona se detallaron en el capítulo 2.

3.3.1. Características del sitio experimental

Los estudios de esta tesis se realizaron durante dos campañas consecutivas en lotes de pequeños productores tabacaleros que fueron seleccionados de acuerdo a los rendimientos obtenidos durante las tres campañas previas. Los datos de rendimiento fueron aportados por el Fondo Especial del Tabaco.

El estudio se llevó a cabo en 13 lotes de tabaco del departamento Chicoana, provincia de Salta. En la cabecera de cada lote se delimitó una parcela de 90m x 25m donde se seleccionaron 3 surcos para la recolección de las muestras.

3.3.2. Muestreo, determinaciones y estimaciones

Muestreo

En ambas campañas, se realizaron determinaciones de variables de suelo y planta en dos momentos del cultivo: previo a plantación y durante la cosecha. Durante la primera campaña, además se realizó el monitoreo del cultivo en diferentes momentos fenológicos

Determinaciones en planta

En los momentos fenológicos de adaptación (Ad), altura de rodilla (AR), floración-desflore (FD) y maduración-cosecha (MC) para el primer año y en MC para el segundo, se recolectaron 2 plantas consecutivas elegidas al azar en cada surco, a excepción del momento Ad en el que se tomaron 6 plantas. Este muestreo fue realizado con mayor número de plantas para garantizar la cantidad de materia seca necesaria para los análisis de laboratorio. Al final de la campaña fueron muestreadas un total de 36 plantas por lote (Tabla 3.1.).

Tabla 3.1. Momentos de muestreo y número de muestras tomadas

Momento fenológico	DDT	Nº plantas	Observaciones
Adaptación (Ad)	30	18	Extracción de planta completa
Altura de la rodilla (AR)	42	6	Extracción de planta completa
Floración, desflore (FD)	72	6	Extracción de planta completa
Maduración y Cosecha (MC)	94 -150	6	Extracción de hojas maduras en forma escalonada y planta completa en la última cosecha.
Total de plantas muestreadas		36	

*DDT: días después del trasplante

Cada planta fue extraída del suelo excavando un pozo alrededor de la misma cuidando no dañar las raíces. Estas últimas fueron lavadas para remover los restos de suelo. Para realizar los análisis, hojas, tallos y raíces de cada una de las plantas fueron separados para conformar muestras compuestas por parcela experimental.

Las determinaciones realizadas en planta fueron:

- Materia seca acumulada (MS) (gravimetría a 70 °C) (Chapman y Prat 1973).
- Nutrientes absorbidos: N total (micro-Kjeldahl), P total (extracción "vía húmeda" y cuantificación colorimétrica) y K total (extracción "vía húmeda" y cuantificación por fotometría de llama) (Quiroga y Corvalán 1988).

Determinaciones en suelo

Previo a la plantación y para los 4 momentos fenológicos mencionados en el ítem anterior, se tomaron muestras compuestas de suelo en diferentes profundidades (0-20, 20-40cm y aporque), cada submuestra fue extraída de los mismos 3 surcos utilizados para el muestreo de plantas.

- En todos los momentos de muestreo se cuantificaron los niveles de N-nitratos (arrastre de vapor saturado), P extractable (Bray-Kurtz N° I) y K intercambiable.
- Previo al trasplante y al final de la cosecha se determinaron: C (micro Walkley-Black), N total (micro Kjeldahl), pH, CE, CIC, Na, Ca y Mg de intercambio (extraídos con Acetato de Amonio 1.0 N a pH 7.0).

Todas las determinaciones se realizaron de acuerdo a las metodologías descriptas en Quiroga y Corvalán (1988).

En las tablas 3.2. y 3.3. se presentan los datos de los análisis de suelos correspondientes a los lotes evaluados.

Tabla 3.3. Datos analizados para los primeros 40cm del suelo (Campaña 2007/08)

	Prof.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Arena (%)	0-20	65	72	46	43	58	39	45	59	48	50	40	50	41
	20-40	63	76	49	40	58	49	42	56	46	45	35	48	46
Limo (%)	0-20	25	20	41	43	25	48	37	28	36	33	40	38	38
	20-40	28	18	39	44	26	36	33	28	38	35	41	38	37
Arcilla (%)	0-20	10	8	13	14	17	18	18	13	16	17	20	12	21
	20-40	9	6	12	16	16	15	25	16	16	20	24	14	17
Calificación Textural	0-20	FA	FA	F	F	FA	F	F	FA	F	F	F	F	F
	20-40	FA	FA	F	F	FA	F	F	FA	F	F	F	F	F
Cap Híd de Sat (%)	0-20	31	29	30	31	26	26	31	25	32	30	34	26	35
	20-40	31	28	30	31	25	26	36	29	31	33	39	26	35
pH en Pasta	0-20	8,3	8,3	6,7	6,3	6,7	7,6	7,8	8,3	7,9	7,9	8,2	6,0	8,1
	20-40	8,3	8,4	6,7	6,4	6,7	8,1	8	8,4	8	8	8,3	5,9	8,2
Cond. Eléct. (mmhos/cm)	0-20	0,87	0,91	0,55	0,91	1,57	1,68	1,16	0,68	1,12	1,55	0,95	0,93	0,94
	20-40	0,53	0,56	0,28	0,43	1,35	0,53	0,78	0,37	0,68	0,92	0,56	0,65	0,61
Carbonato de Ca y Mg (%)	0-20	8,8	8,6	0	0	0	7,0	0,6	8,6	8,3	21,6	8,6	0	22
	20-40	8,8	8,8	0	0	0	7,2	2	8,8	8,1	21,6	8,8	0	21,6
Carbono Orgánico (%)	0-20	1,20	0,97	0,86	1,28	0,98	0,72	1,39	1,02	0,96	1,30	1,32	0,81	1,58
	20-40	0,84	0,61	0,7	0,83	1,14	0,36	1,27	0,68	0,66	1,4	1,34	0,76	1,25
Materia Orgánica (%)	0-20	2,07	1,67	1,48	2,20	1,70	1,24	2,40	1,76	1,66	2,25	2,28	1,39	2,72
	20-40	1,45	1,05	1,20	1,43	1,96	0,62	2,18	1,17	1,13	2,41	2,31	1,31	2,15
Nitrógeno Total (%)	0-20	0,10	0,11	0,10	0,13	0,10	0,09	0,14	0,09	0,10	0,13	0,13	0,08	0,15
	20-40	0,09	0,07	0,08	0,10	0,12	0,04	0,12	0,07	0,07	0,14	0,12	0,07	0,12
Relación C/N	0-20	12	9	9	10	10	8	10	11	10	10	10	10	11
	20-40	9	9	9	8	10	9	11	10	9	10	11	11	10
Fósforo "Extractable" (p.p.m.)	0-20	18	18	10	26	54	23	19	15	25	21	31	37	3
	20-40	5	10	5	16	38	14	10	<1	19	19	14	19	1
Sodio Intercambiable (meq/100g)	0-20	0,5	1,4	0,5	0,6	0,2	0,7	0,2	0,9	0,5	0,2	0,5	0,4	0,2
	20-40	0,5	1,8	0,5	0,6	0,4	0,8	0,2	0,2	0,8	0,2	0,9	0,2	0,4
Potasio Intercambiable (meq/100g)	0-20	2,68	2,21	0,31	0,88	1,24	1,44	1,96	1,13	1,34	2,36	2,43	0,72	1,75
	20-40	1,7	1,75	0,31	0,52	0,88	0,77	1,19	0,72	0,88	1,96	1,6	0,52	1,39
Calcio Intercambiable (meq/100g)	0-20	n.d.	n.d.	7	6	8	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	5	n.d.
	20-40	n.d.	n.d.	7	6,3	7,3	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	4,8	n.d.
Magnesio Intercambiable (meq/100g)	0-20	n.d.	n.d.	1	2	4	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1	n.d.
	20-40	n.d.	n.d.	1,2	1,9	2,1	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1,8	n.d.
Clor.Sol.(Ex.de Sat) (meq/l)	0-20	<5	<5	<5	<5	3	1	2	<5	<5	1	<5	<5	<5
	20-40	<5	<5	<5	<5	3,0	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
Clor. Sol.(Ex. de Sat., SS) (p.p.m.)	0-20	<20	<20	<20	<20	29	12	21	<20	<20	21	<20	<20	<20
	20-40	<20	<20	<20	<20	26	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20

- Al final de la cosecha se determinó la densidad aparente, se aplicó el *método de la excavación* (Gil *et. al.* 2006) en razón de la presencia de fragmentos gruesos (Foto 3.1.). Se utilizó este método por ser más preciso que el método del cilindro debido al mayor volumen de muestra que se requiere. El procedimiento aplicado se describe en el Anexo 1 de esta tesis.



Foto 3.1. Cultivo de tabaco en Chicoana donde pueden apreciarse los fragmentos pedregosos en superficie.

Estimaciones

- *Tiempo térmico*

El tiempo térmico para las diferentes etapas del ciclo se estimó a partir de la siguiente expresión (Miralles *et al.* 2003):

$$TT = \sum (T_m - T_b) \quad [1]$$

Donde:

TT: es el tiempo térmico acumulado para una etapa determinada de la ontogenia del cultivo

T_m: temperatura media diaria

T_b: temperatura base. Se consideró 10°C para el cultivo de tabaco var K326 (Ortega 2010).

- *Radiación fotosintéticamente activa*

La radiación solar o de onda corta se calculó a través de la fórmula de Angstrom (Allen *et al.* 2006) que relaciona la radiación solar con la radiación extraterrestre y la duración relativa de la insolación:

$$R_s = \left(a_s + b_s \times \frac{n}{N} \right) \times R_a \quad [2]$$

Donde:

R_s: radiación solar o de onda corta (MJ/m² día)

n: duración real de la insolación (horas) (Dato aportado por la estación agro meteorológica del INTA EEA Salta)

N: duración máxima posible de la insolación (horas)

$$N = \frac{24}{\pi} \omega_s \quad [3]$$

ω_s : ángulo de radiación a la puesta del sol (rad) (ec. 6)

n/N: duración relativa de la insolación (-)

a_s : constante de regresión, que expresa la fracción radiación extraterrestre que llega a la tierra en días muy nublados (n=0)

a_s+b_s : fracción de la radiación extraterrestre que llega a la tierra en días despejados (n=N)

Ra: radiación extraterrestre (MJ/m² día)

La radiación extraterrestre para cada día del año se puede estimar a partir de la siguiente expresión:

$$Ra = \frac{24 \times 60}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega)] \quad [4]$$

Donde:

G_{sc} : constante solar (=0,082 MJ/m² min)

d_r : distancia relativa inversa Tierra-Sol

$$d_r = 1 + 0,033 \times \cos\left(\frac{2\pi}{365} J\right) \quad [5]$$

J: número de día en el año entre 1 (1 enero) y 365 (31 diciembre)

ω_s : ángulo de radiación a la puesta del sol (rad)

$$\omega_s = \arccos[-\tan(\varphi) \tan(\delta)] \quad [6]$$

φ : latitud (rad). La conversión de grados decimales a radianes se da por:

$$[\text{radianes}] = \frac{\pi}{180} [\text{grados decimales}] \quad [7]$$

δ : declinación solar (rad)

$$\delta = 0,409 \times \text{sen}\left(\frac{2\pi}{365} J - 1,39\right) \quad [8]$$

La proporción de radiación fotosintéticamente activa con respecto a la radiación incidente es de aproximadamente 0,5 (Monteith 1972).

- Contenidos de nutrientes

El cálculo de los contenidos de nutrientes en suelo se realizó de acuerdo a lo recomendado por Gil *et al.* (2006). Con tal fin fue necesario conocer la capa arable con piedras (CACP) y sin piedras (CASP), obtenidas a partir de la densidad

aparente global (DAG) y densidad aparente de la fracción fina (DAF) respectivamente. La capa arable fue calculada a partir de la siguiente expresión:

$$CA = \rho \times 10000 \times \text{prof} \quad [9]$$

Donde:

CA: capa arable (tn)

ρ : es la densidad (tn/m³). Puede ser de la fracción fina (sin piedras) o global (con piedras)

10000: representa la hectárea (m²)

prof: profundidad (m), en el caso del aporque se consideró 10cm de profundidad.

Obtenidas las toneladas de capa arable con y sin piedras se calculó la cantidad de nutriente teniendo en cuenta las dos capas arables calculadas.

$$\text{Nutriente (tn/ha)} = \text{Concentración de nutriente} \times \text{CASP} \quad [10]$$

Donde la concentración de nutriente se deberá multiplicar o dividir por diferentes factores dependiendo del nutriente que se trate:

Nitrógeno ¹ :	$\frac{N (\%)}{100}$
Nitratos:	$\frac{NO_3^- (\text{ppm})}{1.000.000} \times \frac{14}{62}$
Potasio:	$K (\text{meq}/100\text{gr suelo}) \times \frac{0,039}{100}$
Fósforo:	$P(\text{ppm}) \times 1 \cdot 10^{-6}$

Los coeficientes incluidos en el cálculo permiten expresar las concentraciones de nutrientes en tanto por uno. A continuación se detalla el significado de cada coeficiente:

Nitrógeno	100: representa los 100g de suelo
Nitratos	14: peso en gramos del átomo de N 64: peso en gramos del NO ₃ ⁻
Potasio	0,039: peso en gramos de un miliequivalente de K 100: representa los 100g de suelo
Fósforo	1 10 ⁻⁶ : representa el 1000000g de suelo

¹ Para el caso del N, el aporte de N por mineralización de la materia orgánica se calculó con las tasas de mineralización informadas por Ballari (2005). Para el cálculo de la cuota del nitrógeno liberado debe considerarse un 70% del nitrógeno inorgánico calculado para todo el año ya que debe tenerse en cuenta el tiempo del cultivo en el campo y su estacionalidad (primavera – verano).

Finalmente la cantidad de nutriente obtenida en la fracción fina del suelo se debe referir al peso total del suelo (incluidas las piedras):

$$\text{Nutriente (kg/ha)} = \frac{\text{CASP}}{\text{CACP}} \times \text{Nutr (tn/ha)} \times 1000 \quad [11]$$

Los contenidos de nutriente en la cosecha se calcularon realizando un promedio ponderado de las concentraciones del aporque y el muestreo de los 20cm superiores de suelo.

- Balance de Nitrógeno

El nitrógeno aparentemente lixiviado fue estimado para cada lote evaluado de la siguiente manera (Costa 2002):

$$N_L = N_{\text{fert}} + N_m + N_i - N_{\text{abs}} - N_f \quad [12]$$

Donde:

N_L : nitrógeno aparentemente lixiviado (kg/ha)

N_{fert} : aplicado por fertilización (kg/ha)

N_m : nitrógeno de nitratos obtenidos por mineralización durante el período considerado (kg/ha)

N_i : nitrógeno de nitratos disponible al inicio del período considerado (kg/ha)

N_{abs} : nitrógeno absorbido en planta (kg/ha)

N_f : nitrógeno de nitratos disponible al final del período considerado (kg/ha)

El nitrógeno del suelo (N_{suelo}) y el disponible (N_{disp}) fueron calculados a partir de las siguientes expresiones:

$$N_{\text{suelo}} = N_m + N_i \quad [13]$$

$$N_{\text{disp}} = N_{\text{fert}} + N_{\text{suelo}} \quad [14]$$

- Eficiencias fisiológica y agronómica

Se calcularon la eficiencia fisiológica (EFIS) y la eficiencia agronómica (EAGR) para nitrógeno, fósforo y potasio de acuerdo a las siguientes expresiones (Álvarez 2003).

$$\text{EFIS} = \frac{\text{kg de materia seca por ha}}{\text{kg de nutriente absorbido por ha}} \quad [15]$$

$$\text{EAGR} = \frac{\text{kg de materia seca por ha}}{\text{kg de nutriente aplicado por ha}} \quad [16]$$

3.3.3. Análisis estadístico

A los efectos de realizar el análisis de los datos, los lotes estudiados en cada año de estudio se agruparon de acuerdo al nivel de producción de MS de hoja a cosecha, resultando 2 grupos: alta producción (AP) y baja producción (BP) (6 y 7 lotes para AP y 7 y 6 lotes para BP en las campañas 2006/07 y 2007/08 respectivamente). Cada lote fue considerado como una repetición dentro del grupo. Se utilizó la media aritmética como límite entre grupos observándose diferencias significativas entre los mismos. Dicho criterio fue utilizado para los dos años de estudio.

Las diferencias en los valores de las variables medidas entre los grupos se determinaron con prueba T de Student para dos poblaciones ($p < 0,05$ y $p < 0,01$) (InfoStat 2008).

3.4. Resultados

3.4.1. Estados fenológicos y duración de las fases

Los grupos productivos evaluados, AP y BP (alta y baja producción de materia seca de hoja) se diferenciaron estadísticamente en su fecha de plantación en la campaña 2006/07 ($p = 0,0504$) ya que el grupo AP se trasplantó 20 días antes aproximadamente (Figura 3.1.).

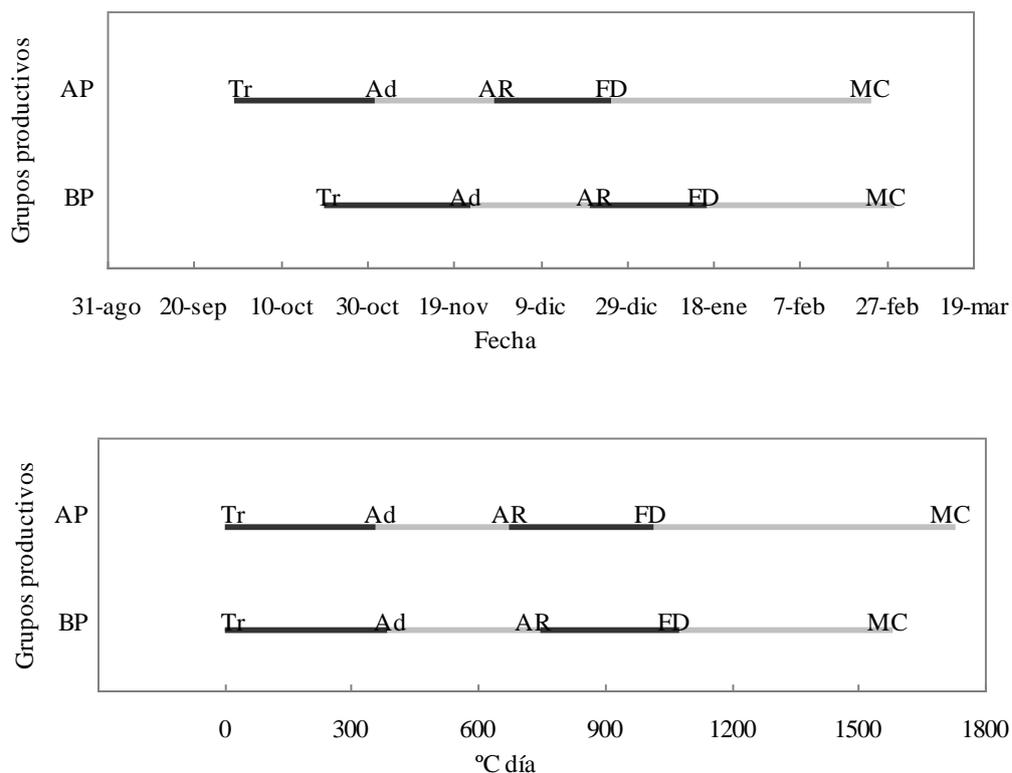


Figura 3.1. Duración de las diferentes fases de cultivo (Tr: trasplante, Ad: adaptación, AR: altura de rodilla, FD: floración-desflore y MC: maduración-cosecha) para los grupos productivos AP y BP (alta y baja producción de MS) correspondientes a la campaña 2006/07.

Esta diferencia de 20 días entre grupos se reflejó en las distintas etapas hasta la floración ($p < 0,06$), sin embargo la finalización de la cosecha para ambos grupos se produjo en fechas similares (Figura 3.1.).

Para esta misma campaña la longitud de las fases en función del tiempo térmico (Figura 3.1.) solo presentó diferencias significativas entre ambos grupos productivos en el período comprendido entre FD-MC ($p = 0,0089$).

La radiación fotosintéticamente activa disponible en la primera campaña no se diferenció entre grupos para los tres primeros momentos del ciclo, pero si lo hizo para el período comprendido entre MC-FD (Tabla 3.4.).

Tabla 3.4. Radiación fotosintéticamente activa disponible en diferentes momentos del ciclo de la campaña 2006/07 para los grupos AP y BP (alta y baja producción de MS). Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$) (medias \pm error estándar).

	PAR estimada acumulada (MJ/m ²)	
	AP	BP
Tr-Ad	326,6 \pm 8,21	345,6 \pm 13,0
Ad-AR	279,4 \pm 44,4	297,9 \pm 54,1
AR-FD	277,8 \pm 26,3	264,2 \pm 29,1
FD-MC	567,4 \pm 27,8 A	395,7 \pm 41,3 B

En la campaña 2007/08 en cambio, los trasplantes se realizaron entre el 20 de septiembre y el 20 de octubre, sin diferenciarse el momento de trasplante entre grupos productivos.

3.4.2. Producción de MS y absorción de nutrientes (N, K, P)

Los valores de MS medidos en la campaña 2006/07, mostraron diferencias entre grupos AP y BP dependiendo de la parte de la planta considerada y el momento del ciclo. Mientras la MS de planta y hoja en AP superó a BP en los dos últimos momentos del ciclo (FD y MC; $p < 0,05$ y $p < 0,01$ respectivamente), la MS de raíz de AP solo superó a BP en floración ($p = 0,0279$). La MS de tallo, en cambio, no presentó diferencias entre los grupos para ninguno de los momentos evaluados (Figura 3.2.a.).

Los niveles de N y K absorbidos en planta y hoja siguieron la misma tendencia que los valores de MS ya que el grupo AP superó a BP en los momentos FD y MC ($p < 0,05$ y $p < 0,01$ para los dos nutrientes en FD y MC respectivamente). A diferencia del N y K, el P absorbido en planta y hoja fue superior para AP solo en MC ($p = 0,0209$) (Figura 3.2.b, c y d.).

En la raíz, los niveles de N, P y K absorbidos en AP superaron estadísticamente a BP ($p < 0,05$) sólo en el momentos FD. Para este mismo momento AP presentó mayor absorción de N en el tallo ($p = 0,0465$) (Figura 3.2.b, c y d.).

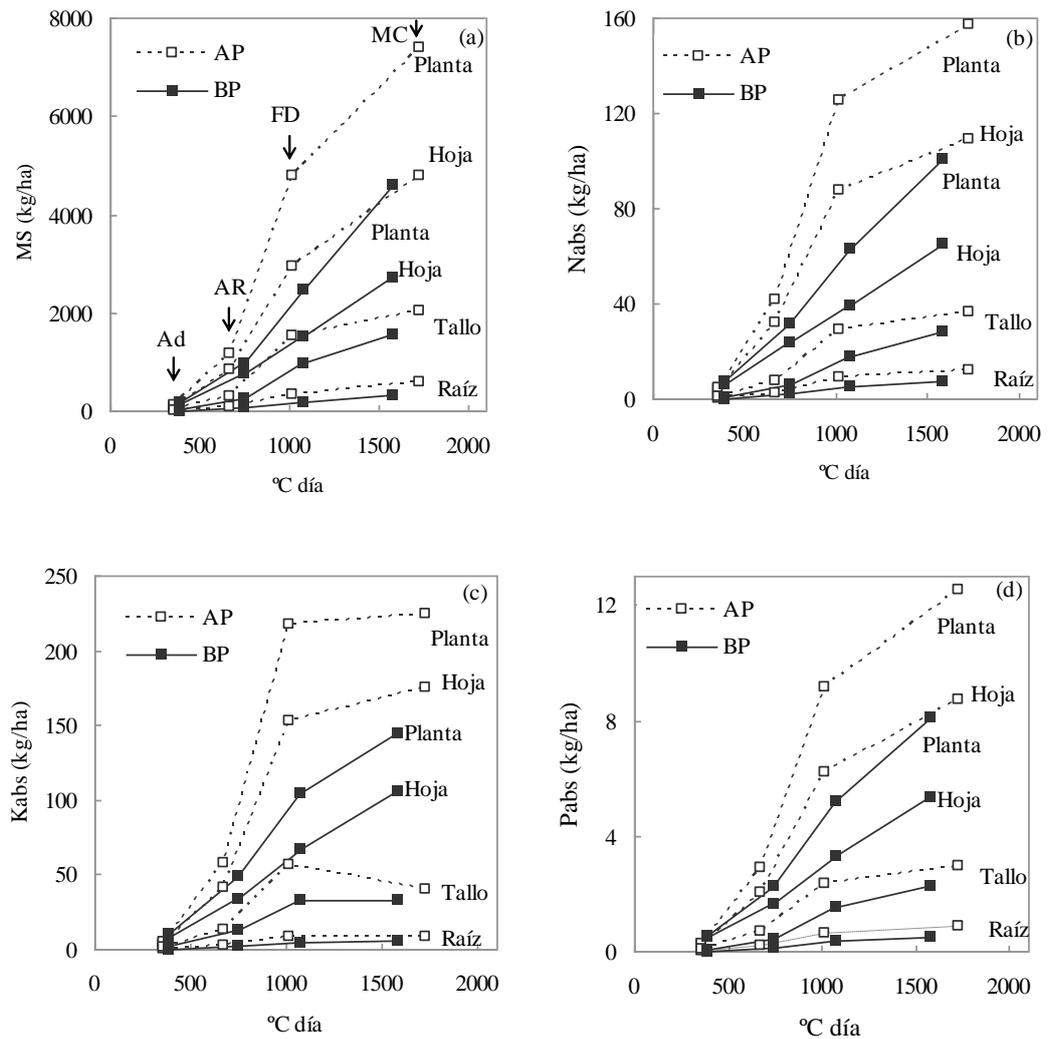


Figura 3.2. Producción de MS y acumulación de nutrientes (N, P y K) en la planta de tabaco y sus diferentes órganos para diferentes momentos (Ad: adaptación, AR: altura de rodilla, FD: floración-desfloración, MC: maduración cosecha) en dos grupos productivos (AP y BP) durante la campaña 2006/07.

La acumulación de MS en el período AR - FD (de rápido crecimiento) fue mayor en AP respecto de BP siendo los valores medidos $6,06 \pm 1,4$ kg MS hoja/°C día vs $2,06 \pm 1,4$ kg MS hoja/°C día respectivamente ($p=0,0207$) (Figura 3.2.a.). De manera similar a la hoja, la tasa de acumulación de MS de planta y en raíz para este mismo período fue 2 veces superior para AP con respecto de BP ($10,37 \pm 2,04$ y $4,55 \pm 1,06$ kg MS planta/°C día y $0,78 \pm 0,13$ y $0,36 \pm 0,09$ kg MS raíz/°C día para AP y BP respectivamente) (media \pm error estándar) ($p < 0,05$).

Al igual que la MS, la tasa de absorción de N y K del grupo AP en hoja y planta duplicó a la de BP durante el período AR-FD ($0,23 \pm 0,05$ y $0,1 \pm 0,02$ kg N planta/°C día; $0,15 \pm 0,04$ y $0,05 \pm 0,02$ kg N hoja/°C día; $0,45 \pm 0,10$ y $0,18 \pm 0,06$ kg

K planta/°C día; $0,31 \pm 0,07$ y $0,11 \pm 0,04$ kg K hoja/°C día para los grupos AP y BP respectivamente) (media \pm error estándar) ($p < 0,05$) (Figura 3.2.b y c.).

La tasa de absorción de N y K en raíz del grupo AP fue el doble de la de BP en el período AR-FD ($0,02 \pm 0,004$ y $0,01 \pm 0,002$ kg N raíz/°C día; $0,02 \pm 0,003$ y $0,01 \pm 0,002$ kg K raíz/°C día para los grupos AP y BP respectivamente) (media \pm error estándar) ($p < 0,05$), mientras que para el P fue superior para el período comprendido entre Ad – AR ($8,3 \cdot 10^{-4} \pm 1,7 \cdot 10^{-4}$ y $1,4 \cdot 10^{-4} \pm 1,4 \cdot 10^{-4}$ kg P raíz/°C día para los grupos AP y BP respectivamente) (media \pm error estándar) ($p = 0,009$) (Figura 3.2.b, c y d.).

Considerando los dos años de estudio la MS de la planta entera y de hoja fue significativamente superior para el grupo de alta producción (AP), mientras que los valores de MS de tallo y raíz solo se diferenciaron en la segunda campaña (Figura 3.3. a y b.)

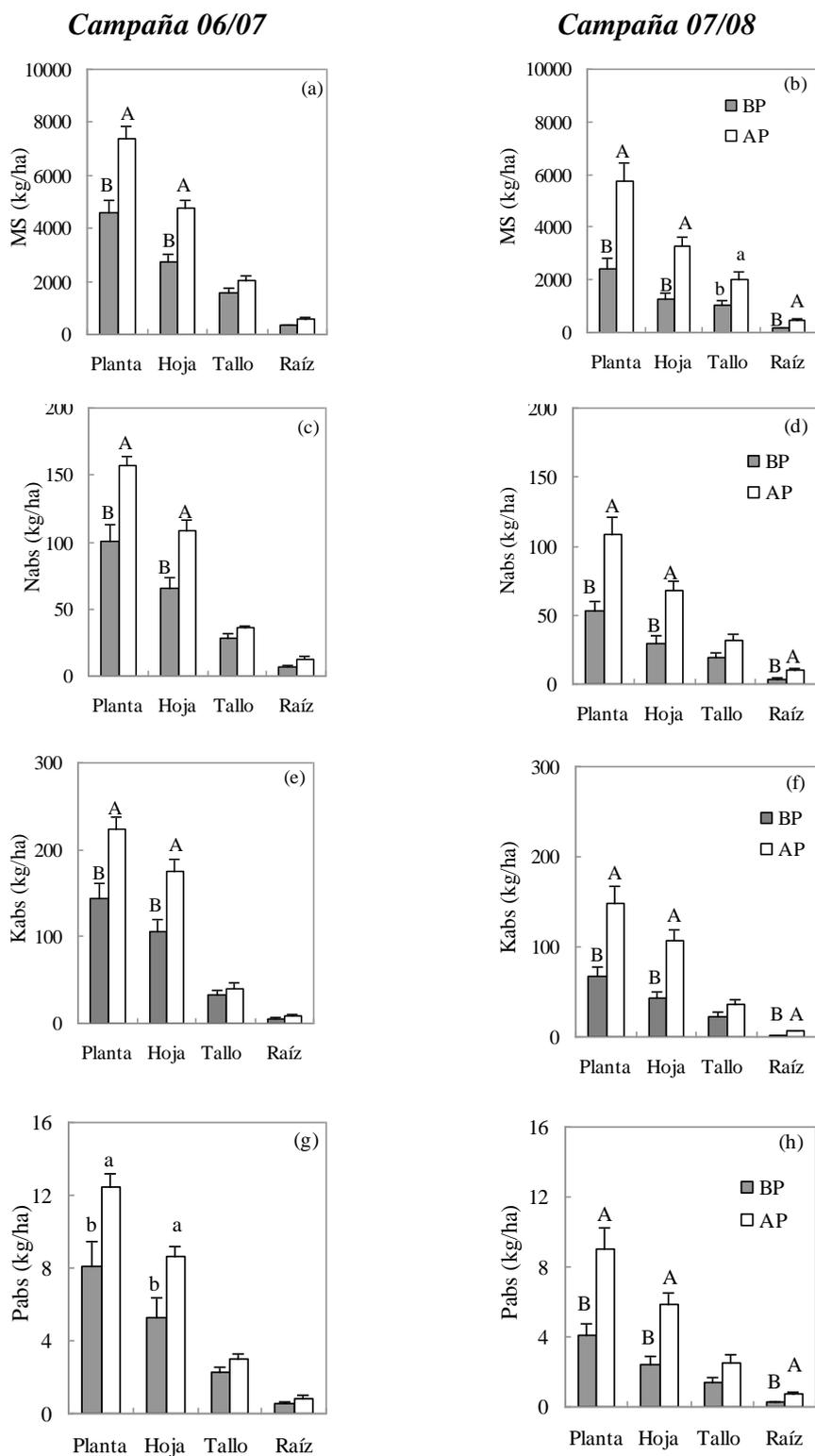


Figura 3.3. Materia seca (a,b) y nitrógeno (c,d), potasio (e,f) y fósforo (g,h) absorbidos en planta, hoja, tallo y raíz (kg/ha) para grupos de baja (BP) y alta (AP) producción en dos campañas diferentes para el momento MC (medias \pm error estándar). Letras diferentes representan diferencias estadísticamente significativas con $p < 0,05$; $p < 0,01$ (letras mayúsculas).

La absorción de N en planta entera fue significativamente superior para el grupo de alta producción (AP) en ambas campañas. Respecto de la partición del N absorbido, el grupo AP absorbió mayor cantidad de N en hoja y raíz (primera campaña), mientras que en tallo fue similar para ambos grupos en las dos campañas evaluadas (Figura 3.3.c y d.).

La concentración de N, en cambio, no presentó diferencias significativas en ninguna de las campañas evaluadas ($2,4 \pm 0,2$ y $2,3 \pm 0,2$ % en 2006/2007 y $2,1 \pm 0,1$ y $2,3 \pm 0,1$ % en 2007/2008, (medias \pm error estándar)).

De manera similar que el N, los niveles de P y K absorbidos en planta entera y hoja del grupo AP superaron significativamente a BP. El grupo AP también se atribuyó la mayor absorción de P y K en raíz en la segunda campaña (Figura 3.3. e, f, g y h).

En la figura 3.4. se presentan las relaciones de materia seca producida y nutrientes absorbidos entre las diferentes partes de la planta. Considerando la MS producida la relación entre hoja vs raíz presentó los mayores valores, sin diferencias entre AP y BP para ninguna de las dos campañas evaluadas, mientras que la relación entre hoja y tallo fue mayor sólo para el grupo de AP y en la primera campaña. Las relaciones entre la MS de hoja y raíz fueron superiores a las del tallo, debido al escaso desarrollo radical (Figura 3.4.a y b.).

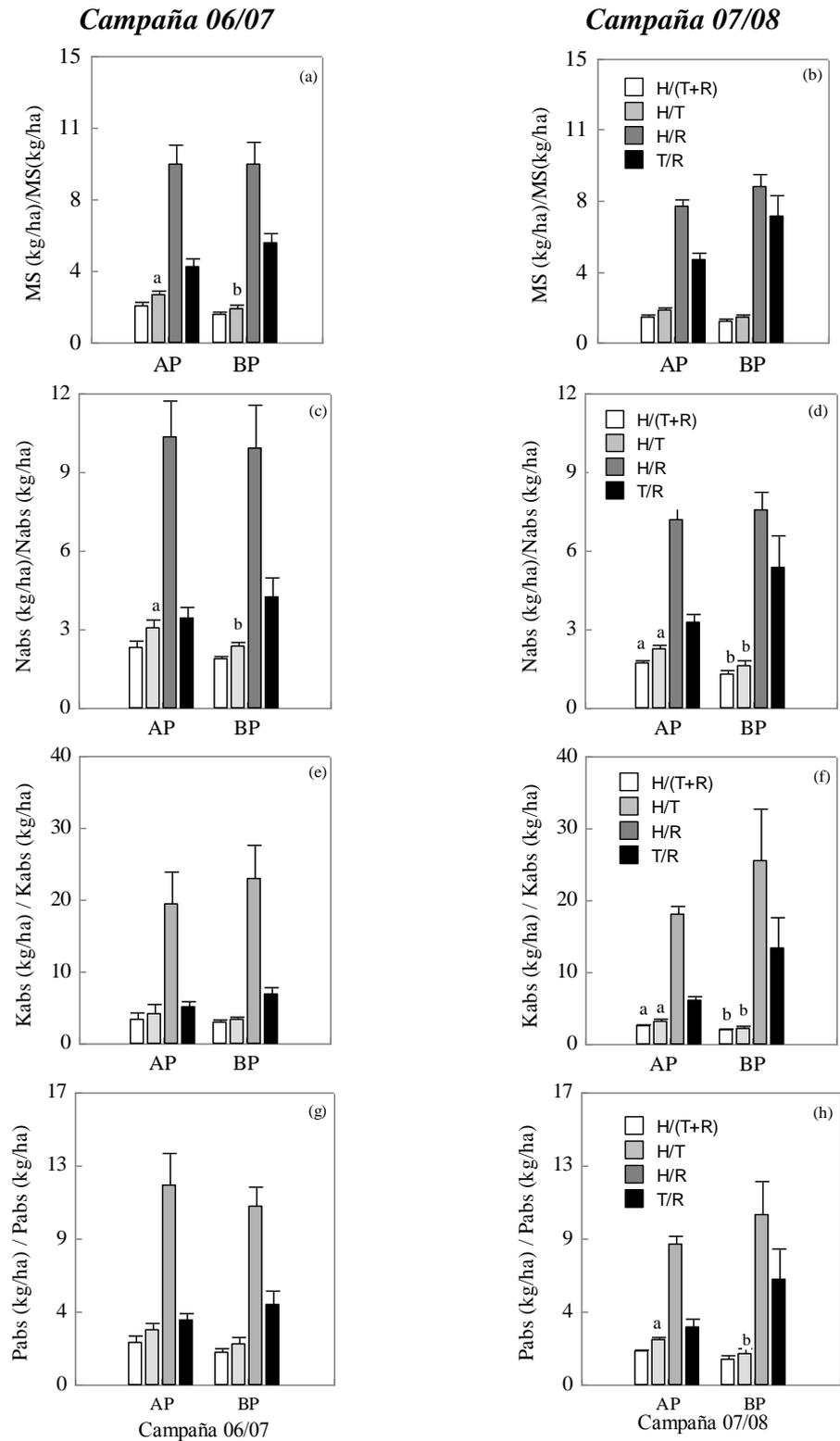


Figura 3.4. Relaciones de MS producida (a,b), N (c,d), K (e,f) y P (g,h) absorbido entre las diferentes partes de la planta para los grupos de alta (AP) y baja producción (BP) en dos campañas (medias \pm error estándar). Letras diferentes representan diferencias estadísticamente significativas con $p < 0,05$. (H: hojas, T: tallo y R: raíz).

Los niveles de absorción de N en hoja respecto de los del tallo y la raíz ($p=0,0345$) presentaron diferencias significativas en la segunda campaña. Similar tendencia se detectó en la relación entre hoja y tallo ($p=0,0261$), siendo el grupo AP el de mayor proporción para ambos años (Figura 3.4. c y d.).

Siguiendo la misma tendencia observada en el nitrógeno, los valores de hoja/tallo+raíz y hoja/tallo para K del grupo AP superaron significativamente a los del grupo BP. También se observó que las relaciones hoja/raíz fueron las mayores para los dos grupos en ambas campañas (Figura 3.4.e y f.).

La relación tallo/raíz de P absorbido fue superior para AP en la segunda campaña. De manera similar al N y K, la relación entre la hoja y la raíz mostró el mayor valor (Figura 3.4.g y h.).

3.4.3. Dinámica de acumulación de nutrientes

Los requerimientos de N, K y P fueron bajos en la primera etapa del ciclo (Ad), la hoja fue el órgano de la planta que presentó los mayores niveles de acumulación en los tres nutrientes, los cuales no superaron el 7% de los totales absorbidos. En esta etapa, las plantas del grupo BP presentaron mayores valores de partición, llegando a duplicar o triplicar los porcentajes de AP (Figura 3.5.).

La partición estudiada en los restantes momentos evaluados no mostró diferencias significativas entre grupos. En floración, la planta absorbió el 98% del K en el grupo AP y el 70% en el grupo BP, correspondiendo a la hoja el 60% del total del K absorbido en ambos grupos. En el caso del N la planta absorbió alrededor del 75% del total, con un 50% destinado a la hoja. Mientras que para el P en planta se observó una absorción de aproximadamente un 70%, con 46% de absorción en hoja (Figura 3.5.).

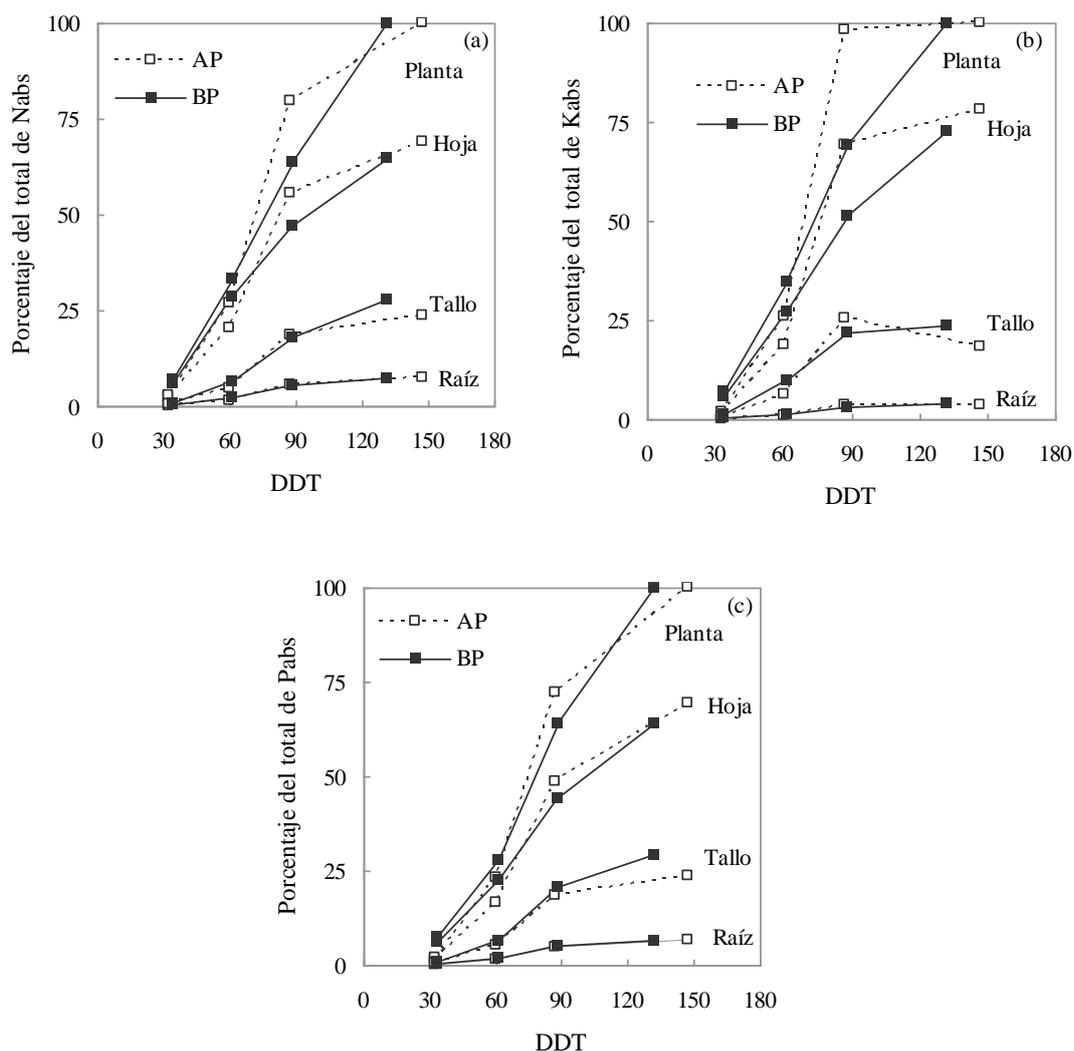


Figura 3.5. Porcentaje de nitrógeno (a), potasio (b) y fósforo (c) absorbido en diferentes órganos de la planta de tabaco en función de los días después del transplante para los grupos de alta (AP) y baja (BP) producción en diferentes momentos del ciclo (adaptación, altura de rodilla, floración-desflore y maduración-cosecha) (campaña 2006/07).

A cosecha, las hojas absorbieron entre el 65 al 70% de los contenidos N, P y K totales. En la raíz se absorbió alrededor del 7% del total de N y P, mientras que para K fue del 4%. La proporción de N, P y K para el tallo al finalizar el ciclo del cultivo varió aproximadamente entre 20 al 25% (Figura 3.5.).

El porcentaje de MS de hoja correspondió al 60 % aproximadamente respecto de la planta entera en ambas campañas. En cambio, la proporción de MS de tallo varió entre 27 y 40 %, siendo el grupo BP el que presentó la mayor proporción en la primera campaña. En todos los casos la proporción de raíces fue muy baja, inferior al 8 % (Tabla 3.5).

Tabla 3.5. Proporción de MS en hoja, tallo y raíz (%) para grupos de baja (BP) y alta (AP) producción en dos campañas diferentes para el momento MC (medias \pm error estándar). Letras diferentes representan diferencias estadísticamente significativas con $p < 0,05$.

	Campaña 06/07		Campaña 07/08	
	BP	AP	BP	AP
Hoja	59,3 \pm 2,0	65,0 \pm 2,3	53,1 \pm 2,6	57,2 \pm 2,2
Tallo	33,8 \pm 1,7 a	27,6 \pm 2,3 b	40,9 \pm 2,8	34,8 \pm 2,2
Raíz	6,9 \pm 0,7	7,5 \pm 1,0	6,7 \pm 0,7	8,0 \pm 0,3

3.4.4. Dinámica de los nutrientes (N, P y K) en el sistema suelo - planta.

Nitrógeno

La oferta del N del suelo ($N_m + N_i$) fue similar en todos los lotes estudiados, mientras que el N aplicado por fertilización (N_{fert}) fue mayor para el grupo AP en la segunda campaña. Sin embargo, el nivel de N disponible ($N_{suelo} + N_{fert}$) no se diferenció entre grupos para ninguna de las dos campañas. (Figura 3.6.).

En el balance de N calculado para todo el ciclo del cultivo se observó que el N_{disp} superó al N_{abs} generando un excedente de N_{Lap} para ambos grupos en las dos campañas evaluadas. A pesar de las diferencias significativas en el N_{abs} por la planta observadas entre AP y BP, el excedente N_{Lap} fue similar para ambos grupos (Figura 3.6.).

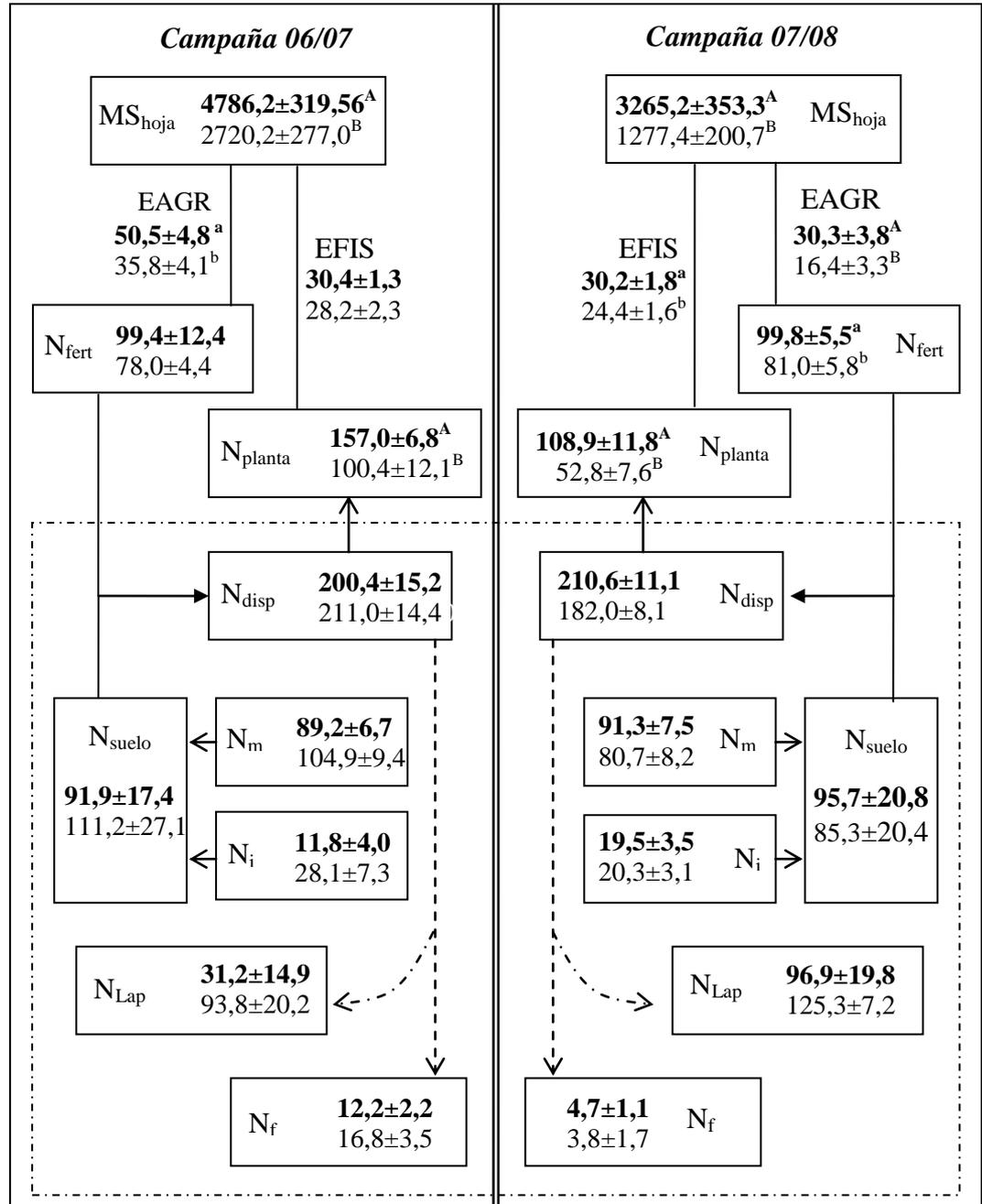


Figura 3.6. Modelo de la dinámica del N en el tabaco de Chicoana. Promedios (kg/ha) de materia seca en hoja (MS_{hoja}), eficiencias agronómica (EAGR) y fisiológica (EFIS) y nitrógeno del fertilizante (N_{fert}), absorbido en planta (N_{planta}), disponible (N_{disp}), del suelo (N_{suelo}), mineralizado (N_m), de nitratos inicial (N_i), de nitratos final (N_f) y aparentemente lixiviado (N_{Lap}) para grupos de baja (BP: normal) y alta (AP: negrita) producción en dos campañas diferentes. Letras diferentes representan diferencias estadísticamente significativas con $p < 0,05$; $p < 0,01$ (letras mayúsculas).

El N_{disp} absorbido por la planta varió entre el 50 y 78% para la primera campaña y el 28 al 50% para la segunda.

La eficiencia agronómica (EAGR) del grupo AP fue significativamente superior a la de BP en ambas campañas. En cambio, para la eficiencia fisiológica (EFIS) esta tendencia sólo fue observada en el segundo año (Figura 3.6.).

La diferencia entre el N aplicado y el N absorbido sugiere que la dosis de N aplicada para el primer año en el grupo AP no alcanzó a restituir los niveles de nitrógeno extraídos por el tabaco, y para BP en el segundo año se observa que fue superior al extraído por el cultivo (Figura 3.7.).

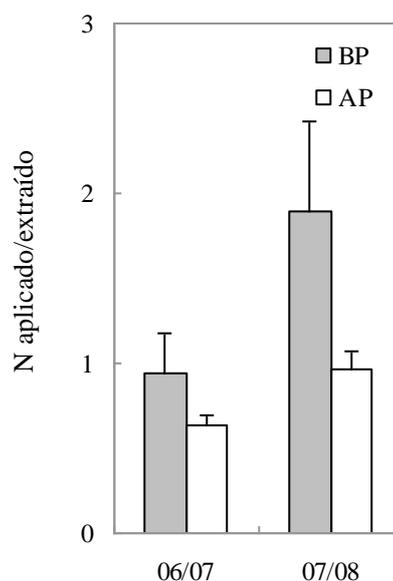


Figura 3.7. Promedio \pm error estándar de niveles de reposición de nitrógeno en el cultivo de tabaco para grupos de alta y baja producción de materia seca (medias \pm error estándar).

Para detectar el momento del ciclo en que pudo haberse producido la mayor pérdida de nitrógeno se elaboró un balance por etapa del ciclo de cultivo, en el primer año de estudio. De acuerdo a los datos observados, la mayor pérdida de N se habría producido en el período comprendido entre adaptación (Ad) y altura de rodilla (AR) (Tabla 3.6.).

Tabla 3.6. Nitrógeno de nitratos inicial (N_i), mineralizado (N_m), del fertilizante (N_{fert}), de nitratos final (N_f), absorbido en planta para el período considerado (N_{abs}) y lixiviado aparente (N_{Lap}) expresados en kg/ha para grupos de baja (BP) y alta (AP) producción en diferentes momentos del ciclo (medias \pm error estándar). Letras diferentes representan diferencias estadísticamente significativas con $p < 0,05$.

		N_i (A)	N_{min} (B)	N_{fert} (C)	N_f (D)	N_{abs} (planta) (E)	N_{Lap} (A+B+C-D-E)
Tr-Ad	AP	11,8 $\pm 4,0$	19,2 $\pm 1,3$ b	25,2 $\pm 4,9$	50,8 $\pm 13,2$	4,1 $\pm 0,7$	1,3 $\pm 7,1$
	BP	28,1 $\pm 7,3$	26,8 $\pm 2,4$ a	21,7 $\pm 2,0$	50,9 $\pm 9,1$	7,3 $\pm 1,6$	18,5 $\pm 11,2$
Ad-AR	AP	50,8 $\pm 13,2$	17,0 $\pm 2,5$	99,4 $\pm 12,4$	22,6 $\pm 0,9$ b	37,5 $\pm 5,1$	107,0 $\pm 24,6$
	BP	50,9 $\pm 9,1$	20,7 $\pm 2,5$	78,0 $\pm 4,4$	37,7 $\pm 5,1$ a	24,2 $\pm 5,1$	87,6 $\pm 9,4$
AR-FD	AP	22,6 $\pm 0,9$ b	16,5 $\pm 2,2$		28,8 $\pm 8,7$	83,3 $\pm 22,4$	-72,9 $\pm 14,8$ a
	BP	37,7 $\pm 5,1$ a	21,8 $\pm 3,2$		13,8 $\pm 3,3$	31,2 $\pm 8,0$	14,5 $\pm 12,1$ b
FD-MC	AP	28,8 $\pm 8,7$	36,5 $\pm 3,3$		12,2 $\pm 2,2$	32,0 $\pm 18,5$	21,0 $\pm 15,4$
	BP	13,8 $\pm 3,3$	35,6 $\pm 5,8$		16,8 $\pm 3,5$	37,7 $\pm 10,7$	-5,1 $\pm 12,2$

En la figura 3.8. se presenta la evolución de las precipitaciones diarias para la campaña 2006/2007 y la MS de hoja producida para AP y BP en diferentes momentos del ciclo.

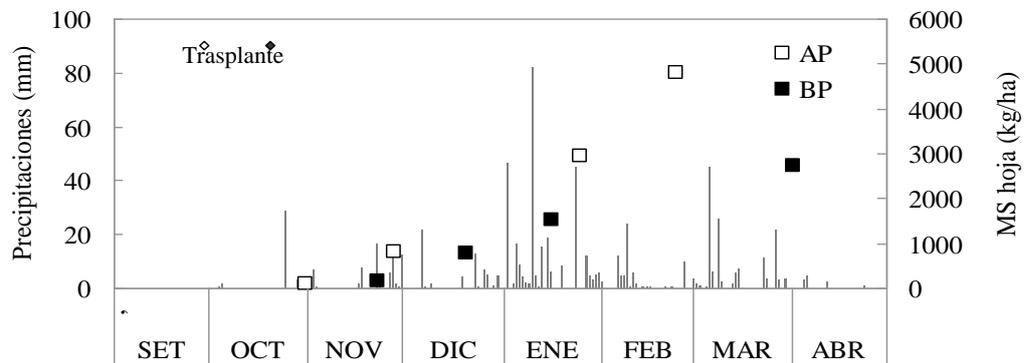


Figura 3.8. Evolución de las precipitaciones diarias a lo largo del ciclo de la campaña 2006/07 (en barras) y contenidos de MS en hoja para grupos de baja (BP) y alta (AP) en cuatro momentos del ciclo (adaptación, altura de rodilla, floración y maduración – cosecha).

El período donde se observan las mayores pérdidas de N corresponde a los meses de Nov y Dic, momento donde se iniciaron las primeras lluvias (Figura 3.8.). Considerando la diferencia entre los niveles de reposición necesarios para los diferentes momentos y las precipitaciones registradas (Figura 3.9.) se observa que las precipitaciones superaron a la lámina de reposición principalmente en el mes de enero.

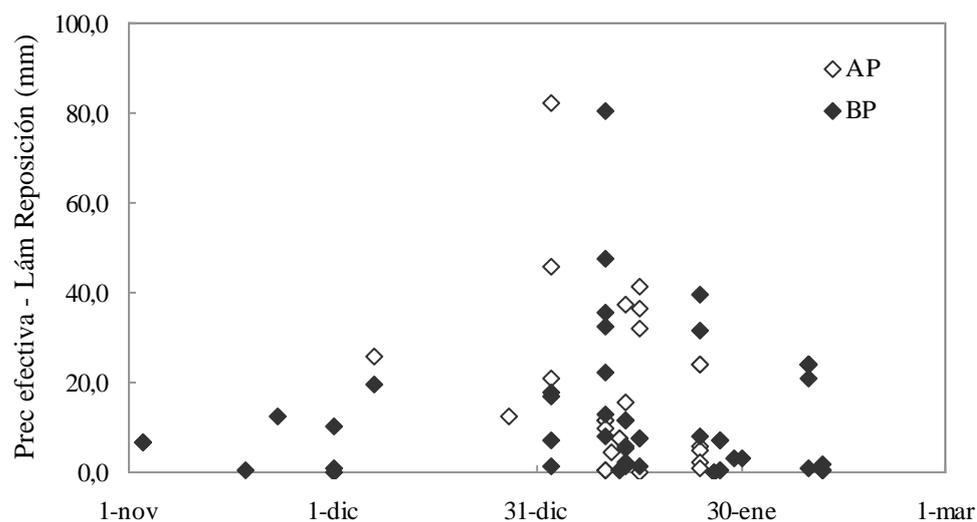


Figura 3.9. Diferencia entre la precipitación efectiva y la lámina de reposición del suelo (mm) para cada momento de lluvia en los diferentes lotes evaluados durante la campaña 2006/07.

Potasio

En la figura 3.10. se presenta el modelo de la dinámica del K para la localidad de Chicoana.

El K inicial del suelo ($K_{i_{\text{suelo}}}$) fue similar en ambos grupos para las dos campañas evaluadas, mientras que el aportado por la fertilización (K_{fert}) fue mayor para AP en la segunda campaña. No obstante ello, el K disponible (K_{disp}) no presentó diferencias significativas entre grupos y la planta absorbió solamente entre el 10-15% del K_{disp} en la primera campaña y entre el 3-7% en la segunda (Figura 3.10.).

En la primera campaña las eficiencias fisiológica y agronómica fueron similares entre grupos, mientras que en la segunda la eficiencia agronómica de AP fue superior (Figura 3.10.).

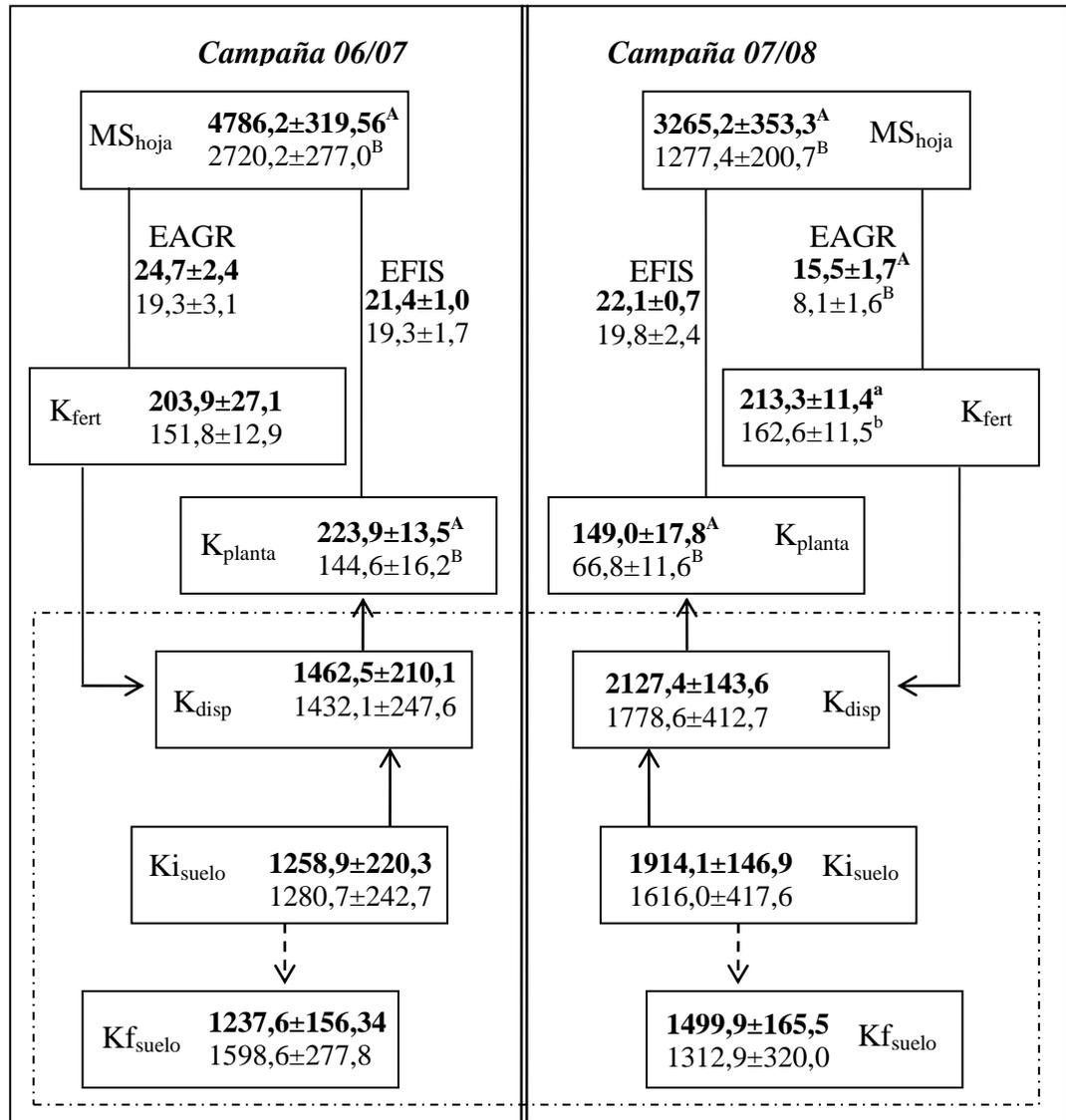


Figura 3.10. Modelo de la dinámica de K en el tabaco en Chicoana. Promedios (kg/ha) de materia seca en hoja (MS_{hoja}), eficiencias agronómica (EAGR) y fisiológica (EFIS), potasio del fertilizante (K_{fert}), absorbido en planta (K_{planta}), disponible (K_{disp}), inicial (K_{i_suelo}) y final (K_{f_suelo}) para grupos de baja (BP: normal) y alta (AP: negrita) producción en dos campañas diferentes. Letras diferentes representan diferencias estadísticamente significativas con $p < 0,05$; $p < 0,01$ (letras mayúsculas).

Al finalizar el ciclo de cultivo los contenidos de K en el suelo fueron similares entre grupos productivos. Estos niveles de K no se diferenciaron con los de K_{i_suelo} (Figura 3.10.).

En la figura 3.11. se presentan las relaciones entre el K aplicado por fertilización y el K absorbido (extraído) por la planta.

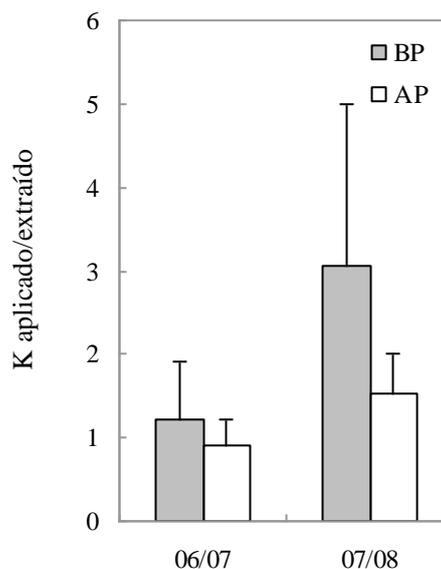


Figura 3.11. Promedio \pm error estándar de niveles de reposición de potasio en el cultivo de tabaco para grupos de alta (AP) y baja (BP) producción de materia seca (medias \pm error estándar).

A partir de la relación entre el K aplicado por fertilización y el absorbido por la planta puede observarse que el K del fertilizante superó al extraído para los dos grupos en la campaña 07/08, mientras que para el primer año de estudio solo se observó esto en el grupo BP. Para ninguno de los años evaluados se diferenció entre grupos la reposición de K (Figura 3.11.).

Fósforo

Las concentraciones de P extractable detectado por la técnica de Bray & Kurtz (B&K), medidas antes de trasplante y después de la cosecha en las diferentes profundidades del suelo, fueron similares para AP y BP con la excepción del estrato 20-40 cm de profundidad en la primera campaña a fin de ciclo, donde AP presentó mayores valores (Figura 3.12.).

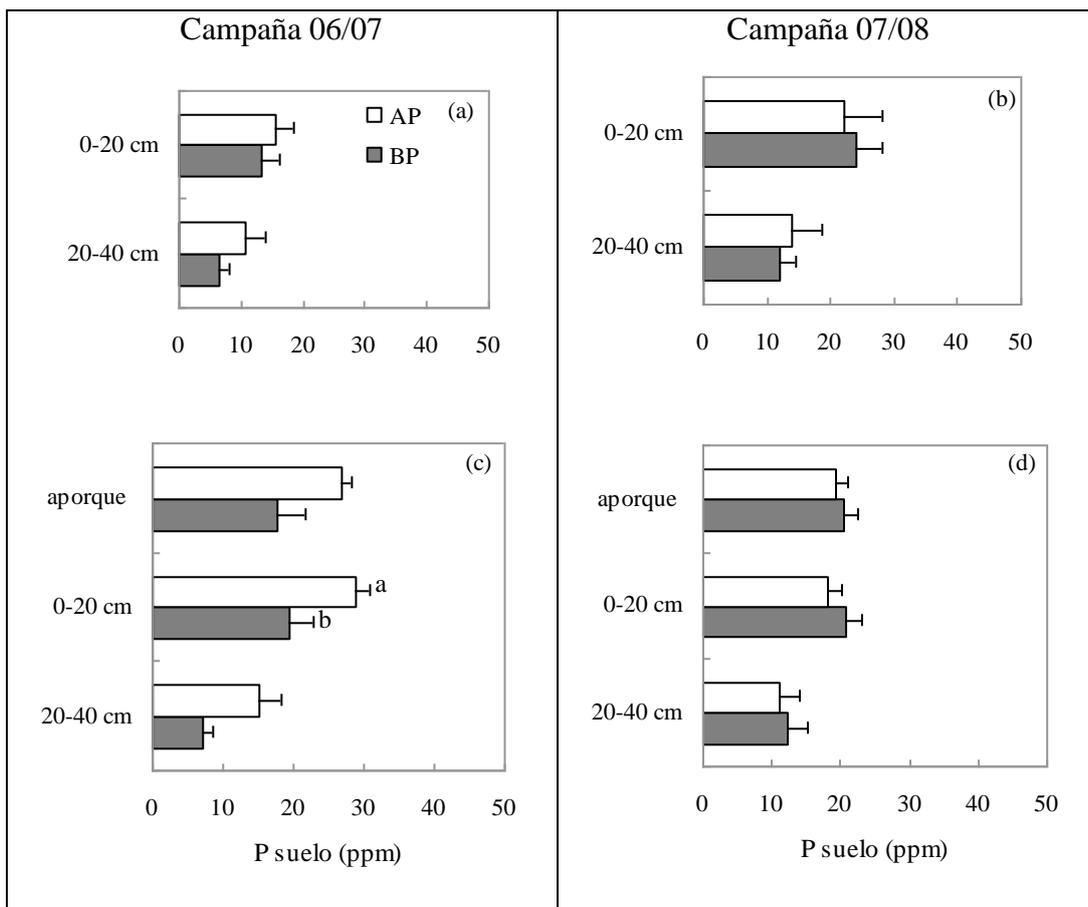


Figura 3.12. Distribución en profundidad del fósforo extractable en grupos de alta (AP) y baja (BP) producción de materia seca. (a, b) Fósforo inicial (c, d) Fósforo final (medias \pm error estándar). Letras diferentes representan diferencias estadísticamente significativas con $p < 0,05$.

La oferta de P, tanto la del P extractable del suelo ($P_{i\text{suelo}}$) como la dosis de P aportada por el fertilizante (P_{fert}) fue similar para ambos grupos en las dos campañas. De igual manera se resultaron los valores de P disponible ($P_{\text{disp}} = P_{i\text{suelo}} + P_{\text{fert}}$). La planta absorbió entre el 10 y 12% del P_{disp} la primera campaña, y de 4 a 9% la segunda (Figura 3.13.).

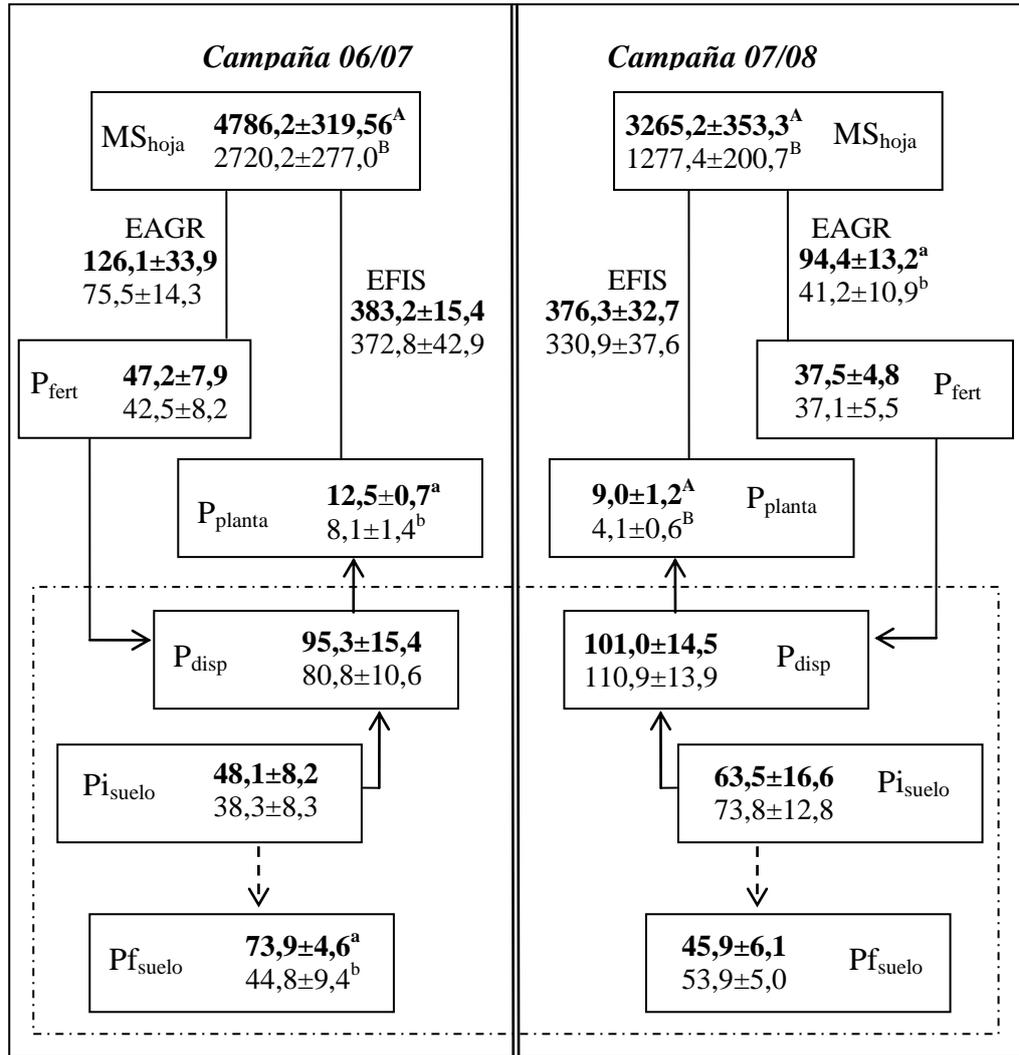


Figura 3.13. Modelo de la dinámica del P en el tabaco de Chicoana. Promedios (kg/ha) de materia seca en hoja (MS_{hoja}), eficiencias agronómica (EAGR) y fisiológica (EFIS), fósforo del fertilizante (P_{fert}), absorbido en planta (P_{planta}), disponible (P_{disp}), inicial ($P_{i_{suelo}}$) y final del suelo ($P_{f_{suelo}}$) para grupos de baja (BP: normal) y alta (AP: negrita) producción en dos campañas diferentes. Letras diferentes representan diferencias estadísticamente significativas con $p < 0,05$; $p < 0,01$ (letras mayúsculas).

La eficiencia fisiológica no presentó diferencias significativas entre grupos en los dos años evaluados, mientras que la eficiencia agronómica fue superior para AP en la segunda campaña (Figura 3.13.).

La extracción de P por parte de los cultivos fue restituida por el aporte de fertilizantes en ambos grupos para las dos campañas. La relación observada entre el P aplicado y extraído fue mayor a 1 en todos los casos, sin diferencias entre grupos (Figura 3.14.).

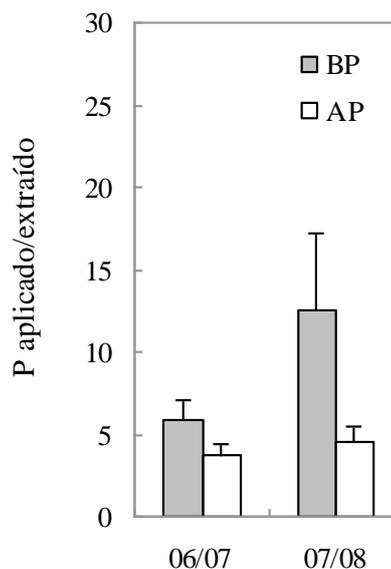


Figura 3.14. Niveles de reposición de fósforo en el cultivo de tabaco para grupos de alta (AP) y baja (BP) producción de materia seca (medias \pm error estándar).

3.5. Discusión

Los valores de MS en planta entera variaron entre 2439 y 7398 kg/ha, resultando similares a los informados en estudios realizados en la zona y en el exterior. Por ejemplo, en un ensayo en la EEA Salta fueron informados valores de MS en planta entera de 4895 kg/ha (Suarez 2006). Mientras que, dichos valores fueron duplicados (8300 kg/ha) cuando las condiciones de cultivo no presentaron limitaciones hídricas ni nutricionales (Ballari 2005).

Los rangos de absorción de N obtenidos en MC en esta tesis variaron entre 30 a 110 y 20 a 40 kg/ha en hoja y tallo respectivamente. Los límites superiores correspondientes al grupo AP de la primer campaña resultaron valores similares a los informados en la bibliografía: 109,0 kg/ha (Moustakas y Ntzanis 2005) y 101,2 kg/ha (Marchetti *et al.* 2006) para hoja y 32,2 kg/ha para tallo (Moustakas y Ntzanis 2005). En el caso de la raíz, los 46,0 kgN/ha absorbidos observados por Moustakas y Ntzanis (2005) superan ampliamente a los valores 4 y 12 kg/ha reportados en esta tesis. Los bajos contenidos de nitrógeno en la raíz están relacionados con la baja producción de materia seca de esta zona.

En cambio, los valores de concentración de N en hoja observados en esta tesis (2 a 2,3 %) resultaron similares a los informados en un ensayo en la EEA Salta, donde los contenidos de nitrógeno fueron del 2 y 3,1 % (Blanco *et al.* 1989). También coinciden con los reportados por Karaivazoglou *et al.* (2006) para tabaco Virginia (1,8 a 2,06 % aproximadamente). Cabe destacar que los porcentajes de N en hoja observados en esta tesis fueron superiores al valor 1,5 %

presentado por Chouteau y Fauconnier (1993) como límite para la aparición de síntomas de deficiencia.

La absorción de N en planta entera en MC cuantificada en esta tesis resultó inferior a 167,5 kg de N/ha, considerado como valor referente para la zona (Ballari 2005). Este consumo fue observado en el grupo AP en el primer año de evaluación. Similares resultados fueron reportados por otros autores en el exterior. En Grecia, la absorción de N medida a maduración fue de 182,4 kg/ha para la planta (Moustakas y Ntzanis 2005) siendo superior a la obtenida en esta tesis. Sin embargo, los niveles de N absorbido obtenidos para el grupo BP en el primer año y AP en el segundo presentaron valores similares al citado por Hawks y Collins (1986), quienes mencionaron que para producir 2240 kg/ha en condiciones medias, una planta debe absorber 78,5 kg/ha.

Los valores de K absorbido en planta fueron mayores en el grupo AP respecto de BP. Dichos valores resultaron inferiores a los 260 kg/ha reportados en lotes productivos de Sud África (Boshoff 2006), y a 225 kg/ha informados para un rendimiento medio en la zona (Ballari 2005). Sin embargo, la absorción en hoja observada en esta tesis, a excepción del grupo BP en la segunda campaña ($42,4 \pm 7,6$ kg de K por ha), fue 1,3 a 2,3 veces superior a los 76 kg/ha obtenidos en un experimento de campo realizado en Grecia. La absorción de K en tallo y raíz (20 a 40 y 2 a 8 kg/ha) fue menor que la obtenida en el mencionado ensayo (67 y 53 kg/ha para tallo y raíz respectivamente) (Moustakas y Ntzanis 2005).

Las concentraciones de K en hoja variaron entre 3 y 5 % para AP y BP en ambos años y resultaron superiores a las observadas en un ensayo en Grecia con tabaco Virginia (1,3 y 2,2 %) (Karaivazoglou *et. al.* 2005). Cabe destacar que las concentraciones consideradas como rangos adecuados para el cultivo de tabaco Virginia varían entre 2,5 y 3% (Ballari 2005).

En cuanto a los valores de P absorbido en planta en MC obtenidos en esta tesis resultaron menores a los informados en estudios realizados en la zona. Se considera que para un rendimiento medio de 145 gr de hoja curada por planta el consumo estimado es de 21,5 kg/ha de P considerando la biomasa total (incluido botón floral) (Ballari 2005). En esta tesis, se observó una tendencia similar a lo propuesto por Hawks y Collins (1986), quienes informaron un nivel de absorción de 13,5 kg/ha de P compatible con una producción de 2240 kg/ha.

Con respecto a la absorción de P en las diferentes partes de la planta, la literatura reporta valores de 5, 2,5 y 2,7 kg/ha para hoja, tallo y raíz respectivamente (Moustakas y Ntzanis 2005). La absorción de P en hoja, observada en esta tesis, fue superior a 5 kg/ha para los dos grupos en el primer año y para AP en el segundo año. El P absorbido en el tallo presentó la misma tendencia, mientras que el P absorbido por la raíz para los dos grupos fue menor que lo informado en la bibliografía (menor a 1 kg/ha).

Las concentraciones de P en hoja obtenidas en esta tesis variaron entre 0,12 y 0,36 % para los dos grupos en ambas campañas. Estos valores se encuentran dentro del rango de 0,17 a 0,38 % correspondientes a contenidos usuales de fósforo en hojas de tabaco (Chouteau y Fauconnier 1993). A pesar de que los valores mínimos observados en esta tesis no se ubican dentro del

mencionado rango, en la bibliografía se citan concentraciones de 0,08 a 0,16% (Karaivazoglou *et. at.* 2005).

En los dos años evaluados se diferenciaron dos grupos con niveles diferentes de producción de MS de hoja y planta, y diferentes niveles de absorción de los nutrientes N, K y P. En base a los datos de la primera campaña puede deducirse que la diferenciación entre grupos se manifestó en el período de rápido crecimiento (AR-FD) donde el grupo AP presentó mayor tasa de producción de MS y de absorción de N y K, principalmente en planta entera y hoja. Esta superioridad en la tasa de absorción podría asociarse a una mayor intercepción de la radiación por el grupo AP dada por la mayor MS de hoja en FD, posiblemente relacionada con un área foliar más elevada.

La mayor absorción de nutrientes pudo deberse al mayor desarrollo radicular que, aunque no presentó diferencias significativas entre grupos mostró valores en las medias absorbidas para AP que duplicaron a BP.

La partición de la MS de hoja medida en MC observada en esta tesis varió entre 55 y 65% de la planta entera, valores superiores a los citados en la bibliografía. En la partición del tallo se observó la misma tendencia, con un rango de variación entre 25 y 40 %, mientras que la proporción de raíz observada en esta tesis fue muy inferior a la informada por otros autores resultando menor al 10 %. En un estudio realizado en la misma zona se informó el 50 % de partición destinado a la hoja en correspondencia con una producción de MS de hoja de 4500 kg/ha (Ortega 2007). Asimismo, la biomasa se repartió en 47 % en hoja, 27 % en tallo y 26 % en raíces para una producción promedio de MS de 4424 kg/ha en fincas comerciales de Sud África (Boshoff 2006). Una partición similar (42 % hoja, 33 % tallo y 28,5 % raíz) se observó en un experimento a campo en Grecia Occidental (Moustakas y Ntzanis 2005).

El escaso desarrollo radical observado (aproximadamente del 8%) en esta tesis puede atribuirse a impedancias del suelo asociadas al intenso laboreo requerido para la realización del tabaco en sistema de monocultivo. Dicho deterioro de la condición física del suelo se evidenció para suelos de la zona en un estudio desarrollado en la EEA Salta. Utilizando dos indicadores de calidad de suelos, se comparó un lote de tabaco representativo del manejo realizado en el Valle de Lerma, con el suelo de una cortina de monte tomada como referencia. Se detectó un 90 % de caída en la estabilidad de agregados del suelo de 1 a 2 mm y un 60 % de caída de los contenidos de materia orgánica del primero con respecto al segundo (Giménez Monge *et al.* 2010).

A pesar de que ambos grupos se diferenciaron en los niveles de absorción de nutrientes y producción de MS, las EFIS de los diferentes nutrientes (N, K, P) fueron similares para AP y BP en ambas campañas.

Las eficiencias fisiológicas obtenidas para N superaron el valor de 19,5 correspondiente a la eficiencia calculada a partir de los datos informados por Moustakas y Ntzanis (2005) con valores de N absorbido superiores a los observados en esta tesis. Mientras que las eficiencias fisiológicas obtenidas para K y P son similares a las calculadas a partir de los datos de Moustakas y Ntzanis (2005) (19,2 kg MS por kg de Kabs y 356 kg de MS por kg de Pabs).

La oferta de N del suelo fue similar para ambos grupos productivos. De acuerdo a la disponibilidad de N_{total} los suelos estudiados pueden clasificarse como regulares a buenos ($0,11 \pm 0,02$ y $0,14 \pm 0,02$ % para AP y BP en la primera campaña y $0,12 \pm 0,02$ y $0,11 \pm 0,02$ % en la segunda) (Ballari 2005). Estos niveles fueron inferiores a 0,20 % de nitrógeno total, valor compatible con la producción de un tabaco Virginia de buena calidad de acuerdo a lo reportado por Fernández de Ulivarri (1990). La concentración de nitratos puede ser considerada baja por resultar inferior a 30 ppm (Ballari 2005) ($11,2 \pm 12,8$ y $27,4 \pm 22,1$ ppm para AP y BP en la campaña 06/07 y $21,3 \pm 11,1$ y $22,2 \pm 7,7$ ppm en la campaña 07/08).

Las dosis de fertilizante aplicadas fueron superiores a 30-40 kg/ha sugeridas por un criterio de fertilización de la zona que estima el requerimiento en función de los niveles de materia orgánica o del N total (Figuroa 1984). De hecho, las dosis aplicadas en los lotes estudiados en esta tesis se ubicaron entre 60 y 96 kg/ha, rangos similares a los propuestos por Ballari (2005) y Hawks y Collins (1986) quienes consideraron que la dosis básica de nitrógeno puede variar de 56 kg/ha hasta 85 a 90 kg/ha dependiendo del suelo.

En ambas campañas, el N disponible fue superior al N absorbido, dejando como resultado un excedente en el balance que podría atribuirse a una potencial lixiviación durante el ciclo. A pesar de la diferencia entre grupos observada en el N absorbido, no se detectaron diferencias en el N lixiviado aparente.

Las relaciones de N absorbido entre la hoja y tallo con respecto a la raíz observadas en esta tesis fueron superiores a las calculadas a partir de los datos de Moustakas y Ntzanis (2005), evidenciando el escaso desarrollo radical que mostraron las plantas de ambos grupos.

En síntesis, los niveles de N total y NO_3^- muestran que es necesario fertilizar con N los suelos de Chicoana estudiados en esta tesis. Los niveles de N absorbido en hoja y planta presentaron diferencias significativas entre grupos AP y BP, aunque la oferta de N resultó similar entre ellos. La cantidad de N absorbido siguió la misma tendencia que la MS. En cada una de las partes de la planta el N absorbido fue bajo, siendo los menores valores aquellos correspondientes a la raíz. Sin embargo, la concentración del N en hoja se ubicó dentro de los límites aceptables para evitar síntomas de deficiencias.

Siguiendo la misma tendencia observada para el N del suelo los niveles de K en el suelo al inicio del cultivo no se diferenciaron en ambos niveles de producción y campañas. Dichos niveles permitieron clasificar a la disponibilidad de K inicial como muy buena a alta (Ballari 2005). En base a estos valores, las dosis de fertilizante a aplicar debieron variar de 50 kg/ha (Figuroa 1984) a 125 y 165 kg/ha dependiendo de la producción esperada (Ballari 2005). Tomando como referencia ambos criterios de recomendación, se considera que las dosis aplicadas por los productores de Chicoana fueron superiores a las estimadas. Sin embargo, los contenidos de K en el suelo al inicio y al final de campaña fueron similares para los dos años de estudio ($p > 0,05$) sugiriendo la existencia de excedentes de K en el balance. Cabe aclarar que las dosis de K aplicadas en el cultivo pueden exceder dos o tres veces los requerimientos para un máximo rendimiento antes de la aparición de efectos adversos (Fernández de Ulivarri 1990). Sin embargo, debe tenerse en cuenta que los suelos pueden acumular K tras haber sido fertilizados

con altas dosis durante varios años, suprimiendo así la posterior respuesta a la fertilización, como fuera informado por Jauregui (1973).

En conclusión, acorde a los niveles de K del suelo las dosis utilizadas fueron superiores a las estimadas. El K disponible para el cultivo fue superior al K absorbido por la planta, aunque no se detectaron diferencias entre el K inicial y el final del suelo sugiriendo la ocurrencia de una pérdida aparente de K durante el ciclo del tabaco.

La disponibilidad de P en suelo puede clasificarse como regular a muy buena de acuerdo a los niveles iniciales de P (B&K) en suelo medidos en esta tesis (15,5±7,1 y 13,4±7,1 ppm para lotes AP y BP en el primer año y 22,1±15,7 y 24,2±9,5 ppm para el segundo). Estos valores se corresponden con dosis de 16 a 29 kg/ha de P calculadas en base a dos criterios de fertilización (Figuroa 1984 y Ballari 2005). Estas dosis resultan inferiores a las aplicadas en los lotes productivos evaluados en ambas campañas. En zonas donde se viene cultivando tabaco por períodos prolongados se ha producido una acumulación de este elemento debido a los aportes repetidos de cantidades de fósforo mayores que los que absorben las plantas. Consecuentemente, los suelos que se han empleado con frecuencia para cultivar tabaco son ricos o muy ricos en fósforo (McCants y Wolt 1967; Hawks y Collins 1986). Sin embargo, los niveles de P en suelo observados en esta tesis no se vieron incrementados como consecuencia de la fertilización.

En síntesis, las tendencias en los datos observadas para P y K resultaron similares ya que la absorción en planta fue inferior a la observada en otros estudios, mientras que la de la hoja los superó. La concentración observada en hoja estuvo dentro de los contenidos usuales de una hoja de tabaco. La disponibilidad de este nutriente fue similar para ambos grupos productivos, sin embargo se observaron diferencias en la absorción del mismo. Cabe destacar que el tabaco absorbió menos de la mitad del P aplicado como fertilizante, resultando así la dosis aplicada muy superior a la recomendada. No se observaron diferencias en los niveles iniciales y finales de P en el ciclo de cultivo a pesar de que los niveles de P aportados por fertilización fueron superiores a los niveles de P absorbidos por la planta.

3.6. Conclusiones del capítulo

Hipótesis A. 1: Respecto del N, se acepta la hipótesis planteada. Independientemente del grupo productivo el contenido de N absorbido por el tabaco representó aproximadamente la mitad del N disponible en el suelo ($N_{\text{suelo}} + N_{\text{fert}}$). En ambos grupos se detectaron excedentes de este nutriente durante el ciclo de cultivo por lo que la eficiencia de la fertilización se vio afectada negativamente.

Hipótesis A.2: La hipótesis planteada para el K se rechaza debido a que no se observaron excedentes en el suelo provenientes de la fertilización, ya que los niveles de nutrientes no se diferenciaron entre el inicio y final de campaña. No obstante las dosis aplicadas resultaron superiores a las calculadas por modelo por lo que podrían haberse producido pérdidas por lixiviación no medidas en esta tesis.

Hipótesis A.3: La dosis aplicada de P resultó muy superior a la dosis óptima calculada por modelo en función del nivel inicial de P del suelo, que puede considerarse como regular a óptimos. El contenido de P disponible en el suelo ($P_{\text{suelo}} + P_{\text{fertilizante}}$) fue superior al nivel de P absorbido por el cultivo. Esta situación pudo deberse a la baja proporción de raíces observadas (menos del 10%) que limitaron la absorción de P, por lo tanto se acepta la hipótesis planteada.

La disponibilidad de nutrientes, N, K o P, no es el factor que está diferenciando la producción de MS entre los dos grupos observados. La absorción de nutrientes es dependiente de la disponibilidad hídrica que será estudiada en el capítulo 5.

CAPITULO 4

DINAMICA DEL AGUA EN LOTES DE TABACO EN CHICOANA

4.1. Introducción

El tabaco es considerado tolerante a la sequía y sensible al exceso de agua. Es por ello, que el agua debe ser aplicada en el momento oportuno y en la cantidad apropiada para una respuesta óptima del cultivo y máximo beneficio económico para el productor (Salehzade *et al.* 2009).

Desde el punto de vista biológico, sin considerar la etapa de almácigo, los períodos más críticos del tabaco respecto al requerimiento hídrico son: *trasplante*, *rápido crecimiento* (desde que la planta se encuentra en altura de rodillas hasta floración) y *comienzos de cosecha* (siguiente a la anterior) (Yáñez 1984). El crecimiento de la planta es lento durante las primeras semanas y la reserva de agua disponible durante los primeros 45 días debe ser suficiente (Çakir y Çebi 2006). Un déficit hídrico desde los 14 a 30 DDT estimula el desarrollo radical, asegurando tolerancia a subsecuentes períodos secos (Maw *et al.* 1997). Experiencias llevadas a cabo en el Valle de Lerma confirman la baja sensibilidad del tabaco a déficits moderados en la etapa intermedia que va desde el trasplante hasta la fase de más activo crecimiento. Es por ello que si se mantiene el agua del suelo entre los puntos de capacidad de campo y marchitez permanente puede garantizarse un suministro de agua con una sucesión de riegos frecuentes con baja lámina, hasta riegos muy infrecuentes, pero abundantes. Esto permite ajustar el programa de riegos con las restricciones que marcan los turnados o la atención de otros cultivos (Yáñez 1984). En los períodos de rápido crecimiento, la cantidad de agua disponible a través de las lluvias o riego, afecta permanentemente el desarrollo de la planta tanto en rendimiento como en la calidad de la hoja (Maw *et al.* 1997).

En el noroeste argentino, el régimen hídrico es monzónico, por lo tanto en la primera etapa del ciclo del tabaco el riego es indispensable (riego total). En la segunda etapa, se riega complementando con las lluvias de la temporada y en la tercera satisface sus requerimientos hídricos a secano (Yáñez 1984). Es por ello que el riego del cultivo es complementario, convirtiéndose en un factor crítico que influye en el rendimiento y calidad del cultivo.

Estudios realizados en el Valle de Lerma indican que entre los problemas vinculados con los recursos productivos, la disponibilidad de agua de riego es uno de los principales. Dicha disponibilidad puede ser restringida por factores como la existencia de tomas precarias, canales sin revestir, turnos largos, bajos caudales en la época de estiaje que son comunes en la zona. Este panorama afectaría la dinámica del agua y, consecuentemente la productividad de los lotes de Chicoana de un modo aún no conocido.

4.2. Objetivos e hipótesis

Objetivo

Estimar la oferta de agua del suelo y compararla con la demanda hídrica del tabaco en lotes de pequeños productores.

Hipótesis

Existe una importante desincronización entre la disponibilidad de agua y el requerimiento del cultivo que impide satisfacer la demanda hídrica del tabaco compatible con el objetivo de rendimiento.

4.3. Materiales y métodos

Las características climáticas y edáficas del sitio experimental fueron desarrolladas en el capítulo 2.

4.3.1. Muestreo, determinaciones y estimaciones

Muestreo

Se tomaron muestras compuestas de suelo cada 15 días, antes y después de cada riego a diferentes profundidades (0-20, 20-40cm y aporque) dependiendo del momento de cultivo durante la campaña 2006/07.

Determinaciones

a) Densidad aparente:

Se aplicó el *método de la excavación* (Gil *et al.* 2006) a causa de la presencia de fragmentos gruesos. Se utilizó este método por ser más preciso que el método del cilindro debido al mayor volumen de la muestra utilizado. El procedimiento aplicado se describe en el Anexo de esta tesis.

b) Contenido gravimétrico de humedad en el suelo:

Es la relación de la masa de agua (Ma) con respecto a la masa de suelo (Ms), se expresa como fracción o porcentaje (Lal y Shukla 2004).

$$\theta_m = \frac{Ma}{Ms} = \frac{Ma}{Mo + Min} \quad [1]$$

Donde:

θ_m : contenido de agua en masa

Mo: masa de componentes orgánicos

Min: masa de componentes inorgánicos

Estimaciones*a) Disponibilidad de agua en el suelo*

- Agua disponible total
- Agua fácilmente aprovechable

b) Demanda evapotranspiratoria

- Evapotranspiración del cultivo de referencia
- Evapotranspiración en condiciones estándar
- Evapotranspiración ajustada a condiciones de estrés hídrico

*c) Relación productividad/estrés hídrico**a) Disponibilidad de agua en el suelo*

- Agua disponible total: se refiere a la capacidad de un suelo de retener el agua disponible para las plantas. Es la diferencia entre los contenidos de humedad a capacidad de campo y punto de marchitez permanente:

$$ADT = (\theta m_{cc} - \theta m_{pmp}) \times \frac{\rho_{ff}}{\rho_a} \times e \times \frac{\rho_{ff}}{\rho_g} \quad [2]$$

Donde:

ADT: agua disponible total

θm : contenido de agua en peso en capacidad de campo (cc) y en punto de marchitez permanente (pmp) (g/g suelo)

ρ_{ff} : densidad de la fracción fina (sin piedras) (g/cm³)

ρ_a : densidad del agua (g/cm³)

e : profundidad radical (mm), se consideró que la misma alcanza su máximo valor en floración (Ballari 2005), a una profundidad de 40cm.

ρ_g : densidad global (con piedras) (g/cm³)

Los contenidos hídricos de CC y PMP utilizados fueron los propuestos por Israelsen y Hansen (1965) en Chambouleyron (2005) para diferentes texturas (Tabla 4.1.). Cuando los contenidos hídricos registrados resultaron inferiores al valor promedio de marchitez permanente se utilizó el límite inferior del rango teórico para ambas texturas. De forma similar se procedió con los valores de CC.

Tabla 4.1. Contenidos hídricos en masa (Israelsen y Hansen (1965) en Cambouleyron (2005)) y volumétricos (Allen *et al.* 2006) para diferentes tipos de suelo.

Textura del suelo	Contenido volumétrico		Contenido en masa	
	CC (%)	PMP(%)	CC (%)	PMP(%)
Arenoso	9 (6-12)	4 (2-6)	12 (7-17)	4,5 (2-7)
Arenoso Franco			15 (11-19)	6.5 (3-10)
Franco Arenoso	14 (10-18)	6 (4-8)	23 (18-28)	11 (6-16)
Franco	22 (18-26)	10 (8-12)	25 (20-30)	12 (7-17)
Franco Limoso			29 (22-36)	15 (9-21)
Limoso			32 (28-36)	17 (12-22)
Franco arcilloso	27 (23-31)	13 (11-15)		
Franco Arcillo Limoso			33.5 (30-37)	20.5 (17-24)
Arcillo Limoso			36 (30-42)	23 (17-29)
Arcillo arenoso	31 (27-35)	15 (13-17)		
Arcilloso	35 (31-39)	17 (15-19)	36 (32-40)	22 (20-24)

- Agua fácilmente aprovechable: es la fracción de ADT que un cultivo puede extraer de la zona radical sin experimentar estrés hídrico. Se basa en que a pesar de que en teoría existe agua disponible hasta alcanzar el punto de marchitez permanente, la cantidad de agua extraída por el cultivo se reducirá significativamente antes de alcanzar el mencionado punto.

$$AFA = ADT \times p \quad [3]$$

Donde:

AFA: agua fácilmente aprovechable de la zona radical del suelo (mm)

p: fracción promedio del total de agua disponible en el suelo (ADT) que puede ser agotada de la zona radical antes de presentarse estrés hídrico (reducción de la ET) (0-1).

El valor de p está en función del poder evaporante de la atmósfera. Generalmente se utiliza un valor constante de p para cada período específico de desarrollo, en lugar de variar su valor para cada día. Una aproximación numérica para ajustar el valor de p de acuerdo a la tasa de ETc es:

$$p = p_{se} + 0,04 \times (5 - ETc) \quad [4]$$

Donde:

p_{se} : fracción de agotamiento de la humedad en el suelo para condiciones sin estrés hídrico para una ET de 5mm/d. Se consideró para el cultivo de tabaco un valor de 0,6 (Doorenbos y Kassam 1979).

b) Demanda evapotranspiratoria

La evapotranspiración del cultivo en condiciones estándar y ajustada se estimó a partir de la evapotranspiración del cultivo de referencia.

- Evapotranspiración del cultivo de referencia: se utilizó la ecuación de Penman-Montheith a partir de los datos registrados por la estación agrometeorológica del INTA Cerrillos.

$$ET_o = \frac{0,408\Delta(Rn - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad [5]$$

Donde

ET_o: evapotranspiración de referencia (mm/d)

R_n: radiación neta en la superficie del cultivo (MJ/m² d)

G: flujo del calor de suelo (MJ/m² d)

T: temperatura media del aire a 2m de altura (°C)

$e_s - e_a$: déficit de presión de vapor del aire (kPa)

e_s : presión de vapor a saturación para un período determinado (kPa)

e_a : presión real de vapor (kPa)

u_2 : velocidad del viento a 2 m sobre la superficie del suelo (m/s)

Δ : pendiente de la curva de presión de vapor (kPa/°C)

γ : constante psicométrica

- Evapotranspiración del cultivo en condiciones estándar: se calculó multiplicando la ET_o por un coeficiente único del cultivo (K_c).

$$ETc = ET_o \times Kc \quad [6]$$

Donde:

ET_c: evapotranspiración del cultivo en condiciones estándar

K_c: coeficiente único de cultivo. Expresa la diferencia entre la evapotranspiración de la superficie cultivada y la superficie del pasto de referencia.

Se utilizó el valor K_c para tabaco propuesto por Yáñez (2002). El mismo se obtuvo a partir de un ensayo con tres niveles de humedad de suelo y dos de fertilización nitrogenada. Dicho ensayo se condujo en la EEA Salta a lo largo de 3 campañas (1979/82). La obtención de K_c se realizó en base a la fórmula Blaney-Criddle y también a partir de la elaboración de datos del evaporímetro tipo A y de

radiación (Blanco *et al.* 1989). Los valores de Kc para tabaco se detallan en la tabla 4.2.

Tabla 4.2. Duración (días) y valores de coeficiente único de cultivo para el tabaco tipo Virginia (Yáñez 2002).

Períodos de crecimiento del tabaco				
	Inicial	Desarrollo	Media (Altura de rodilla)	Final
				
Duración (días)	10	35	60	45
Kc	0,47	→	0,84	0,45

Considerando que la longitud del ciclo de cultivo varió entre los diferentes lotes, se tomó el criterio de ponderar la longitud del período de máximo consumo cuando este fuera diferente a la longitud propuesta por Yáñez (2002). Esta ponderación se realizó utilizando la siguiente expresión:

$$T_{máx_L} = \frac{T_{máx_Y}}{T_{total_Y}} \times T_{total_L} \quad [7]$$

Donde:

- T_{máx_L} : período de máximo consumo observado en el lote (días)
- T_{máx_Y} : período de máximo consumo propuesto por Yáñez (2002) (días)
- T_{total_Y} : duración total del ciclo propuesto por Yáñez (2002) (días)
- T_{total_L} : duración total del ciclo observado en el lote (días)

- Evapotranspiración ajustada a condiciones de estrés hídrico: se calculó multiplicando ET_c por el coeficiente de estrés hídrico, K_s (Allen *et al.* 2006):

$$ET_{c_{aj}} = K_s \times ET_c \quad [8]$$

Donde:

$ET_{c_{aj}}$: evapotranspiración de cultivo ajustada bajo condiciones de estrés hídrico

K_s : factor dimensional de reducción de la transpiración que depende de la cantidad de agua disponible en el suelo (0-1). Se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$K_s = \frac{ADT - D_r}{(1 - p) \times ADT} \quad [9]$$

Donde:

D_r : agotamiento de humedad en la zona radical (mm), es decir la cantidad de agua faltante con respecto a la capacidad de campo.

ADT: agua disponible total en la zona radical del suelo (mm)

p : fracción de ADT que un cultivo puede extraer de la zona radical sin sufrir estrés hídrico (-)

Cuando se produce la extracción del agua a través de la evapotranspiración, aumentará el agotamiento de humedad y se iniciará la situación de estrés al igualarse D_r con AFA. Después de que el agotamiento en la zona radical exceda a AFA, será lo suficientemente alto como para limitar la evapotranspiración a valores menores que su potencial, por lo que la evapotranspiración del cultivo comenzará a disminuir en proporción a la cantidad de agua remanente en la zona radical. Si el agotamiento de la zona radical es menor que AFA (agua fácilmente aprovechable), $K_s=1$.

Las estimaciones realizadas se basaron en las propuestas en el manual de la FAO N°56 (Allen *et al.* 2006).

c) Relación productividad / estrés hídrico

Se trabajó con una función lineal sencilla para predecir la reducción de la productividad del cultivo cuando el estrés hídrico es inducido por la falta del agua del suelo (Doorembos y Kassam 1979, Allen *et al.* 2006):

$$\left(1 - \frac{Y_a}{Y_m}\right) = K_y \left(1 - \frac{ET_{c_{aj}}}{ET_c}\right) \quad [10]$$

Donde:

K_y : factor de respuesta de la productividad (-)

$ET_{c_{aj}}$: evapotranspiración ajustada (real) del cultivo (mm/d)

ET_c : evapotranspiración del cultivo en condiciones estándar (sin estrés hídrico) (mm/d)

Y_a : rendimiento real cosechado

Y_m : rendimiento máximo cosechado

El factor K_y describe la reducción relativa de la productividad en función a la reducción de la ET_c generada por falta de agua. Los valores de K_y para las diferentes etapas de detallan en la tabla 4.3.

Tabla 4.3. Factor del efecto sobre el rendimiento para el cultivo de tabaco en diferentes momentos del ciclo (Doorembos y Kassam 1979)

Etapa	K_y
0 DDT – Ad	0,2
Ad – AR	
AR – FD	1
FD – MC	0,5
Ciclo completo	0,9

4.3.2. Análisis estadístico

Se realizaron pruebas T de Student para detectar diferencias entre grupos de producción de materia seca (AP y BP) en las variables estudiadas.

4.4. Resultados

4.4.1. Variación de las precipitaciones durante el ciclo del tabaco

En la campaña 2006/07 los meses de enero y marzo presentaron precipitaciones superiores a la media mensual para una serie de años (1969-2008), mientras que, en diciembre y febrero fueron menores. En la segunda campaña evaluada en octubre y noviembre se observaron precipitaciones inferiores a la media mensual para una serie de años, siendo superada la misma en enero y febrero (Figura 4.1).

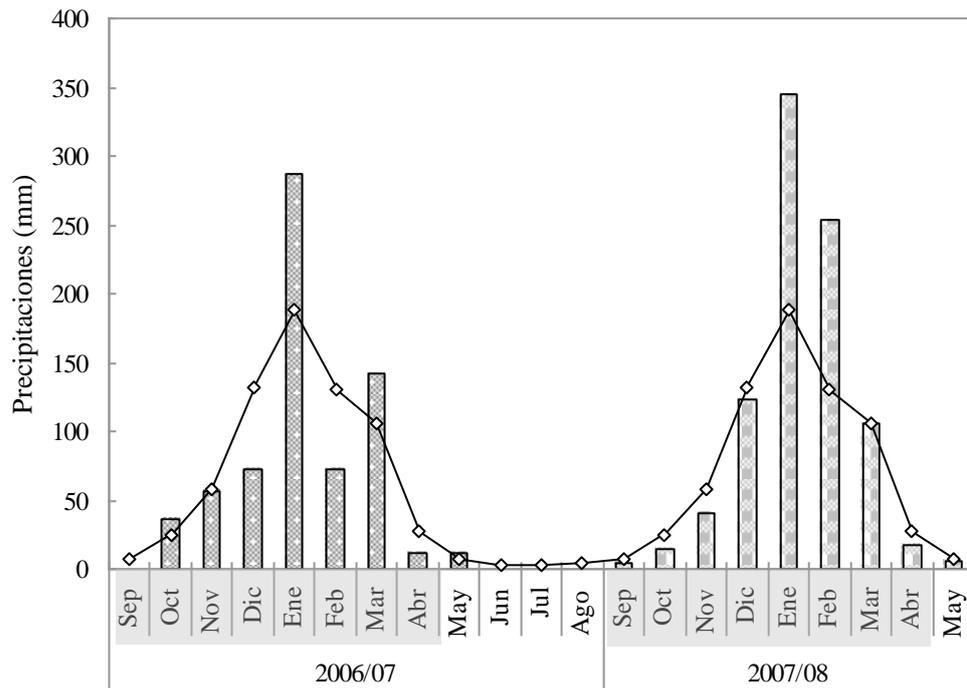


Figura 4.1. Precipitaciones correspondientes a las campañas 2006/07 y 2007/08 registradas en la estación meteorológica de la EEA Salta, ubicada en la localidad de Cerrillos (pag web¹). Las barras representan las precipitaciones registradas para cada campaña y la línea las precipitaciones medias correspondientes al período 1969-2008. Los meses sombreados indican la longitud de las campañas.

Considerando las precipitaciones en los momentos del ciclo donde el riego es total o complementario, desde septiembre a diciembre, los años evaluados presentaron 20mm de diferencia entre ellos y para ambos las precipitaciones totales de ese período fueron menores a la media (campaña 06/07: 164mm; campaña 07/08: 184mm y media para la serie de años: 222mm).

4.4.2. Dinámica del agua en el perfil durante el ciclo del tabaco

La tendencia general indicó que a medida que fue avanzando el ciclo del cultivo (campaña 2006/07), los contenidos hídricos del suelo aumentaron llegando a sus valores máximos entre los meses de diciembre y enero, en coincidencia con las precipitaciones registradas para la zona (Figuras 4.2. y 4.3).

¹ http://www.inta.gov.ar/prorenea/info/resultados/meteorologia/cerrillos_decadas/69_2008.htm

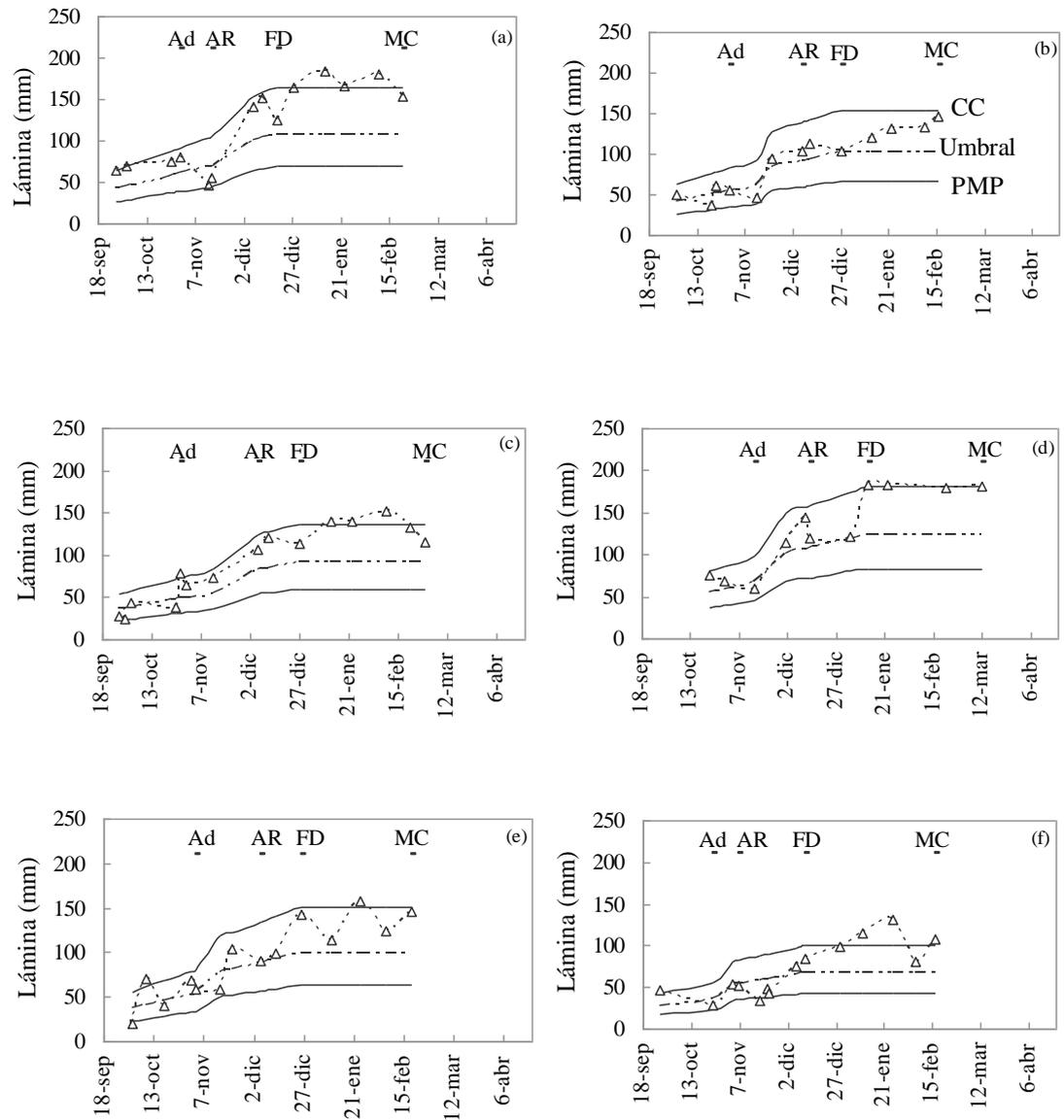


Figura 4.2. Contenidos hídricos en mm de lámina para lotes (a, b, c, d, e, f) de alta producción (AP) a lo largo del ciclo de cultivo (Ad: Adaptación, AR: altura de rodilla, FD: floración-desflore, MD: maduración-cosecha) (campaña 06/07). Las líneas llenas representan las láminas correspondientes a los puntos de capacidad de campo y marchitez permanente, la línea con punto y raya el umbral hídrico al 60%

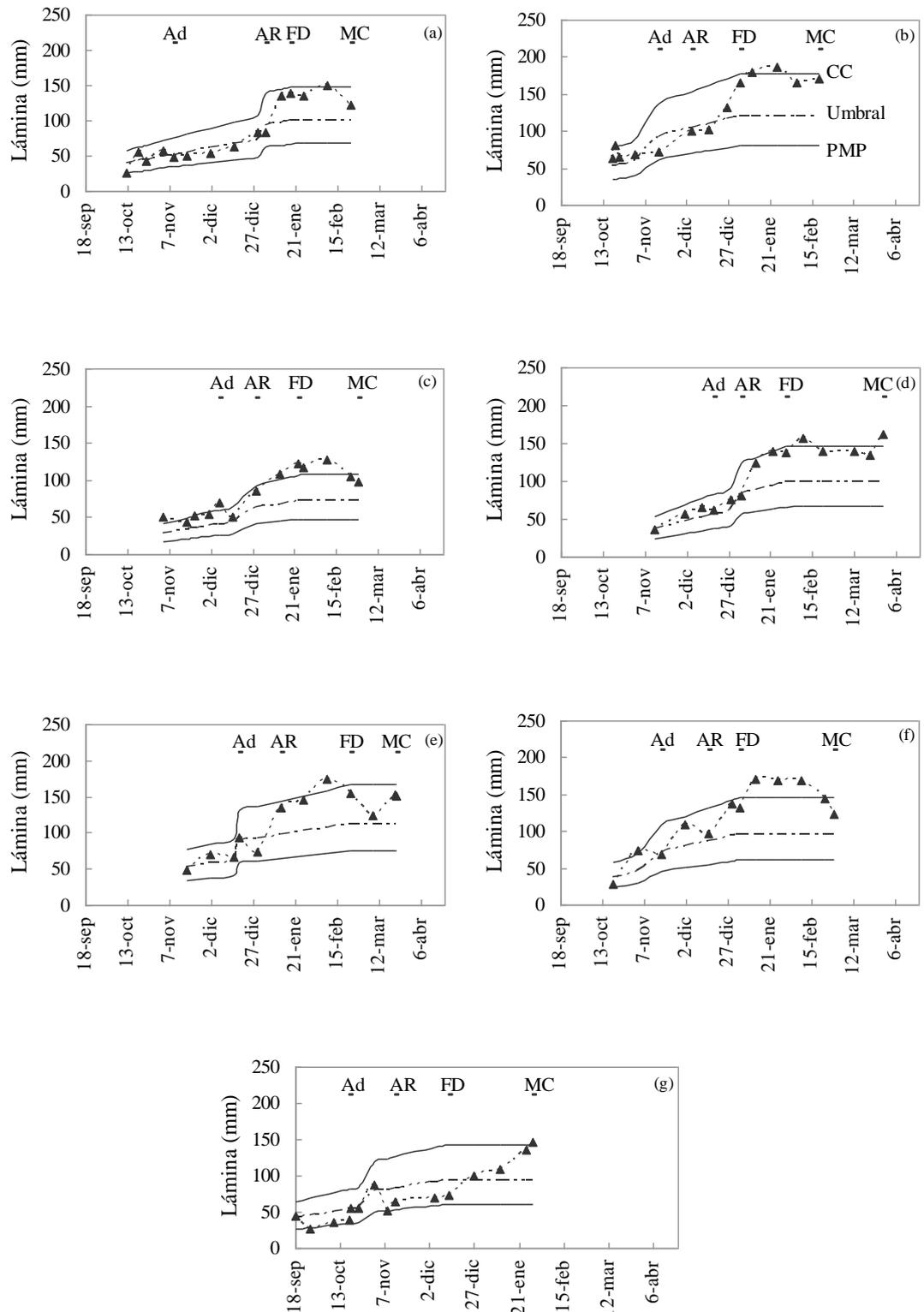


Figura 4.3. Contenidos hídricos en mm de lámina para lotes (a, b, c, d, e, f, g) de baja producción (BP) a lo largo del ciclo de cultivo (Ad: Adaptación, AR: altura de rodilla, FD: floración-desflore, MD: maduración-cosecha) (campana 06/07). Las líneas llenas representan las láminas correspondientes a los puntos de capacidad de campo y marchitez permanente, la línea con punto y raya el umbral hídrico al 60%.

Las láminas evaluadas en suelo se comportaron de manera similar en todos los lotes para las distintas etapas independientemente del grupo productivo. Durante el período de adaptación las láminas observadas se ubicaron entre el umbral y el PMP, con algún punto en CC. Mientras que en la siguiente etapa (Ad-AR) coincidieron en general con los valores de la línea del umbral. A partir de ese punto, la humedad de suelo fue incrementando y se mantuvo cercana a la CC hasta la finalización de la cosecha.

4.4.3. Demanda evapotranspiratoria

La evapotranspiración ajustada ($ET_{c_{aj}}$) se vio disminuida en relación a la evapotranspiración del cultivo en condiciones estándar por los bajos contenidos hídricos del suelo al momento de muestreo. Durante los períodos trasplante - adaptación (T-Ad) y adaptación - altura de rodilla (Ad-AR) la evapotranspiración ajustada fue menor en un 45 a 55% que la del cultivo bajo condiciones estándar para los dos grupos de productores evaluados. Esta disminución resultó diferente para el período AR-FD, en el cual la evapotranspiración ajustada disminuyó en un 47% para AP y 30% para BP respecto del cultivo en condiciones estándar. Durante el último período del ciclo de cultivo se presentó la menor diferencia entre la evapotranspiración ajustada y la potencial, siendo del 10% para los dos grupos estudiados.

La evapotranspiración entre grupos se diferenció en el último período del ciclo, el grupo AP presentó los mayores niveles tanto para las condiciones estándar como para la ajustada ($p < 0,01$) (Figura 4.4.).

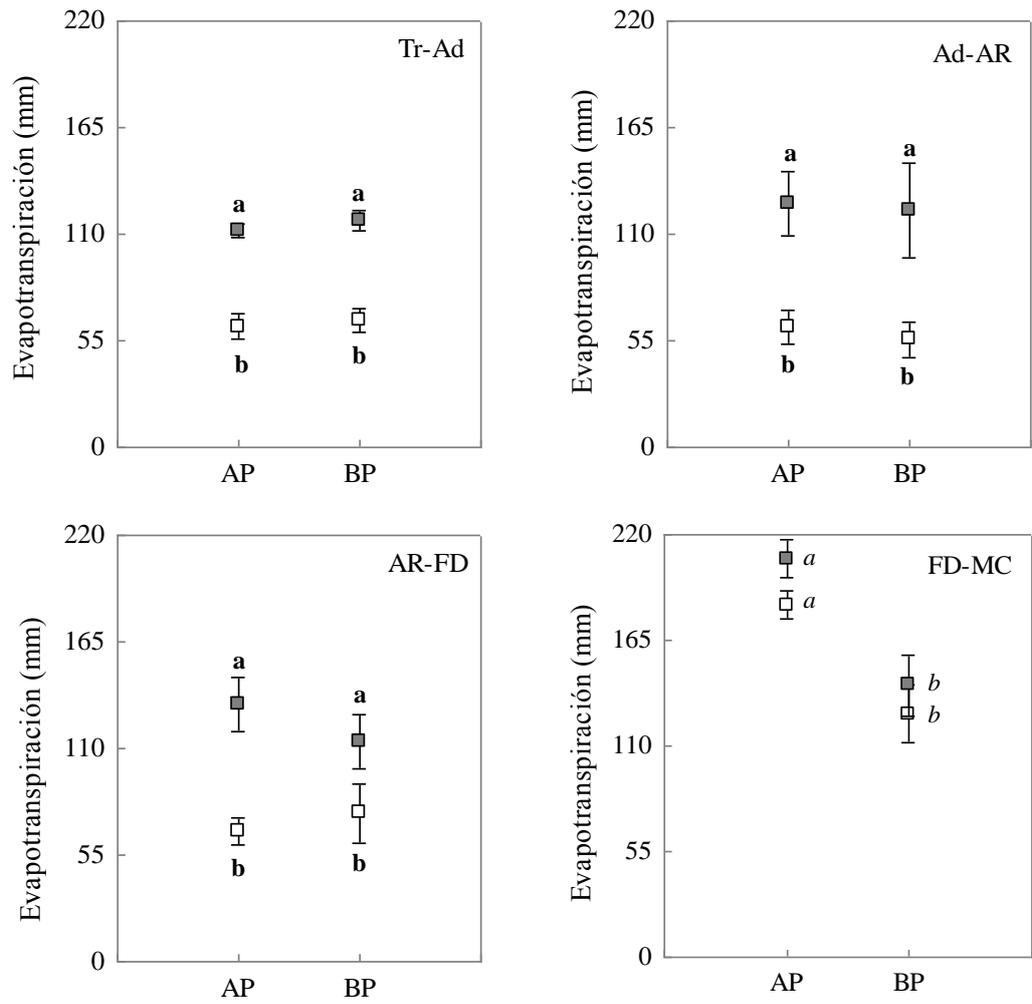


Figura 4.4. Evapotranspiración (promedio y desvío estándar) en condiciones estándar (■) y ajustada (□) para los grupos de alta (AP) y baja (BP) producción de materia seca en diferentes períodos del ciclo de cultivo (Tr: trasplante; Ad: adaptación; AR: altura de rodilla; FD: floración, desflore; MC: maduración, cosecha). Letras diferentes representan diferencias estadísticamente significativas con $p < 0,05$ (negrita: diferencias entre la evapotranspiración potencial y la ajustada para un mismo grupo; cursiva: diferencias entre grupos)

4.4.4. Agotamiento de humedad en la zona radical

El agotamiento de humedad la zona radical, en general, fue variable para los dos grupos evaluados (Figura 4.5). Entre trasplante y altura de rodilla para AP, el agotamiento de la lámina se ubicó por debajo del umbral, el cual fue superado en la mayoría de los casos con la aplicación del agua, aunque solo unos pocos llegaron nuevamente a capacidad de campo. El grupo BP para este mismo período presentó lotes donde el contenido hídrico no llegó a superar el umbral. La evapotranspiración del cultivo disminuyó entre punto de marchitez permanente y el umbral, es por ello que la pendiente del agotamiento de la lámina fue menor en esta zona (Figuras 4.5. y 4.6.).

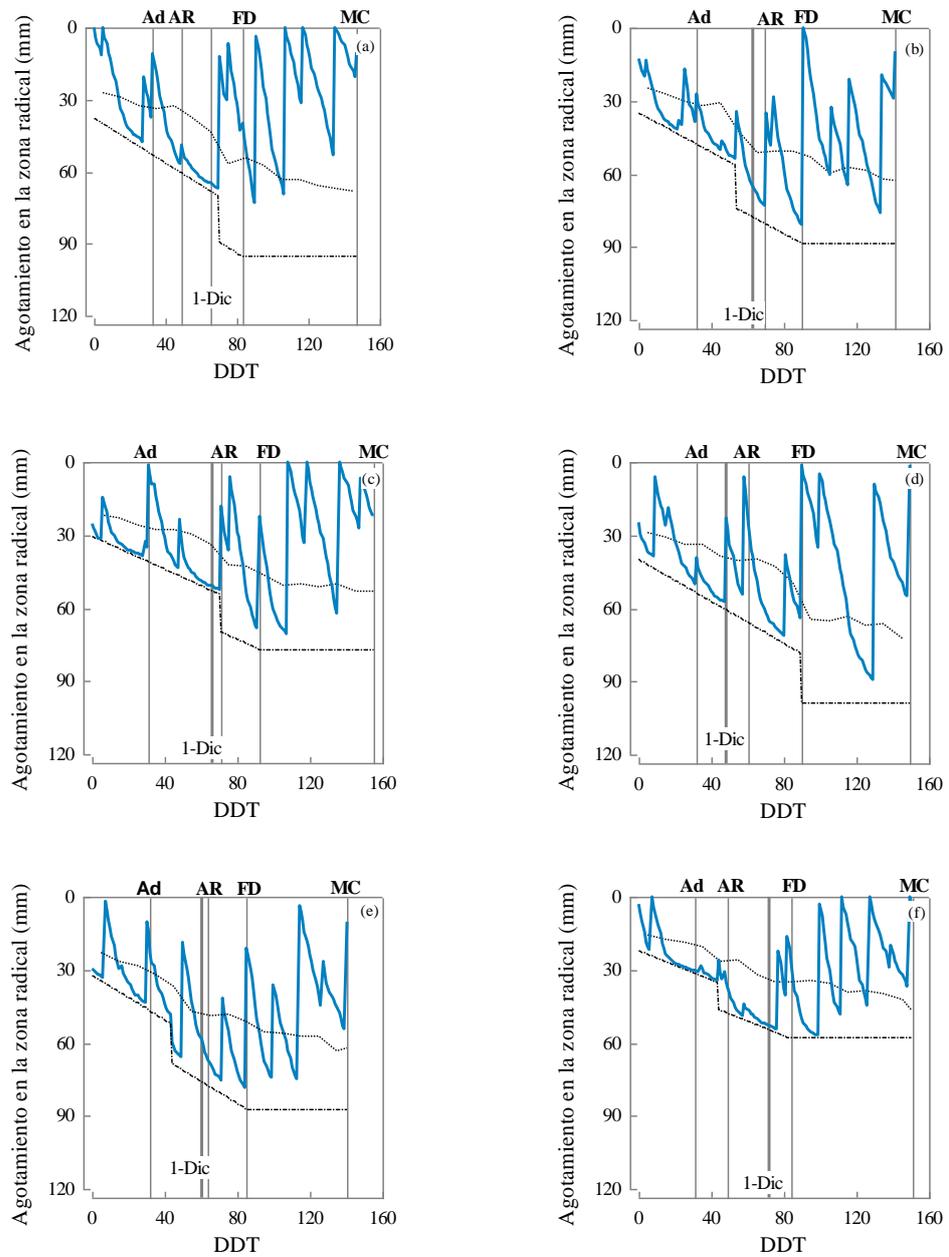


Figura 4.5. Agotamiento en la zona radical (línea celeste), lámina total utilizable (líneas cortadas) y lámina fácilmente utilizable considerando un umbral de 60% para lotes (a, b, c, d, e, f) de alta producción (AP) a lo largo del ciclo de cultivo (campana 06/07). Las líneas verticales indican diferentes momentos fenológicos (Ad, AR y FD)

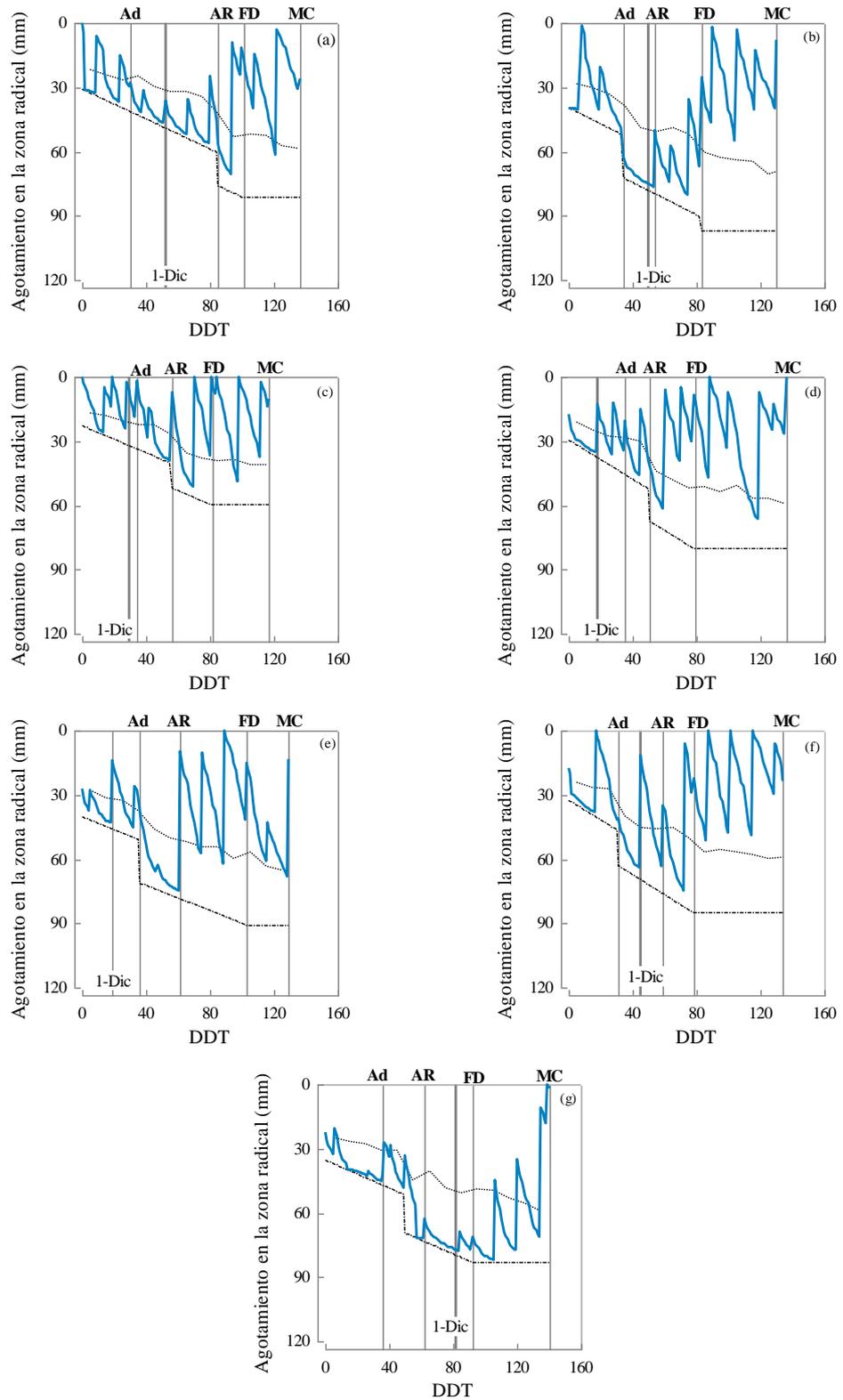


Figura 4.6. Agotamiento en la zona radical (línea celeste), lámina total utilizable (líneas cortadas) y lámina fácilmente utilizable considerando un umbral de 60% (línea punteada) para lotes (a, b, c, d, e, f, g) de baja producción (BP) a lo largo del ciclo de cultivo (campana 06/07). Las líneas verticales indican diferentes momentos fenológicos.

En el período crítico comprendido entre altura de rodilla y floración, el agotamiento de la lámina resultó inferior al umbral en casi todos los lotes evaluados. Desde floración a cosecha, esta tendencia solamente se observó en algunos lotes AP; para BP el agotamiento, en general, estuvo por encima del umbral. Dicha tendencia está asociada al inicio del período de precipitaciones (1 de Diciembre) momento en que el riego comienza a ser complementario (Figuras 4.5. y 4.6.). Cabe destacar que la fecha de trasplante en la mayoría de los lotes del grupo BP fue más tardía.

4.4.5. Relación productividad – estrés hídrico

La disminución del rendimiento por estrés hídrico fue de alrededor de un 13% en los períodos de adaptación, altura de rodilla y maduración (Figura 4.7.).

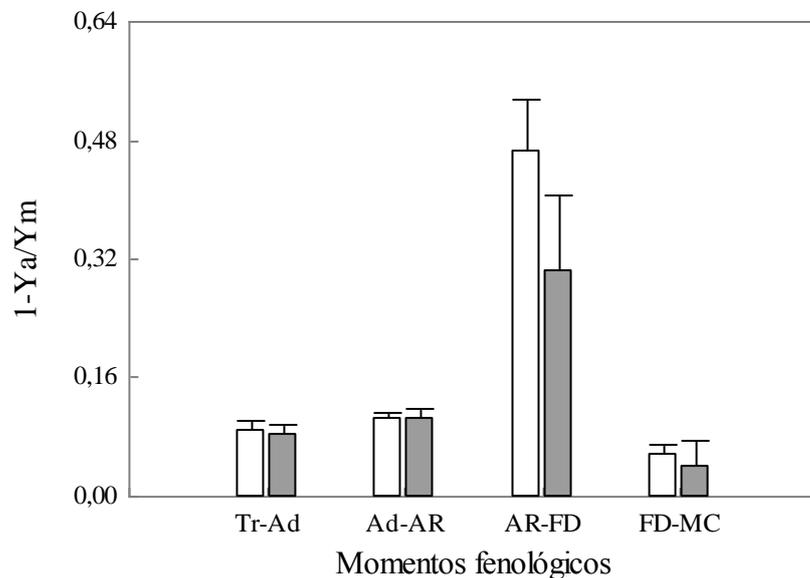


Figura 4.7. Disminución del rendimiento relativo para lotes de alta producción (■) y baja producción (□) a lo largo del ciclo de cultivo (campaña 06/07).

La disminución del rendimiento por estrés hídrico fue de alrededor del 10% en los dos primeros y en el último período del ciclo del tabaco. Durante la etapa comprendida entre altura de rodilla y floración se incrementó para ambos grupos, llegando a valores superiores al 40% para AP y de 30% para BP, mientras que los máximos registrados en ambos grupos alcanzaron el 60% (Figura 4.7.).

Considerando el ciclo de cultivo completo, la disminución del rendimiento estimado para AP y BP varió entre 20 y 50% (con medias del 30%) no habiéndose detectado diferencias entre grupos productivos.

4.5. Discusión

Las láminas de agua registradas durante el trasplante y la altura de rodilla estuvieron por debajo o cercanas al umbral establecido para este cultivo. A partir de este último periodo las mismas se incrementaron, coincidiendo con el inicio de las precipitaciones de verano.

Este déficit hídrico en las diferentes etapas del ciclo se vio reflejado en la evapotranspiración ajustada ($ET_{c_{aj}}$). En los dos grupos evaluados se observó una disminución de la evapotranspiración hasta la floración, sin diferenciarse la demanda entre grupos productivos. La $ET_{c_{aj}}$ se igualó a la máxima para el último período del ciclo comprendido entre la floración y la cosecha, siendo mayor para el grupo AP.

La menor evapotranspiración coincidió con la disminución en el rendimiento de alrededor del 30% para ambos grupos productivos durante todo el ciclo del cultivo, donde la etapa más afectada fue la de máximo crecimiento. Otros autores informaron tendencias similares. Una tendencia similar a la detectada en esta tesis, se observó en un ensayo donde se compararon dos déficit de riego (50% de ET_c) impuestos como déficit convencional o por la alternancia de surco regado. La disminución del rendimiento fue de 31 y 10% respectivamente con respecto al control (100% ET_c) (Sifola 2010).

Otros estudios reportan datos sobre el agotamiento de la lámina de agua. En un ensayo con tabaco oriental se determinó que la fracción de agua fácilmente disponible para la planta fue de 0,6 para el período de rápido crecimiento y de 0,8 para la cosecha (Ranjbar y Taghavi 2006). Resultados similares se obtuvieron en Turquía donde los mayores rendimientos se observaron en el testigo sin estrés y en los tratamientos con 40% de reducción del agua disponible en tres estadios del cultivo (vegetativo, maduración y cosecha) (Çakir y Çebi 2009). Asimismo, en un ensayo en Irán con tabaco Oriental la disminución del rendimiento cuando el agotamiento del agua fue del 60% varió entre el 25 y 30% para tres variedades estudiadas (Salehzade *et al.* 2009).

En Turquía, al igual que en Chicoana, el riego es un factor de vital importancia para el tabaco tipo Virginia debido a que la lluvia es impredecible y generalmente insuficiente durante los períodos críticos de crecimiento. Pérdidas de materia seca del orden de los 40-70, 15-17 y 22-25% fueron detectadas bajo diferentes programas de riego incluyendo estrés severo (sin riego), o estrés moderado con 40 y 60% de reducción del agua disponible, respectivamente (Çakir y Çebi 2006).

Con respecto al período más afectado por el estrés hídrico, los datos de esta tesis son similares a los obtenidos por Maw *et al.* (1997) en un estudio donde se le impusieron al tabaco periodos de sequía en diferentes momentos del ciclo. Se observó que la disminución del peso seco de la cosecha fue del 22% si la restricción fue aplicada entre los 48 y 54 DDT, del 10% entre los 60 y 66 DDT y del 6% entre los 36 y 48 DDT. Los dos primeros períodos mencionados se encuentran entre la altura de rodilla y la floración período considerado como el de máximo crecimiento. Asimismo, pérdidas de rendimientos entre el 70 y 80% se observaron en Turquía cuando se omitió el riego durante el período de rápido crecimiento y maduración (Çakir y Çebi 2006).

4.6. Conclusiones del capítulo

La baja disponibilidad hídrica en los lotes de Chicoana estudiados en esta tesis produjo una disminución del rendimiento en un 20 a 30% con respecto al rendimiento potencial, independientemente del grupo productivo. Por lo tanto la hipótesis propuesta se rechaza parcialmente ya que si bien la disponibilidad de agua limita el rendimiento, no se debió a la desincronización propuesta sino al carácter deficitario del riego de Chicoana.

Los datos hasta aquí obtenidos confirman que efectivamente es preciso optimizar el uso de los nutrientes y el agua en el tabaco cultivado en Chicoana. Esta optimización puede lograrse a través de un ajuste de los nutrientes y el agua en condiciones controladas. Dicho estudio se presentará en el próximo capítulo de esta tesis.

CAPITULO 5

AJUSTE EN CONDICIONES CONTROLADAS DE NIVELES OPTIMOS DE NUTRIENTES ANTE VARIACIONES DEL NIVEL DE RIEGO Y MATERIA ORGANICA INICIAL DEL SUELO

5.1. Introducción

Como se sugirió en diagnósticos realizados en Chicoana, el aprovechamiento de los nutrientes y el agua en lotes tabacaleros dista de ser el óptimo. El ajuste de los niveles apropiados de nutrientes y agua puede realizarse en base a criterios desarrollados para suelos de la zona. Sin embargo, es preciso tener en cuenta a aquellos factores que podrían condicionar la respuesta del cultivo y que varían en la zona como lo es la materia orgánica (MO).

El nivel de materia orgánica en el suelo afecta la capacidad de proveer nutrientes y las condiciones necesarias para la disponibilidad y absorción de los mismos (Alvarez *et al.* 2006). Asimismo, condiciona la capacidad de retención de agua útil como lo indica un estudio en el cual un incremento de la MO de suelos con texturas variables de 0,5 a 3% se correspondió con un aumento de la capacidad de agua disponible en un 100 % (Hudson 1994).

En Chicoana, los niveles de MO varían de 1,3 a 2,3 %. Estos valores son considerados adecuados a medios-bajos acorde a los niveles de interpretación para tabaco Flue Cured propuestos por Ballari (2005). Es por ello que la respuesta del tabaco podría estar condicionada por dicha variación. Sin embargo, no se dispone de datos que aseguren que la variación de la MO del suelo dentro de Chicoana sea suficientemente amplia como para condicionar significativamente la respuesta.

5.2. Objetivo

Establecer bajo dos niveles de materia orgánica inicial del suelo y disponibilidad de agua, la respuesta del cultivo de tabaco a la fertilización calculada en base a un modelo desarrollado en la zona.

Hipótesis

La respuesta del cultivo de tabaco a la fertilización calculada en base a un modelo será significativa aún en condiciones limitantes de humedad, lo que permite optimizar la dosis de nutriente aplicada.

5.3. Materiales y métodos

5.3.1. Descripción general del ensayo

Durante la campaña 2007/08 se realizó en la Estación Experimental Agropecuaria de INTA Salta (24° 54' Sur, 65° 29' Oeste, provincia de Salta, Argentina) un experimento bajo cubierta, donde se cultivó tabaco tipo Virginia en macetas (Foto 5.1.).



Foto 5.1. Invernadero montado para el experimento en condiciones controladas con plantas de tabaco en macetas

Se seleccionaron dos suelos del departamento de Chicaoana con contenidos de MO medio-bajo (1 a 1,5 %) y adecuado (1,5 a 2,5 %) para el cultivo del tabaco (Ballari 2005) (Tabla 5.1.).

Tabla 5.1. Características físico-química de los suelos utilizados en el estudio en condiciones controladas.

		Medio-bajo	Adecuado
Arena	(cm)	45	47
Limo		36	33
Arcilla		19	20
Capacidad Hídrica de Saturación	(%)	28	34
pH en Pasta de Saturación	-	7,8	8
Conductividad Eléct. En el Extracto de Saturación.	(mmhos/cm)	0,79	0,9
Carbonato de Calcio y Magnesio	(%)	5,9	8,1
Carbono Orgánico	(%)	0,8	1,25
Materia Orgánica	(%)	1,38	2,15
Relación C/N	-	9	10
Sodio Intercambiable	(meq/100 g)	0,4	0,3
Cloruro Soluble en el Extracto de Saturación	(meq/l)	5	5
Cloruro Soluble en el Extracto de Saturación, Referido a Suelo Seco	(p.p.m.)	20	20
Boro		0,08	0,1
Nitrógeno total	(%)	0,09	0,13
Nitrógeno de nitratos obtenidos por la mineralización (A)	(g/maceta)	0,32	0,46
Nitratos	Ppm	18	12
Nitrógeno de nitratos (B)	(g/maceta)	0,09	0,06
Nitrógeno del suelo (A+B)	(g/maceta)	0,39	0,51
Fósforo	(p.p.m.)	31	24
	(g/maceta)	5,48	4,24
Potasio	(meq/100 g)	1,08	0,82
	(g/maceta)	7,45	5,65

Se utilizaron macetas plásticas de 27,5 kg a las que se les incorporaron los suelos seleccionados mezclados con arena en una relación de 3:1 (Karaivazoglou *et al.* 2005). En el fondo de las macetas se colocó una capa de ripio y otra de arena (pH 8,4 y CEE 0,21 mmhos/cm) con el objetivo de favorecer el drenaje del agua.

La variedad de tabaco elegida fue Virginia K326, por ser la más representativa en la zona de estudio al momento de realizar el ensayo. El trasplante se realizó a principios de octubre y consistió en ubicar una plántula por maceta. Las plántulas fueron pesadas individualmente y se seleccionaron las que presentaron mayor uniformidad. Aquellas que no lograron establecerse fueron reemplazadas por otras del mismo tamaño durante las primeras dos semanas (Pierik *et al.* 2004). Las macetas se regaron al trasplante con un nivel de agua que garantizó la capacidad de campo (CC).

La cosecha del ensayo se realizó de forma escalonada. Después de la cosecha de las últimas hojas, los tallos y raíces fueron separados. Todas las partes de la planta fueron pesadas en estado fresco y luego secadas en estufa hasta alcanzar peso constante.

5.3.2. Diseño experimental y tratamientos

Se aplicó un diseño en bloques al azar con experimentación factorial (2x2x2) y 4 repeticiones por cada tratamiento. Se trabajó en bloques con el fin de respetar el marco de plantación del cultivo (1,20m x 0,40m). Los bloques se separaron a 1,2 m entre ellos. La unidad experimental fue una maceta con una planta. Los tres factores evaluados fueron 1) contenido de MO en el suelo, 2) dosis de fertilizante NPK calculado por modelo y 3) niveles de riego. Para evaluar el efecto del riego y de la fertilización se contó con los testigos correspondientes de cada tipo de suelo seleccionado.

En la Tabla 5.2 se presentan los tratamientos propuestos para el ensayo.

Tabla 5.2. Tratamientos correspondientes al ensayo en invernadero

Contenido de MO	Fertilización	Nivel de riego
Medio-bajo (MOm)	Testigo sin fertilizar (f)	Medio (H)
		Bajo (h)
	Fertilizado (F)	Medio
		Bajo
Adecuado (MOa)	Testigo sin fertilizar	Medio
		Bajo
	Fertilizado	Medio
		Bajo

Durante el período de adaptación, las láminas de agua aplicadas aseguraron que la disponibilidad hídrica se encuentre por encima del umbral para los dos niveles evaluados, con el propósito de lograr el establecimiento de las plantas. A partir del período de rápido crecimiento, las láminas de agua aplicadas comenzaron a diferenciarse con el objetivo de mantener dos niveles de disponibilidad hídrica: media (por encima o en el nivel del umbral o de la lámina fácilmente utilizable (LFU)) y baja (por debajo del umbral o LFU) (Figura 5.1.).

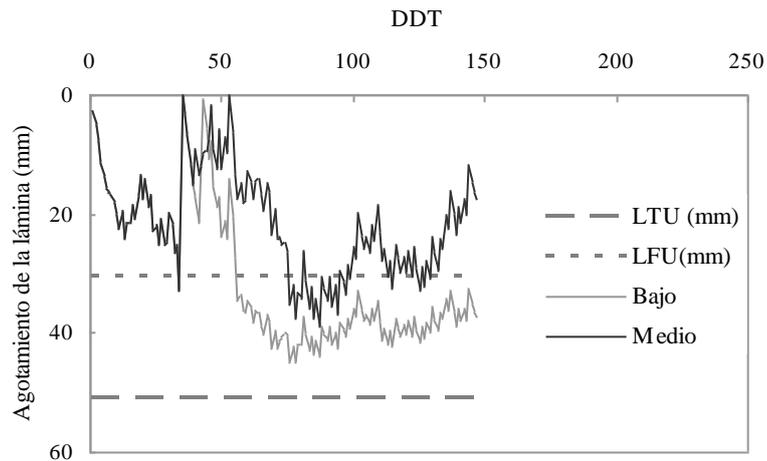


Figura 5.1. Agotamiento en la zona radical para niveles de riego medio y bajo (línea llena oscura y clara respectivamente), LFU- lámina fácilmente utilizable (líneas punteada), lámina total utilizable (línea cortada)

La fertilización consistió en la incorporación de nitrato de amonio (32-0-0), nitrato de potasio (13-0-44) y superfosfato triple (0-46-0) en 2 momentos: base (al trasplante) y repique (30DDT). Las dosis fueron calculadas según el modelo propuesto por Ballari (2005) para la zona. Para el cálculo de contenidos de nutrientes se utilizó la siguiente expresión:

$$\text{Nutr (g/maceta)} = \text{suelo (g/maceta)} \times a$$

Donde *a* fue diferente para cada nutriente en particular (Tabla 5.3.)

Tabla 5.3. Valores del coeficiente *a* para cada nutriente en particular.

Nutriente	<i>a</i>
Nitrógeno (g/maceta):	$\frac{N(\%)}{100} \times \text{Tasa min (2,25 \%)}$
Nitratos (g/maceta):	$\frac{N(\text{ppm})}{1.000.000} \times \frac{14}{62}$
Potasio (g/maceta):	$K(\text{meq}/100\text{grsuelo}) \times \frac{0,039}{100}$
Fósforo (g/maceta):	$P(\text{ppm}) \times 1 \cdot 10^{-6}$

Dosis de fertilizante aplicado

-Nitrógeno: la dosis aplicada de nitrógeno se calculó en base a la siguiente expresión:

$$DN = \frac{\left(\frac{OPR}{EFIS_N} \right) - (DPN)}{CA} \tag{1}$$

Donde:

DN: Dosis de N (kg/ha)

OPR: Objetivo de producción esperado (2700 kg/Ha de hoja curada).

EFIS: Eficiencia fisiológica N (18kg de hoja curada/kg de nutriente absorbido).

DPN: Disponibilidad potencial del nutriente en el perfil explorado

CA: Coeficiente de aprovechamiento del nutriente aportado (porcentaje utilizado: 0,7)

$$CA = \frac{N_{\text{aportado}}}{N_{\text{utilizado}}} \quad [2]$$

- Fósforo: se realizó en función del nivel de fertilidad del suelo (información que surge del análisis de suelo). Calculado el requerimiento ($OPR/EFIS_p$), con una eficiencia fisiológica de 140kg de hoja curada/kg de P_{abs} , y considerando los niveles disponibles de fósforo del suelo la dosis a aplicar fue equivalente a la demanda del cultivo para los dos suelos considerados.

-Potasio: la dosis potásica se correlacionó con el nivel de K-cambiable y el poder fijador del suelo, ligado principalmente al contenido de arcilla (Tabla 5.4.).

Tabla 5.4. Dosis de potasio a aplicar en función de la disponibilidad de K para suelos francos.

Disponibilidad de K para suelos francos (meq/100gr suelo)		Dosis
Muy buena disponibilidad	0,85-1,1	Aplicar como media un 20% menos que la demanda calculada para el cultivo
Buena	0,85- 0,55	Aplicar como media una dosis equivalente a la demanda calculada para el cultivo

Las dosis utilizadas expresadas por nutriente y por fertilizante en gramos por planta y kilos por hectárea para el fertilizante base y de repique se detallan en la Tabla 5.5.

Tabla 5.5. Dosis de N, P y K y de fertilizantes expresadas en g/pl y kg/ha (B: base, R: repique, MOa: materia orgánica adecuada, MOm: materia orgánica media a baja).

		N		P		K	
		B	R	B	R	B	R
MOa	g/pl	7,6	1,9	0,7	0,2	8,0	2,0
MOm		7,8	2,0	0,7	0,2	6,4	1,6
MOa	Kg/ha	158,0	39,5	15,4	3,9	166,2	41,5
MOm		163,1	40,8	15,4	3,9	132,9	33,2
		NO ₃ NH ₄		SPT		NO ₃ K	
		B	R	B	R	B	R
MOa	g/pl	14,3	3,6	3,7	0,9	22,2	5,5
MOm		16,7	4,2	3,7	0,9	17,7	4,4
MOa	kg/ha	296,9	74,2	77,1	19,3	461,5	115,4
MOm		348,8	87,2	77,1	19,3	369,2	92,3

5.3.3. Muestreo, determinaciones y estimaciones

Muestreo y determinaciones

-En planta:

Durante el ciclo del cultivo se midieron semanalmente: 1) altura del tallo principal (hasta la inserción de la última hoja menor a 5cm) y 2) número de hojas.

Al final de la cosecha se registraron el peso seco total de hojas, tallo y raíces. Para cada una de las partes de la planta se determinó:

-Materia seca acumulada (secado en estufa gravimetría a 70 °C hasta constancia en peso) (Chapman y Prat 1973).

-Nutrientes: N total (micro-Kjeldahl), P total (extracción "vía húmeda" y cuantificación colorimétrica), K total (extracción "vía húmeda" y cuantificación por fotometría de llama) (Quiroga y Corvalán 1988).

5.3.4. Análisis estadístico

Los efectos de tratamientos sobre los parámetros analizados se determinaron por análisis de la varianza (ANOVA). Las medias de los tratamientos fueron comparadas por el test de mínima diferencia significativa (LSD) con $p < 0,05$ (Infostat 2008).

Dado que no se detectó interacción entre los diferentes contenidos de MO (Anexo 2), la fertilización y los niveles de disponibilidad hídrica, el modelo estadístico utilizado fue el siguiente:

$$Y_{ijkl} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \delta_k + \gamma_l + (\alpha \beta)_{ij} + \varepsilon_{ijklm}$$

Donde:

μ : media poblacional

α_i : efecto de la aplicación de fertilizante a nivel i

β_j : efecto de la disponibilidad hídrica a nivel j

δ_k : efecto del nivel inicial materia orgánica del suelo a nivel k

γ_l : efecto de bloque

$(\alpha \beta)_{ij}$: efecto de la interacción de la aplicación de fertilizante a nivel i y de la disponibilidad hídrica a nivel j

ε_{ijkl} : error aleatorio en la repetición del tratamiento que combina el nivel i de la aplicación de fertilizante, el j de la disponibilidad hídrica y el k del contenido inicial de materia orgánica.

Para aquellas variables que se midieron en la misma unidad experimental a lo largo del ciclo se les realizó un ANOVA con medidas repetidas en el tiempo, seleccionando para el análisis 4 momentos de la curva de crecimiento, con el fin de que el número de observaciones no superase al de repeticiones. El modelo utilizado para este análisis fue el siguiente:

$$Y_{ijkl} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \delta_k + \gamma_l + (\alpha \beta)_{ij} + \varepsilon_{ijklm}$$

En donde:

μ : media poblacional

α_i : efecto del nivel inicial materia orgánica del suelo a nivel i

β_j : efecto de los tratamientos a nivel j

δ_k : efecto del tiempo a nivel k

γ_l : efecto de bloque

$(\beta \delta)_{ij}$: efecto de la interacción de los tratamientos a nivel j y del tiempo a nivel k.

ε_{ijkl} : error aleatorio en la repetición de l del tratamiento que combina el nivel i del contenido inicial de materia orgánica, el nivel j de los tratamientos y el nivel k del tiempo.

5.4. Resultados

5.4.1. Evolución de las temperaturas en el invernadero

Las temperaturas registradas en el invernadero se presentan en la figura 5.2.

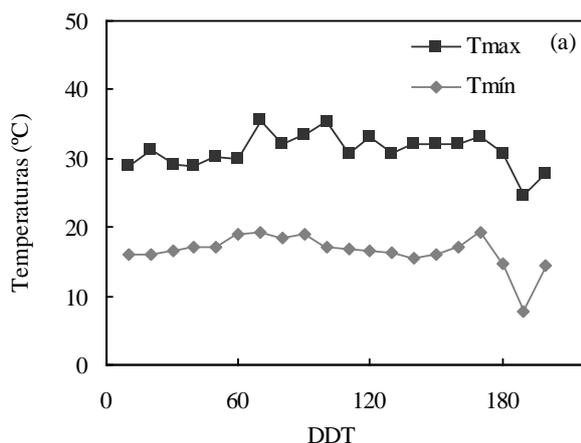


Figura 5.2. Promedios decádicos de temperaturas máximas y mínimas del invernadero.

5.4.2. Crecimiento de la planta (altura y número de hojas)

El nivel inicial de MO afectó significativamente la altura de la planta al fin del experimento pero independientemente de los otros dos factores aplicados ya que la interacción entre los 3 factores no resultó significativa. Con niveles medios-bajos de MO se obtuvieron plantas de mayor altura ($51,9 \pm 2,4$ cm vs $48,5 \pm 2,5$ cm, medias \pm error estándar) ($p=0,0456$). En cambio, el número de hojas por planta no fue afectado ($p=0,7192$).

En la etapa comprendida entre los primeros momentos del ciclo hasta el establecimiento del tabaco, la altura de las plantas resultó similar, y no fue afectada por la fertilización ni el nivel de riego. En cambio, al finalizar el periodo de rápido crecimiento, las plantas con disponibilidad hídrica media alcanzaron mayor altura diferenciándose de las plantas con menor humedad independientemente de la aplicación de fertilizante ($p < 0,05$). A los 129 DDT, la diferencia en altura entre tratamientos se mantuvo para los distintos niveles de humedad hasta la finalización de la cosecha ($p < 0,05$). No se observaron diferencias dentro del mismo tratamiento entre los 129 y 177 DDT, en razón de que la floración ocurrió alrededor de los 110 a 120 DDT, momento en el que se realizó el desflore (Figura 5.3).

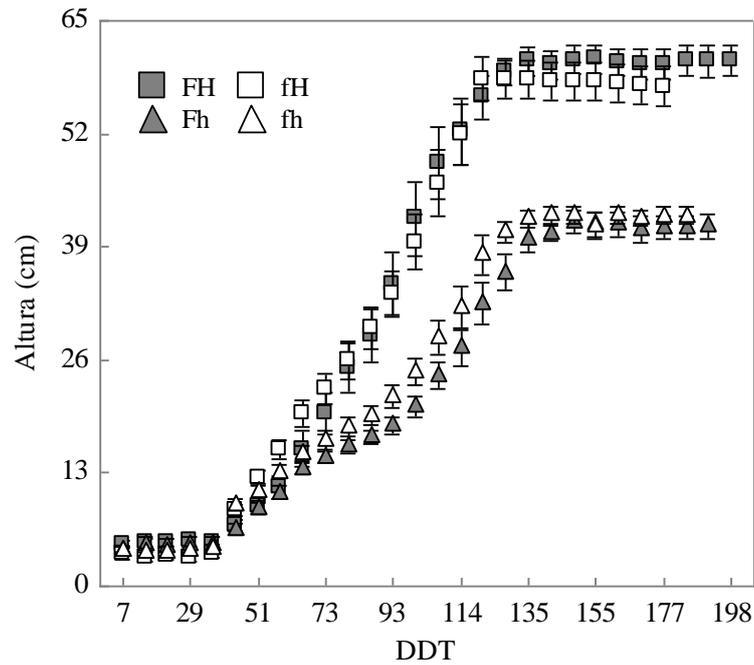


Figura 5.3. Altura de plantas (cm) para diferentes niveles de riego (medio: H y bajo: h) y fertilización (fertilizadas: F y no fertilizadas: f) (media \pm error estándar).

El número de hojas por planta fue similar para todos los tratamientos al inicio del ciclo (14 DDT). A los 50 DDT comenzaron a diferenciarse los tratamientos, donde las plantas con disponibilidad hídrica media y fertilización presentaron menor cantidad de hojas. En el mismo momento, las plantas sin fertilizar presentaron similar número de hojas independientemente de la disponibilidad hídrica. En la etapa 50 a 90 DDT no se observó un aumento significativo del número de hojas en las plantas no fertilizadas. Esta tendencia varió ante la presencia de fertilizante, ya que a los 90 DDT el número de hojas se incrementó y llegó a superar en número a las plantas no fertilizadas, siendo este incremento mayor para el nivel hídrico más alto (Figura 5.4.).

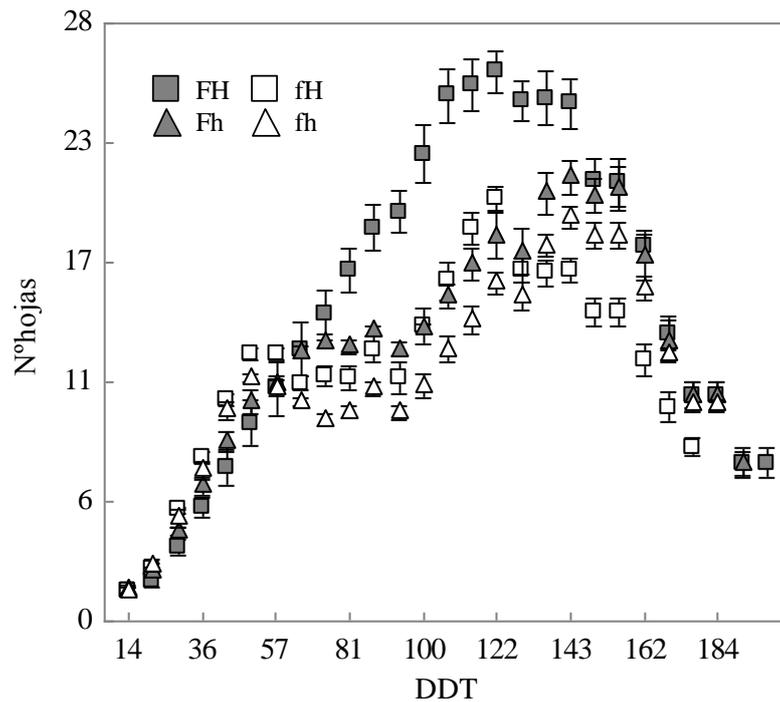


Figura 5.4. Número de hojas por planta para diferentes niveles de riego (medio: H y bajo: h) y fertilización (fertilizadas: F y no fertilizadas: f) (media \pm error estándar).

En todos los tratamientos evaluados, el número de hojas se incrementó entre los 90 y 120 DDT. Sin embargo, a los 90 DDT, las plantas fertilizadas con disponibilidad hídrica media alcanzaron el número de hojas que el resto de los tratamientos presentaron a los 120 DDT (Figura 5.4.).

5.4.3. Materia seca producida y nutrientes absorbidos

Los niveles de MS, N absorbido en tallo+raíz y K absorbido mostraron diferencias significativas entre suelos con diferente contenido inicial de MO. Con respecto a la interacción entre los efectos de nivel de riego y fertilización no fue significativa para P absorbido en tallo+raíz, es por ello que para éste parámetro se discuten ambos factores por separado (Tabla 5.6.).

Tabla 5.6. ANOVA (análisis de varianza) de materia seca (MS), nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) para hojas y tallo+raíz afectadas por el nivel inicial de materia orgánica del suelo (MO), fertilización y nivel de riego.

	ANOVA (Pr>F)			
	MS	N	P	K
HOJA				
Modelo	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Nivel de MO en suelo	0,0266	0,077	0,5968	0,0116
Nivel de riego	<0,0001	0,0089	<0,0001	<0,0001
Fertilización	<0,0001	<0,0001	0,0004	<0,0001
Bloque	0,772	0,4845	0,0172	0,9653
Humedad*Fertilización	<0,0001	0,0078	0,0028	<0,0001
TALLO+RAÍZ				
Modelo	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Nivel de MO en suelo	0,0593	0,0374	0,058	0,1152
Nivel de riego	<0,0001	0,0106	0,0019	0,0592
Fertilización	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Bloque	0,7378	0,3526	0,3351	0,5875
Nivel de riego*Fertilización	0,0001	<0,0001	0,1772	0,0001

- Producción de MS y absorción de nutrientes al final del ciclo de cultivo en función de los contenidos iniciales de materia orgánica en el suelo

El análisis de los dos tipos de suelo demostró que la mayor producción de MS de hoja se registró en los lotes donde los contenidos iniciales de MO fueron menores, mientras que la MS de tallo+raíz fue similar para los dos suelos (Figura 5.5.).

La variación de los niveles de nutrientes absorbidos siguió distintas tendencias según el nutriente considerado. La absorción de N en hoja no fue afectada por el nivel inicial de MO, mientras que la absorción en tallo+raíz se vio incrementada en los suelos con mayor nivel de MO. Respecto del K, se observó que en el suelo con menor contenido de MO se produjo mayor absorción de K en hoja. El nivel de P absorbido fue similar para los dos niveles de MO evaluados (Figura 5.5.).

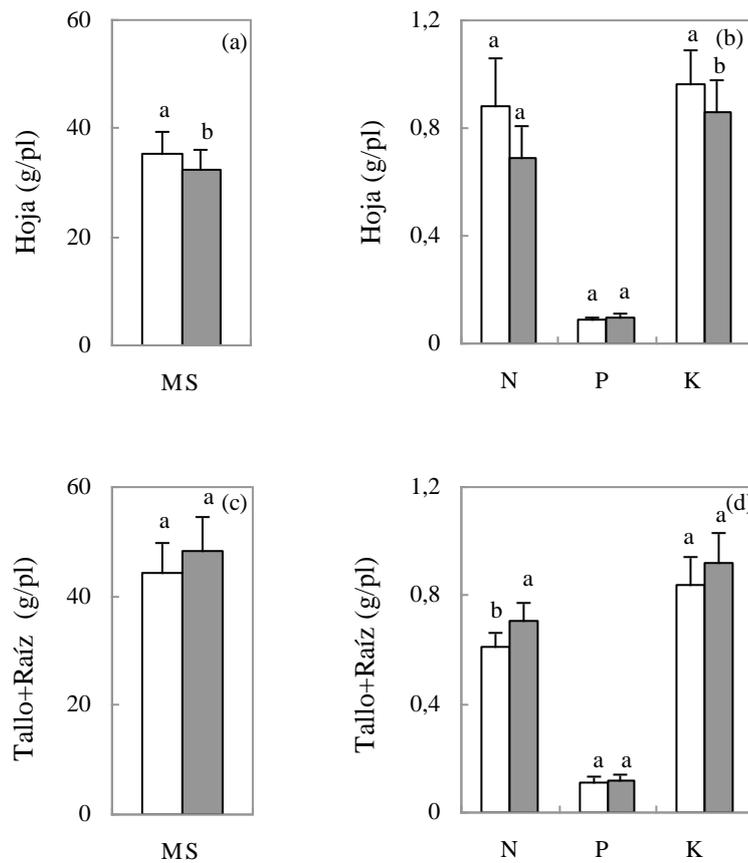


Figura 5.5. MS (a y c) y nutrientes absorbidos (b y d) (g/pl) para dos tipos de suelo con adecuados (■) y medio-bajo (□) contenido de MO (medias±error estándar). Letras diferentes indican diferencias significativas ($p<0,05$).

- Producción de MS y absorción de nutrientes de acuerdo a la disponibilidad hídrica (nivel de riego) y la fertilización

La MS en hoja se vio favorecida por el nivel de riego medio, y con la incorporación del fertilizante la producción se diferenció significativamente. Por su parte, la MS de tallo + raíz fue mayor para aquellos tratamientos sin fertilizar (Figura 5.6.).

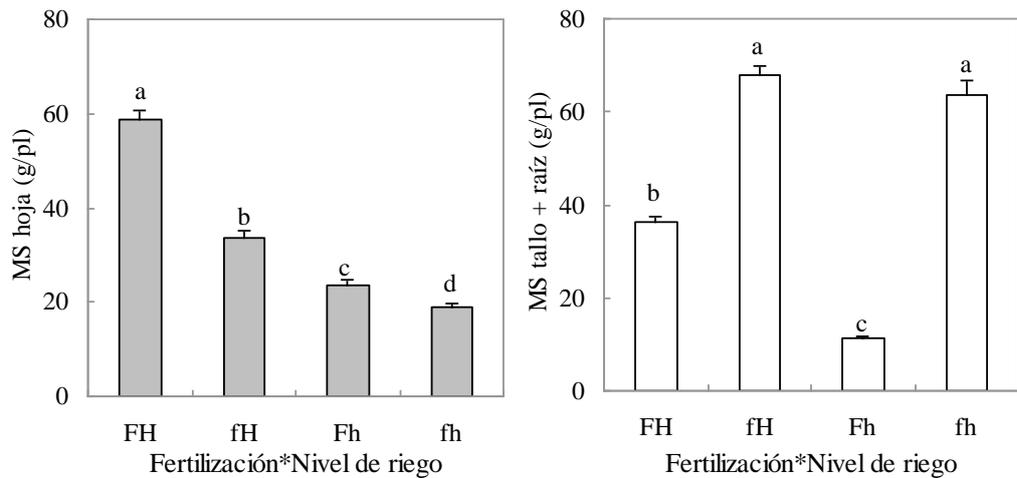


Figura 5.6. Materia seca de hoja producida (g/pl) para las combinaciones entre los factores de fertilidad (fertilizada: F, sin fertilizar: f) y nivel de riego (medio: H y bajo: h) (medias ± error estándar). Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$).

La incorporación del fertilizante produjo un incremento de la MS de hoja equivalente a 1,8 veces para niveles de disponibilidad hídrica media y de 1,2 veces cuando la disponibilidad hídrica fue baja. Por otro lado, el incremento de la disponibilidad hídrica en las plantas fertilizadas aumentó la producción de MS de hoja en un 40 %.

La producción de MS de hoja, que se vio significativamente afectada por la interacción entre los niveles de humedad (mm) y la aplicación de fertilizante (g/pl), pudo ser explicada por un modelo entre las dos variables. En dicho modelo, el nivel inicial de MO no tiene incidencia, debido a que las constantes del modelo considerando los dos niveles juntos son similares a las de los modelos tomados por separado (Tabla 5.7.).

Tabla 5.7. Coeficientes a, b y c correspondientes a las funciones calculadas para dos niveles de MO en el suelo. La variable dependiente es materia seca (MS) y las variables independientes Fertilidad y Humedad (medias ± error estándar)

MS=a+b*Fertilidad+c*Humedad				
Niveles de C	A	B	c	R²
Dos niveles	-43,289±7,35	1,966±0,28	0,107±0,01	0,817
Medio-bajo	-47,322±10,82	2,025±0,40	0,116±0,02	0,841
Adecuado	-40,349±10,16	1,906±0,39	0,100±0,01	0,822

La mayor absorción de nitrógeno en hoja se observó en las plantas fertilizadas con niveles medios de disponibilidad hídrica, llegando a duplicar o triplicar la absorción registrada en las otras combinaciones. La absorción en tallo y raíz se vio afectada por la aplicación de fertilizante en combinación con baja disponibilidad hídrica presentando los menores contenidos de N (Figura 5.7.).

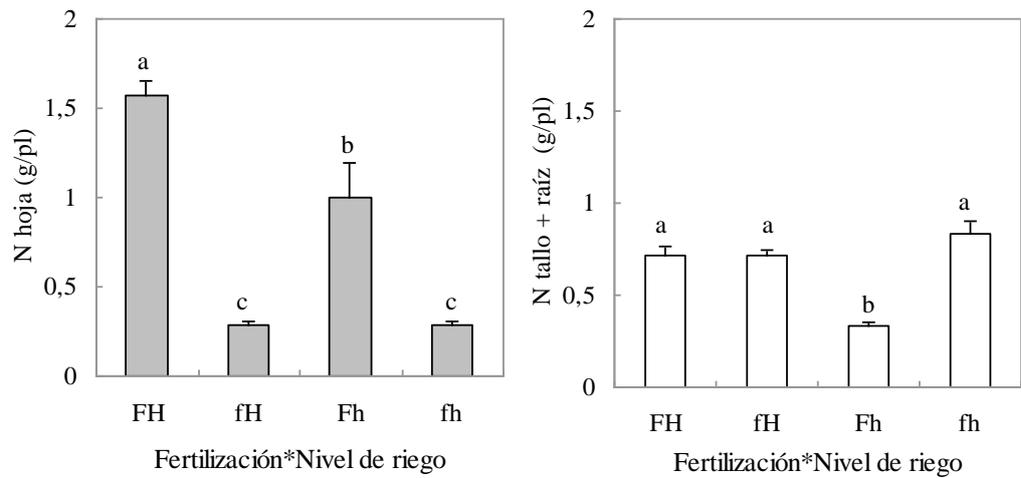


Figura 5.7. Nitrógeno absorbido (g/pl) para las combinaciones entre los factores de fertilidad (fertilizada: F, sin fertilizar: f) y nivel de riego (medio: H y bajo:h) (medias \pm error estándar). Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$).

La absorción de P en hoja fue superior con niveles medios de disponibilidad hídrica y mayor aún si estuvo acompañada con la aplicación de fertilizante, mientras que el bajo nivel de humedad produjo una disminución significativa en la absorción de este nutriente (Figura 5.8.). En las plantas fertilizadas el incremento en la disponibilidad hídrica incrementó la absorción de P en 2,6 veces mientras que con baja disponibilidad no varió ante la aplicación de fertilizante. La absorción de P en tallo + raíz no presentó interacción entre factores y fue mayor para aquellas plantas que no fueron fertilizadas. Con respecto a la disponibilidad hídrica, la absorción se vio favorecida por los niveles mayores de humedad (Figura 5.8.).

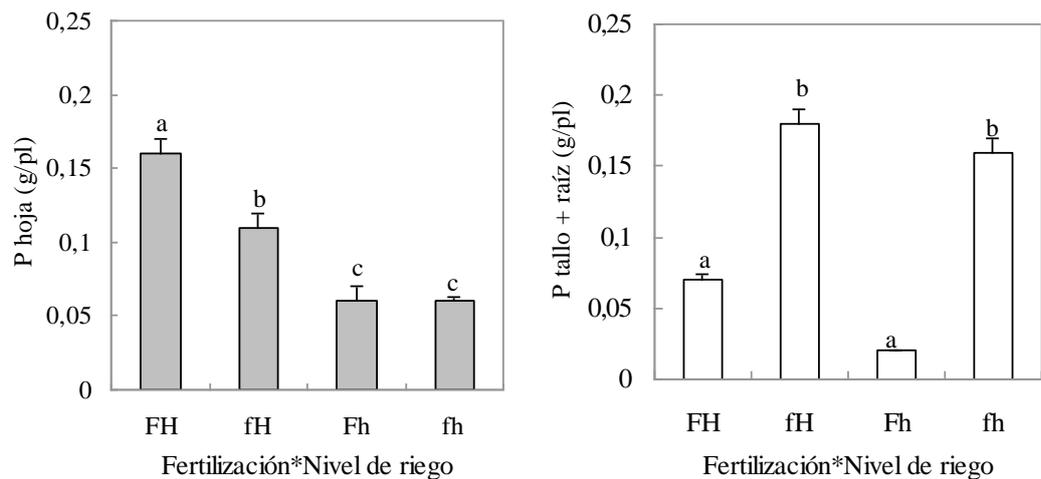


Figura 5.8. Fósforo absorbido en hoja (g/pl) para las combinaciones entre los factores de fertilidad (fertilizada: F, sin fertilizar: f) y nivel de riego (medio: H y bajo: h) (medias \pm error estándar). Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$).

Las plantas fertilizadas y con mayores contenidos hídricos absorbieron dos veces más K en hoja, que las plantas no fertilizadas o con baja disponibilidad hídrica (Figura 5.9).

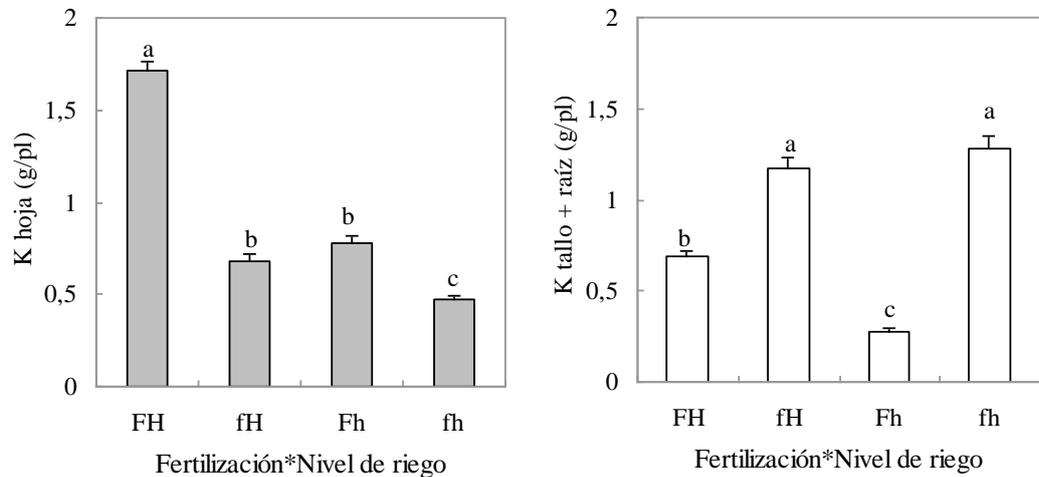


Figura 5.9. Potasio absorbido en hoja (g/pl) para las combinaciones entre los factores de fertilidad (fertilizada: F, sin fertilizar: f) y nivel de riego (medio: H y bajo:h) (medias \pm error estándar). Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$).

La absorción de K en tallo y raíz fue superior en las plantas fertilizadas independientemente del contenido de humedad (Figura 5.9).

5.5. Discusión

Los valores de altura de planta, MS en hoja, absorción de N en tallo+raíz y en el K absorbido en hoja mostraron diferencias entre ambos suelos con diferente contenido inicial de MO las cuales, aunque fueron muy pequeñas (10% MS hoja y K absorbido y 20% N tallo+raíz), resultaron significativas.

La tendencia inversa entre el nivel inicial de MO del suelo y los niveles de MS producida en hoja y el N absorbido en hoja ($p=0,07$) en los suelos con moderados a bajos contenidos de humedad pudo deberse a una compensación entre el nivel de N orgánico y la tasa de mineralización. El suelo con menor nivel de MO pudo haber mineralizado a una tasa mayor, resultando en un mayor nivel de N disponible que se vio reflejado en mayor MS y N absorbido en hoja.

El nivel de K absorbido es un parámetro que depende más de la presencia de iones con los cuales puede mantener interacciones, tales como carbonatos de Ca y Mg, que del nivel de MO del suelo. En esta tesis, los suelos con moderados contenidos de MO mostraron también mayores niveles de Ca y Mg, lo cual produjo una disminución en la absorción de K, situación que se potencia en suelos con baja disponibilidad de agua (Ballari 2005).

Al evaluar el efecto de la disponibilidad hídrica y la fertilización sobre el crecimiento, se observó que la mayor de humedad de suelo incidió significativamente en la altura de la planta independientemente de la fertilización. Así, los tratamientos con disponibilidad hídrica media superaron en 1,4 veces aproximadamente a los de baja disponibilidad. Por su parte, el número de hojas, a los 120DDT antes de iniciar la cosecha, fue mayor para las plantas con alta humedad y fertilizadas llegando a tener entre 3 y 5 hojas más que los tratamientos evaluados. Similar tendencia fue observada por Çakir y Çebi (2006) quienes detectaron que tanto el número de hojas como la altura de plantas se vieron reducidas con la aplicación de estrés hídrico en el período de rápido crecimiento.

En cambio, el número de hojas no resultó afectado por condiciones de estrés hídrico como lo muestran los resultados de Biglouei *et al.* (2010) quienes informaron que en un cultivo de tabaco sometido a diferentes niveles de estrés la altura de la planta fue negativamente afectada, aunque el nivel de estrés hídrico no afectó el número de hojas por planta. Ésta última variable tampoco se vio influenciada por un estrés hídrico en un ensayo realizado en Estados Unidos (Maw *et al.* 2009).

Con respecto a la disponibilidad de N, la altura de la planta y el número de hojas se incrementaron significativamente con el aumento del aporte de nitrógeno coincidiendo con los datos informados en Alemania bajo condiciones de invernadero (Brueck y Senbayram 2009).

La producción de MS y la absorción de nutrientes en hoja obtenidas en esta tesis fueron superiores para aquellas plantas fertilizadas con niveles de disponibilidad hídrica media. Una tendencia similar se observó en un experimento a campo con tabaco Burley, donde se evaluó la influencia de dos niveles de N con o sin riego sobre el rendimiento. Esta variable se incrementó tanto con el riego como con la aplicación de N y el efecto del N fue mayor en los lotes regados que en los no regados (Atkinson *et al.* 1969 en Sifola y Postglione 2003).

En esta tesis, la aplicación de fertilizantes resultó en un incremento de la MS en hoja de 1,2 a 1,8 veces para los dos niveles de disponibilidad hídrica. Resultados similares fueron observados en un ensayo con tabaco Burley, con y sin riego y diferentes niveles de fertilización nitrogenada realizado en Italia, la MS de hoja curada se incrementó en respuesta a la aplicación del N entre 1,4 a 2,7 veces solo al ser regado (Sifola y Postglione 2003).

De manera similar a la MS, la absorción de N en hoja fue dos veces superior para las plantas fertilizadas y con disponibilidad hídrica media con respecto a las de disponibilidad baja. Este mismo efecto del agua se observó en un ensayo con tabaco Burley, donde el N total acumulado en la parte aérea no dependió del incremento de las dosis de N cuando el cultivo no fue regado, mientras que con la aplicación de agua llegó a duplicar o triplicar la absorción dependiendo de la dosis aplicada (Sifola y Postglione 2003). Similares resultados se observaron para tabaco Virginia, donde la absorción de N en hoja se duplicó para los diferentes tratamientos de riego en comparación con el testigo no regado (Tso 1990).

La absorción de K en hoja presentó la misma tendencia que el N, siendo sus valores superiores en aquellas plantas fertilizadas y con disponibilidad hídrica

media, mientras que el contenido de K en tallo y raíz se vio reducido. Resultados similares de absorción de K en hoja fueron observados en un ensayo desarrollado en Irán, donde el aumento de la disponibilidad hídrica incrementó la cantidad de K absorbido. Esto se explica porque una disminución en el agua del suelo reduce la tasa de difusión del K y por lo tanto su absorción (Salehzade *et al* 2009).

La absorción de P en hoja fue mayor para los niveles hídricos cercanos al umbral, al fertilizar la absorción se incrementó en 1,5 veces. La menor absorción observada en los niveles con menores contenidos hídricos pudo deberse a la disminución de la disponibilidad de P en razón de la formación de fosfatos de Ca (Brady y Weil, 2002). La disponibilidad de P es máxima a pH 7 y comienza a reducirse a medida que el pH va aumentando. Nuestros datos corresponden a valores de pH cercanos 7,8 y 8 para ambos suelos en correspondencia con la presencia de carbonatos de Ca y Mg.

5.6. Conclusiones del capítulo

Los resultados obtenidos en esta tesis conducen al rechazo de la hipótesis planteada. La respuesta del cultivo a la aplicación del fertilizante no dependió del nivel de MO para ninguno de los 2 niveles de humedad estudiados ya que no se detectó interacción entre los factores: nivel de MO del suelo, fertilización y disponibilidad hídrica.

Independientemente del nivel de MO se observó que el nivel de disponibilidad hídrica en combinación con la fertilización incrementó el crecimiento de la planta, la producción de MS y la absorción de N, P y K en hoja.

Los resultados obtenidos muestran que las dosis de nutrientes ajustadas en base a un modelo de fertilización calculado en función de la características del suelo y en combinación con un riego suficiente y sincronizado con el ciclo del cultivo permitieron incrementar la producción de MS en un 40%, demostrando que efectivamente existe un potencial para mejorar el aprovechamiento de los recursos hídricos y nutricionales en los lotes tabacaleros de los pequeños productores de Chicoana.

CAPITULO 6

CONCLUSIONES GENERALES

La información generada en esta tesis representa un aporte al diagnóstico de la eficiencia en el uso de los nutrientes y el agua en los lotes de pequeños productores tabacaleros de la zona de Chicoana (Salta) demostrando que la fertilización en base a un modelo calibrado para la zona permite optimizar el uso de ambos recursos aún en condiciones restringidas de humedad.

El aporte original de la tesis radica en la cuantificación de la magnitud de los destinos de los nutrientes aplicados con la fertilización (N-P-K) determinada a partir de balances en el sistema suelo-planta confeccionados con datos tomados a campo. Estos datos permitieron detectar excedentes de nutrientes que fueron relacionados con la producción de materia seca. Asimismo, se realizaron estudios de la dinámica del agua que permitieron vincular el aprovechamiento de los nutrientes con la disponibilidad de agua para el tabaco en diferentes momentos del ciclo. Los resultados derivados del análisis de los nutrientes y del agua permitieron establecer que el aprovechamiento de dichos recursos podía ser optimizado. Con tal fin, se realizó el ajuste de la fertilización NPK bajo dos niveles de humedad en base a datos tomados en condiciones de invernáculo.

Los valores de materia seca medidos en planta entera al fin del ciclo en los lotes fertilizados mostraron un rango muy amplio permitiendo establecer dos grupos (alta y baja producción). Dichos valores son similares a los informados en estudios realizados en la zona (Suarez 2006). Sin embargo, resultaron un 50 % inferiores a los obtenidos por Ballari (2005) en condiciones de cultivo sin limitaciones hídricas ni nutricionales. En consecuencia, los datos reportados en esta tesis permiten establecer que, aunque la oferta nutricional es la adecuada teniendo en consideración los niveles iniciales de NPK en suelo, existiría un potencial de rendimiento que aún no está siendo alcanzado.

Con el fin de establecer las posibles limitaciones al aprovechamiento de los nutrientes se cuantificaron los niveles de absorción de los mismos en los diferentes órganos de la planta, los cuales fueron comparados con los disponibles en el suelo. Este análisis puso en evidencia que los niveles de nutrientes disponibles (suelo+fertilizante) fueron superiores a los niveles absorbidos por la planta generándose excedentes de N, P y K en el suelo, independientemente del grupo productivo. El N absorbido representó aproximadamente el 50% del N disponible en el suelo cuando se midieron los pools de N del sistema suelo planta. Estos resultados sugieren que la dosis de fertilización nitrogenada fue excesiva en razón de la subestimación del aporte del suelo por mineralización ya que dicho cálculo probablemente esté siendo establecido por los productores sólo en función del requerimiento del cultivo. Con respecto al K los niveles absorbidos por el tabaco también resultaron bajos en comparación con la cantidad de K disponible en el suelo que, por otra parte, fue elevada en virtud de la abundancia de K proveniente del material original del suelo. Del mismo modo que para el N, se observó un balance en exceso para el K al finalizar el ciclo del cultivo que puede ser explicado por la subestimación de la oferta de K del suelo ya que el mismo se clasifica como un suelo con “disponibilidad de K buena a alta”. Al igual

que para el N y el K, el estudio de los destinos del P permitió confirmar que la dosis de P aplicada resultó excesiva ya que subestimó el nivel de P disponible en el suelo al inicio del cultivo. Estos resultados confirmaron limitaciones en la absorción de los tres nutrientes disponibles ya que siendo requeridos por la planta no fueron absorbidos en los niveles que corresponden a un nivel de materia seca total acorde a la oferta nutricional.

El estudio de la partición de la materia seca aportó información que permite interpretar las limitaciones a la absorción de los nutrientes. En base al mismo, se evidenció el escaso desarrollo radicular alcanzado por las plantas en ambos grupos productivos, ya que la proporción de raíces respecto de la planta entera no superó el 10%, siendo el valor de referencia que se informa en la bibliografía del 25% aproximadamente (Boshoff 2006, Moustakas y Ntzanis 2005). Estos resultados pueden atribuirse a impedancias en el suelo causadas por el deterioro físico asociado a laboreo excesivo.

El estudio de la dinámica del agua permitió establecer que la disponibilidad hídrica del suelo antes del inicio del período de precipitaciones fue baja y los riegos aplicados no resultaron suficientes para reponer el agua en el perfil a niveles de capacidad de campo, razón por la cual se considera que el riego en Chicoana es de tipo deficitario.

La ETaj (Evapotranspiración ajustada a condiciones de estrés hídrico) estimada a partir de los niveles de humedad registrados fue inferior a la máxima calculada por el método de Penman Monteith. Esta disminución en la evapotranspiración se reflejó en una disminución en el rendimiento del cultivo, 30% aproximadamente, independientemente del grupo productivo, siendo el momento de activo crecimiento el más afectado.

En un análisis integrado surgió el interrogante ¿los niveles de humedad de suelo están condicionando la absorción de nutrientes motivando la generación de excedentes?. Dado que la fertilización de base del cultivo se realiza al trasplante y el repique a los 45 DDT, los datos sugieren que los bajos niveles hídricos observados restringieron la absorción de nutrientes en las primeras etapas del cultivo.

Teniendo en cuenta que los riegos realizados en la zona dependen exclusivamente de los caudales disponibles en los ríos y éstos son de régimen estival, es factible pensar que si se mantiene la superficie cultivada con tabaco, es poco probable que los niveles de humedad del suelo en el período de estiaje sean incrementados. Es por ello que se planteó un experimento en condiciones controladas, en el cual se evaluó la respuesta del cultivo a un modelo de fertilización bajo dos niveles bajos de humedad (menores al óptimo) y con dos suelos con diferentes contenido de materia orgánica. Este experimento permitió establecer la incidencia del nivel de humedad del suelo en la respuesta a la fertilización calculada de acuerdo a un modelo desarrollado para la zona. Este incremento fue de un 50% cuando la humedad del suelo se equiparó al nivel del umbral de la lámina fácilmente utilizable. Esta misma tendencia se observó en la absorción de N, P y K en hoja, siendo este efecto del agua también informado en otras investigaciones (Sifola y Postiglione 2003, Salehzade *et al.* 2009).

La incidencia de la humedad sobre la respuesta a la fertilización no fue condicionada por el nivel original de materia orgánica del suelo. Esto puede deberse a que si bien los suelos seleccionados pertenecieron a dos grupos de suelo con diferente nivel de MO, dicha diferencia no fuera lo suficientemente amplia como para incidir en los valores de retención de humedad a contenidos hídricos bajos. Con respecto a la fertilización y a la disponibilidad hídrica, las plantas fertilizadas absorbieron más N en hojas que las no fertilizadas, mientras que la mayor absorción de P se observó en las plantas con mayores niveles de humedad. En el caso del K la mayor absorción se observó en plantas fertilizadas niveles de humedad superiores. La altura de la planta se diferenció significativamente cuando los niveles de disponibilidad hídrica fueron más altos, mientras que el número de hojas también se vio favorecido para este nivel pero con el aporte de la fertilización.

La relevancia de la información que se brinda en esta tesis radica en que pudo comprobarse la ineficiencia del uso de los nutrientes a través de la observación de excedentes que se producen con el manejo actual de la fertilización que se realiza en Chicoana. Asimismo, fue posible detectar un bajo aprovechamiento de los nutrientes que pudo ser explicado por la baja disponibilidad hídrica en los primeros momentos del ciclo. El experimento en condiciones controladas permitió comprobar que, aún manteniendo los niveles de humedad en condiciones de estrés, si se utilizan dosis de nutrientes más bajas puede obtenerse un incremento en la producción de MS de hoja. Es por ello, que el mejoramiento en la oferta de agua optimizaría el uso de los nutrientes especialmente si estos son aplicados en las dosis que indica el modelo calibrado para la zona.

PERSPECTIVAS FUTURAS

Los avances realizados con esta tesis permitieron establecer que el aprovechamiento de los nutrientes y el agua dista de ser el óptimo en razón de los excedentes de nutrientes medidos y la deficiencia hídrica observada.

A futuro se deberían considerar diferentes umbrales hídricos y evaluar las eficiencias de riego tales como la de almacenaje y distribución.

Considerando el escaso desarrollo radicular y la práctica de monocultivo es recomendable el estudio de las propiedades físicas del suelo y la práctica de diferentes manejos para su recuperación.

En esta tesis se evidenció tanto la falta de curvas de mineralización y de retención hídrica como de umbrales de respuesta a la fertilización determinados para lotes tabacaleros de la zona.

Debido a que en el balance de N se detectaron pérdidas de este nutriente sería importante cuantificar la lixiviación de nitratos, teniendo en cuenta el impacto ambiental que puede acarrear. Dicha información permitirá disminuir las dosis de fertilizantes usadas, contribuyendo indirectamente a mejorar la economía del sector.

BIBLIOGRAFÍA

- Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M (2006) `Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos.` (FAO 56: Roma)
- Alvarez R, Steinbach HS, Alvarez CR y Grigera S (2003) Recomendaciones para la fertilización nitrogenada de trigo y maíz en la Pampa Ondulada. Informaciones Agronómicas del Cono Sur N° 18, Argentina.
- Alvarez R, Steinbach HS, Lavado RS, Gutiérrez Boem FH (2006) `Materia Orgánica. Valor agronómico y dinámica en suelos Pampeanos.` (Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires: Buenos Aires)
- Arias JA (1984) Desflore y desbrote. *Panorama Agropecuario* **25**, 22-23.
- Arias M, Bianchi AR (1996) `Estadísticas Climatológicas de la Provincia de Salta.` (Dirección de Medio Ambiente y Recursos Naturales Provincia de Salta e INTA EEA Salta: Salta, Argentina)
- Azcón-Bieto J, Talón M. (2000) `Fundamentos de Fisiología Vegetal` (McGraw-Hill Interamericana, Madrid)
- Ballari MH (2005) `Tabaco Virginia aspectos ecofisiológicos y de la nutrición en condiciones de cultivo.` (Ed MH Ballari: Argentina)
- Bianchi AR (1996) `Temperaturas medias estimadas para la región noroeste de Argentina.` (SAGPyA-INTA:Salta, Argentina)
- Bianchi AR, Yáñez CE (1992) `Las Precipitaciones en el Noroeste Argentino.` Segunda Edición. (SAGPyA-INTA: Salta, Argentina)
- Biglouei MH, Assimi MH, Akbarzadeh A (2010) Influence of Different Levels of Soil Moisture on Yield and Quality Characteristics of Coker (flue-cured) Tobacco. *ProEnvironment* **3**, 89-99.
- Blanco LE, Yáñez CE, Quiroga I (1989) Riego en tabaco Virginia. INTA Estación Experimental Salta. Informe Final del Plan de Trabajo N° 07:2165, Argentina.
- Boshoff HJ (2006) Yield and nutrient uptake of flue-cured tobacco in South Africa. CORESTA Congress, Paris. Abstract.
- Bozhinova RP (2006) Coefficients for determination of the leaf area in three burley tobacco varieties. *Journal of Central European Agriculture* **7** (1), 7-12.
- Brady N and Wail RR (2002) `Nature and property of soils` (Mc Millan: N York)
- Brueck H, Senbayram M (2009) Low nitrogen supply decreases water-use efficiency of oriental tobacco. *J Plant Nutr. Soil Sci* **172**, 216-223.
- Çakir R, Çebi U (2006) Growth and dry matter accumulation dynamics of Flue-Cured Tobacco under different soil moisture regimes. *Journal of Agronomy* **5**(1), 79-86.

- Çakir R, Cebi U (2009) Yield, water use and yield response factor of flue-cured tobacco under different levels of water supply at various growth stages. *Irrigation and Drainage*, **59** (4), 453-464.
- Ceotto E, Castelli F (2002) Radiation-use efficiency in flue cured tobacco (*Nicotiana Tabacum* L.): response to nitrogen supply, climatic variability and sink limitations. *Field Crops Research* **74**, 117-130.
- Chambouleyron J (2005) 'Riego y drenaje. Técnicas para el desarrollo de una agricultura regadía sustentable.' (EDIUNC Editorial de la Universidad Nacional de Cuyo: Mendoza)
- Chapman HD, Pratt PF (1973) 'Métodos de análisis para suelos, plantas y aguas.' (Ed. Trillos: Méjico)
- Chouteau J, Fauconnier D (1993) Fertilizando para alta calidad y rendimiento. Tabaco. Instituto Internacional de la Potasa. Boletín No. 11, Suiza.
- Costa JL, Massone H, Martínez D, Suero EE, Vidal CM, Bedmar F (2002) Nitrate contamination of a rural aquifer and acumulation in the unsaturated zone. *Agricultural Water Management* **57**, 33-47.
- Doorembos J, Kassam AH (1979) 'Yield response to water.' (FAO 33: Roma)
- Edwards PB (2005) The effect of management practices on grade distribution in flue-cured tobacco. MSc Thesis, North Carolina State University, EEUU
- Fernández de Ullivarri D (1990) El cultivo de tabacos claros . Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Centro Regional Salta – Jujuy, Manual No. 1, Argentina.
- Figueroa P (1984) Análisis de suelos y fertilización. *Panorama Agropecuario* **25**, 10-13.
- Galli J (2010) 'Guía práctica para el manejo en almácigos flotantes de tabaco' (INTA, CR Salta-Jujuy, EEA Salta)
- Gil RC, Boca T, Lupi AM (2006) Propuesta de trabajo para la determinación de densidad aparente en suelos pedregosos. INTA – Centro de Investigación en Recursos Naturales Instituto Suelos.
- Giménez Monge JL, Mercado Cárdenas G, Lacci F, Ortega A, Arzeno JL (2009) Un enfoque integral del amarillamiento en el tabaco. *Panorama Agropecuario* **52**, 3-7.
- González Martín JA (2001) La hoja de tabaco y su consumo. *Prevención del Tabaquismo*. **3** (4):257-261.
- Hawks SN, Collins WK (1986) 'Tabaco flue-cured. Principios básicos de su cultivo y curado.' Versión española de H Perez Carbonell y E Cabrera Martínez. Secretaría General Técnica. (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación: Madrid)
- Hudson BD (1994) Soil organic matter and available water capacity. *Journal of Soil and Water Conservation*, **49** (2), 189-194.

- InfoStat (2008). InfoStat versión 2008. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Jauregui MA (1973) Caracterización de la fertilidad potásica en algunos suelos tabacaleros del Valle de Lerma, Salta. Magister Scientiae Tesis, Escuela para graduados en Ciencias Agrarias, Argentina.
- Karaivazolou NA, Papakosta DK, Divanidis S (2005) Effect of chloride in irrigation water and form of nitrogen fertilizer on Virginia (flue-cured) tobacco. *Field Crop Research* **92**, 61-74.
- Lal R, Shukla MK (2004) 'Principles of soil physics.' (Marcel Dekker: New York) 716pp.
- Marchetti R, Castelli F, Contillo R (2006) Nitrogen Requirements for Flue-Cured Tobacco. *Agronomy Journal* **98**, 666-674.
- Maw BW, Stansell JR, Mullinix BG (1997) Soil-Plant-Water Relationships for Flue-cured Tobacco. University of Georgia, Research Bulletin of the Georgia Agricultural Experimental Station, No. 427, EEUU.
- Maw BW, Stansell JR, Mullinix BG (2009) Soil-Plant-Water Relationships for Flue-cured Tobacco. University of Georgia. College of Agriculture and Environmental Sciences, Research Bulletin No. 427.
- Mc Daniel CN (1996) Developmental physiology of floral initiation in *Nicotiana tabacum* L. *Journal of Experimental Botany* Vol. **47** (297), 465-475.
- McCants CB and Wolt WG (1967) Growth and mineral nutrition of tobacco. *Advances in Agronomy* **19**, 211-265.
- Militello E (1980) Desflore y desbrote (tabaco). *Panorama Agropecuario* **8**,10-13
- Miralles DJ, Windauer LB y Gomez NV (2003) Factores que regulan el desarrollo de los cultivos de granos. En 'PRODUCCIÓN DE GRANOS. Bases funcionales para su manejo'. (Eds E Satorre, R Benech-Arnold, GA Slafer, E de la Fuente, D Miralles y ME Otegui, R Savín) pp. 61-74 (Facultad de Agronomía Universidad de Buenos Aires: Argentina).
- Monteith JL (1972) Solar Radiation and Productivity in Tropical Ecosystems. *The Journal of Applied Ecology* **9** (3): 747-766.
- Moustakas NK, Ntzanis H (2005) Dry matter accumulation and nutrient uptake in flue-cured tobacco (*Nicotiana tabacum* L.). *Field Crops Research* **94** (1): 1-13.
- Nadir A, Chafatinos T (1990) 'Los Suelos del NOA (Salta y Jujuy)'. (INTA-UNSa: Salta, Argentina) Disponible en: <http://www.inta.gov.ar/prorenea/info/suelos.htm>
- Nadir A, Osinaga R, Zapater MA, Mattalia MC (2004) Diagnóstico para el programa de desarrollo para pequeños productores tabacaleros. Administración Fondo especial del tabaco, Secretaría de la producción. Salta, Argentina. 80 pp.
- Ortega A (2007) Absorción de macronutrientes y acumulación de materia seca de tabaco tipo virginia en el Valle de Lerma (Salta). INTA EEA Salta. 7 pág.

- Ortega AE (2010) Ecofisiología della produzione vivaistica di solanacee in fuori suolo. Tesi di Dottorato, Università Degli Studi Di Padova, L'Italia.
- Pierik R, Voeselek L, Kroon H, Visser EJW (2004) Density – Induced Plant Size Reduction and Size Inequalities en Ethylene – Sensing and Ethylene – Insensitive Tobacco. *Plant Biology* **6**, 201-205.
- Quiroga IR, Corvalán ER (1988) Análisis químico de suelos y de aguas. 1º Curso para auxiliares de laboratorio – Zona Norte. EEA Salta
- Ranjbar R, Taghavi R (2006) Determination of maximum allowable depletion fraction in different stages of growth for Oriental tobacco, variety B.S.31. CORESTA Congress, Paris, 2006, Agronomy/Phytopathology Groups, abstr. APOST23
- Rodriguez MB (2008) Fertilidad del suelo y nutrición de las plantas. En `Fertilización de cultivos y pasturas. 2ª edición ampliada y actualizada´. (Eds R Melgar y M Díaz Zorita) pp. 37-49. (Hemisferio Sur: Argentina)
- SAGPyA (2010) http://www.sagpya.mecon.gov.ar/scripts/tab_pcia.idc Visitado el 8/11/2010.
- Salehzade H, Mogaddam AF, Bernosi I, Ghiyasi M, Amini P (2009) The effect of irrigation regimes on yield and chemicals quality of oriental tobacco in West Azerbaijan. *Biological Sciences* **4** (5), 632-636.
- Sifola MI (2010) Yield response and nitrogen accumulation of furrow-irrigated Burley tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) under deficit irrigation. *Agrochimica*, LIV(1), 13-24
- Sifola MI, Postiglione L (2002) The effect of increasing NaCl in irrigation water on growth, gas exchange and yield of tobacco Burley type. *Field Crops Research* **74**, 81-91.
- Sifola MI, Postiglione L (2003) The effect of nitrogen fertilization on nitrogen use efficiency of irrigated and non-irrigated tobacco (*Nicotiana tabacum* L.). *Plant and Soil* **252**, 313-323.
- Soil Survey Staff (2006) Departamento de Agricultura de los Estados Unidos Servicio de Conservación de Recursos Naturales. Claves para la Taxonomía de Suelos. Décima Edición.
- Suarez M, Ortega A (2006) Comportamiento de la formulación líquida de fertilizantes en dos manejos de cultivo de tabaco. *INPOFOS Informaciones Agronómicas* **32**, 16-18
- Tso TC (1990) `Production, Physiology, and Biochemistry of Tobacco Plant´ (Institute of International Development & Education in Agricultural and Life Sciences: Maryland, USA)
- Vargas Gil JR (1999) `Carta de Suelo de la República Argentina Provincia de Salta. Valle de Lerma. Hoja 7-Cerrillos.´ (INTA: Salta, Argentina)
- Wilkinson WC, Fisher LR, Smith WD, Jordan DL (2007/2008) Effects of stand loss, planting date, and replanting method on yield and quality of flue-cured tobacco. *Tobacco Science* **47**, 44-52.

Yañez CE (1984) Riego. *Panorama Agropecuario* **25**, 18-21.

Yañez CE (2002) `Necesidades de Agua y Riego para 20 localidades de Salta y Jujuy.´ Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Versión digital.

ANEXO 1**Densidad aparente: método de la excavación (Gil 2005)**

Se hace un pozo de aproximadamente 30 cm de diámetro por 10 cm de profundidad. El suelo extraído se pesa y se registra el peso del suelo más las piedras (S+P) (Foto 1).



Foto 1. Pozo de 30cm de diámetro para la extracción de suelo y piedras

El pozo es recubierto con un film de polietileno fino y se agrega un volumen de agua necesario para enrasar el hoyo (V_t) (Foto 2). Del suelo extraído se toma una pequeña muestra representativa para determinar la humedad, y expresar luego el peso en base seca.



Foto 2. Enrase del pozo con volumen de agua conocido

Peso, Volumen y densidad de la fracción gruesa.

El suelo es tamizado y los fragmentos > 2 mm son lavados, secados y pesados. Considerando una densidad de partícula de 2,65 g/cm³, es posible calcular el volumen ocupado por los mismos:

$$\text{Vol (cm}^3\text{)} = \text{Masa (gr)} / 2,65 \text{ (gr/cm}^3\text{)} \quad [1]$$

Cálculos de la densidad aparente global y densidad de la fracción fina

La densidad aparente global (DAG) es la masa total del suelo seco en relación al volumen que ocupa manteniendo su ordenamiento estructural original.

$$\text{DAG} = \frac{\text{Mst}}{\text{Vt}} \quad \text{y} \quad \text{Mst} = \text{Ms} + \text{Mp} \quad [2]$$

Donde:

MS: masa del suelo

Mp: masa de las piedras

Vt: volumen total.

La densidad aparente de la fracción fina del suelo (DAF) se puede calcular a partir de:

$$\text{DAG} = \frac{\text{Mst}}{\text{Vt}} \quad \text{donde} \quad \text{Ms} = \text{Mst} - \text{Mp} \quad \text{y} \quad \text{Vs} = \text{Vt} - \text{Vp} \quad [3]$$

El volumen de las piedras (Vp) puede estimarse como:

$$\text{Vp} = \frac{\text{Mp}}{2,65} \quad [4]$$

Finalmente la densidad de la fracción fina se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$\text{DAF} = \frac{\text{Ms}}{\text{Vt} - \frac{\text{Mp}}{2,65}} \quad [5]$$

ANEXO 2

ANOVA (análisis de varianza) de materia seca (MS), nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) para hojas y tallo+raíz afectadas por el nivel inicial de materia orgánica del suelo (MO), fertilización y disponibilidad hídrica

	MS	N	P	K
HOJA				
Modelo	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Carbono del suelo	0,0359	0,018	0,6001	0,0171
Humedad	<0,0001	0,0001	<0,0001	<0,0001
Fertilización	<0,0001	0,0005	0,0005	<0,0001
Bloque	0,7982	<0,0001	0,0201	0,9702
Suelo*Humedad	0,5685	0,9401	0,1686	0,6049
Suelo*Fertilización	0,6256	0,3879	0,5012	0,9745
Humedad*Fertilización	<0,0001	0,0637	0,0033	<0,0001
Suelo*Humedad*Fertilización	0,8176	0,9979	0,6938	0,6189
TALLO+RAÍZ				
Modelo	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Carbono del suelo	0,5836	0,0783	0,2837	0,6557
Humedad	<0,0001	0,0081	0,0001	0,0054
Fertilización	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Bloque	0,2438	0,0001	0,126	0,2615
Suelo*Humedad	0,6788	0,5778	0,1965	0,6269
Suelo*Fertilización	0,0377	0,0935	0,045	0,0616
Humedad*Fertilización	<0,0001	0,0585	0,086	<0,0001
Suelo*Humedad*Fertilización	0,3725	0,9807	0,1275	0,5593