



UNIVERSIDAD DE LA RIOJA

TESIS DOCTORAL

Título
Evaluación de medidas de nitrógeno en planta para su uso como sistema de recomendación de abonado nitrogenado en el cultivo de coliflor
Autor/es
Luis Rivacoba Gómez
Director/es
Alfonso Pardo Iglesias
Facultad
Facultad de Ciencia y Tecnología
Titulación
Departamento
Agricultura y Alimentación
Curso Académico



Evaluación de medidas de nitrógeno en planta para su uso como sistema de recomendación de abonado nitrogenado en el cultivo de coliflor, tesis doctoral de Luis Rivacoba Gómez, dirigida por Alfonso Pardo Iglesias (publicada por la Universidad de La Rioja), se difunde bajo una Licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 3.0 Unported. Permisos que vayan más allá de lo cubierto por esta licencia pueden solicitarse a los titulares del copyright.

© El autor
© Universidad de La Rioja, Servicio de Publicaciones, 2016
publicaciones.unirioja.es
E-mail: publicaciones@unirioja.es

Departamento de Agricultura y Alimentación

Universidad de La Rioja



Evaluación de medidas de nitrógeno en planta para su uso como sistema de recomendación de abonado nitrogenado en el cultivo de coliflor



Luis Rivacoba Gómez

Mayo 2016



Departamento de Agricultura y Alimentación
Universidad de La Rioja

**Evaluación de medidas de nitrógeno en planta
para su uso como sistema de recomendación de
abonado nitrogenado en el cultivo de coliflor**

Memoria presentada en el Departamento de Agricultura y Alimentación de la Universidad de La Rioja por D. Luis Rivacoba Gómez para optar al Grado de Doctor por la Universidad de La Rioja.

Director: Dr. Alfonso Pardo Iglesias

Jefe de la sección de Recursos Naturales del Servicio de Investigación y Desarrollo Tecnológico Agroalimentario del Gobierno de La Rioja.

Mayo 2016

ALFONSO PARDO IGLESIAS, Doctor Ingeniero Agrónomo y Jefe de la Sección de Recursos Naturales del Servicio de Investigación y Desarrollo Tecnológico Agroalimentario del Gobierno de La Rioja,

CERTIFICA,

Que el trabajo presentado por LUIS RIVACOBÁ GÓMEZ, Ingeniero Agrónomo por la Universidad Pública de Navarra, constituye un trabajo original de investigación y que ha sido realizado bajo mi dirección.

Puesto que el mismo cumple con la normativa vigente en materia de Doctorado, autorizo su presentación.

Logroño, 6 de mayo de 2016

Fdo. Dr. Alfonso Pardo Iglesias

A mis padres,

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	21
RESUMEN	22
1. Introducción	27
1.1. Cultivo de la coliflor.....	28
1.2. Sistemas de recomendación del abonado nitrogenado	31
1.3. Situación actual.....	44
2. Objetivos	47
3. Material y métodos	51
3.1. Ensayos de fertilización nitrogenada de coliflor de la variedad Barcelona	51
3.1.1. Año 2012	51
Localización y condiciones iniciales	51
Diseño experimental	52
Muestreos y determinaciones	53
3.1.2. Año 2013	58
Localización y condiciones iniciales	58
Diseño experimental	59
Muestreos y determinaciones	60
3.1.3. Año 2014	61
Localización y condiciones iniciales	61
Diseño experimental	61
Muestreos y determinaciones	62
3.2. Ensayos de fertilización nitrogenada de coliflor de la variedad Typical	63
3.2.1. Año 2013	64
Localización y condiciones iniciales	64
Diseño experimental	64
Muestreos y determinaciones	65
3.2.2. Año 2014	66
Localización y condiciones iniciales	66
Diseño experimental	67
Muestreos y determinaciones	68
3.3. Ensayos de fertilización nitrogenada de la variedad Casper de coliflor	69
3.3.1. Año 2012	69
Localización y condiciones iniciales	69
Diseño experimental	69
Muestreos y determinaciones	70
3.3.2. Año 2014	71
Localización y condiciones iniciales	71
Diseño experimental	71

Muestreos y determinaciones	73
4. Resultados	77
4.1. Año 2012. Var. Barcelona	77
4.2. Año 2013. Var. Barcelona	86
4.3. Año 2014. Var. Barcelona	96
4.4. Año 2013. Var. Typical	106
4.5. Año 2014 var. Typical	115
4.6. Año 2012. Var. Casper	122
4.7. Año 2014. Var. Casper	125
5. Discusión	137
5.1. Cosecha y umbral de fertilización	137
5.2. Nitrógeno en planta	137
5.3. Nitrógeno en el suelo	140
5.4. Mineralización	141
5.5. Balances de nitrógeno	141
5.6. Sensor SPAD	142
5.7. Sensor DUALEX	143
5.7.1. Curva crítica NBI de Dualex	145
5.8. Sensor MULTIPLEX	152
5.8.1. Curva crítica Multiplex	154
5.9. Sensor CROP CIRCLE	161
5.10. Nitrato en savia	166
5.10.1. Curva crítica N-NO ₃ ⁻ en savia	167
6. Conclusiones	179
7. Referencias bibliográficas	183
8. Anejos	205

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Espectro electromagnético. Longitud de onda expresada en μm . Fuente: Hoffer (1978).	37
Figura 2. Ejemplos de espectros de reflectancia de una planta sana y de una planta estresada.	38
Figura 3. Diseño experimental y distribución de los tratamientos en función del nitrógeno mineral disponible ($N_{\text{min}}+N_{\text{fertilizante}}$) en el experimento de 2012 con la var. Barcelona. $N_{\text{disponible}}$ (kgN/ha): T1: 93; T2: 189; T3: 270; T4: 322. Las líneas y círculos azules indican la red de aspersores.	52
Figura 4. Nitrógeno total en hoja (%) y biomasa (Mg/ha) de plantas de coliflor var. Barcelona en los ensayos de 2012, 2013 y 2014. Líneas correspondientes a los modelos de nitrógeno crítico general de Greenwood (1986), de Brassica (Greenwood (1996) y EU-Rotate (Rahn et al., 2010a y 2010b). Deficitario: tratamientos y repeticiones cuyo nitrógeno disponible está por debajo de los niveles considerados como recomendables en la literatura y en el propio diseño experimental. Valores de biomasa superiores a 1 Mg/ha	55
Figura 5. Diseño experimental y distribución de los tratamientos de nitrógeno mineral disponible en la parcela del experimento de 2013 con la var. Barcelona. $N_{\text{disponible}}$ (kgN/ha): T1: 67; T2: 130; T3: 193; T4: 260. Las líneas y círculos azules indican la red de aspersores. Las áreas verdes indican pasillos.	59
Figura 6. Diseño experimental y distribución de los tratamientos de nitrógeno mineral disponible en la parcela del experimento de 2014 con la var. Barcelona. $N_{\text{disponible}}$ (kgN/ha): T1: 72; T2: 130; T3: 190; T4: 260. Las líneas y círculos azules indican la red de aspersores. Las áreas verdes indican pasillos.	62
Figura 7. Diseño experimental y distribución de los tratamientos de nitrógeno mineral disponible en la parcela del experimento de 2013 con la var. Typical. $N_{\text{disponible}}$ (kgN/ha): T1: 84; T2: 130; T3: 190; T4: 260. Las líneas y círculos azules indican la red de aspersores. Las áreas verdes indican pasillos.	64
Figura 8. Diseño experimental y distribución de los tratamientos de nitrógeno mineral disponible en la parcela del experimento de 2014 con la var. Typical. $N_{\text{disponible}}$ (kgN/ha): T1: 95; T2: 170; T3: 230; T4: 300. Las líneas y círculos azules indican la red de aspersores. Las áreas verdes indican pasillos.	67
Figura 9. Diseño experimental y distribución de los tratamientos de nitrógeno mineral disponible en la parcela del experimento de 2012 con la var. Casper. $N_{\text{disponible}}$ (kgN/ha): T1: 259; T2: 359; T3: 432; T4: 524. Las líneas y círculos azules indican la red de aspersores.	70
Figura 10. Diseño experimental y distribución de los tratamientos de nitrógeno mineral disponible en la parcela del experimento de 2014 con la var. Casper. $N_{\text{disponible}}$ (kgN/ha): T1: 104; T2: 134; T3: 190; T4: 260. Las líneas y círculos azules indican la red de aspersores.	72
Figura 11. Producción total relativa de pellas de coliflor var. Barcelona, en función del nitrógeno mineral disponible en el suelo ($N_{\text{min}} + N_{\text{fertilizante}}$).....	78
Figura 12. Concentración del nitrógeno total (%) de coliflor var. Barcelona en hojas, a lo largo del cultivo en el año 2012. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 93; 189; 270 y 322 kg/ha de $N_{\text{disponible}}$	79
Figura 13. Concentración del nitrógeno total (%) de coliflor var. Barcelona en función de la biomasa (Mg/ha) en el año 2012. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 93; 189; 270 y 322 $\text{kg N disponible /ha}$. Se presenta la curva crítica del modelo de Greenwood (1986).	79
Figura 14. Nitrógeno mineral (N_{min}) en el suelo, de 0 a 60 cm, en un cultivo de coliflor var. Barcelona, en el año 2012, (A) 12 de agosto, en el momento del trasplante; (B) 1 de octubre, quince días después del abonado de cobertera y (C) 29 de octubre, al finalizar la cosecha. ...	80
Figura 15. Concentración de N-NO_3^- (ppm) en savia, en hojas de coliflor var. Barcelona en los diferentes tratamientos. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 93; 189; 270 y 322 $\text{kg N disponible /ha}$. Las barras verticales indican el error estándar.	80

Figura 16. Contenido de clorofila en hojas de coliflor var. Barcelona, unidades SPAD, en los diferentes tratamientos. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 93; 189; 270 y 322 kg N disponible /ha. Las barras verticales indican el error estándar.	81
Figura 17. Índice Chl de Dualex, en hojas de coliflor var. Barcelona en los diferentes tratamientos de nitrógeno disponible. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 93; 189; 270 y 322 kg N disponible /ha. Las barras verticales indican el error estándar.	82
Figura 18. Índice de balance de nitrógeno NBI de Dualex, en hojas de coliflor var. Barcelona en los diferentes tratamientos de nitrógeno disponible. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 93; 189; 270 y 322 kg N disponible /ha. Las barras verticales indican el error estándar.	82
Figura 19. Índice SFR de Multiplex, en hojas de coliflor var. Barcelona, en los diferentes tratamientos de nitrógeno disponible. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 93; 189; 270 y 322 kg N disponible /ha. Las barras verticales indican el error estándar.	83
Figura 20. Índice NBI de Multiplex, en hojas de coliflor var. Barcelona, en los diferentes tratamientos de nitrógeno disponible. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 93; 189; 270 y 322 kg N disponible /ha. Las barras verticales indican el error estándar.	83
Figura 21. Mineralización (mg N-NO ₃ ⁻ /kg suelo seco) medida en resinas a 0,2 m de profundidad, en el ensayo de coliflor de la variedad Barcelona en 2012. Las barras verticales indican el error estándar.	84
Figura 22. Producción total relativa de pellas de coliflor var. Barcelona, en función del nitrógeno disponible en el suelo (Nmin + N fertilizante).	87
Figura 23. Concentración del nitrógeno total (%) de coliflor var. Barcelona en hojas, a lo largo del cultivo en el año 2013. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 67; 130; 193 y 260 kg N disponible /ha.	88
Figura 24. Concentración de nitrógeno total (%) en coliflor var. Barcelona en función de la biomasa (Mg/ha) en el año 2013. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 67; 130; 193 y 260 kg N disponible /ha. Se presenta la curva crítica del modelo de Greenwood 1986.	88
Figura 25. Nitrógeno mineral (Nmin) en el suelo (kgN/ha) de 0 a 60 cm de profundidad en la var. Barcelona, en el año 2013, (A) 5 de agosto, en el momento del trasplante, (B) 30 de septiembre, al inicio de formación de pellas y (C) 28 de octubre, al finalizar la cosecha.	89
Figura 26. Concentración de N-NO ₃ ⁻ (ppm) en savia, en hojas de coliflor var. Barcelona en los diferentes tratamientos. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 67; 130; 193 y 260 kg N disponible/ha. Las barras verticales indican el error estándar.	89
Figura 27. Contenido de clorofila en hojas de coliflor var. Barcelona, unidades SPAD, en los diferentes tratamientos. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 67; 130; 193 y 260 kg N disponible /ha. Las barras verticales indican el error estándar.	90
Figura 28. Índice Chl de Dualex, en hojas de coliflor var. Barcelona, en los diferentes tratamientos de nitrógeno disponible. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 67; 130; 193 y 260 kg N disponible /ha. Las barras verticales indican el error estándar.	91
Figura 29. Índice de balance de nitrógeno NBI de Dualex, en hojas de coliflor var. Barcelona, en los diferentes tratamientos de nitrógeno disponible. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 67; 130; 193 y 260 kg N disponible /ha. Las barras verticales indican el error estándar.	91
Figura 30. Índice SFR de Multiplex, en hojas de coliflor var. Barcelona, en los diferentes tratamientos de nitrógeno disponible. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 67; 130; 193 y 260 kg N disponible /ha. Las barras verticales indican el error estándar.	92
Figura 31. Índice de balance de nitrógeno NBI de Multiplex, en hojas de coliflor var. Barcelona, en los diferentes tratamientos de nitrógeno disponible. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 67; 130; 193 y 260 kg N disponible /ha. Las barras verticales indican el error estándar.	92
Figura 32. Índice NDRE de Crop Circle, en hojas de coliflor var. Barcelona, en los diferentes tratamientos de nitrógeno disponible. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 67; 130; 193 y 260 kg N disponible/ha. Las barras verticales indican el error estándar.	93

Figura 33. Índice NDVI de Crop Circle, en hojas de coliflor var. Barcelona, en los diferentes tratamientos de nitrógeno disponible. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 67; 130; 193 y 260 kg N disponible/ha. Las barras verticales indican el error estándar.	93
Figura 34. Mineralización (mg N/kg de suelo seco) medida en resinas a 0,2 m de profundidad, en el ensayo de coliflor de la variedad Barcelona en 2013, en el tratamiento T1 (67 kg N disponible/ha) y en el T4 (260 kg N disponible/ha). Las barras verticales indican el error estándar.	94
Figura 35. Producción total relativa de pellas de coliflor var. Barcelona, en función del nitrógeno disponible en el suelo (Nmin + N fertilizante).	97
Figura 36. Concentración del nitrógeno total (%) de coliflor var. Barcelona en hojas, a lo largo del cultivo en el año 2014. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 72; 130; 189 y 260 kg N disponible /ha.	97
Figura 37. Concentración de nitrógeno total (%) de coliflor var. Barcelona en función de la biomasa (Mg/ha) en el año 2014. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 72; 130; 189 y 260 kg N disponible /ha. Se presenta la curva crítica del modelo de Greenwood 1986.	98
Figura 38. Nitrógeno mineral (Nmin) en el suelo, de 0 a 60 cm, en la var. Barcelona, en el año 2014, (A) 5 de agosto, en el momento del trasplante, (B) 29 de septiembre, dieciocho días después del abonado y (C) 10 de noviembre, al finalizar la cosecha.	99
Figura 39. Concentración de N-NO_3^- (ppm) en savia, en hojas de coliflor var. Barcelona en los diferentes tratamientos. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 72; 130; 189 y 260 kg N disponible /ha. Las barras verticales indican el error estándar.	99
Figura 40. Contenido de clorofila en hojas de coliflor var. Barcelona, unidades SPAD, en los diferentes tratamientos. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 72; 130; 189 y 260 kg N disponible /ha. Las barras verticales indican el error estándar.	100
Figura 41. Índice Chl de Dualex, en coliflor cv. Barcelona, en los diferentes tratamientos de nitrógeno disponible. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 72; 130; 189 y 260 kg N disponible /ha. Las barras verticales indican el error estándar.	101
Figura 42. Índice NBI de Dualex, en coliflor cv. Barcelona, en los diferentes tratamientos de nitrógeno disponible. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 72; 130; 189 y 260 kg N disponible /ha. Las barras verticales indican el error estándar.	101
Figura 43. Índice SFR de Multiplex, en coliflor cv. Barcelona, en los diferentes tratamientos de nitrógeno disponible. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 72; 130; 189 y 260 kg N disponible /ha. Las barras verticales indican el error estándar.	102
Figura 44. Índice NBI de Multiplex, en coliflor cv. Barcelona, en los diferentes tratamientos de nitrógeno disponible. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 72; 130; 189 y 260 kg N disponible/ha. Las barras verticales indican el error estándar.	102
Figura 45. Índice NDRE de Crop Circle, en coliflor cv. Barcelona en los diferentes tratamientos de nitrógeno disponible. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 72; 130; 189 y 260 kg N disponible /ha. Las barras verticales indican el error estándar.	103
Figura 46. Índice NDVI de Crop Circle, en coliflor cv. Barcelona en los diferentes tratamientos de nitrógeno disponible. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 72; 130; 189 y 260 kg N disponible /ha. Las barras verticales indican el error estándar.	103
Figura 47. Mineralización (mg N/kg suelo seco) medida en resinas a 0,2 m de profundidad, en el ensayo de coliflor de la variedad Barcelona en 2014, en los tratamientos T1, T2, T3 y T4 con 72; 130; 189 y 260 kg N disponible /ha. Las barras verticales indican el error estándar.	104
Figura 48. Producción total relativa de pellas de coliflor var. Typical, en función del nitrógeno disponible en el suelo (Nmin + N fertilizante).	107
Figura 49. Concentración del nitrógeno total (%) de coliflor var. Typical en hojas, a lo largo del cultivo en el año 2013. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 84; 130; 190 y 260 kg N disponible /ha.	108

Figura 50. Concentración de nitrógeno total (%) en coliflor var. Typical en función de la biomasa (Mg/ha) en el año 2013. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 84; 130; 190 y 260 kg N disponible /ha. Se presenta la curva crítica del modelo de Greenwood 1986.	108
Figura 51. Nitrógeno mineral (Nmin) en el suelo, de 0 a 60 cm, en la var. Typical, en el año 2013, (A) 6 de agosto, en el momento del trasplante, (B) 16 de septiembre, quince días después del primer abonado y (C) 10 de marzo, al finalizar la cosecha.	109
Figura 52. Concentración de N-NO_3^- (ppm) en savia, en hojas de coliflor var. Typical en los diferentes tratamientos. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 84; 130; 190 y 260 kg N disponible /ha. Las barras verticales indican el error estándar.	109
Figura 53. Contenido de clorofila en hojas de coliflor var. Typical, unidades SPAD, en los diferentes tratamientos. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 84; 130; 190 y 260 kg N disponible /ha. Las barras verticales indican el error estándar.	110
Figura 54. Índice Chl de Dualex, en coliflor cv. Typical, en los diferentes tratamientos de nitrógeno disponible. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 84; 130; 190 y 260 kg N disponible /ha. Las barras verticales indican el error estándar.	111
Figura 55. Índice NBI de Dualex, en coliflor cv. Typical, en los diferentes tratamientos de nitrógeno disponible. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 84; 130; 190 y 260 kg N disponible /ha. Las barras verticales indican el error estándar.	111
Figura 56. Índice SFR de Multiplex, en coliflor cv. Typical, en los diferentes tratamientos de nitrógeno disponible. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 84; 130; 190 y 260 kg N disponible /ha. Las barras verticales indican el error estándar.	112
Figura 57. Índice NBI de Multiplex, en coliflor cv. Typical, en los diferentes tratamientos de nitrógeno disponible. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 84; 130; 190 y 260 kg N disponible /ha. Las barras verticales indican el error estándar.	112
Figura 58. Índice NDRE de Crop Circle, en coliflor cv. Typical, en los diferentes tratamientos de nitrógeno disponible. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 84; 130; 190 y 260 kg N disponible /ha. Las barras verticales indican el error estándar.	113
Figura 59. Índice NDVI de Crop Circle, en coliflor cv. Typical, en los diferentes tratamientos de nitrógeno disponible. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 84; 130; 190 y 260 kg N disponible /ha. Las barras verticales indican el error estándar.	113
Figura 60. Concentración del nitrógeno total (%) de coliflor var. Typical en hojas, a lo largo del cultivo en el año 2014. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 65; 130; 190 y 260 kg N disponible /ha.	116
Figura 61. Concentración de nitrógeno total (%) de coliflor var. Typical en función de la biomasa (Mg/ha) en el año 2014. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 65; 130; 190 y 260 kg N disponible /ha. Se presenta la curva crítica del modelo de Greenwood 1986.	116
Figura 62. Nitrógeno mineral (Nmin) en el suelo, de 0 a 60 cm, en la var. Typical, en el año 2014, (A) 6 de agosto, en el momento del trasplante, (B) 15 de septiembre, después del primer abonado, y (C) 28 de octubre, una vez iniciada la formación de pellas.	117
Figura 63. Concentración de N-NO_3^- (ppm) en savia, en hojas de coliflor var. Typical en los diferentes tratamientos. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 65; 130; 190 y 260 kg N disponible /ha. Las barras verticales indican el error estándar.	117
Figura 64. Contenido de clorofila en hojas de coliflor var. Typical, unidades SPAD, en los diferentes tratamientos. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 65; 130; 190 y 260 kg N disponible /ha. Las barras verticales indican el error estándar.	118
Figura 65. Índice Chl de Dualex en hojas de coliflor var. Typical, en los diferentes tratamientos de nitrógeno disponible. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 65; 130; 190 y 260 kg N disponible /ha. Las barras verticales indican el error estándar.	119
Figura 66. Índice de balance de nitrógeno NBI de Dualex en hojas de coliflor var. Typical, en los diferentes tratamientos de nitrógeno disponible. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 65; 130; 190 y 260 kg N disponible /ha. Las barras verticales indican el error estándar.	119

Figura 67. Índice SFR de Multiplex en hojas de coliflor var. Typical, en los diferentes tratamientos de nitrógeno disponible. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 65; 130; 190 y 260 kg N disponible /ha. Las barras verticales indican el error estándar.	120
Figura 68. Índice NBI de Multiplex en hojas de coliflor var. Typical, en los diferentes tratamientos de nitrógeno disponible. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 65; 130; 190 y 260 kg N disponible /ha. Las barras verticales indican el error estándar.	120
Figura 69. Índice NDRE de Crop Circle en un cultivo de coliflor var. Typical, en los diferentes tratamientos de nitrógeno disponible. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 65; 130; 190 y 260 kg N disponible /ha. Las barras verticales indican el error estándar.	121
Figura 70. Índice NDVI de Crop Circle en un cultivo de coliflor var. Typical, en los diferentes tratamientos de nitrógeno disponible. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 65; 130; 190 y 260 kg N disponible /ha. Las barras verticales indican el error estándar.	121
Figura 71. Evolución de la concentración de nitrógeno (%) en planta de coliflor var. Casper en función del Nmin disponible en el suelo. T1: 259 kgN/ha; T2: 359 kgN/ha; T3: 432 kgN/ha; T4: 524 kgN/ha.	122
Figura 72. Nitrógeno mineral (Nmin) en el suelo, de 0 a 60 cm, en un cultivo de coliflor var. Casper, en el año 2012, (A) 23 de julio, en el momento del trasplante, (B) 3 de octubre, 26 días después del abonado de cobertera e inicio de la recolección y (C) 12 de noviembre, al finalizar la cosecha.	123
Figura 73. Concentración de N-NO_3^- (ppm) en savia, en hojas de coliflor var. Casper en los diferentes tratamientos en función del nitrógeno disponible en el suelo. T1: 259 kgN/ha; T2: 359 kgN/ha; T3: 432 kgN/ha. Las barras verticales indican el error estándar.	124
Figura 74. Producción total relativa de pellas de coliflor var. Casper 2014, en función del nitrógeno mineral disponible en el suelo (Nmin + N fertilizante).	126
Figura 75. Concentración de nitrógeno total (%) de coliflor var. Casper a lo largo del cultivo en el año 2014. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 104; 134; 190 y 260 kg N disponible /ha.	127
Figura 76. Concentración de nitrógeno total (%) de coliflor var. Casper en función de la biomasa (Mg/ha) en el año 2014. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 104; 134; 190 y 260 kg N disponible /ha. Se presenta la curva crítica del modelo de Greenwood 1986.	127
Figura 77. Nitrógeno mineral (Nmin) en el suelo, de 0 a 60 cm, en la var. Casper, en el año 2014, (A) 12 de agosto, en el momento del trasplante, (B) 29 de septiembre, después del abonado y (C) 1 de diciembre, al finalizar la cosecha.	128
Figura 78. Concentración de N-NO_3^- (ppm) en savia, en hojas de coliflor var. Casper en los diferentes tratamientos. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 104; 134; 190 y 260 kg N disponible /ha. Las barras verticales indican el error estándar.	128
Figura 79. Contenido de clorofila en hojas de coliflor var. Casper, unidades SPAD, en los diferentes tratamientos. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 104; 134; 190 y 260 kg N disponible /ha. Las barras verticales indican el error estándar.	129
Figura 80. Índice Chl de Dualex en hojas de coliflor var. Casper, en los diferentes tratamientos de nitrógeno disponible. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 104; 134; 190 y 260 kg N disponible /ha. Las barras verticales indican el error estándar.	130
Figura 81. Índice NBI de Dualex en hojas de coliflor var. Casper, en los diferentes tratamientos de nitrógeno disponible. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 104; 134; 190 y 260 kg N disponible /ha. Las barras verticales indican el error estándar.	130
Figura 82. Índice SFR de Multiplex en hojas de coliflor var. Casper, en los diferentes tratamientos de nitrógeno disponible. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 104; 134; 190 y 260 kg N disponible /ha. Las barras verticales indican el error estándar.	131
Figura 83. Índice NBI de Multiplex en hojas de coliflor var. Casper, en los diferentes tratamientos de nitrógeno disponible. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 104; 134; 190 y 260 kg N disponible /ha. Las barras verticales indican el error estándar.	131

Figura 84. Índice NDRE de Crop Circle en hojas de coliflor var. Casper, en los diferentes tratamientos de nitrógeno disponible. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 104; 134; 190 y 260 kg N disponible /ha. Las barras verticales indican el error estándar.	132
Figura 85. Índice NDVI de Crop Circle en hojas de coliflor var. Casper, en los diferentes tratamientos de nitrógeno disponible. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 104; 134; 190 y 260 kg N disponible /ha. Las barras verticales indican el error estándar.	132
Figura 86. Relación entre el índice NBI de Dualex y la concentración de nitrógeno total en la hoja de coliflor de la variedad Barcelona durante los años 2012, 2013 y 2014. El valor p indica el grado de significación estadística.	145
Figura 87. Relación entre el índice NBI de Dualex y la concentración de nitrógeno total en la hoja de coliflor de la variedad Typical durante los años 2013 y 2014. El valor p indica el grado de significación estadística.	146
Figura 88. Relación entre el índice NBI de Dualex y la concentración de nitrógeno total en la hoja de coliflor de las variedades Barcelona y Typical. El valor p indica el grado de significación estadística.	146
Figura 89. Índice NBI de Dualex y biomasa (Mg/ha) de las var. Barcelona y Typical en los ensayos de 2012, 2013 y 2014. Curva crítica ajustada de NBI en función de la biomasa del cultivo (NBI crítico) e intervalo de confianza al 95% (I.C. Upper e I.C. Lower).	148
Figura 90. Curva crítica e índice NBI de Dualex en función de la biomasa del cultivo para el ensayo de la variedad Barcelona en el año 2012.	149
Figura 91. Curva crítica e índice NBI de Dualex en función de la biomasa del cultivo para el ensayo de la variedad Barcelona en el año 2013.	149
Figura 92. Curva crítica e índice NBI de Dualex en función de la biomasa del cultivo para el ensayo de la variedad Barcelona en el año 2014.	150
Figura 93. Curva crítica e índice NBI de Dualex en función de la biomasa del cultivo para el ensayo de la variedad Typical en el año 2013.	150
Figura 94. Curva crítica e índice NBI de Dualex en función de la biomasa del cultivo para el ensayo de la variedad Typical en el año 2014.	151
Figura 95. Relación entre el índice NBI de Multiplex y la concentración de nitrógeno total en la hoja de coliflor de la variedad Barcelona durante los años 2012, 2013 y 2014. El valor p indica el grado de significación estadística.	154
Figura 96. Relación entre el índice NBI de Multiplex y la concentración de nitrógeno total en la hoja de coliflor de la variedad Typical durante los años 2013 y 2014. El valor p indica el grado de significación estadística.	155
Figura 97. Relación entre el índice NBI de Multiplex y la concentración de nitrógeno total en la hoja de coliflor de las variedades Barcelona y Typical. El valor p indica el grado de significación estadística.	155
Figura 98. Índice NBI de Multiplex y biomasa (Mg/ha) de las var. Barcelona y Typical en los ensayos de 2012, 2013 y 2014. Curva crítica ajustada de NBI en función de la biomasa del cultivo (NBI crítico) e intervalo de confianza al 95% (I.C. Upper e I.C. Lower).	157
Figura 99. Curva crítica e índice NBI de Multiplex en función de la biomasa del cultivo para el ensayo de la variedad Barcelona el año 2012.	158
Figura 100. Curva crítica e índice NBI de Multiplex en función de la biomasa del cultivo para el ensayo de la variedad Barcelona el año 2013.	158
Figura 101. Curva crítica e índice NBI de Multiplex en función de la biomasa del cultivo para el ensayo de la variedad Barcelona el año 2014.	159
Figura 102. Curva crítica e índice NBI de Multiplex en función de la biomasa del cultivo para el ensayo de la variedad Typical el año 2013.	159
Figura 103. Curva crítica e índice NBI de Multiplex en función de la biomasa del cultivo para el ensayo de la variedad Typical el año 2014.	160

Figura 104. Relación entre el índice NDVI y la biomasa del cultivo en Mg/ha para las variedades Barcelona y Typical.	162
Figura 105. Relación entre el índice NDVI y el índice NDRE para las variedades Barcelona y Typical en los años 2013 y 2014. N+: tratamientos más fertilizados, T3 y T4; N-: tratamientos menos fertilizados.	162
Figura 106. Relación entre los índices NNI y REDVI para la variedad Barcelona durante los años 2012, 2013 y 2014. El valor p indica el grado de significación estadística.	164
Figura 107. Relación entre los índices NNI y REDVI para la variedad Typical durante los años 2013 y 2014. El valor p indica el grado de significación estadística.	165
Figura 108. Relación entre los índices NNI y REDVI para las variedades Barcelona y Typical. El valor p indica el grado de significación estadística.	165
Figura 109. Contenido relativo crítico de N-NO_3^- en savia (%) en función del tiempo de cultivo relativo (%). A: cv. Barcelona y Casper. B: cv. Typical. S.C.: porcentaje de suelo cubierto. Se incluyen las recomendaciones de Kubota et al. (1997), procedentes de resultados de Doerge et al. (1991).	169
Figura 110. Curva crítica y contenido de nitrato en savia en función del tiempo de cultivo para el ensayo de la variedad Barcelona en el año 2012.	170
Figura 111. Curva crítica y contenido de nitrato en savia en función del tiempo de cultivo para el ensayo de la variedad Barcelona en el año 2013.	170
Figura 112. Curva crítica y contenido de nitrato en savia en función del tiempo de cultivo para el ensayo de la variedad Barcelona en el año 2014.	171
Figura 113. Curva crítica y contenido de nitrato en savia en función del tiempo de cultivo para el ensayo de la variedad Casper en el año 2014.	171
Figura 114. Curva crítica y contenido de nitrato en savia en función del tiempo de cultivo para el ensayo de la variedad Typical en el año 2013.	172
Figura 115. Curva crítica y contenido de nitrato en savia en función del tiempo de cultivo para el ensayo de la variedad Typical en el año 2014.	172

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades físico-químicas del suelo en var. Barcelona (2012).	51
Tabla 2. Tratamientos experimentales en función del N disponible en var. Barcelona (2012).	52
Tabla 3. Datos del ensayo en var. Barcelona (2012).	58
Tabla 4. Propiedades físico-químicas del suelo en var. Barcelona (2013).	58
Tabla 5. Tratamientos experimentales en función del N disponible en var. Barcelona (2013).	59
Tabla 6. Datos del ensayo en var. Barcelona (2013).	61
Tabla 7. Propiedades físico-químicas del suelo en var. Barcelona (2014).	61
Tabla 8. Tratamientos experimentales en función del N disponible en var. Barcelona (2014).	62
Tabla 9. Datos del ensayo en var. Barcelona (2014).	63
Tabla 10. Propiedades físico-químicas del suelo en var. Typical (2013).	64
Tabla 11. Tratamientos experimentales en función del N disponible en var. Typical (2013).	65
Tabla 12. Datos del ensayo en var. Typical (2013).	66
Tabla 13. Propiedades físico-químicas del suelo en var. Typical (2014).	66
Tabla 14. Tratamientos experimentales en función del N disponible en var. Typical (2014).	67
Tabla 15. Datos del ensayo en var. Typical (2014).	68
Tabla 16. Propiedades físico-químicas del suelo en var. Casper (2012).	69
Tabla 17. Tratamientos experimentales en función del N disponible en var. Casper (2012).	70
Tabla 18. Datos del ensayo en var. Casper (2012).	71
Tabla 19. Propiedades físico-químicas del suelo en var. Casper (2014).	72
Tabla 20. Tratamientos experimentales en función del N disponible en var. Casper (2014).	72
Tabla 21. Datos del ensayo en var. Casper (2014).	73
Tabla 22. Cobertura, altura y biomasa del cultivo, el 18/10/2012, al inicio de la cosecha.	77
Tabla 23. Producción total, de hojas y de pellas (kg/ha) de la var. Barcelona y nitrógeno disponible en el ensayo de 2012.	77
Tabla 24. Índices NDVI, NDRE obtenidos con el sensor Crop Circle en coliflor var. Barcelona a los cuarenta y nueve días desde la plantación.	84
Tabla 25. Balance de nitrógeno (kg/ha) hasta 0,6 m de profundidad.	85
Tabla 26. Cobertura, altura y biomasa del cultivo, el 09/10/2013, al inicio de la cosecha.	86
Tabla 27. Producción total, de hojas y de pellas (kg/ha) de la var. Barcelona y nitrógeno disponible en el ensayo de 2013.	86
Tabla 28. Balance de nitrógeno (kg N/ha) hasta 0,6 m de profundidad.	95
Tabla 29. Cobertura, altura y biomasa del cultivo, el 22/10/14, al inicio de la cosecha.	96
Tabla 30. Producción total, de hojas y de pellas (kg/ha) de la var. Barcelona y nitrógeno disponible en el ensayo de 2014.	96
Tabla 31. Balance de nitrógeno (kg/ha) hasta 0,6 m de profundidad.	105
Tabla 32. Cobertura, altura y biomasa del cultivo, el 21/01/2014, al inicio de la cosecha. ..	106
Tabla 33. Producción total, de hojas y de pellas (kg/ha) de la var. Typical y nitrógeno disponible en el ensayo de 2013.	106
Tabla 34. Balance de nitrógeno (kg/ha) hasta 0,6 m de profundidad.	114

Tabla 35. Cobertura, altura y biomasa del cultivo, el 30/12/2014, al inicio de la cosecha. ..	115
Tabla 36. Producción total, de hojas y de pellas (kg/ha) de la var. Casper y nitrógeno disponible en el ensayo de 2012.	122
Tabla 37. Balance de nitrógeno (kg/ha) hasta 0,6 m de profundidad.....	124
Tabla 38. Cobertura, altura y biomasa del cultivo, el 20/11/2014, al inicio de la cosecha. ..	125
Tabla 39. Producción total, de hojas y de pellas (kg/ha) de la var. Casper y nitrógeno disponible en el ensayo de 2014.	125
Tabla 40. Balance de nitrógeno (kg/ha) hasta 0,6 m de profundidad.....	133
Tabla 41. Valores iniciales y finales medios de Dualex, de los tratamientos fertilizados (F) y no fertilizados (NF), en los ensayos de la variedad Barcelona en los años 2012, 2013 y 2014, con el porcentaje de variación ($\pm\Delta$).	143
Tabla 42. Valores iniciales y finales medios de Dualex, de los tratamientos fertilizados (F) y no fertilizados (NF), en los ensayos de la variedad Typical en los años 2013 y 2014, con el porcentaje de variación ($\pm\Delta$).	144
Tabla 43. Suma de cuadrados (SC), grados de libertad (gdl), cuadrados medios (CM) y valor del estadístico F. Valor de los parámetros “a” y “b” de la función [8], error estándar (SE) y valor del estadístico t ($t_{observada}$). Significación: *** = $p \leq 0.001$	147
Tabla 44. Valores de suficiencia mínimos para el índice NBI de Dualex en función de la biomasa, en tres estados fenológicos del cultivo.	148
Tabla 45. Curva crítica NBI de Dualex. Valor de los índices de sensibilidad, de especificidad, de Youden y de precisión en los ensayos realizados durante 2012, 2013 y 2014 con las var. Barcelona y Typical.....	151
Tabla 46. Valores iniciales y finales medios de Multiplex, de los tratamientos fertilizados (F) y no fertilizados (NF), en los ensayos de la variedad Barcelona en los años 2012, 2013 y 2014, con el porcentaje de variación ($\pm\Delta$).	153
Tabla 47. Valores iniciales y finales medios de Multiplex, de los tratamientos fertilizados (F) y no fertilizados (NF), en los ensayos de la variedad Typical 2013 y 2014, con el porcentaje de variación ($\pm\Delta$).	153
Tabla 48. Suma de cuadrados (SC), grados de libertad (gdl), cuadrados medios (CM) y valor del estadístico F. Valor de los parámetros “a” y “b” de la función [10], error estándar (SE) y valor del estadístico t ($t_{observada}$). Significación: *** = $p \leq 0.001$	156
Tabla 49. Valores de suficiencia mínimos para el índice NBI de Multiplex en función de la biomasa, en tres estados fenológicos del cultivo.	157
Tabla 50. Curva crítica NBI de Multiplex. Valor de los índices de sensibilidad, de especificidad, de Youden y de precisión en los ensayos realizados durante 2012, 2013 y 2014 con las var. Barcelona y Typical.	160
Tabla 51. Suma de cuadrados (SC), grados de libertad (gdl), cuadrados medios (CM) y valor del estadístico F. Valor de los parámetros “a” y “b” de la función [11], error estándar (SE) y valor del estadístico t ($t_{observada}$). Significación: *** = $p \leq 0.001$	167
Tabla 52. Curva crítica de nitrato en savia. Valor de los índices de sensibilidad, de especificidad, de Youden y de precisión en los ensayos realizados con las var. Barcelona y Casper.....	168
Tabla 53. Suma de cuadrados (SC), grados de libertad (gdl), cuadrados medios (CM) y valor del estadístico F. Valor de los parámetros “a” y “b” de la función [12], error estándar (SE) y valor del estadístico t ($t_{observada}$). Significación: *** = $p \leq 0.001$	168
Tabla 54. Curva crítica de nitrato en savia. Valor de los índices de sensibilidad, de especificidad, de Youden y de precisión en los ensayos realizados con la var. Typical.....	168
Tabla 55. Curva crítica de nitrato en savia. Valor de los índices de sensibilidad, de especificidad, de Youden y de precisión en los ensayos realizados para todos los ensayos.	173

AGRADECIMIENTOS

Quisiera expresar mi agradecimiento a todas aquellas personas que han contribuido al desarrollo de esta Tesis Doctoral y que de una manera u otra han hecho posible su elaboración.

En primer lugar, al Dr. Alfonso Pardo Iglesias por sus rigurosas y enriquecedoras apreciaciones científicas, que me han servido de guía, estímulo y orientación durante este proceso.

A los compañeros que han formado parte de la sección de Recursos Naturales del SIDTA-CIDA, a la Dra. M^a Luisa Suso, a la Dra. Nuria Vázquez y a la Dra. Leticia Olasolo, por sus oportunos consejos y correcciones. A Pilar Yécora y Cristina Casis por su encomiable trabajo en el laboratorio, y a todo el personal del centro que ha colaborado en el trabajo y ha facilitado las labores diarias, especialmente a los operarios. Quisiera agradecer también a M^a Carmen Arroyo y todo su equipo del Laboratorio Regional su rigurosidad y celeridad que han mostrado analizando las muestras de suelo.

Al Servicio de Investigación y Desarrollo Tecnológico Agroalimentario de La Rioja (SIDTA), donde se ha realizado esta Tesis Doctoral, por facilitar el desarrollo de la misma. Al Dr. Enrique García-Escudero y a todo el personal del SIDTA, que directa o indirectamente han sido partícipes de este trabajo. A la Consejería de Agricultura, Ganadería y Medio Ambiente del Gobierno de La Rioja, por permitir el uso de las instalaciones y equipos del SIDTA-CIDA

Al Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA) por concederme la beca predoctoral ligada al proyecto nacional "Integración de medidas de suelo, planta y modelos de simulación para el manejo eficiente de nitrógeno en los cultivos hortícolas" (RTA-2011-00136-C04-02) que ha hecho posible que lleve esto adelante.

Y por supuesto, finalmente, quisiera agradecer a mis padres, que siempre están, y a mi hermana, sus sacrificios realizados, su paciencia y sus valiosas enseñanzas, ya que sin ellas esto no hubiera sido posible. A mi abuelo, que ya no está pero que siempre estuvo, por enseñarme que la lucha, el esfuerzo y el sacrificio, con una sonrisa en la cara, son el camino para lograr los objetivos marcados. A Sara, por mirarme y entenderme, por el apoyo infinito. A todos los que directa o indirectamente han facilitado la terminación de este trabajo, muchísimas gracias.

RESUMEN

Existe un interés creciente en optimizar la fertilización nitrogenada de los cultivos y mejorar la eficiencia en el uso del nitrógeno para obtener elevadas productividades y limitar los efectos colaterales en relación a la lixiviación de nitrógeno. La concentración de nitrógeno en plantas se determina habitualmente a través de análisis químicos, aunque existen alternativas como son la determinación del N-NO_3^- en la savia y la medida de la clorofila como una estimación indirecta del contenido de nitrógeno. Actualmente, los métodos de reflectancia, transmitancia y fluorescencia en regiones específicas del espectro se utilizan para el diagnóstico del estado nutricional en nitrógeno de las plantas. El primer objetivo de este trabajo ha sido estudiar el efecto del nitrógeno disponible sobre la producción y la eficiencia en el uso del nitrógeno en un cultivo de coliflor (*Brassica oleracea* var. *botrytis*) de las variedades Barcelona, Typical y Casper. El segundo objetivo de este estudio ha sido evaluar la medida de concentración de nitrato en savia y el método Nmin, y el tercer objetivo ha sido evaluar la utilización de sensores basados en los principios de reflectancia, fluorescencia y transmitancia en las mismas parcelas de ensayo. Los ensayos se llevaron a cabo en la Finca Valdegón, en el Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico Agroalimentario del Gobierno de La Rioja, en Agoncillo (La Rioja), y en La Finca Experimental del Instituto Navarro de Tecnología e Infraestructuras Agroalimentarias en Sartaguda (Navarra), España, en los años 2012, 2013 y 2014. Las plantaciones se realizaron en el mes de agosto. Se diseñó un experimento con cuatro tratamientos y cuatro repeticiones en un escenario aleatorizado en función del contenido de nitrógeno mineral en el suelo al inicio del cultivo. Se instalaron resinas de intercambio iónico en tubos a 0,2 m de profundidad para estimar la mineralización de la materia orgánica del suelo. Periódicamente se realizaron muestreos de nitrógeno en suelo, en planta, nitrato en savia, nitrato en resinas, altura, cobertura, biomasa y medidas en hoja con los sensores SPAD®, Dualex®, Multiplex®, y Crop-Circle

En la variedad Barcelona, el valor medio de $\text{N}_{\text{disponible}}$ por encima del cual no se ha encontrado respuesta en la producción ha sido de $184 \pm 20 \text{ kgN/ha}$. En la variedad Typical esta cantidad fue de $189 \pm 45 \text{ kgN/ha}$. En Casper el valor encontrado fue $143 \pm 7 \text{ kgN/ha}$, este valor fue sensiblemente inferior al del resto de los ensayos, posiblemente debido a una subestimación de la mineralización de la materia orgánica del suelo.

Los resultados del análisis del balance, confirman la utilidad del método Nmin para el diseño de la fertilización nitrogenada de la coliflor, así como la importancia que

en el balance pueden adquirir el nitrógeno mineralizado, las pérdidas por volatilización y la correcta programación del riego para reducir las pérdidas por lixiviación. Las extracciones medias de las variedades de coliflor estudiadas se sitúan en 246 kg de nitrógeno por hectárea.

La mineralización de la materia orgánica del suelo medida en campo alcanzó un valor medio de 46 kg N/ha para el período de cultivo en la capa superficial de suelo. El aporte de nitrógeno a través de este proceso podría suponer hasta un 20% de las extracciones de nitrógeno de la planta.

La concentración de N-NO_3^- en savia, ha sido un indicador muy sensible, y repetible, capaz de mostrar diferencias significativas entre tratamientos, sobre todo después de la fertilización de cobertera.

Para los índices NBI de los equipos Dualex y Multiplex y el índice REDVI de Crop Circle se han encontrado altas correlaciones con el contenido de nitrógeno de la planta, lo que ha servido para, en función del estado fenológico del cultivo, ajustar unas funciones que relacionan las medidas realizadas con la biomasa del cultivo en el caso del índice NBI y con el índice de nutrición nitrógenada (NNI) en el caso del índice REDVI. En las curvas críticas obtenidas para los sensores se observa como a partir de una biomasa aproximada de 1 Mg/ha (50% de suelo cubierto) la medida se estabiliza y es a partir de este momento cuando comienzan a distinguirse tratamientos deficitarios de los no deficitarios, al igual que ocurre con el contenido de nitrógeno total en hoja. Por ello, estos modelos podrían servir para determinar un déficit nutricional nitrogenado y poder corregirlo mediante fertilización. Es muy importante que estas deficiencias sean detectadas a tiempo para poder ser corregidas.

El único método capaz de precisar cuantitativamente una recomendación de abonado a día de hoy sería el análisis de N_{min} . Retrasar el análisis de suelo hasta momentos antes de la fertilización de cobertera, nos permitiría ajustar de forma más eficaz el abonado nitrogenado, ya que tendríamos en cuenta la posible mineralización de la materia orgánica del suelo desde el inicio del cultivo, así como las posibles pérdidas por lixiviación.

Los resultados observados con los equipos de medidas no destructivas, complementan los resultados de N_{min} y demuestran la utilidad de estos métodos para detectar deficiencias en el estado nutricional de las plantas. De ellos, el medidor de reflectancia CROP CIRCLE ACS-430 ha permitido analizar de forma continua un gran número de muestras en un corto espacio de tiempo, disminuyendo así el error de

muestreo y obteniendo valores más representativos del cultivo que con el resto de equipos empleados.

El objetivo de estos equipos debería centrarse no sólo en la detección temprana de deficiencias nutricionales, sino también en la cuantificación de estas deficiencias para así poder corregirlas cuantitativamente.

1. INTRODUCCIÓN

1. Introducción

El sector hortofrutícola tiene un papel muy importante tanto en el sector agrícola como en el conjunto de la economía española. En el avance publicado correspondiente al año 2015 (MAGRAMA, 2015), su participación en la Producción de la Rama Agraria alcanzó los 14.544 millones de euros, el 34,1%, cifra altamente significativa y que ha seguido una evolución creciente a lo largo de los últimos años. La superficie dedicada a cultivos hortícolas en 2014 fue de 389.472 hectáreas con una producción total de 14 millones de toneladas (MAGRAMA, 2015).

En La Rioja, durante la campaña 2014 la superficie dedicada a este tipo de cultivos fue de 4.625 ha, siendo los cultivos más representativos el guisante verde, la judía verde, la coliflor y la alcachofa (Gobierno de La Rioja, 2015).

En España, el consumo de fertilizantes inorgánicos en la campaña 2013/2014 fue de 5,0 millones de toneladas, correspondiendo el 53,1% a abonos nitrogenados simples (ANFFE, 2013/14). Los fertilizantes y enmiendas destinados directamente a la agricultura, con un valor de 2.030,4 millones de euros, representaron en el año 2014 el 9,6% del valor de todos los consumos intermedios, y un 5,0% en relación sobre el valor producción de la rama agraria (MAGRAMA, 2015). En estudios económicos realizados por el Instituto Técnico de Gestión Agraria de Navarra (ITGA) en diferentes cultivos, se observa que en la mayoría de cultivos hortícolas el coste de los fertilizantes representa entre un 5 y 10% de los costes totales de cultivo, nivel bajo en comparación con un cultivo como el maíz para grano donde suponen alrededor de un 20%. Esto podría provocar que los agricultores apliquen un exceso de fertilizantes para minimizar el riesgo de un descenso de productividad por falta de abonado.

Así pues, la gestión adecuada del N en los cultivos hortícolas tiene importancia económica para el agricultor pero también afecta al medio ambiente a través del efecto que tiene sobre la contaminación de las aguas subterráneas (Directiva 91/676 de la Unión Europea sobre la contaminación de las aguas por nitratos de origen agrario), y a través de la emisión de óxido nitroso a la atmósfera por desnitrificación del nitrato del suelo.

En los cultivos hortícolas la fertilización nitrogenada suele ser elevada y esto unido a que son cultivos de regadío y a que en bastantes casos, el sistema radical es relativamente poco profundo, hace que se produzcan pérdidas elevadas de nitrato por lixiviación. La Directiva europea y los Programas de Actuación derivados de ella, establecen que los estados miembros deben dictaminar las cantidades máximas de abono nitrogenado a emplear en los diferentes cultivos y los Códigos de Buenas

Prácticas Agrarias se tienen que basar en estudios experimentales en las diferentes zonas agrícolas.

En relación con el impacto de las prácticas de fertilización sobre la emisión de gases de efecto invernadero, se ha demostrado que los fertilizantes nitrogenados son la principal causa del aumento en las emisiones de N_2O atribuidas a la actividad agraria (Stehfest y Bouwman, 2006). El óxido nitroso es un gas que se produce en el suelo como consecuencia de la desnitrificación o la nitrificación (Bremner, 1997) y tiene un efecto potencial en el calentamiento global casi trescientas veces superior al del CO_2 . Se estima que el 42% del total de las emisiones de N_2O a la atmósfera provienen de la agricultura (IPCC, 2007). Hay evidencia de que las mejores prácticas de abonado nitrogenado son aquellas que producen una mayor eficiencia agronómica, es decir las que resultan en una mayor proporción de absorción por el cultivo del N aplicado (Van Groenigen *et al.*, 2010). Así pues, hace falta desarrollar métodos para determinar en cada parcela y cada cultivo, el abonado requerido para obtener una producción alta y de buena calidad y, al mismo tiempo, con un impacto reducido en el medio ambiente.

Los estudios de fertilización nitrogenada de los cultivos hortícolas son imprescindibles para poder ajustar mejor las dosis óptimas de abonado. Este ajuste se cree conveniente debido a razones económicas y medioambientales, y también debido a que existe una gran variación de estas dosis en los Programas de Actuación de las diferentes Comunidades Autónomas, variación que no resulta fácilmente justificable (Ramos y Úbeda, 2009).

1.1. Cultivo de la coliflor

La coliflor (*Brassica oleracea* L. var. *botrytis* L.) pertenece a la familia de las crucíferas, que constituye una importante familia de cerca de trescientos géneros, principalmente plantas herbáceas de zonas templadas. El género *Brassica* es el de mayor importancia económica. Dentro de las especies de *Brassica*, la especie *B. oleracea* contiene una serie de plantas que se han convertido en hortícolas muy importantes en regiones templadas como por ejemplo la col repollo de hoja lisa (*B. oleracea* var. *capitata* L.), la col de Bruselas (*B. oleracea* var. *gemmifera* DC.) o el brócoli (*B. oleracea* var. *italica* Plenck).

En 2013 la producción de coliflor en España alcanzó las 146.700 t. y en 2014 en La Rioja, se produjeron 9.518 t. convirtiéndola en una de las principales hortalizas producidas en la Comunidad donde cuenta además con una Indicación Geográfica Protegida.

1.1.1. Períodos del desarrollo de la coliflor y ciclos de cultivo

El desarrollo vegetativo de la planta de coliflor ha sido ampliamente estudiado, diferenciándose tres fases vegetativas durante el ciclo de cultivo comercial (Wurr *et al.*, 1981). La primera de ellas es la fase juvenil que transcurre desde la germinación hasta la inducción floral. En esta fase solamente se forman hojas, variando el número entre 12 y 20, según cultivar y temperatura del período (Wiebe, 1975; Wurr *et al.*, 1981; Booij y Struik, 1990). La segunda corresponde a la fase de inducción floral que no está ligada claramente con el final de la fase juvenil (Booij y Struik, 1990). La inducción está producida fundamentalmente por las bajas temperaturas y también interviene la edad de las plantas, la variedad, etc. El valor de la temperatura vernalizante varía en función de los cultivares, desde 6° a 8°C para cultivares de invierno, hasta temperaturas superiores a 15°C para cultivares de verano. La duración de las temperaturas vernalizantes también varía con los cultivares, así para los cultivares de otoño oscila entre dos y cinco semanas y para los cultivares de invierno puede oscilar entre cinco y quince semanas. Al finalizar esta fase cesan de formarse hojas. Como existe una correlación entre el número de hojas y la producción de pellas, es importante ajustar los ciclos para que la inducción se produzca cuando la planta posea un número suficiente de hojas. La tercera fase es la de crecimiento de la inflorescencia (Wiebe, 1975; Wurr *et al.*, 1981).

De acuerdo con este patrón de desarrollo, los cultivares más comúnmente empleados en nuestro país pueden encuadrarse en los ciclos productivos siguientes:

- Ciclo corto y recolección otoñal con una duración entre 45 y 90 días desde la plantación hasta la recolección.
- Ciclo medio y recolección de fin de otoño a mediados de invierno con una duración entre 90 y 120 días desde la plantación.
- Ciclo largo y recolección desde mediados de invierno hasta principios de la primavera y una duración del ciclo entre 120 y 180 días.

1.1.2. La fertilización nitrogenada de la coliflor

La coliflor es un cultivo que se cosecha cuando está en pleno crecimiento. Los datos sobre la dinámica de la absorción de N en este cultivo muestran una línea creciente y sugieren una extracción continua hasta la cosecha (Everaarts, 1993).

Las extracciones de nitrógeno para este cultivo, según diversos estudios, pueden variar entre 150 y 300 kg N/ha (Everaarts *et al.*, 1996), 170 y 250 kg N/ha (Everaarts, 2000) y 250 y 498 kg N/ha (Vázquez *et al.*, 2010).

Según Everaarts *et al.* (1996), el óptimo de fertilización nitrogenada para este cultivo se encuentra en torno a 224 kg N/ha menos el nitrógeno mineral inicial presente en el suelo. Csizinszky (1996) obtuvo la máxima producción en coliflor verde con 294 kg N/ha de fertilizante. Rahn *et al.* (1998) determinaron el techo de producción para valores entre 240 y 300 kg N/ha de fertilizante. Rather *et al.* (2000) determinaron la dosis óptima en 250 kg N/ha, como suma de N mineral en el suelo (N_{min}) en el momento del trasplante y el N aplicado como fertilizante; estos autores concluyeron que cuando el N_{min} era superior a 210 kg N/ha en el horizonte de suelo entre 0 y 30 cm o superior a 270 kg N/ha en el perfil del suelo de 0 a 90 cm, no se encontró respuesta a la fertilización nitrogenada.

En ensayos realizados por Riley y Vågen (2003) no se encontró ningún efecto sobre la producción en relación al aumento de la fertilización nitrogenada de 150 a 250 kg N/ha. También mostraron que la aplicación fraccionada de nitrógeno dio rendimientos significativamente más altos en comparación con una sola aplicación. Van Den Boogaard y Thorup-Kristensen (1997) no encontraron respuesta por encima de 250 kg N/ha disponible (N_{min} + fertilizante). Un incremento de fertilizante de 100 kg N/ha condujo a un incremento de 17 kg/ha de N residual en el suelo, 52 kg/ha de nitrógeno en los residuos del cultivo, 37 kg/ha de N mineralizable y 15 kg/ha de N en las inflorescencias. La eficiencia en el uso del nitrógeno se incrementó cuando se aportó más nitrógeno en el momento de mayor demanda y mayor crecimiento.

En la recomendación de abonado nitrogenado en coliflor utilizando el método de N_{min}, Feller y Fink (2002) indican como N_{min} objetivo 297 kg N/ha hasta 0,6 m de profundidad, considerando 251 kg N/ha extraído por el cultivo y 40 kg N/ha como residuo.

El nitrógeno no es solamente un factor de producción sino que está también relacionado con la calidad. Así Rather *et al.* (1999) observaron un porcentaje significativamente superior de coliflores poco compactas en estados de carencia de nitrógeno en relación a la fertilización óptima. También Böhmer *et al.* (1981) observaron un incremento en el número de coliflores poco compactas en función del nitrógeno disponible. Un incremento en la fertilización nitrogenada de 80 a 120 kg N/ha condujo a una disminución del 7% en el contenido de vitamina C en coliflor (Lisiewska y Kmiecik, 1996).

Las pérdidas de N a partir de los residuos de coliflor pueden ser altas. Las brassicas utilizadas en horticultura tienen un bajo índice de cosecha (Abuzeid y Wilcockson, 1989; Everaarts y de Moel, 1991) y dejan una gran cantidad de nitrógeno

en los residuos (Alt y Wiemann, 1990). En la coliflor el índice de cosecha oscila entre el 33 y 47% según varios autores. Lorenz *et al.* (1989) indicaron que los residuos de coliflor aportaron 130 kg N/ha al cultivo siguiente. Rahn *et al.* (1992) midieron hasta 300 kg N/ha en residuos de *Brassica*. Everaarts (1993) determinó valores entre 100 y 200 kg N/ha en coliflor y Everaarts (2000) encontró valores entre 95 y 140 kg N/ha en los residuos de este cultivo. Riley y Vågen (2003) determinaron que los residuos dejados por la coliflor después de la cosecha alcanzaban aproximadamente el 70 por ciento del total. Este nitrógeno orgánico, después de ser mineralizado, puede quedar disponible para el cultivo siguiente o puede ser lixiviado, con los consiguientes riesgos medioambientales. Scharpf (1991) encontró que el 70% del N en residuos de hortalizas quedaba disponible en diez semanas.

1.2. Sistemas de recomendación del abonado nitrogenado

La mayoría de los sistemas de recomendación de abonado nitrogenado en los cultivos hortícolas se pueden agrupar en dos categorías básicas. La primera comprende aquellos que se basan en un análisis de N mineral al inicio del cultivo antes de que el crecimiento de la planta sea más rápido (Hartz *et al.*, 2000; Feller y Fink, 2002; Heckman, 2002) y la segunda incluye los que se basan en medidas en las plantas que indican su estado nutritivo en determinados momentos de su desarrollo (Hochmuth, 1994 y 2009; Rodrigo, 2006; Westerveld *et al.*, 2004; Rodrigo y Ramos, 2007a). Schröder *et al.* (2000) en una revisión de las dos opciones concluyen que el instrumento de diagnóstico ideal “debe ser capaz de detectar tanto una deficiencia como un exceso de nitrógeno, debe de ser fácil de manejar y capaz de informar al agricultor rápidamente sobre la necesidad de aportar nitrógeno suplementario. Los resultados obtenidos deben ser específicos para el estado N de la cosecha y la influencia de otros factores, es decir, variedad, diferencias climáticas entre años...etc., no deben afectar al resultado”.

En los últimos 20 años ha habido también un creciente interés por la utilización de los modelos de simulación para la ayuda en la toma de decisiones de la fertilización nitrogenada (Van der Burgt *et al.*, 2006; Rahn *et al.*, 2010 a; Shaffer *et al.*, 2010).

1.2.1. Sistemas basados en el análisis del suelo

Son varios los sistemas de recomendación del abonado nitrogenado basados en medidas de suelo (Neeteson, 1995; Tremblay *et al.*, 2001; Hartz, 2002a). Entre ellos destacan dos tipos: 1) aquellos que determinan la cantidad de N mineral que debería estar disponible para el cultivo al inicio del mismo en una determinada profundidad del suelo, caso por ejemplo del sistema denominado Nmin (Feller y Fink,

2002), y 2) los métodos que determinan el abonado de cobertera en función del análisis de suelo de los primeros 30 cm y que dependiendo de los valores obtenidos diagnostican si es previsible que el abonado pueda aumentar la producción o no (Krusekopf *et al.*, 2002).

El método Nmin (Nitrógeno mineral) de recomendación de abonado nitrogenado se desarrolló en Alemania (Wehrmann y Scharpf, 1986). Se basa en la determinación del contenido de N mineral en el suelo al inicio del crecimiento del cultivo. En este método la dosis óptima de fertilizante es la diferencia entre el nitrógeno total requerido por la planta y la cantidad de N mineral que se encuentra en la parte de suelo explorado por el sistema radical al inicio del cultivo, y se ha determinado en distintos cultivos hortícolas (Scharpf y Weier, 1996; Wehrmann y Scharpf, 1986).

Entre los segundos se encuentra el sistema denominado PSNT (Pre-sidedress Soil Nitrate Testing). Una herramienta muy útil para identificar aquellas parcelas en las que una aplicación adicional de N aumentará la producción. Aunque originalmente se desarrolló para maíz (Magdoff, 1991), se ha adaptado posteriormente para brócoli, coliflor, col, apio, lechuga, maíz dulce y tomate (Heckman *et al.*, 1995; Sánchez, 1999; Mitchell *et al.*, 2000; Hartz *et al.*, 2000; Breschini y Hartz, 2002; Krusekopf *et al.*, 2002). El abonado de cobertera tiene lugar al menos un mes después de la preparación del suelo, en la fase previa de crecimiento rápido de la planta en la que la demanda de N es más elevada. Se considera que el nitrato del suelo proporciona una idea aproximada de la disponibilidad del N mineral para el cultivo durante el resto del ciclo (Hartz, 2002b). En este método, se suele muestrear sólo la capa de suelo de 0 a 30 cm, no obstante algunos autores recomiendan muestrear la capa de 5 a 30 cm ya que el nitrato presente en los cinco primeros centímetros no es muy accesible a las raíces. El contenido en nitrato del suelo se emplea como indicador de la necesidad o no de aplicar abonado de cobertera. Este sistema lleva implícito la necesidad de poder analizar el nitrato del suelo de forma rápida (Ramos, 2005).

Todos estos sistemas necesitan ajustarse a las diferentes regiones productivas con climas y suelos diferentes y, también con prácticas de riego con eficiencias variables, ya que todos estos factores influyen en la producción comercial y también en diferentes términos del balance de nitrógeno en el suelo (Hartz, 2003). Estos sistemas son de gran utilidad en el caso de los cultivos hortícolas porque es muy frecuente que los valores de Nmin residual en el suelo procedentes del cultivo anterior sean muy elevados (Ramos *et al.*, 2002; Vázquez *et al.*, 2006) y, por tanto, el abonado se pueda reducir mucho o incluso suprimirse.

El principal inconveniente de estos sistemas es el coste del muestreo y análisis del suelo y la elevada variabilidad espacial del nitrato en el suelo (López-Granados *et al.*, 2002; Giebel *et al.*, 2006). Para disminuir el coste de los análisis se han desarrollado métodos sencillos y económicos (Hartz, 1994; Sepúlveda *et al.*, 2003; Thompson *et al.*, 2009).

1.2.2. Sistemas basados en medidas de la planta

Para estudiar el exceso o déficit de nitrógeno en la planta se puede emplear la concentración de nitrógeno crítico, que ha sido definida como la mínima concentración en la planta necesaria para alcanzar una tasa de crecimiento máxima (Ulrich, 1952). Lemaire y Salette (1984) desarrollaron el concepto de concentración de nitrógeno crítica en la biomasa aérea, en un determinado momento del crecimiento vegetativo, como la mínima concentración de nitrógeno necesaria para alcanzar la máxima biomasa. Representaron esta concentración mediante una ecuación potencial donde la biomasa total es una función de la concentración de nitrógeno, expresada como porcentaje de la materia seca total. Por debajo de la curva el crecimiento está limitado por el nitrógeno, por encima no está limitado y sobre la curva, la concentración de nitrógeno es óptima. Ha sido necesario definir los valores específicos de los coeficientes de la curva de dilución crítica de nitrógeno para las diferentes especies. Así, por ejemplo, se ha hecho para forrajes (Lemaire y Salette, 1984), patatas (Greenwood *et al.*, 1990), trigo (Justes *et al.*, 1994), maíz (Plenet, 1995), judía verde (Olasolo, 2013).

Estas curvas críticas de dilución pueden utilizarse para determinar los requerimientos de nitrógeno y para calcular el índice de nutrición nitrógenada (NNI) que cuantifica el estado nitrogenado de las plantas (Lemaire *et al.*, 1989; Lemaire y Meynard, 1997) y puede ser utilizado en los modelos dinámicos para tener en cuenta el efecto del nitrógeno en el crecimiento y la cosecha (Justes *et al.*, 1997).

Para estudiar la curva de nitrógeno crítico en coliflor se ha utilizado el modelo general de Greenwood *et al.* (1986) y un modelo específico para brassicas (Greenwood *et al.*, 1996). Riley y Vågen (2003) desarrollaron un modelo de curva de nitrógeno crítico para brócoli y coliflor que resultó más cercano a la ecuación general de Greenwood que a la específica para brassicas. El contenido de nitrógeno en la coliflor fue estudiado por Rincón *et al.* (2001) en España, obteniendo en recolección un valor de 6.959 kg/ha de biomasa seca y un porcentaje medio de nitrógeno de 4,6%, superior al 4% que predice el modelo específico para brassicas.

En general, las medidas del estado nutritivo de la planta en relación al nitrógeno son menos laboriosas que las medidas de suelo. La práctica más frecuente ha sido el análisis foliar de N o bien el análisis de nitrato en savia. Sin embargo, existe disparidad de opiniones entre los expertos ya que algunos han encontrado útiles estas medidas (Kubota *et al.*, 1996; Rodrigo *et al.*, 2005; Hochmuth, 2009), mientras que otros han encontrado que el análisis del suelo es más efectivo que el análisis de nitrato en savia para detectar en qué casos las plantas responderán al abonado nitrogenado (Pritchard *et al.*, 1995; Sánchez, 1998; Hartz, 2003).

Diversos estudios indican una estrecha relación entre la concentración de clorofila en la hoja y el contenido de nitrógeno en la hoja, es debido a que la mayoría del nitrógeno de la hoja se encuentra en las moléculas de clorofila (Evans, 1989; Peterson *et al.*, 1993)

La concentración de clorofila, o el verdor de la hoja, está afectada por numerosos factores, uno de ellos es el estado nutricional de nitrógeno de la planta. Es por ello que si empleamos herramientas capaces de medir el contenido de clorofila en la hoja, podríamos mejorar el manejo de la fertilización nitrogenada en los cultivos (Peterson *et al.*, 1993; Smeal and Zhang, 1994; Balasubramanian *et al.*, 2000).

La medida de la clorofila como indicador del estado nutritivo de la planta se basa en la buena correlación observada en muchos cultivos entre el contenido foliar de clorofila y el contenido foliar de N, especialmente cuando hay deficiencia en nitrógeno (Schepers *et al.*, 1992; Samborski *et al.*, 2009). Los sensores utilizados en esta medida son fáciles de manejar y relativamente económicos (Goffart *et al.*, 2008). Algunos cultivos hortícolas en los que se ha estudiado este tipo de medidas son: alcachofa y romanesco (Rodrigo y Ramos, 2007c), tomate (Gianquinto *et al.*, 2006) y pimiento (Godoy *et al.*, 2003). La medida de clorofila para el manejo del abonado nitrogenado de los cultivos hortícolas ha sido revisada por Rodrigo y Ramos (2007a), Gianquinto *et al.* (2004) y Tremblay (2013).

Un problema bastante general de los sistemas basados en las medidas de planta es que estas medidas son sensibles a otros factores como los déficits hídricos, disponibilidad de nutrientes (aparte del N), enfermedades, etc. En los últimos años se han desarrollado sensores ópticos para determinar el estado nutricional de N de los cultivos.

- **Análisis de savia**

El análisis rápido de nitrato en savia es un método práctico y simple para realizar el seguimiento del contenido de nitrato en los cultivos hortícolas (Rodrigo y

Ramos, 2007a). Este método se ha empleado para diagnosticar el estado nutricional de la planta empleando unos rangos de suficiencia específicos para cada cultivo (Kubota *et al.*, 1997). Estas medidas se ven afectadas por el N mineral del suelo, la posición del peciolo en la planta, la edad de la planta, el cultivar y la hora del día, pero seleccionando hojas maduras recién expandidas y muestreando antes de mediodía, la variabilidad en las medidas de savia puede reducirse (Hochmuth, 1994 y 2009). El análisis de nitrato en savia se ha empleado en diversos cultivos hortícolas: col (Scaife y Stevens, 1983), tomate (Prasad y Spiers, 1985; Hochmuth 1994 y 2009; Beverly, 1994; Thompson *et al.*, 2009), coliflor (Kubota *et al.*, 1996), brócoli (Kubota *et al.*, 1997; Gardner y Roth, 1989), lechuga (Huett y White, 1992; García *et al.*, 2003), pimiento (Hartz *et al.*, 1993; Hochmuth, 2003), calabaza (Studstill *et al.*, 2003), patata (Errebhi *et al.*, 1998; MacKerron *et al.*, 1995), alcachofa (Rodrigo y Ramos, 2007b), zanahoria, repollo y cebolla (Westerveld *et al.*, 2003) y otros. Este método es preciso, seguro, cómodo, simple y barato (Prasad y Spiers, 1984). Ha sido descrita como una técnica valiosa y rápida para estimar las necesidades de nitrógeno (Kubota *et al.*, 1997) y también ha sido criticada por la alta variabilidad de sus resultados y la no concordancia de niveles críticos (Westerveld *et al.*, 2003).

- **Medidas de compuestos fotosintéticos en hoja mediante sensores ópticos**

En la actualidad, existen diferentes sensores ópticos capaces de medir en la cubierta vegetal, por métodos de reflectancia, transmitancia o fluorescencia, diferentes compuestos fotosintéticos capaces de estimar el estado nutricional de nitrógeno de las plantas.

Reflectancia y transmitancia

Los métodos de reflectancia y transmitancia se basan en el siguiente concepto: una parte de la radiación incidente sobre las hojas es reflejada especularmente mientras que la otra parte, penetra en la hoja y es sometida a múltiples dispersiones debido a discontinuidades en el índice de refracción entre las paredes celulares y el aire, y entre las paredes celulares y el agua existente dentro del tejido foliar. Una porción de la radiación dispersada puede escapar a través de la epidermis inferior de las hojas, recibiendo el nombre de radiación transmitida. El remanente de la radiación continúa sufriendo procesos de dispersión dentro de la hoja o escapa a través de la epidermis superior, lo que se denomina luz reflejada difusa (Woolley, 1971), formando parte de la radiación reflejada total (Willstätter y Stoll, 1918; Wendlandt, 1966; Kumar *et al.*, 2001). De acuerdo con la ley de conservación de la energía, la suma de las

fracciones de luz absorbida, reflejada y transmitida debe ser igual a uno (Lee y Graham, 1986).

La naturaleza y la cantidad de la luz reflejada, absorbida o transmitida dependen de la longitud de onda de la radiación incidente y de su ángulo de incidencia, de la rugosidad de la superficie de la hoja (Kumar *et al.*, 2001) y de diferencias en los índices de refracción de la cutícula en el caso de las hojas que poseen cutículas cerosas (Hoque y Remus, 1996). Además, están influenciadas por la estructura interna de la hoja, por el contenido de pigmentos y su distribución dentro de la hoja y por la cantidad y calidad de los cloroplastos. El ángulo de exposición de las hojas controla la difusión o la dispersión y el paso óptico de la luz incidente (Hoque y Remus, 1996). Para finalizar, el contenido de agua de la hoja, tanto la concentración como su distribución, controla el índice de refracción en el rango visible del espectro electromagnético y la absorbancia en el infra-rojo cercano (Hoque y Remus, 1996).

Las investigaciones en esta área continuaron hasta que a mediados de la década del 60, en el siglo pasado, surgieron trabajos fundamentales en los que se relacionan las propiedades ópticas de plantas con sus características morfológicas. Los trabajos de Allen, Gates, Gausman y Woolley fueron trabajos pioneros en el uso de radiación visible y del infrarrojo cercano para obtener información relativa a la reflectancia, transmitancia y absorbancia de las plantas en diferentes cultivos vegetales (Gates *et al.*, 1965; Allen y Richardson, 1968; Allen *et al.*, 1969; Gausman *et al.*, 1969; Gausman y Allen, 1973; Gausman, 1974; Woolley, 1971).

En la zona del verde (alrededor de 550 nm, Figura 1) y en la zona del rojo lejano (alrededor de 700 nm, Figura 1) la reflectancia es sensible a la variación de clorofila. Esto se debe a que la absorción de la clorofila en la zona del rojo lejano del espectro electromagnético (Figura 2) es suficientemente alta para permitir que la luz penetre profundamente en la hoja, al contrario que en la zona del verde, (Gausman y Allen, 1973; Gitelson y Merzlyak, 1994) y por lo tanto la reflectancia a estas longitudes de onda es máxima en la zona del verde y mínima en la zona del rojo, permitiendo una evaluación muy precisa del contenido de clorofila.

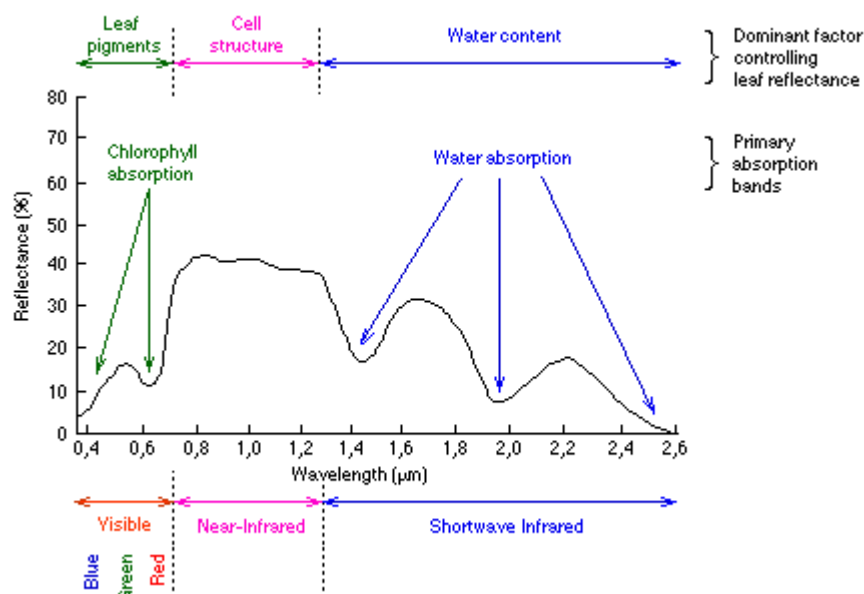


Figura 1. Espectro electromagnético. Longitud de onda expresada en μm . Fuente: Hoffer (1978).

Las propiedades ópticas de las hojas son las mismas cualesquiera de la especie que se trate. Una hoja sana tiene una característica espectral que difiere en cada una de las tres principales regiones del espectro. En la figura 1 podemos observar que en la banda visible (400-700 nm) la absorción de la luz por los pigmentos de la hoja predomina en el espectro de reflectancia de la hoja que es generalmente bajo (como máximo el 15%). Hay dos bandas principales de absorción, en el azul (450 nm) y en el rojo (670 nm) debido a la absorción de los dos principales pigmentos: la clorofila a y b que constituyen el 65% del total de los pigmentos de hoja en las plantas superiores.

En la región del infrarrojo cercano (700-1300 nm), la estructura de la hoja explica las propiedades ópticas. Los pigmentos y la celulosa son transparentes a estas longitudes de onda y por tanto la absorción de la radiación es muy pequeña (del orden del 10% como máximo) pero no la reflectancia y transmitancia que pueden alcanzar hasta el 50%. La tercera región importante corresponde al infrarrojo entre 1300 y 2500 nm, caracterizado por la absorción de la radiación por el agua contenida en la hoja.

En los últimos años, las investigaciones en sensores remotos se han apoyado en el uso de la radiación espectral, capturada por espectro radiómetros de campo y radiómetros de satélite y aerotransportados (espectroscopia de imágenes), para determinar las características de los materiales y/o coberturas sobre la superficie terrestre; estas características pueden ser: la identificación de un tipo de material (tipos de minerales, especies vegetales), o la determinación de una variable

relacionada con un tipo de cobertura (estrés vegetal, estado fenológico) La espectroscopia de imágenes tiene un particular enfoque en la identificación y clasificación de coberturas vegetales, y aún más de las características fenológicas y bioquímicas de las plantas. Los espectros de reflectancia correspondientes a coberturas vegetales evidencian el estado real de las mismas ya que contienen información inherente a: las bandas de absorción de la clorofila en la región del espectro visible, las altas reflectancias de la vegetación sana en el rango del infrarrojo cercano y los efectos de absorción en la región del infrarrojo medio por causa del agua en la vegetación saturada, entre otros (Gates, 1965). De acuerdo con Clevers *et al.* (2002), en la franja de transición entre el rango visible (rojo) y el rango del infrarrojo cercano de las firmas espectrales de vegetación, conocida con el nombre de región red edge, es donde se presentan las características de absorción más importantes de las curvas de reflectancia de la vegetación, debido a que se encuentra un contraste o fuerte cambio entre el rango rojo y el infrarrojo cercano, caracterizado por un valor de reflectancia extremadamente bajo en el visible rojo, seguido por altas reflectancias en el rango infrarrojo cercano, lo cual se asocia con la poca reflectancia de luz roja de la clorofila, la estructura interna y contenido de agua foliar, mostrando que esta región del espectro es una de las más importantes.

Esta característica de absorción tiene un ancho de aproximadamente de 100 nm, entre los 680 y 780 nm, y por lo general se considera su punto de inflexión o de máxima pendiente de la curva, conocido como red edge position (REP), como un parámetro para realizar comparaciones entre firmas espectrales de diferentes especies vegetales, o como indicador del estrés y la senescencia vegetal entre una misma especie (Clevers *et al.*, 2002).

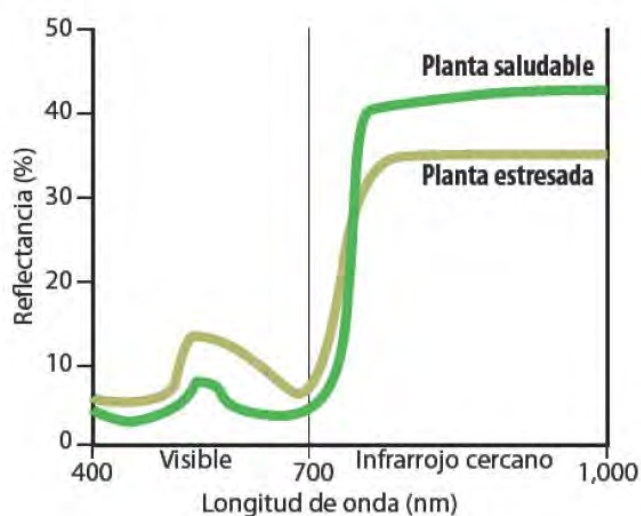


Figura 2. Ejemplos de espectros de reflectancia de una planta sana y de una planta estresada.

Fluorescencia

La fluorescencia es un tipo particular de luminiscencia, que caracteriza a las sustancias que son capaces de absorber energía en forma de radiaciones electromagnéticas y luego emitir parte de esa energía en forma de radiación electromagnética de longitud de onda diferente (Skoog *et al.*, 2007)

En la actualidad, la fluorescencia de la clorofila es una herramienta útil como método no invasivo para monitorizar el estado de las plantas. Además de ser una metodología no destructiva, esta técnica tiene las ventajas de ser rápida y altamente sensible (Tremblay *et al.*, 2012).

Medidas en cubierta vegetal mediante sensores ópticos

Algunos medidores de reflectancia y fluorescencia se emplean a nivel de cubierta vegetal y no de hoja como los medidores foliares de clorofila y por tanto pueden ser montados en tractores y, con el software y hardware adecuados permiten realizar una aplicación variable de fertilizante en función de la reflectancia de la cubierta vegetal (Scharf y Lory, 2009). Las medidas de reflectancia están relacionadas con propiedades de la cubierta vegetal tales como el índice de área foliar, el contenido foliar de N y de clorofila y la biomasa (Lemaire *et al.*, 2008; Jongschaap, 2006). Algunos de los equipos más empleados son el CropScan, GreenSeeker, CropSpec, Crop Circle y Multiplex. Para la aplicación de estas mediciones a la fertilización nitrogenada es muy recomendable disponer de una zona de referencia en la que el cultivo no tenga déficit de N, de esta manera las medidas en cada zona se pueden comparar con las obtenidas en la zona sin déficit (Scharf y Lory, 2009). Los datos de reflectancia medidos por los sensores permiten al usuario calcular índices de vegetación clásicos como el NDVI (Rouse *et al.*, 1973) y otros índices como el índice REDVI (Cao *et al.*, 2013). Barker y Sawyer (2010) han remarcado la importancia del desarrollo de algoritmos a partir de las medidas de reflectancia para la utilización de estos sensores como herramienta para el manejo del N en la producción agrícola, pero advierten que estos algoritmos están limitados a las condiciones de cultivo similares a las que se emplearon en su desarrollo.

Un estudio reciente sobre la viabilidad económica de la aplicación de este tipo de medidas en el cultivo de maíz en EEUU mostró que en la mayoría de los campos estudiados hubo un beneficio económico (Roberts *et al.*, 2010).

Las técnicas basadas en medidas de reflectancia están siendo ampliamente utilizadas en diversos cultivos, sin embargo apenas hay estudios de aplicación para la

gestión del abonado nitrogenado en cultivos hortícolas (El-Shikha *et al.*, 2007; Peña *et al.*, 2012).

Instrumentos de medida

Medidor SPAD

El medidor de clorofila SPAD-502 (Spectrum Technologies, Inc, IL, EE.UU.) es un espectrofotómetro de mano utilizado para medir el color verde de las hojas para determinar el estado nutricional del N en las plantas. El color verde de la hoja está estrechamente relacionado con la clorofila, que a su vez se relaciona con el N en hoja. El medidor SPAD mide la diferencia de luz transmitida por la hoja a 650 nm, pico de absorción de la clorofila, y 940 nm, valor de referencia en la zona del infrarrojo que depende solamente de la estructura de la hoja. El valor SPAD, calculado por el instrumento, es proporcional a la densidad óptica relativa entre las dos longitudes de onda.

Diversos factores como el momento de la medición, la irradiación y el estado hídrico de la planta deben ser considerados al usar el medidor SPAD (Hoel y Solhaug, 1998; Martínez y Guamet, 2004). Algunos trabajos muestran que el medidor de clorofila solo es capaz de detectar deficiencias severas de nitrógeno (Villeneuve *et al.*, 2002), o precisa de una parcela bien fertilizada como referencia (Westcott y Wraith, 1995). Otros autores cuestionan su uso para evaluar de manera fiable la concentración de N en la planta (Himelrick *et al.*, 1993).

Medidor Dualex[®]

El medidor Dualex (Force-A, París, Francia) es un aparato de mano que permite medir la clorofila y los polifenoles en las hojas. El contenido en clorofila se estima, al igual que SPAD, por medio de la relación de transmitancia en la hoja de dos longitudes de onda en las bandas roja e infrarroja del espectro. El contenido en polifenoles se estima a través de la relación de fluorescencias de la clorofila en el infrarrojo, excitada en la banda roja y ultravioleta del espectro (Goulas *et al.*, 2004).

Dualex proporciona un índice NBI como relación entre el contenido en clorofila y flavonoides. Este índice introduce el contenido en flavonoides como un factor de estrés y por lo tanto amplifica las posibles deficiencias nutricionales de la planta. Se ha descrito la acumulación de compuestos fenólicos bajo estrés nutricional (Kiraly, 1964; McClure, 1977; Chishaki y Horiguchi, 1997; Cartelat *et al.*, 2005; Cerovic *et al.*, 2012) y también bajo estrés hídrico (Estiarte *et al.*, 1994).

Medidor Multiplex®

Multiplex® (Force-A, Orsay, Francia) es un sensor óptico multi-paramétrico de mano que genera fluorescencia en los tejidos de la planta empleando múltiples fuentes de luz en las bandas ultravioleta, azul, verde y roja. Puede medir, simultáneamente y de forma no destructiva el contenido de diversos compuestos como los antocianos, los flavonoides o la clorofila. Se han realizado estudios que demuestran la relación entre el estado nutricional de la planta y las medidas con Multiplex, como son los estudios de Zhang *et al.* (2012) en maíz; y Agati *et al.* (2013 y 2015) en cubiertas vegetales.

Apenas existen estudios con Multiplex en relación a la nutrición N de cultivos hortícolas. En estudios realizados en maíz, comparándolo con otros sensores como SPAD y Dualex se han obtenido correlaciones significativas entre los valores del índice SFR de Multiplex, relacionado con el contenido en clorofila y los valores de las medidas de clorofila realizadas con los equipos SPAD y Dualex (Zhang *et al.*, 2012).

Medidor Crop-Circle

El Crop-Circle ACS-430 es un sensor activo de luz, independiente de las condiciones de luz natural, que emite radiación en tres longitudes de onda y mide la reflectancia en las mismas tres longitudes de onda simultáneamente: 670 nm, 730 nm y 780 nm (NIR). Además de los valores de reflectancia genera los índices NDVI y NDRE. El primero es un estimador de la cubierta vegetal (Rouse *et al.*, 1973) y el segundo estima el contenido en nitrógeno (Barnes *et al.*, 2000).

El sensor se puede montar en prácticamente cualquier tipo de vehículo y dotado del programa adecuado permite realizar muestreos muy intensivos sobre los cultivos.

Apenas existen estudios que utilicen Crop-Circle ACS 430 en la determinación del nitrógeno en cultivos hortícolas. Peña *et al.* (2012) utilizando el Crop-Circle 470 encontraron diferencias significativas en la relación de reflectancias NIR/Verde en melón y Shaver *et al.* (2007) utilizando el índice NDVI, observaron diferencias significativas en maíz para diferentes valores de fertilización nitrogenada, obteniendo valores más altos en los tratamientos con una mayor tasa de fertilización.

1.2.3. Modelos de simulación

Algunos autores han propuesto el uso de modelos como herramientas de diagnóstico para situaciones de déficit de agua o de nutrientes (Batchelor *et al.*, 2002; Jones *et al.*, 2003). Sin embargo, los modelos de simulación requieren una cantidad considerable de datos que en ocasiones son difíciles de obtener. No obstante, se ha

propuesto que algunas medidas de las plantas a lo largo de su desarrollo pueden integrarse o “asimilarse” dentro de un modelo para poder corregir alguna de sus imperfecciones (Jongschaap, 2006). Este enfoque está adquiriendo mayor relevancia a medida que se van desarrollando instrumentos que permiten estimar con cierta facilidad algunos datos sobre el estado nutricional de los cultivos en cada momento (Prévot *et al.*, 2003; Baret *et al.*, 2007). Los modelos, una vez recalibrados a partir de las medidas obtenidas en determinados momentos, podrían utilizarse para determinar la fertilización nitrogenada más adecuada (Houlès, 2004).

Existen muchos modelos de simulación de la dinámica del N en sistemas agrícolas pero la mayoría de ellos son para cultivos extensivos, cereales principalmente. En general, su objetivo es predecir el movimiento y transformación del N en el sistema suelo-planta, pero algunos tienen unos requerimientos menores de datos, lo que los convierte en mejores candidatos para ser empleados en las recomendaciones de abonado nitrogenado. Entre los modelos más recientes o que se han empleado y testado más, están: DSSAT (Jones *et al.*, 2003), STICS (Brisson *et al.*, 2003), APSIM (Keating *et al.*, 2003), NDICEA (Van der Burgt *et al.*, 2006), NLEAP (Shaffer *et al.*, 1991; Shaffer *et al.*, 2010), N_ABLE (Greenwood, 2001), EU-Rotate_N (Rahn *et al.*, 2010a), SMCR_N (Zhang *et al.*, 2010). Información sobre otros modelos de N en el contexto agrícola se puede encontrar en Kersebaum *et al.* (2007) y Cannavo *et al.* (2008).

De estos modelos, los que se han desarrollado con el objetivo de ser empleados especialmente en los cultivos hortícolas son el N_ABLE, EU-Rotate_N y SMCR_N. Estos tres modelos tienen algunos puntos en común ya que el módulo de crecimiento sigue el patrón aplicado por Greenwood en el N_ABLE (Greenwood, 2001). El modelo NLEAP también se ha evaluado en algunos cultivos hortícolas con resultados satisfactorios (Delgado *et al.*, 2000). El modelo EU-Rotate_N (Rahn *et al.*, 2010b) ha sido evaluado en otros trabajos con resultados aceptables (Doltra y Muñoz, 2010; Doltra *et al.*, 2010).

En general, todos los modelos requieren una calibración y validación en un entorno particular, definido por el cultivo, suelo, clima y prácticas de cultivo. Para ello es necesario disponer de un conjunto de datos de ensayos de fertilización nitrogenada, teniendo en cuenta que, cuanto mayor sea la base de datos en los que calibrar un modelo, mayor será en general, la fiabilidad de las predicciones.

1.2.4. Sistemas basados en el balance de nitrógeno

Estos sistemas se pueden considerar como modelos muy simplificados en los que los diferentes componentes del balance de N se estiman o calculan de manera aproximada.

La ecuación general del balance de nitrógeno se puede expresar (Meisinger y Randall, 1991) del siguiente modo:

$$(N_f + N_r + N_{mn} + N_{fd} + N_{da} + N_a) - (N_l + N_p + N_d + N_v) = \Delta N_s$$

donde N_f es el N aportado como fertilizante, N_r es el N aportado en el agua de riego, N_{mn} es el N aportado por la mineralización neta de la materia orgánica del suelo, N_{fd} es el N aportado por la fijación biológica, N_{da} es el N aportado por deposición atmosférica, N_a es el amonio liberado desde el espacio interlaminar de las arcillas, N_l es el N lixiviado, N_p es el N extraído por el cultivo, N_d son las pérdidas de N por desnitrificación, N_v son las pérdidas de N por volatilización y ΔN_s es la variación del contenido de nitrógeno mineral en el perfil del suelo durante el cultivo.

Algunos ejemplos de este tipo de programas son el AZODYN (Jeuffroy y Recous, 1999) empleado en el trigo o el AZOFERT (Dubrulle *et al.*, 2003) evaluado en cereales y remolacha azucarera, los dos en Francia.

- **Mineralización**

En los sistemas basados en medidas de suelo, en modelos de simulación o en el balance de N, el aporte de N por la mineralización de la materia orgánica del suelo puede ser una parte importante del N disponible para los cultivos y, por tanto, su determinación es de interés. Fink y Scharpf (2000) y Tremblay *et al.* (2001) en trabajos utilizando plantas hortícolas estimaron una tasa de mineralización de 5 kgN/ha y semana lo que supone que en un cultivo de coliflor de 90 días se podría alcanzar una aportación de 60 kgN/ha.

Las medidas de mineralización mediante ensayos de incubación en laboratorio presentan problemas de transferencia a las condiciones de campo (Lidón *et al.*, 2005). Por ello se han desarrollado métodos para determinar la tasa de mineralización del N en campo (Hatch *et al.*, 2000), que tienen en común el aislamiento de una determinada cantidad de suelo durante un periodo de incubación, evitando así procesos que pueden afectar a la reserva de N inorgánico, como la absorción radicular, las pérdidas por lixiviación y los aportes por deposición atmosférica. Uno de estos métodos es el de los tubos con resina (IER-Core), propuesta por DiStefano y Gholz (1986) y modificado por Fisk y Schmidt (1995). En un meta-análisis de los diferentes métodos de

predicción de la mineralización mediante análisis del suelo publicado recientemente (Ros *et al.*, 2011) los autores abogan no por un único análisis o test sino por un enfoque en el que se consideren tanto el análisis químico como otras propiedades del suelo y condiciones ambientales.

1.3. Situación actual

En el presente trabajo se han evaluado diferentes medidas de nitrógeno en planta para su uso como sistema de recomendación de abonado nitrogenado en el cultivo de coliflor. Se engloba dentro del proyecto nacional “Integración de medidas de suelo, planta y modelos de simulación para el manejo eficiente de nitrógeno en los cultivos hortícolas” (RTA-2011-00136-C04-02) financiado por el I.N.I.A. y en el que han colaborado diferentes Comunidades Autónomas.

El proyecto tiene dos aspectos claramente diferenciados. En el primero se pretende evaluar e integrar diferentes métodos para la determinación del abonado nitrogenado en algunos cultivos hortícolas. Unos basados en medidas de suelo (contenido de N mineral) y otros basados tanto en medidas en la planta (nitrato en savia, clorofila y reflectancia de la cubierta vegetal) como en modelos de simulación. En el segundo, se pretende desarrollar un sistema de recomendación de abonado en el que a partir de información fácilmente disponible para el agricultor (tipo de suelo, datos de abonado y producción del cultivo anterior, y producción esperada del cultivo en cuestión) se pueda realizar una recomendación de abonado nitrogenado ajustada a las necesidades. Este segundo aspecto es de aplicación más inmediata al sector hortícola. Los trabajos de este proyecto en la C.A. de La Rioja se han centrado en el cultivo de la coliflor.

2. OBJETIVOS

2. OBJETIVOS

2. Objetivos

El objetivo general de la presente Tesis Doctoral ha sido evaluar diferentes medidas de nitrógeno en planta para su uso como sistema de recomendación de abonado nitrogenado en el cultivo de la coliflor.

A su vez, para lograr este objetivo, se ha propuesto:

- Estudiar el efecto del nitrógeno disponible sobre la producción y la eficiencia en el uso del nitrógeno en un cultivo de coliflor (*Brassica oleracea* var. *botrytis*).
- Evaluar la medida de concentración de nitrato en savia y el método Nmin en un cultivo de coliflor (*Brassica oleracea* var. *botrytis*) para determinar el estado nutricional.
- Evaluar la reflectancia, fluorescencia y transmitancia de hojas mediante sensores ópticos, como estimadores del estado nutricional de nitrógeno en un cultivo de coliflor (*Brassica oleracea* var. *botrytis*).

3. MATERIAL Y MÉTODOS

3. Material y métodos

El presente capítulo de material y métodos se ha estructurado en tres grandes apartados:

El primero de ellos hace referencia a los ensayos de fertilización nitrogenada de coliflor de la variedad Barcelona realizados en las parcelas experimentales de la Finca Valdegón del CIDA-SIDTA (Servicio de Investigación y Desarrollo Tecnológico Agroalimentario) del Gobierno de La Rioja. El segundo apartado describe los ensayos de fertilización nitrogenada de coliflor de la variedad Typical que se llevaron a cabo en la misma finca experimental. Finalmente, el tercer apartado hace referencia a los ensayos de fertilización nitrogenada de coliflor (var. Casper) realizados en la Finca Experimental del INTIA (Instituto Navarro de Tecnologías e Infraestructuras Agroalimentarias) en Sartaguda (Navarra). La metodología empleada fue la misma en todos los ensayos, salvo excepciones que serán descritas convenientemente.

Los análisis de laboratorio necesarios para la realización del estudio se llevaron a cabo en el CIDA-SIDTA y en el Laboratorio Regional del Gobierno de La Rioja.

3.1. Ensayos de fertilización nitrogenada de coliflor de la variedad Barcelona

Se realizaron tres ensayos en parcelas experimentales de la Finca Valdegón, en Agoncillo (La Rioja), situada a una altitud de 342 m sobre el nivel del mar (UTM, 558.332/4.702.004). Debido a que los ensayos se realizaron en parcelas diferentes y con distintas dosis de abonado, se ha separado la descripción de los tres experimentos realizados en los años 2012, 2013 y 2014.

3.1.1. Año 2012

Localización y condiciones iniciales

En la experiencia de 2012, la coliflor de la variedad Barcelona, de ciclo corto de 90 días y con destino al mercado fresco, se trasplantó en un suelo de textura franca, clasificado como *torripsammets oxiácuico* (Soil Survey Staff, 2006). Sus propiedades se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades físico-químicas del suelo en var. Barcelona (2012).

Prof. cm	Arena %	Limo ¹ %	Arcilla ¹ %	M.O. ² %	pH ³	C.E. ⁴ dS/m	P ⁵ ppm	K ⁵ ppm	Textura ¹
0-15	28,1	49,1	22,8	1,48	8,3	0,31	6,16	194,3	Franco
15-30	26,6	50,2	23,2	1,45	8,3	0,30	7,05	200,9	Franco limoso
30-60	26,6	50,7	22,7	1,14	8,2	0,86	3,48	148,2	Franco limoso
60-90	31,2	44,5	24,4	0,77	8,3	0,88	0,78	113,7	Franco

1) USDA. 2) Materia orgánica oxidable. 3) H₂O (1:5). 4) 25°C (1:5). 5) Mehlich III.

Diseño experimental

Se realizaron cuatro tratamientos con cuatro repeticiones en un diseño aleatorizado en función del N_{min} inicial. La parcela elemental tenía una superficie de 81 m² y contenía 6 líneas de cultivo. Se consideró una profundidad de enraizamiento máxima de 0,6 m para el cálculo del balance de nitrógeno, lixiviados, etc. (Figura 3).

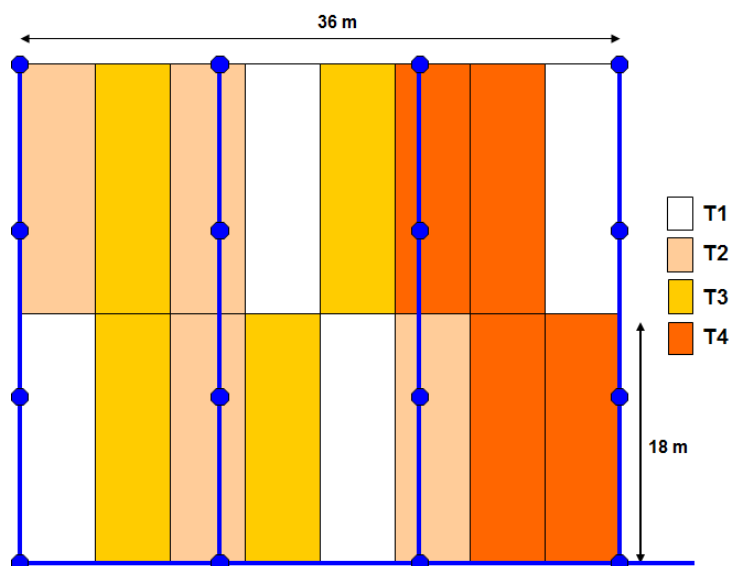


Figura 3. Diseño experimental y distribución de los tratamientos en función del nitrógeno mineral disponible (N_{min}+N_{fertilizante}) en el experimento de 2012 con la var. Barcelona. N_{disponible} (kgN/ha): T1: 93; T2: 189; T3: 270; T4: 322. Las líneas y círculos azules indican la red de aspersores.

Como abonado de pre-plantación se aplicaron 0-150-275 kg/ha de un abono complejo N-P-K y en cobertera se realizó una sola aplicación de fertilizante nitrogenado a los 31 días desde el trasplante (DDT) en forma de nitrosulfato amónico 26-0-0, a una dosis variable en función del nitrógeno disponible de los tratamientos (Tabla 2).

Tabla 2. Tratamientos experimentales en función del N disponible en var. Barcelona (2012).

Tratamientos	T1	T2	T3	T4
N _{disponible} (kgN/ha)	93	189	270	322
N _{min} ¹ (kgN/ha)	93	102	121	128
N _{fertilizante} (kgN/ha)	0	87	149	194

1) Nitrato y Amonio

El trasplante se realizó el 13 de agosto en mesetas separadas 1,5 m entre ejes, con dos líneas de cultivo por meseta (0,75 x 0,6 m), obteniéndose una densidad de 23.412 plantas/ha. El riego se realizó por aspersión según programación dual FAO56

(Allen *et al.*, 1998). Se realizó un balance diario de agua hasta 0,6 m. de profundidad con datos suministrados por el SIAR (Servicio de Información Agroclimática de La Rioja) de la Estación Agroclimática situada en la misma finca. Los datos de cobertura y altura del cultivo se introducían diariamente a través de los modelos que se describen posteriormente. Para comprobar la evolución del perfil humedecido se instalaron ocho sondas Watermark en cuatro estaciones distribuidas en el ensayo a dos profundidades diferentes, 0,3 y 0,6 m. Los tratamientos fitosanitarios fueron los recomendados para mantener el buen estado sanitario del cultivo.

Muestreos y determinaciones

Para disponer de datos con que actualizar el balance diario de agua se tomaron datos de la altura y la cobertura del cultivo en los cuatro tratamientos. Para la determinación de la cobertura se tomaron fotografías digitales periódicamente de todas las repeticiones del ensayo y mediante el programa de tratamiento de imágenes Gimp® se calculó la cobertura del cultivo (Campillo *et al.*, 2010). En el mismo día de la toma, se midió la altura de cinco plantas por repetición.

Se modelizó la cobertura del cultivo (COB, %) en función de la integral térmica con umbral de 5,5°C ($IT_{5,5}$) (Maroto, 2002) según un modelo logístico del tipo:

$$COB = \frac{A}{1 + EXP(-B(IT_{5,5} - C))} \quad [1]$$

Donde A, estima la cobertura máxima del cultivo, B estima la pendiente inicial y C estima el momento en que se alcanza el 50% de la cobertura final.

La altura del cultivo (m), se trató de modo similar, en función de la integral térmica con umbral de 5,5°C según un modelo logístico del tipo:

$$ALT = A + \frac{B}{1 + EXP(-C(IT_{5,5} - D))} \quad [2]$$

Donde A, estima la altura inicial del cultivo en el trasplante y A+B la altura máxima del cultivo. Los parámetros C y D tienen el mismo significado que el indicado en el modelo de cobertura.

El ajuste de ambos modelos se realizó mediante regresión no lineal y la posterior comparación entre los tratamientos de los correspondientes parámetros mediante una *t* de Student.

Se determinó el Nmin (nitrato y amonio) en la plantación, a los cuarenta y ocho días desde el trasplante (DDT) y en la cosecha. Para ello se tomaron dos muestras en

cada parcela elemental, mezclando el suelo por capas, a 0-15, 15-30, 30-60 y 60-90 cm de profundidad. Se realizó una extracción con KCl 1M y se analizó el contenido en nitrato y amonio con el autoanalizador AA3 de AxFlow.

La tasa de mineralización se determinó aproximadamente cada quince días. Para ello se utilizaron tubos de PVC de 0,25 m de longitud en cuyo extremo distal había instalado un filtro de resinas para recoger el nitrato lixiviado (DiStefano y Gholz, 1986). Se insertó un tubo en cada parcela elemental manteniendo el suelo inalterado. La mineralización neta en cada tubo se calculó como la diferencia entre el contenido de Nmin final e inicial más el nitrógeno retenido en las resinas.

A los 28, 49 y 63 DDT y en la cosecha, se determinó el peso fresco, el peso seco, el Ntotal y el N-NO_3^- en hojas y pellas de cinco plantas por parcela elemental. El N total se analizó por el método Kjeldhal (AOAC, 1990) y para analizar el contenido en nitrato, se realizó una extracción con $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ al 0,025 M y se midió la concentración de nitrato con el método del electrodo de ión selectivo (Jones y Case, 1990; Miller, 1998).

Al conjunto de todos los resultados obtenidos de peso seco y de contenido en nitrógeno total en los ensayos para cada variedad, se aplicaron el modelo de nitrógeno crítico general de Greenwood (1986), el modelo para el género *Brassica* de Greenwood (1996) y el modelo EU_Rotate (Rahn *et al.*, 2010a y 2010b) con el propósito de comprobar qué modelo discriminaba mejor los tratamientos deficitarios en nitrógeno de los no deficitarios. Se consideraron como tratamientos deficitarios aquellos que mostraron una producción significativamente menor que el resto y cuyo nitrógeno disponible estaba por debajo de los niveles considerados como recomendados en la bibliografía y en el propio diseño experimental de los ensayos. En la figura 4 se representan los valores obtenidos con la var. Barcelona en los ensayos de 2012, 2013 y 2014, para biomásas mayores de 1 Mg/ha, así como los modelos citados anteriormente. No se han considerado los valores de biomasa menores de 1 Mg/ha ya que para estos valores de biomasa la concentración de nitrógeno crítico es independiente de la biomasa aérea (Justes *et al.*, 1994). De los tres modelos estudiados, el modelo general de Greenwood (1986) situó adecuadamente al 97,4% de los tratamientos considerados como no deficitarios y al 62,1% de los deficitarios. Los modelos de Greenwood (1996) y EU-Rotate (Rahn *et al.*, 2010a y 2010b) situaron correctamente al 100% de tratamientos deficitarios pero solamente al 18 y 39% de los no deficitarios respectivamente. Por ello, en el análisis de resultados se empleará la forma general de este modelo.

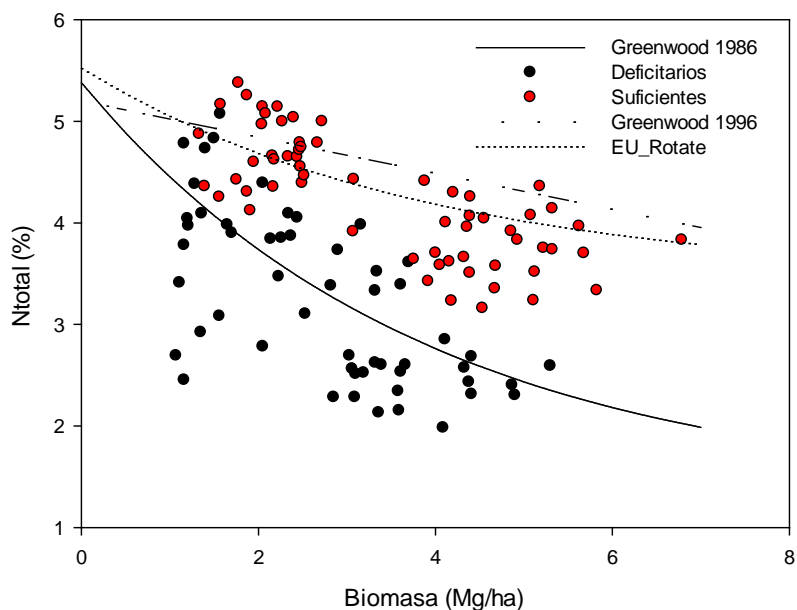


Figura 4. Nitrógeno total en hoja (%) y biomasa (Mg/ha) de plantas de coliflor var. Barcelona en los ensayos de 2012, 2013 y 2014. Líneas correspondientes a los modelos de nitrógeno crítico general de Greenwood (1986), de *Brassica* (Greenwood (1996) y EU-Rotate (Rahn *et al.*, 2010a y 2010b). Deficitario: tratamientos y repeticiones cuyo nitrógeno disponible está por debajo de los niveles considerados como recomendables en la literatura y en el propio diseño experimental. Valores de biomasa superiores a 1 Mg/ha.

La cosecha se realizó entre 66 y 84 DDT. En una subparcela de 9 m² se recogieron todas las plantas. En cada una de ellas se determinó su peso total y el peso de la pella con y sin las hojas basales. Se consideraron como comerciales todas las pellas de calidad Extra o Primera y un diámetro superior a 11 cm. (CEE, 1998). En este ensayo y en los posteriores se ajustaron los datos de cosecha en función del nitrógeno mineral disponible, en una regresión lineal en dos fases (Ecuación 3), buscando el valor de mayor producción para el menor valor de nitrógeno mineral disponible en el suelo.

$$y = b * Ndisp(Ndisp < a) + b * a(Ndisp \geq a) \quad [3]$$

Donde y es la producción de pellas, $Ndisp$ es el contenido de nitrógeno mineral disponible en el suelo y, a y b son parámetros de la regresión. El parámetro a corresponde al valor de la abscisa a partir del cual la pendiente se hace igual a cero. El producto $a \times b$ es el valor de la ordenada que estima el valor máximo de la producción.

En cuatro fechas a lo largo del cultivo, y sobre la misma hoja, se realizaron medidas mediante los equipos SPAD (Mod. 502, Minolta), Dualex® y Multiplex®

(Force-A). Las medidas se realizaron a las 11:00 h, en una hoja totalmente expandida por planta, en diez plantas por parcela elemental. Cinco pecíolos de estas plantas se trocearon y mezclaron en el laboratorio para extraer la savia mediante prensado y una alícuota de esta muestra se diluyó (cuando fue necesario) en agua desionizada midiéndose el contenido en N-NO_3^- mediante un reflectómetro portátil RQflex®.

El sensor SPAD es un medidor de la concentración relativa de clorofila por medio de la luz transmitida a través de la hoja en 650 nm (longitud de onda fotosintéticamente activa) y 940 nm.

El sensor Dualex proporciona tres índices. El índice Chl, es un estimador del contenido en clorofila por medio de la relación de transmitancias en la hoja entre el rojo, a 710 nm y el infrarrojo cercano (NIR), a 850 nm. El índice FLAV es un estimador del contenido en flavonoides en la hoja que aumenta en condiciones de deficiencia de nitrógeno. El índice de balance de nitrógeno, NBI, se calcula como la relación entre Chl y FLAV.

El índice Chl, es un estimador del contenido en clorofila y se expresa como:

$$Chl = \frac{\tau_{NIR} - \tau_R}{\tau_R} \quad [4]$$

donde τ_{NIR} y τ_R son las transmitancias en la banda del infrarrojo cercano (NIR) y en la banda del rojo (R).

El índice FLAV, es un estimador del contenido en flavonoides y se expresa como:

$$FLAV = \log \frac{CF_{NIR}^R}{CF_{NIR}^{UV-A}} \quad [5]$$

donde CF_{NIR} es la fluorescencia de la clorofila en el infrarrojo cercano (NIR) excitadas por el rojo (R) y por el ultravioleta (UV-A). La diferencia entre ambas fluorescencias es proporcional a la cantidad de flavonoides presentes en la epidermis de la hoja. A partir de los índices Chl y FLAV es posible calcular el índice NBI como el cociente entre ambos.

El sensor Multiplex genera fluorescencia en los tejidos vegetales utilizando la excitación de varias fuentes de luz para obtener hasta veinte parámetros relacionados con el estado fisiológico de la planta. En este trabajo se han utilizado el índice SFR-R, que es un estimador del contenido en clorofila obtenido por la relación de fluorescencia entre el rojo y el rojo lejano, y el NBI.

El índice SFR se expresa como:

$$SFR - R = \frac{F_{NIR}^{visible}}{F_R^{visible}} \quad [6]$$

donde F_{NIR} y F_R son las fluorescencias de la clorofila en el infrarrojo cercano (NIR) y en el rojo (R) respectivamente, excitadas ambas por el visible.

El índice FLAV se obtiene de modo similar al descrito para el sensor DUALEX. A partir de los índices SFR-R y FLAV es posible calcular el índice NBI como la relación clorofilas/flavonoles.

El 1 de octubre, a los 49 DDT, se realizó una medida de reflectancia con el equipo Crop-Circle ACS-430 (Holland Scientific) que mide la reflectancia del suelo y del cultivo a 670, 730 y 780 nm. El sensor Crop-Circle es un sensor activo que emite radiación en la banda visible y por tanto no depende de la radiación solar para la medida de la reflectancia. Se realizaron dos trayectos de 5 m sobre dos líneas interiores de cada parcela elemental, a una altura de 0,9 m sobre el suelo, lo que supone un barrido de 0,75 m a nivel de la superficie del suelo. Este sensor proporciona los índices NDVI y NDRE. El índice NDVI (Rouse *et al.*, 1973) es uno de los índices de vegetación más utilizados, y varía entre 0,1 para el suelo desnudo y 0,9-1,0 en cubiertas vegetales plenamente desarrolladas. Se calcula como el cociente entre la diferencia y la suma de las reflectancias del NIR (780 nm) y del rojo (670 nm). El índice NDRE es similar al NDVI pero utiliza la reflectancia a 730 nm en vez de a 670 nm y es sensible a los cambios en el contenido en clorofila A o en nitrógeno de la hoja el menor valor del índice NDRE supone un incremento en la reflectancia a 730 nm que indica un menor valor del contenido en clorofila (Fitzgerald *et al.*, 2006).

Se elaboró un balance de nitrógeno en el sistema suelo-planta. En este balance se establecieron como parámetros de entrada al sistema: el nitrógeno mineral inicial presente en el suelo, el aplicado en forma de fertilizante y el nitrógeno aportado a través de la mineralización de la materia orgánica del suelo, durante el ciclo del cultivo, y como parámetros de salida se tuvieron en cuenta; el nitrógeno mineral presente en el suelo al finalizar el cultivo, el nitrógeno extraído por la planta y el nitrógeno lixiviado.

$$(N_{min} + N_{fert} + N_{miner} - N_{minf} - N_{ext} - N_{lix}) = AN_s \quad [7]$$

Donde N_{min} es el nitrógeno mineral inicial presente en el suelo, N_{fert} es el N aportado como fertilizante, N_{miner} es el N aportado por la mineralización neta de la materia orgánica del suelo, N_{lix} es el N lixiviado, N_{ext} es el N extraído por el cultivo, N_{minf}

es el nitrógeno mineral en el suelo al finalizar el cultivo, y AN_s es la variación del contenido de nitrógeno mineral en el perfil del suelo durante el cultivo.

Se calculó el lixiviado de $N-NO_3^-$ a partir de un balance de agua y de la concentración media de $N-NO_3^-$ entre las capas de 30-60 y 60-90 cm. La eficiencia en el uso del nitrógeno (EUN) se calculó como la relación entre la producción comercial y nitrógeno disponible (N mineral inicial + N aplicado) (Moll *et al.*, 1982).

En el análisis estadístico de los resultados, se han empleado el análisis de la varianza (ANOVA), análisis de regresión lineal y no lineal, y pruebas de Student y Tukey utilizando el programa SYSTAT®12. Previo a los análisis se ha comprobado la normalidad y homocedasticidad de los datos. En la Tabla 3 se presenta un resumen de algunos datos fenológicos y de cultivo.

Tabla 3. Datos del ensayo en var. Barcelona (2012).

Fecha de plantación	13/08/2012
Densidad de plantación (plantas.ha-1)	23.412
Número de riegos	16
Riego acumulado (mm)	211
Precipitación (mm)	121
Abonado	13/09/2012
Inicio de formación de pellas*	01/10/2012
Período de recolección	17/10/12-05/11/12

*Se considera el inicio de formación de pellas, el momento en que se detectan pellas de 1mm de diámetro.

3.1.2. Año 2013

Localización y condiciones iniciales

La experiencia se llevó a cabo en la finca del SIDTA. Se utilizó coliflor de la variedad Barcelona en un suelo de textura franco arenosa y estaba clasificado como *torriorthens oxiácuico* (Soil Survey Staff, 2006) y sus propiedades se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Propiedades físico-químicas del suelo en var. Barcelona (2013).

Prof. cm	Arena %	Limo ¹ %	Arcilla ¹ %	M.O. ² %	pH ³	C.E. ⁴ dS/m	P ⁵ ppm	K ⁵ ppm	Textura ¹
0-15	57,7	32,1	10,3	0,56	8,4	0,16	4,2	132,0	Fco. arenoso
15-30	57,0	32,6	10,5	0,56	8,5	0,16	7,6	111,9	Fco. arenoso
30-60	73,9	19,1	7,0	0,26	8,7	0,10	0,8	50,0	Fco. arenoso
60-90	84,3	11,4	4,3	0,13	8,8	0,09	0,1	27,9	Fco. arenoso

1) USDA. 2) Materia orgánica oxidable. 3) H₂O (1:5). 4) 25°C (1:5). 5) Mehlich III.

Diseño experimental

Las características del ensayo en cuanto a distribución en campo, riego, cálculo de las necesidades hídricas, cobertura y altura del cultivo e instalación de sondas Watermark fueron similares a las del año 2012. Hay que señalar que el 6 de septiembre tuvo lugar un evento de granizo que afectó al cultivo, retrasando su desarrollo, si bien no afectó al desarrollo final de las plantas.

El trasplante se realizó el 7 de agosto en mesetas separadas 1,5 m entre ejes, a doble línea por meseta y una densidad de 20.550 plantas/ha. En pre-plantación se aplicaron 0-140-260 kg/ha de un abono complejo N-P-K, y en cobertera se realizó una aplicación de fertilizante nitrogenado a los 26 días desde el trasplante (DDT) en forma de nitrosulfato amónico 26-0-0, a una dosis variable en función del nitrógeno disponible (Tabla 5).

Tabla 5. Tratamientos experimentales en función del N disponible en var. Barcelona (2013).

Tratamientos	T1	T2	T3	T4
Ndisponible (kgN/ha)	67	130	193	260
Nmin inicial (kgN/ha)	67	80	93	130
Nfertilizante (kgN/ha)	0	50	100	130

El diseño, se estableció en función del nitrógeno mineral (Nmin) inicial del suelo y constaba de cuatro tratamientos con cuatro repeticiones (Tabla 5). La parcela elemental tenía una superficie de 81 m² y contenía 6 líneas de cultivo (Figura 5).

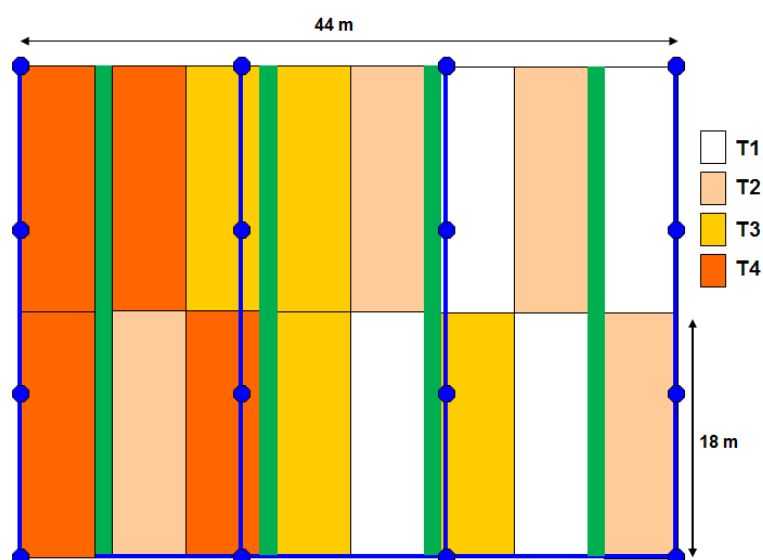


Figura 5. Diseño experimental y distribución de los tratamientos de nitrógeno mineral disponible en la parcela del experimento de 2013 con la var. Barcelona. Ndisponible (kgN/ha): T1: 67; T2: 130; T3: 193; T4: 260. Las líneas y círculos azules indican la red de aspersores. Las áreas verdes indican pasillos.

Muestreos y determinaciones

Se determinó el N_{min} (nitrato y amonio) en la plantación, a los cuarenta y ocho días desde el trasplante (DDT) y en la cosecha. Para ello se tomaron dos muestras en cada parcela elemental a 0-15, 15-30, 30-60 y 60-90 cm de profundidad, mezclando el suelo por capas.

La tasa de mineralización se determinó aproximadamente cada quince días mediante filtros de resinas (DiStefano y Gholz, 1986). Se insertó un tubo en cada parcela elemental de los tratamientos T1 y T4 manteniendo el suelo inalterado.

A los 23, 43, 56 y 76 DDT y en la cosecha, se determinó el peso fresco, el peso seco y el N_{total} en hojas y pellas de cinco plantas por parcela elemental.

La cosecha se realizó entre 64 y 86 DDT en una subparcela de 9 m² donde se recogieron todas las plantas. En cada una de ellas se determinó su peso total y el peso de la pella. Se consideraron como comerciales todas las pellas de calidad Extra o Primera y un diámetro superior a 11 cm. (CEE, 1998).

En cinco fechas durante el cultivo, se realizaron medidas en hoja con los equipos SPAD (Mod. 502, Minolta), Dualex® y Multiplex® (Force-A), a las 11:00 h, en una hoja adulta por planta, en diez plantas por parcela elemental. Cinco pecíolos de estas hojas se trocearon y mezclaron en el laboratorio para extraer la savia y determinar el contenido de nitrato por el método explicado en el ensayo de 2012. En tres fechas, se tomaron medidas de reflectancia a 670, 730 y 780 nm, con el equipo Crop-Circle™ ACS-430 (Holland Scientific). Se realizó un trayecto de 12 metros sobre las dos líneas interiores de cada parcela elemental.

Al igual que en el año anterior, se realizó un balance de nitrógeno. Se calculó el lixiviado de N-NO₃⁻ a partir de un balance de agua y de la concentración media de N-NO₃⁻ entre las capas de 30-60 y 60-90 cm. La eficiencia en el uso del nitrógeno (EUN) se calculó como la relación entre la producción comercial y nitrógeno disponible (N mineral inicial + N aplicado) (Moll *et al.*, 1982).

El tratamiento estadístico de los resultados ha sido similar al descrito en el ensayo de 2012. En la Tabla 6 se presenta un resumen de algunos datos fenológicos y de cultivo.

3. MATERIAL Y MÉTODOS

Tabla 6. Datos del ensayo en var. Barcelona (2013).

Fecha de plantación	07/08/2013
Densidad de plantación (plantas.ha-1)	20.550
Número de riegos	20
Riego acumulado (mm)	194
Precipitación (mm)	65
Abonado	02/09/2013
Inicio de formación de pellas*	30/09/2013
Período de recolección	09/10/13-31/10/13

*Se considera el inicio de formación de pellas, el momento en que se detectan pellas de 1mm de diámetro.

3.1.3. Año 2014

Localización y condiciones iniciales

La experiencia se llevó a cabo en la finca del SIDTA. Se utilizó coliflor de la variedad Barcelona en un suelo de textura franca y estaba clasificado como *torriorthens oxiácuico* (Soil Survey Staff, 2006) y sus propiedades se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7. Propiedades físico-químicas del suelo en var. Barcelona (2014).

Prof. cm	Arena %	Limo ¹ %	Arcilla ¹ %	M.O. ² %	pH ³	C.E. ⁴ dS/m	P ⁵ ppm	K ⁵ ppm	Textura ¹
0-15	28,10	49,11	22,79	1,48	8,26	0,31	6,2	194,3	Franco
15-30	26,61	50,19	23,20	1,45	8,30	0,30	7,0	200,9	Franco
30-60	26,60	50,70	22,71	1,14	8,22	0,86	3,5	148,1	Franco
60-90	31,15	44,48	24,37	0,77	8,29	0,88	0,8	113,7	Franco

1) USDA. 2) Materia orgánica oxidable. 3) H₂O (1:5). 4) 25°C (1:5). 5) Mehlich III.

Diseño experimental

Las características del ensayo en cuanto a la distribución en campo, riego, cálculo de las necesidades hídricas, cobertura y altura del cultivo e instalación de sondas Watermark fueron similares a las de los años 2012 y 2013. El trasplante se realizó el 11 de agosto en mesetas separadas 1,5 m entre ejes, a doble línea por meseta y una densidad de 20.440 plantas/ha. En pre-plantación se aplicaron 0-82-213 kg/ha de un abono complejo N-P-K, y en cobertera se realizó una aplicación de fertilizante nitrogenado a los 26 días desde el trasplante (DDT) en forma de nitrosulfato amónico 26-0-0, a una dosis variable en función del nitrógeno disponible (Tabla 8).

Tabla 8. Tratamientos experimentales en función del N disponible en var. Barcelona (2014).

Tratamientos	T1	T2	T3	T4
Ndisponible (kgN/ha)	0	130	190	260
Nmin inicial (kgN/ha)	72	94	111	124
Nfertilizante (kgN/ha)	0	36	79	136

El diseño en bloques, se estableció en función del nitrógeno mineral (Nmin) inicial del suelo y constaba de cuatro tratamientos con cinco repeticiones en los tratamientos T1 y T2 y cuatro en los tratamientos T3 y T4 (Tabla 8). La parcela elemental tenía una superficie de 81 m² y contenía 6 líneas de cultivo (Figura 6).

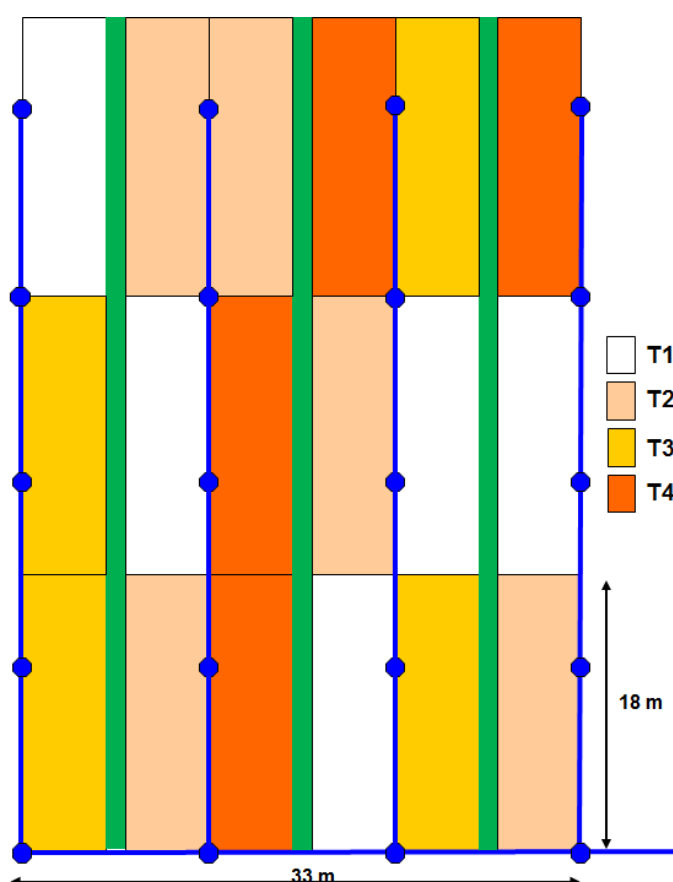


Figura 6. Diseño experimental y distribución de los tratamientos de nitrógeno mineral disponible en la parcela del experimento de 2014 con la var. Barcelona. Ndisponible (kgN/ha): T1: 72; T2: 130; T3: 190; T4: 260. Las líneas y círculos azules indican la red de aspersores. Las áreas verdes indican pasillos.

Muestreos y determinaciones

Se determinó el Nmin (nitrato y amonio) en la plantación, a los cincuenta y cuatro días desde el trasplante (DDT) y en la cosecha. Para ello se tomaron dos

muestras en cada parcela elemental a 0-15, 15-30, 30-60 y 60-90 cm de profundidad, mezclando el suelo por capas.

La tasa de mineralización se determinó aproximadamente cada quince días en todas las parcelas elementales del ensayo de acuerdo a la metodología descrita para el ensayo de 2013. Se insertó un tubo en cada parcela elemental de todos los tratamientos manteniendo el suelo inalterado.

A los 29, 55, 74 DDT y en la cosecha, se determinó el peso fresco, el peso seco y el Ntotal en hojas y pellas de cinco plantas por parcela elemental. La cosecha se realizó entre 71 y 90 DDT en una subparcela de 9 m² donde se recogieron todas las plantas. En cada una de ellas se determinó su peso total y el peso de la pella. Se consideraron como comerciales todas las pellas de calidad Extra o Primera y un diámetro superior a 11 cm. (CEE, 1998).

En tres fechas durante el cultivo, se realizaron medidas en hoja con los equipos SPAD (Mod. 502, Minolta), Dualex® y Multiplex® (Force-A), a las 11:00 h, en una hoja adulta por planta, en diez plantas por parcela elemental. Cinco pecíolos de estas hojas se trocearon y mezclaron en el laboratorio para extraer la savia y determinar el contenido de nitrato por el método explicado en el ensayo de 2012. En tres fechas, se tomaron medidas de reflectancia a 670, 730 y 780 nm, con el equipo Crop-Circle™ ACS-430 (Holland Scientific) en un trayecto de 12 metros.

Al igual que en el año anterior, se realizó un balance de nitrógeno. El tratamiento de datos ha sido similar al de años anteriores. En la Tabla 9 se presenta un resumen de algunos datos fenológicos y de cultivo.

Tabla 9. Datos del ensayo en var. Barcelona (2014).

Fecha de plantación	11/08/2014
Densidad de plantación (plantas.ha-1)	20.440
Número de riegos	16
Riego acumulado (mm)	224
Precipitación (mm)	73
Abonado	11/09/2014
Inicio de formación de pellas*	03/10/2014
Período de recolección	22/10/14-10/11/14

*Se considera el inicio de formación de pellas, el momento en que se detectan pellas de 1mm de diámetro.

3.2. Ensayos de fertilización nitrogenada de coliflor de la variedad Typical

En el presente capítulo se describen los experimentos de coliflor de la variedad Typical en condiciones de campo. Debido a que se realizaron ensayos en varias

parcelas y sujetos a condiciones, tratamientos y dosis de abonado diferentes, se ha preferido separar la descripción de los dos experimentos, de los años 2013 y 2014. Los ensayos se realizaron en parcelas experimentales de la Finca Valdegón del Gobierno de La Rioja, cuya situación ha sido descrito en el apartado 3.1.

3.2.1. Año 2013

Localización y condiciones iniciales

La experiencia se llevó a cabo en la finca del SIDTA. Se utilizó coliflor de la variedad Typical, destinada para industria, de ciclo largo, en torno a ciento ochenta días, en un suelo de textura franca y estaba clasificado como *torriorthens oxiácuico* (Soil Survey Staff, 2006) y sus propiedades se presentan en la Tabla 10.

Diseño experimental

Las características del ensayo en cuanto a la distribución en campo, riego, cálculo de las necesidades hídricas, cobertura y altura del cultivo e instalación de sondas Watermark fueron similares a las de la variedad Barcelona.

Tabla 10. Propiedades físico-químicas del suelo en var. Typical (2013).

Prof. cm	Arena %	Limo ¹ %	Arcilla ¹ %	M.O. ² %	pH ³	C.E. ⁴ dS/m	P ⁵ ppm	K ⁵ ppm	Textura ¹
0-15	39,2	45,5	15,3	1,16	8,2	0,39	8,2	155,9	Franco
15-30	50,9	36,7	12,4	1,01	8,3	0,33	10,6	131,7	Franco
30-60	31,7	50,2	18,1	1,03	8,6	0,25	4,5	69,4	Franco
60-90	33,3	52,0	14,7	0,66	8,3	0,98	1,4	32,0	Franco

1) USDA. 2) Materia orgánica oxidable. 3) H₂O (1:5). 4) 25°C (1:5). 5) Mehlich III.

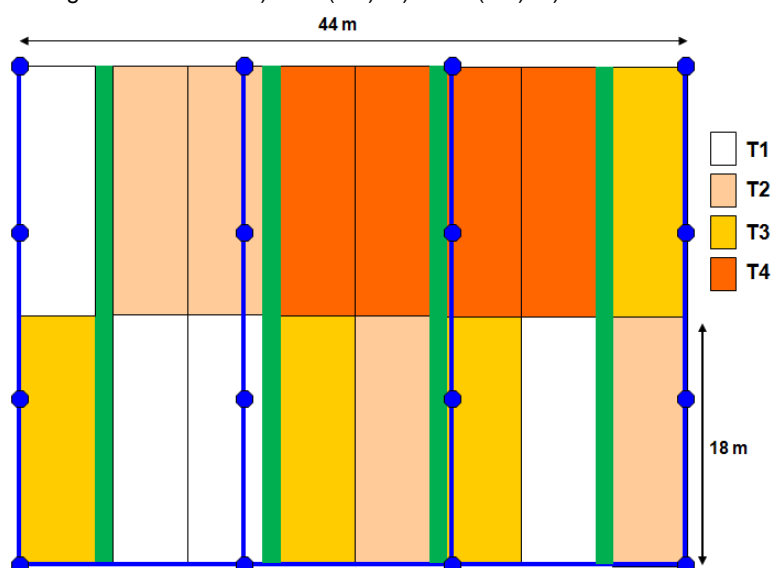


Figura 7. Diseño experimental y distribución de los tratamientos de nitrógeno mineral disponible en la parcela del experimento de 2013 con la var. Typical. Ndisponible (kgN/ha): T1: 84; T2: 130; T3: 190; T4: 260. Las líneas y círculos azules indican la red de aspersores. Las áreas verdes indican pasillos.

El trasplante se realizó el 8 de agosto en mesetas separadas 1,5 m entre ejes, a doble línea por meseta y una densidad de 20.833 plantas/ha. El riego fue por aspersión. En pre-plantación se aplicaron 0-140-260 kg/ha de un abono complejo N-P-K, y en cobertera se realizaron dos aplicaciones de fertilizante nitrogenado, a los 24 y a los 48 días desde el trasplante (DDT) en forma de nitrosulfato amónico 26-0-0, a una dosis variable en función del nitrógeno disponible (Tabla 11).

El diseño en bloques, se estableció en función del nitrógeno mineral (Nmin) inicial del suelo y constaba de cuatro tratamientos con cuatro repeticiones (Tabla 11). La parcela elemental tenía una superficie de 81 m² y contenía 6 líneas de cultivo (Figura 7). El 6 de septiembre, un evento de granizo provocó una defoliación moderada en todas las parcelas, de la cual las plantas se recuperaron posteriormente.

Tabla 11. Tratamientos experimentales en función del N disponible en var. Typical (2013).

Tratamientos	T1	T2	T3	T4
Ndisponible (kgN/ha)	84	130	190	260
Nmin inicial (kgN/ha)	84	95	122	175
Nfertilizante (kgN/ha)	0	35	68	85

Muestreos y determinaciones

Se determinó el Nmin (nitrato y amonio) en la plantación, a los cuarenta días desde el trasplante (DDT) y en la cosecha. Para ello se tomaron dos muestras en cada parcela elemental a 0-15, 15-30, 30-60 y 60-90 cm de profundidad, mezclando el suelo por capas.

La tasa de mineralización se determinó aproximadamente cada quince días. Se insertó un tubo en cada parcela elemental de los tratamientos T1 y T4 manteniendo el suelo inalterado

A los 20, 40, 62, 106 DDT y en la cosecha, se determinó el peso fresco, el peso seco y el Ntotal en hojas y pellas de cinco plantas por parcela elemental. La cosecha se realizó entre 106 y 207 DDT en una subparcela de 9 m² donde se recogieron todas las plantas. En cada una de ellas se determinó su peso total y el peso de la pella. Se consideraron como comerciales todas las pellas de calidad Extra o Primera y un diámetro superior a 11 cm. (CEE, 1998).

En cuatro fechas durante el cultivo, se realizaron medidas en hoja con los equipos SPAD (Mod. 502, Minolta), Dualex® y Multiplex® (Force-A), a las 11:00 h, en una hoja adulta por planta, en diez plantas por parcela elemental. Cinco pecíolos de

estas hojas se trocearon y mezclaron en el laboratorio para extraer la savia. En tres fechas, se tomaron medidas de reflectancia a 670, 730 y 780 nm, con el equipo Crop-Circle™ ACS-430 (Holland Scientific). Se realizó un trayecto de 12 metros sobre las dos líneas interiores de cada parcela elemental.

Al igual que en el año anterior, se realizó un balance de nitrógeno. El tratamiento de datos ha sido similar al de años anteriores. En la Tabla 12 se presenta un resumen de algunos datos fenológicos y de cultivo.

Tabla 12. Datos del ensayo en var. Typical (2013).

Fecha de plantación	08/08/2013
Densidad de plantación (plantas.ha-1)	20.833
Número de riegos	24
Riego acumulado (mm)	281
Precipitación (mm)	219
Primer abonado	02/09/2013
Segundo abonado	25/09/2013
Inicio de formación de pellas*	11/11/2013
Período de recolección	21/01/14-06/03/14

*Se considera el inicio de formación de pellas, el momento en que se detectan pellas de 1mm de diámetro.

3.2.2. Año 2014

Localización y condiciones iniciales

La experiencia se llevó a cabo en la finca del SIDTA. Se utilizó coliflor de la variedad Typical de ciclo largo en un suelo de textura franco arenoso y estaba clasificado como *torriorthens oxíacuico* (Soil Survey Staff, 2006) y sus propiedades se presentan en la Tabla 13.

Tabla 13. Propiedades físico-químicas del suelo en var. Typical (2014).

Prof. cm	Arena %	Limo ¹ %	Arcilla ¹ %	M.O. ² %	pH ³	C.E. ⁴ dS/m	P ⁵ ppm	K ⁵ ppm	Textura ¹
0-15	57,7	32,1	10,3	0,56	8,4	0,16	4,2	132,0	Fco. arenoso
15-30	57,0	32,6	10,5	0,56	8,5	0,16	7,6	111,9	Fco. arenoso
30-60	73,9	19,1	7,0	0,26	8,7	0,10	0,8	50,0	Fco. arenoso
60-90	84,3	11,4	4,3	0,13	8,8	0,09	0,1	27,9	Fco. arenoso

1) USDA. 2) Materia orgánica oxidable. 3) H₂O (1:5). 4) 25°C (1:5). 5) Mehlich III.

Diseño experimental

Las características del ensayo en cuanto a la distribución en campo, riego, cálculo de las necesidades hídricas, cobertura y altura del cultivo e instalación de sondas Watermark fueron similares a las de la variedad Barcelona.

El trasplante se realizó el 5 de agosto en mesetas separadas 1,5 m entre ejes, a doble línea por meseta y una densidad de 22.222 plantas/ha.

El riego fue por aspersión. En pre-plantación se aplicaron 0-82-213 kg/ha de un abono complejo N-P-K, y en cobertera se realizaron dos aplicaciones de fertilizante nitrogenado, a los 29 y a los 42 días desde el trasplante (DDT) en forma de nitrosulfato amónico 26-0-0, a una dosis variable en función del nitrógeno disponible (Tabla 14).

Tabla 14. Tratamientos experimentales en función del N disponible en var. Typical (2014).

Tratamientos	T1	T2	T3	T4
Ndisponible (kgN/ha)	95	170	230	300
Nmin inicial (kgN/ha)	95	130	135	177
Nfertilizante (kgN/ha)	0	40	95	123

El diseño en bloques, se estableció en función del nitrógeno mineral (Nmin) inicial del suelo y constaba de cuatro tratamientos con cuatro repeticiones (Tabla 14). La parcela elemental tenía una superficie de 81 m² y contenía 6 líneas de cultivo (Figura 8). El 2 de febrero de 2015 una crecida del río Ebro provocó una inundación en la parcela del ensayo, dando por concluido el experimento sin haber completado la cosecha.

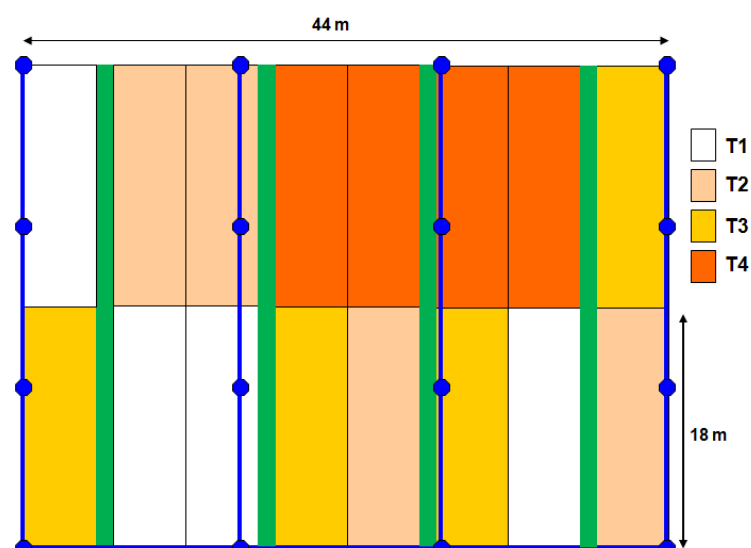


Figura 8. Diseño experimental y distribución de los tratamientos de nitrógeno mineral disponible en la parcela del experimento de 2014 con la var. Typical. Ndisponible (kgN/ha): T1: 95; T2: 170; T3: 230; T4: 300. Las líneas y círculos azules indican la red de aspersores. Las áreas verdes indican pasillos.

Muestreos y determinaciones

Se determinó el N_{min} (nitrato y amonio) en la plantación, a los 28 días desde el trasplante (DDT), a los 41 DDT, a los 57 DDT y a los 83 DDT. Para ello se tomaron dos muestras en cada parcela elemental a 0-15, 15-30, 30-60 y 60-90 cm de profundidad, mezclando el suelo por capas.

A los 27, 41, 57, 79 DDT y en la cosecha, se determinó el peso fresco, el peso seco y el N_{total} en hojas y pellas de cinco plantas por parcela elemental.

Debido a la inundación causada por la crecida del río Ebro, solamente se pudo recolectar, aproximadamente, un 30% del total. Esta cosecha parcial se realizó entre 147 y 176 DDT en una subparcela de 9 m² donde se recogieron todas las plantas. En cada una de ellas se determinó su peso total y el peso de la pella. Se consideraron como comerciales todas las pellas de calidad Extra o Primera y un diámetro superior a 11 cm. (CEE, 1998).

En cuatro fechas durante el cultivo, se realizaron medidas en hoja con los equipos SPAD (Mod. 502, Minolta), Dualex® y Multiplex® (Force-A), a las 11:00 h, en una hoja adulta por planta, en diez plantas por parcela elemental. Cinco pecíolos de estas hojas se trocearon y mezclaron en el laboratorio para extraer la savia mediante prensado. En cinco fechas, se tomaron medidas de reflectancia a 670, 730 y 780 nm, con el equipo Crop-Circle™ ACS-430 (Holland Scientific). Se realizó un trayecto sobre las dos líneas interiores de cada parcela elemental de 12 metros.

Al igual que en el año anterior, se realizó un balance de nitrógeno. El tratamiento de datos ha sido similar al de años anteriores. En la Tabla 15 se presenta un resumen de algunos datos fenológicos y de cultivo.

Tabla 15. Datos del ensayo en var. Typical (2014).

Fecha de plantación	05/08/2014
Densidad de plantación (plantas.ha-1)	20.833
Número de riegos	17
Riego acumulado (mm)	233
Precipitación (mm)	204
Primer abonado	03/09/2014
Segundo abonado	16/09/2014
Inicio de formación de pellas*	22/10/14
Período de recolección	30/12/14-28/01/15

*Se considera el inicio de formación de pellas, el momento en que se detectan pellas de 1mm de diámetro.

3.3. Ensayos de fertilización nitrogenada de la variedad Casper de coliflor

En el presente capítulo se describen los experimentos de coliflor en condiciones de campo. Debido a que se realizaron ensayos en varias parcelas y sujetos a condiciones, tratamientos y dosis de abonado diferentes, se ha preferido separar la descripción de los dos experimentos en 2012 y 2014.

Los dos ensayos se realizaron en parcelas experimentales de la Finca Experimental del INTIA en Sartaguda (Navarra), que se encuentra situada a 337 metros sobre el nivel del mar (UTM, 577.967; 4.690.730).

3.3.1. Año 2012

Localización y condiciones iniciales

Se realizó un ensayo de abonado nitrogenado en un cultivo de coliflor var. Casper, de ciclo corto, en la finca experimental de INTIA. Las propiedades del suelo se presentan en la Tabla 16.

Tabla 16. Propiedades físico-químicas del suelo en var. Casper (2012).

Prof. cm	Arena %	Limo ¹ %	Arcilla ¹ %	M.O. ² %	pH ³	C.E. ⁴ dS/m	P ⁵ ppm	K ⁵ ppm	Textura ¹
0-30	60,6	28,8	10,6	1,15	8,15	0,81	54,7	300,7	franco-arenoso
30-60	58,4	31,2	10,4	0,91	8,24	0,86	36,0	215,3	franco-arenoso
60-90	65,7	27,2	7,1	0,61	8,33	0,68	13,3	144,2	franco-arenoso

1) USDA. 2) Materia orgánica oxidable. 3) H₂O (1:2,5). 4) (1:1). 5) Mehlich III.

Como material vegetal se utilizó la variedad de coliflor Casper. El trasplante se realizó el 2 de agosto a una densidad de plantación de 22.222 plantas/ha, en mesetas separadas 1,50 m entre ejes y 60 cm entre plantas, con dos líneas de cultivo por meseta (Figura 6). La ET_c se calculó siguiendo el enfoque del K_c dual de la FAO (Allen *et al.*, 1998). Los datos meteorológicos y la ET_o se obtuvieron de la estación meteorológica situada en la misma finca. Se utilizó un sistema de riego por aspersión.

Diseño experimental

Se diferenciaron cuatro tratamientos con diferentes niveles de N_{min} disponible (N_{min} inicial + N_{fertilizante}) y cuatro repeticiones, en un diseño en bloques en función del N_{min} inicial. La parcela elemental tenía una superficie de 81 m² y 6 líneas de cultivo (Figura 9). Para la determinación del nitrógeno mineral, nítrico y amoniacal, presente en el suelo al inicio del cultivo, se muestrearon las profundidades de 0-15, 15-30, 30-60 y 60-90 cm. Los valores de N_{min} de los diferentes tratamientos y las dosis de fertilizante empleadas aparecen en la Tabla 17.

El abonado de cobertera se realizó en una única aplicación de fertilizante nitrogenado en forma de nitrosulfato amónico 26%, el 7 de septiembre. En todos los tratamientos, como abonado de fondo se aplicaron 100-150 kg/ha de un abono complejo P-K.

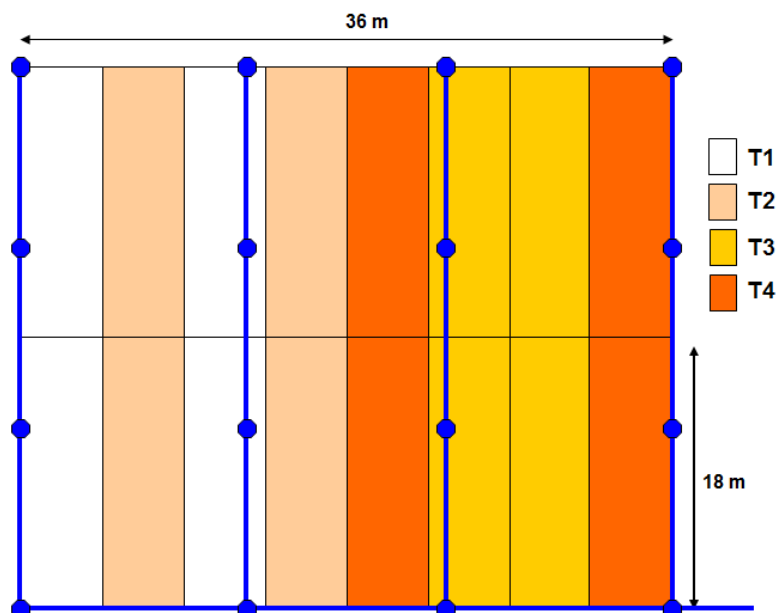


Figura 9. Diseño experimental y distribución de los tratamientos de nitrógeno mineral disponible en la parcela del experimento de 2012 con la var. Casper. Ndisponible (kgN/ha): T1: 259; T2: 359; T3: 432; T4: 524. Las líneas y círculos azules indican la red de aspersores.

Tabla 17. Tratamientos experimentales en función del N disponible en var. Casper (2012).

Tratamientos	T1	T2	T3	T4
Ndisponible (kgN/ha)	259	359	432	524
Nmin inicial (kgN/ha)	259	309	432	424
Nfertilizante (kgN/ha)	0	50	0	100

Muestreos y determinaciones

Se determinó el Nmin (nitrato y amonio) en la plantación, a los 62 días desde el trasplante (DDT) y en la cosecha. Para ello se tomaron dos muestras en cada parcela elemental a 0-15, 15-30, 30-60 cm de profundidad, mezclando el suelo por capas.

En el trasplante, a los 20, 35, 64 DDT y en la cosecha, se determinó el peso fresco, el peso seco y el Ntotal en hojas y pellas de cinco plantas por parcela elemental. La cosecha se realizó entre 89 y 99 DDT en una subparcela de 9 m² donde se recogieron todas las plantas. La recolección fue escalonada, en tres fechas, 30 de octubre, 6 y 9 de noviembre, tras un ciclo de cultivo de 89 días. Se controló la

producción total, comercial y el peso medio de la pella. El tamaño de la pella en la recolección ha estado determinado por el destino de la cosecha, en este caso para industria, siendo habitual en esta zona valores entre 1.200 y 1.600 g por pella.

En cuatro fechas durante el cultivo, se realizaron medidas en hoja con el equipo SPAD (Mod. 502, Minolta) a las 11:00 h, en una hoja adulta por planta, en diez plantas por parcela elemental. Cinco pecíolos de estas hojas se trocearon y mezclaron en el laboratorio para extraer la savia.

La eficiencia en el uso del nitrógeno (EUN) se calculó como la relación entre la producción comercial y nitrógeno disponible ($N_{\text{mineral inicial}} + N_{\text{aplicado}}$) (Moll *et al.*, 1982). Al igual que en años anteriores, se realizó un balance de nitrógeno.

El tratamiento de datos ha sido similar al de años anteriores. En la Tabla 18 se presenta un resumen de algunos datos fenológicos y de cultivo.

Tabla 18. Datos del ensayo en var. Casper (2012).

Fecha de plantación	02/08/2012
Densidad de plantación (plantas.ha-1)	20.833
Abonado	07/09/2012
Inicio de formación de pellas	30/09/2012
Fecha de recolección	30/10/12-09/11/12

*Se considera el inicio de formación de pellas, el momento en que se detectan pellas de 1mm de diámetro.

3.3.2. Año 2014

Localización y condiciones iniciales

La experiencia se llevó a cabo en la finca experimental de INTIA en Sartaguda (Navarra), en el año 2014. Se utilizó la variedad Casper de coliflor. El suelo era de textura franca y sus propiedades se presentan en la Tabla 19.

Diseño experimental

El trasplante se realizó el 12 de agosto. El riego se realizó por aspersión. Como abonado de pre-plantación se aplicaron 140 kg P/ha a base de superfosfato del 45% y 220 kg K/ha mediante sulfato de potasa 50%. En cobertera, el 10 de septiembre, 28 días después del trasplante (DDT), se realizó una aplicación de fertilizante nitrogenado en forma de nitrosulfato amónico 26%, a una dosis variable en función del nitrógeno mineral disponible ($N_{\text{min inicial}} + N_{\text{fertilizante}}$) (Tabla 20).

3. MATERIAL Y MÉTODOS

Tabla 19. Propiedades físico-químicas del suelo en var. Casper (2014).

Prof. cm	Arena %	Limo ¹ %	Arcilla ¹ %	M.O. ² %	pH ³	C.E. ⁴ dS/m	P ⁵ ppm	K ⁵ ppm	Textura ¹
0-30	53,6	34,8	11,6	0,9	8,4	0,2	40,9	262,7	Franco
30-60	53,5	35,1	11,4	0,7	8,5	0,2	25,2	242,9	Franco
60-90	54,9	34,5	10,5	0,4	8,5	0,2	1,4	195,8	Franco

1) USDA. 2) Materia orgánica oxidable. 3) H₂O (1:5). 4) 25°C (1:5). 5) Mehlich III.

Se diferenciaron cuatro tratamientos en función del Nmin disponible (Nmin inicial + Nfertilizante) y cuatro repeticiones, en un diseño en bloques en función del Nmin inicial. La parcela elemental tenía una superficie de 81 m² y 6 líneas de cultivo (Figura 10). Para la determinación del nitrógeno mineral, nítrico y amoniacal, presente en el suelo al inicio del cultivo, se muestrearon las profundidades de 0-15, 15-30 y 30-60 cm. Los valores de Nmin de los diferentes tratamientos y las dosis de fertilizante empleadas aparecen en la Tabla 20. Se consideró una profundidad de enraizamiento máxima de 0,6 m para el cálculo del balance de nitrógeno.

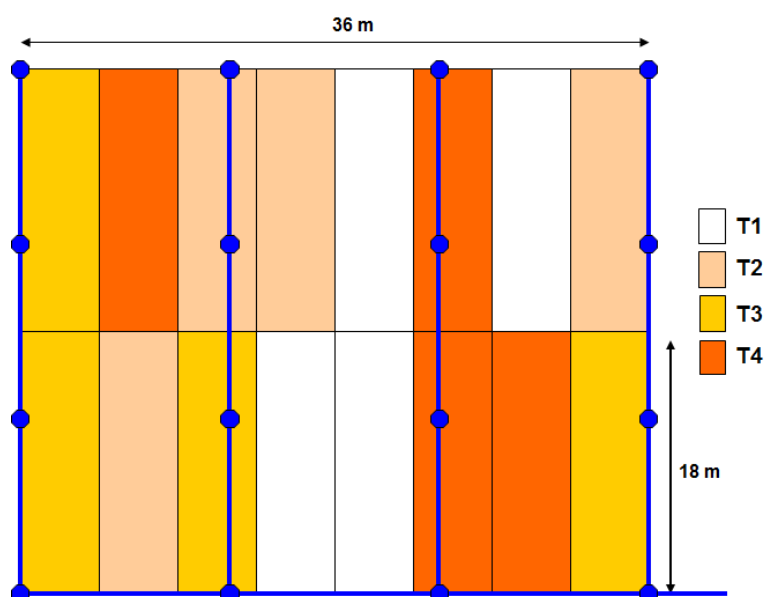


Figura 10. Diseño experimental y distribución de los tratamientos de nitrógeno mineral disponible en la parcela del experimento de 2014 con la var. Casper. Ndisponible (kgN/ha): T1: 104; T2: 134; T3: 190; T4: 260. Las líneas y círculos azules indican la red de aspersores.

Tabla 20. Tratamientos experimentales en función del N disponible en var. Casper (2014).

Tratamientos	T1	T2	T3	T4
Ndisponible (kgN/ha)	104	134	190	260
Nmin inicial (kgN/ha)	104	124	135	162
Nfertilizante (kgN/ha)	0	10	55	98

Muestreos y determinaciones

Se determinó el Nmin (nitrato y amonio) en la plantación, a los 47 días desde el trasplante (DDT) y en la cosecha. Para ello se tomaron dos muestras en cada parcela elemental, mezclando el suelo por capas, a 0-15, 15-30 y 30-60 cm de profundidad. A los 27, 50, 68 DDT y en la cosecha, se determinó el peso fresco, el peso seco y el N total en hojas y pellas de cinco plantas por parcela elemental.

La cosecha se realizó entre 99 y 110 DDT. En una subparcela de 15 m² se recogieron todas las plantas. En cada una de ellas se determinó su peso total y el peso de la pella. Se consideraron como comerciales todas las pellas de calidad Extra o Primera y un diámetro superior a 11 cm. (CEE, 1998).

En tres fechas durante el cultivo, se realizaron medidas en hoja con los equipos SPAD (Mod. 502, Minolta), Dualex® y Multiplex® (Force-A), a las 11:00 h, en una hoja adulta por planta, en diez plantas por parcela elemental. Cinco pecíolos de estas hojas se trocearon y mezclaron en el laboratorio para extraer la savia mediante prensado. En tres fechas, se tomaron medidas de reflectancia a 670, 730 y 780 nm, con el equipo Crop-Circle™ ACS-430 (Holland Scientific). Se realizó un trayecto sobre las dos líneas interiores de cada parcela elemental de 12 metros.

Al igual que en años anteriores, se realizó un balance de nitrógeno. El tratamiento de datos ha sido similar al de años anteriores. En la Tabla 21 se presenta un resumen de algunos datos fenológicos y de cultivo.

Tabla 21. Datos del ensayo en var. Casper (2014).

Fecha de plantación	12/08/2014
Densidad de plantación (plantas.ha-1)	20.833
Abonado	10/09/2014
Inicio de formación de pellas*	01/10/2014
Período de recolección	20/11/14-26/11/14

*Se considera el inicio de formación de pellas, el momento en que se detectan pellas de 1mm de diámetro.

4. RESULTADOS

4. Resultados

Se presentan por año y variedad los resultados de los ensayos realizados. Para el conjunto de resultados, contenidos en tablas y figuras, los valores detallados por tratamiento y repetición así como su significación estadística se encuentran en los Anejos 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7.

4.1. Año 2012. Var. Barcelona

Cobertura, Altura y Biomasa del cultivo

En la Tabla 22 se muestran los resultados de altura, cobertura y biomasa del cultivo al inicio de la cosecha. La altura y la cobertura en los tratamientos fertilizados ha sido significativamente superior al tratamiento T1, no fertilizado, no habiendo diferencias entre los fertilizados. No se han encontrado diferencias significativas en los valores de biomasa.

Tabla 22. Cobertura, altura y biomasa del cultivo, el 18/10/2012, al inicio de la cosecha.

Tratamientos	Altura (m)		Cobertura (%)		Biomasa (Mg/ha)	
T1	0,49 ± 0,02	a	75 ± 5	a	3,94 ± 0,42	ns
T2	0,59 ± 0,01	b	94 ± 4	b	5,12 ± 0,31	ns
T3	0,64 ± 0,03	b	93 ± 5	b	5,33 ± 0,13	ns
T4	0,64 ± 0,03	b	87 ± 5	b	5,31 ± 0,52	ns

Letras diferentes difieren significativamente en un test de Tukey ($p \leq 0.05$). ns: no existen diferencias significativas.

Producción total

La producción total media de coliflores en los tratamientos con fertilizante nitrogenado fue superior a los 20.000 kg/ha (Tabla 23). El tratamiento T1 tuvo una producción significativamente menor.

Tabla 23. Producción total, de hojas y de pellas (kg/ha) de la var. Barcelona y nitrógeno disponible en el ensayo de 2012.

Tratamientos	Ndisponible	Pellas	Hojas	Total
	kg/ha			
T1	93	11.984 a	31.903 a	43.887 a
T2	189	22.142 b	46.697 b	68.839 b
T3	270	23.806 b	47.188 b	70.994 b
T4	322	22.259 b	44.954 b	67.213 b
		***	***	***

*** Significación ($p \leq 0.001$) en el análisis de la varianza. Letras diferentes difieren significativamente en un test de Tukey ($p \leq 0.05$).

El análisis de regresión no lineal de la producción total relativa de coliflores en función del nitrógeno disponible ($N_{disp} = N_{min} + N_{fertilizante}$), indica que la producción se estabiliza para valores de N_{disp} de 192 ± 34 kg N_{disp}/ha , valor del parámetro a en el modelo de regresión (ecuación [3]) (Figura 11). Entendiendo que los tratamientos con estado deficitario nutricional serán aquellos que presenten un valor de nitrógeno disponible inferior al valor en el que se estabiliza la producción. En este caso, el tratamiento T1 es el único que presenta valores de nitrógeno disponible inferiores al nivel en el cual la producción se estabiliza. El tratamiento T2 se encuentra en el rango de valores por encima del cual no se han obtenido incrementos de producción. Y los tratamientos T3 y T4 se sitúan muy por encima de estos niveles de nitrógeno disponible.

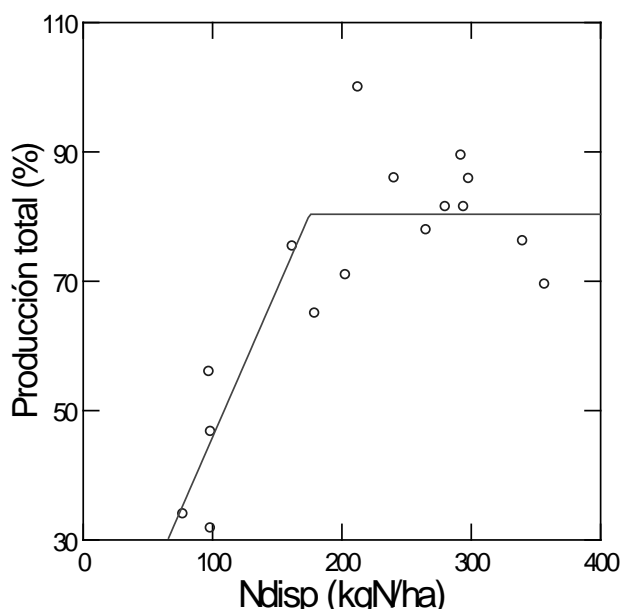


Figura 11. Producción total relativa de pellas de coliflor var. Barcelona, en función del nitrógeno mineral disponible en el suelo ($N_{min} + N_{fertilizante}$).

Concentración de nitrógeno en hojas

En la figura 12 se representa la evolución del contenido de nitrógeno total en hojas en los diferentes tratamientos. La concentración de nitrógeno en las hojas de coliflor disminuyó en todos los tratamientos conforme se incrementaba la biomasa del cultivo. Excepto en la primera fecha, el contenido de nitrógeno en los tratamientos fertilizados fue significativamente superior al del tratamiento T1 no fertilizado.

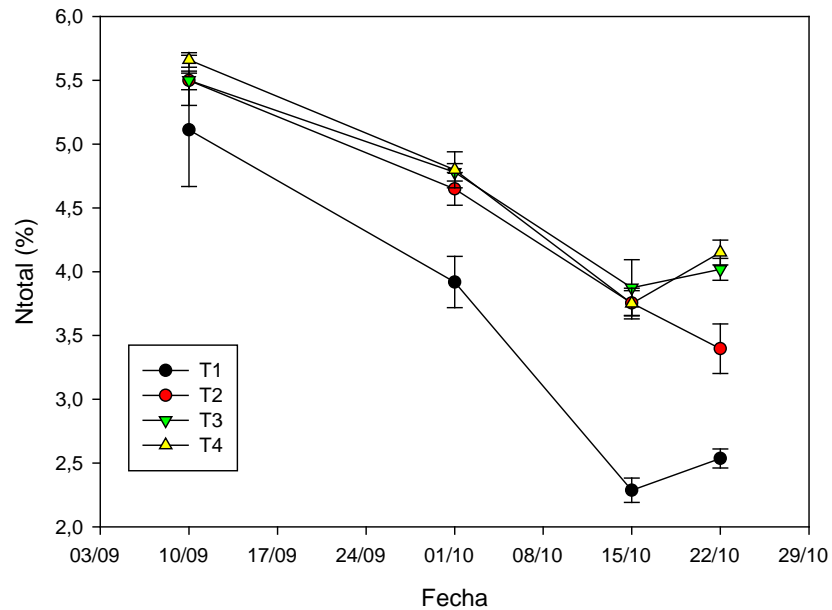


Figura 12. Concentración del nitrógeno total (%) de coliflor var. Barcelona en hojas, a lo largo del cultivo en el año 2012. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 93; 189; 270 y 322 kg/ha de Ndisponible.

Para este ensayo de la variedad Barcelona en el año 2012, de acuerdo al modelo de Greenwood (1986), solamente el tratamiento T1 tuvo concentraciones de nitrógeno por debajo de los valores de nitrógeno crítico (Figura 13), lo que contribuye a explicar la menor producción obtenida para este tratamiento.

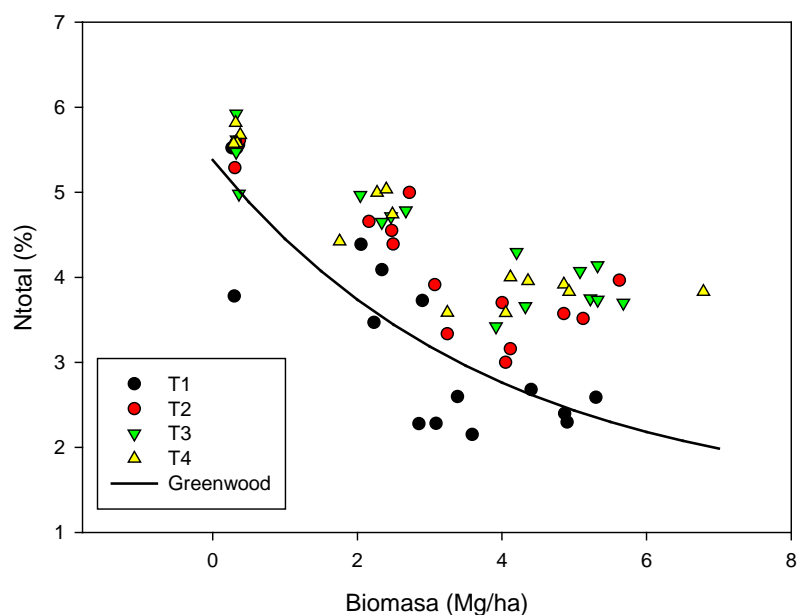


Figura 13. Concentración del nitrógeno total (%) de coliflor var. Barcelona en función de la biomasa (Mg/ha) en el año 2012. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 93; 189; 270 y 322 kg N disponible /ha. Se presenta la curva crítica del modelo de Greenwood (1986).

Contenido de nitrógeno en el suelo

El contenido en Nmin inicial en el perfil del suelo hasta 0,6 m de profundidad estuvo comprendido entre 93 y 128 kg/ha. Al finalizar la recolección el Nmin disminuyó, alcanzando valores entre 6 y 73 kg/ha (Figura 14). El horizonte superficial parece casi agotado.

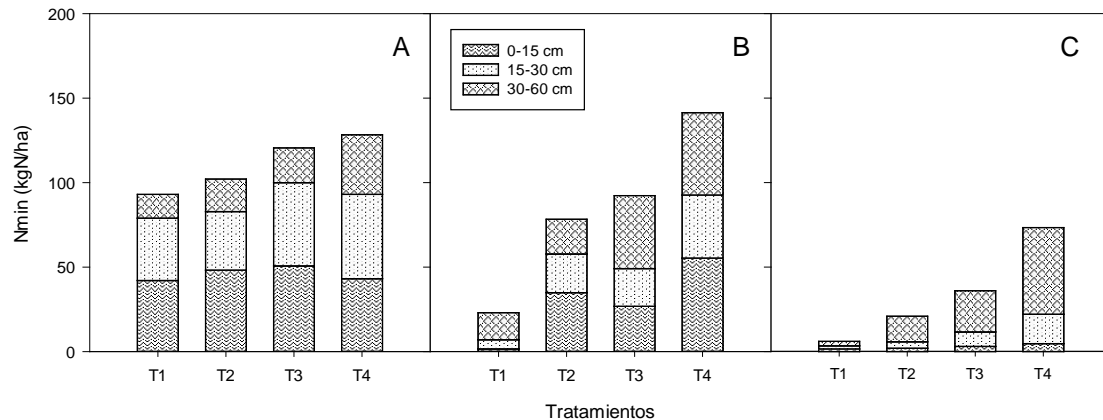


Figura 14. Nitrógeno mineral (Nmin) en el suelo, de 0 a 60 cm, en un cultivo de coliflor var. Barcelona, en el año 2012, (A) 12 de agosto, en el momento del trasplante; (B) 1 de octubre, quince días después del abonado de cobertera y (C) 29 de octubre, al finalizar la cosecha.

Contenido de N-Nitrato en savia

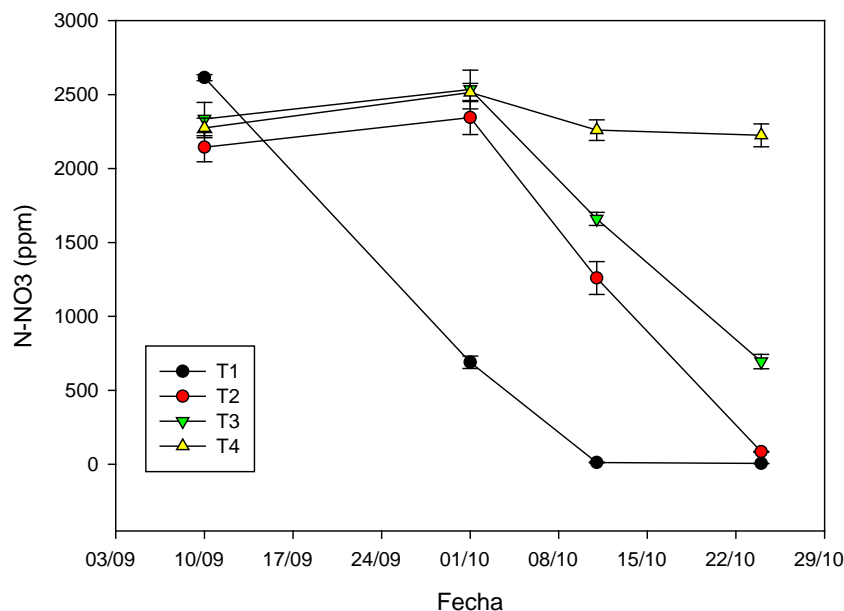


Figura 15. Concentración de N-NO₃⁻ (ppm) en savia, en hojas de coliflor var. Barcelona en los diferentes tratamientos. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 93; 189; 270 y 322 kg N disponible /ha. Las barras verticales indican el error estándar.

La concentración de N-NO₃⁻ en savia (Figura 15) osciló entre 2100 y 2600 ppm en la primera medida, dos días antes del abonado de cobertera. Esta concentración se

incrementó ligeramente en la segunda determinación, al inicio de la formación de las pellas, en los tratamientos T2, T3 y T4, siendo significativamente superior al contenido en T1. Posteriormente estos valores disminuyeron de modo significativo en todos los tratamientos salvo el T4. Las concentraciones en el tercer muestreo, previo a la cosecha, fueron superiores a 1000 ppm en los tratamientos T2, T3 y T4

Sensor SPAD

En el contenido en clorofila, estimado con el sensor SPAD no se encontraron diferencias significativas entre tratamientos, salvo en la medida del 23 de octubre en cosecha (Figura 16). No se observan tendencias claras en el tiempo salvo en el tratamiento T1 en el que los valores SPAD disminuyen paulatinamente desde 63 hasta 54 unidades.

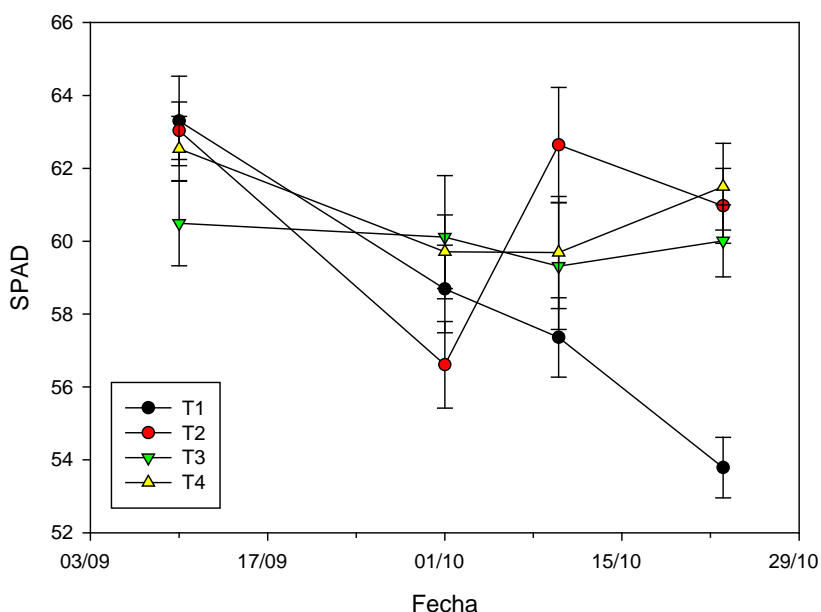


Figura 16. Contenido de clorofila en hojas de coliflor var. Barcelona, unidades SPAD, en los diferentes tratamientos. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 93; 189; 270 y 322 kg N disponible /ha. Las barras verticales indican el error estándar.

Sensor DUALEX

En las medidas realizadas con el sensor Dualex (Figuras 17 y 18), existen diferencias significativas, a partir de la primera fecha de muestreo, para los parámetros Chl y NBI entre tratamientos frente al menos fertilizado T1.

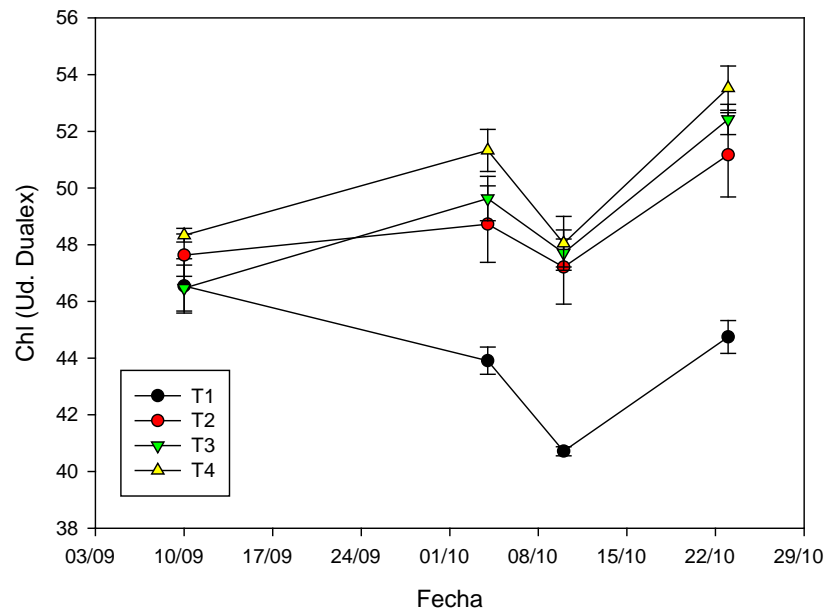


Figura 17. Índice Chl de Dualex, en hojas de coliflor var. Barcelona en los diferentes tratamientos de nitrógeno disponible. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 93; 189; 270 y 322 kg N disponible /ha. Las barras verticales indican el error estándar.

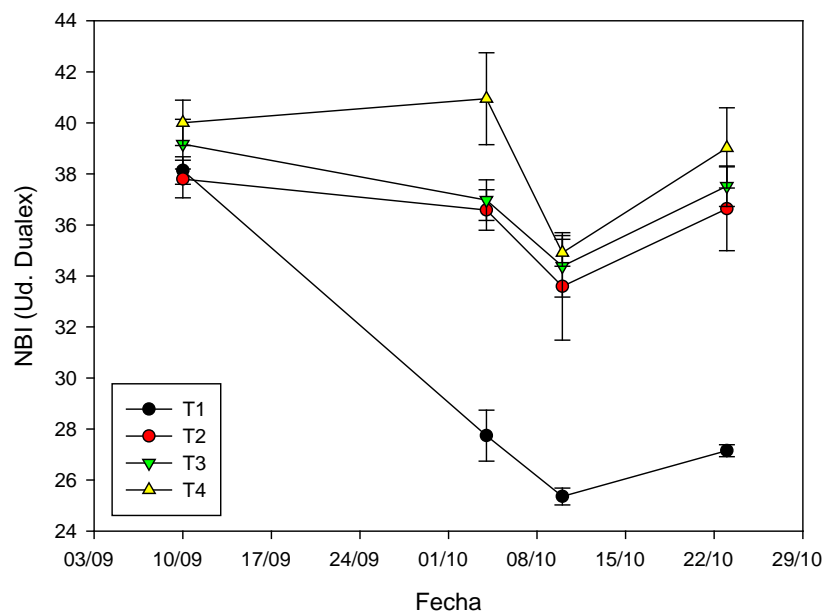


Figura 18. Índice de balance de nitrógeno NBI de Dualex, en hojas de coliflor var. Barcelona en los diferentes tratamientos de nitrógeno disponible. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 93; 189; 270 y 322 kg N disponible /ha. Las barras verticales indican el error estándar.

Sensor MULTIPLEX

La evolución de los índices SFR y NBI del sensor Multiplex se presenta en las figuras 19 y 20. A los 21 días después del abonado (segundo muestreo), el índice SFR del tratamiento T4 es significativamente superior al resto. Desde este momento hasta la cosecha, los tratamientos T2, T3 y T4 muestran valores significativamente

superiores al T1. Este tratamiento ha mostrado un índice NBI significativamente menor que el resto a partir del abonado de cobertera (posterior al primer muestreo).

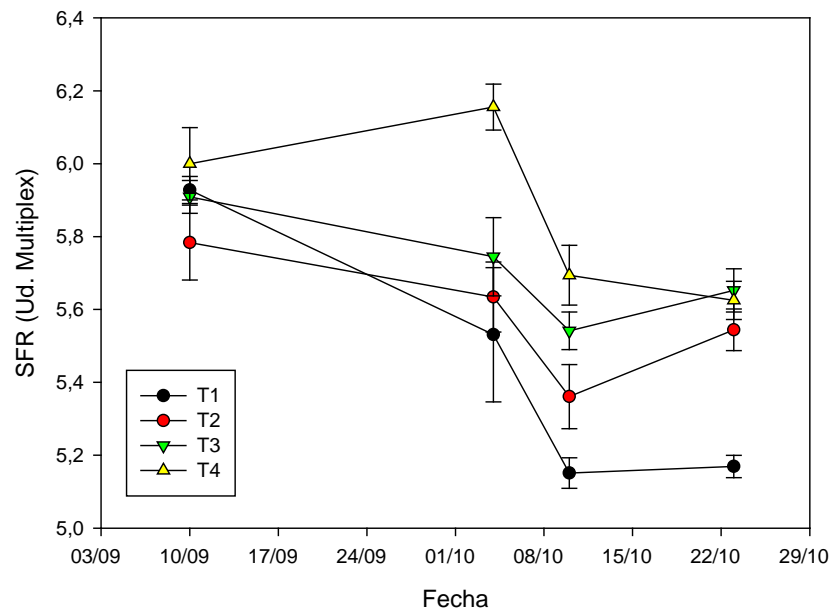


Figura 19. Índice SFR de Multiplex, en hojas de coliflor var. Barcelona, en los diferentes tratamientos de nitrógeno disponible. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 93; 189; 270 y 322 kg N disponible /ha. Las barras verticales indican el error estándar.

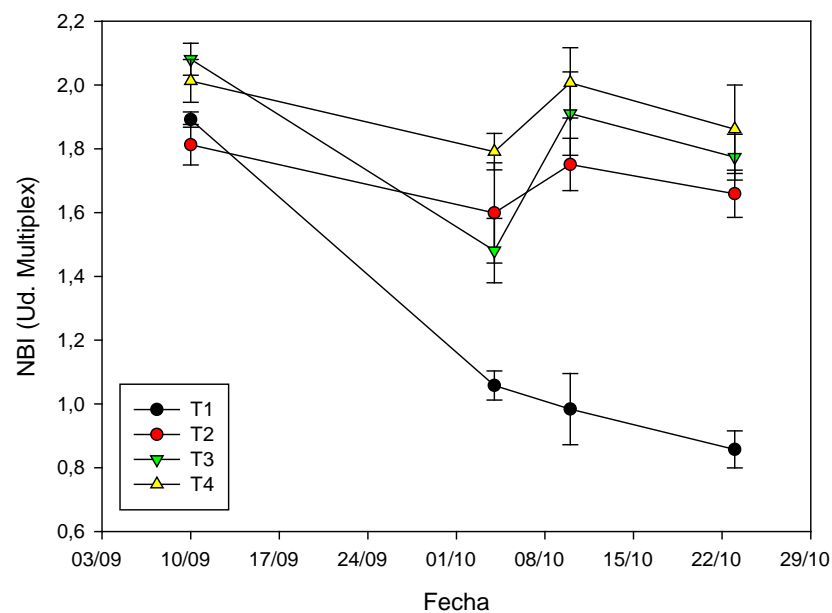


Figura 20. Índice NBI de Multiplex, en hojas de coliflor var. Barcelona, en los diferentes tratamientos de nitrógeno disponible. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 93; 189; 270 y 322 kg N disponible /ha. Las barras verticales indican el error estándar.

Sensor CROP CIRCLE

En los trayectos realizados a los 49 días desde la plantación con el sensor Crop Circle, se han obtenido diferencias significativas entre los tratamientos para el

4. RESULTADOS

índice NDVI (Tabla 24). El tratamiento T1 ha mostrado un valor del índice NDRE significativamente inferior al resto.

Tabla 24. Índices NDVI, NDRE obtenidos con el sensor Crop Circle en coliflor var. Barcelona a los cuarenta y nueve días desde la plantación.

Tratamientos	NDVI	NDRE
T1	0,768 ± 0,012 ^a	0,329 ± 0,006 ^a
T2	0,788 ± 0,008 ^b	0,352 ± 0,005 ^b
T3	0,789 ± 0,007 ^b	0,353 ± 0,004 ^b
T4	0,772 ± 0,002 ^b	0,350 ± 0,002 ^b
	***	***

ANOVA, significación: *** ($p \leq 0,001$); ns: no significativo. Cifras seguidas por letras distintas difieren significativamente ($p \leq 0,05$) en una prueba de Tukey.

Mineralización de la materia orgánica del suelo

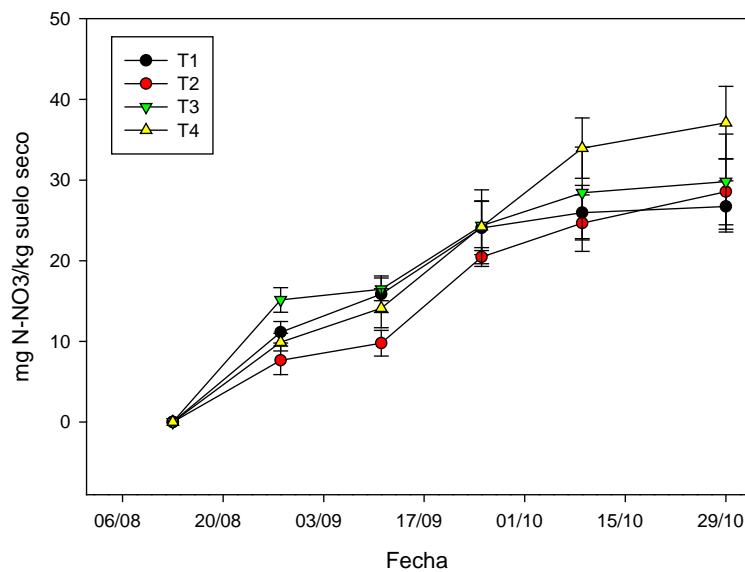


Figura 21. Mineralización (mg N-NO₃/kg suelo seco) medida en resinas a 0,2 m de profundidad, en el ensayo de coliflor de la variedad Barcelona en 2012. Las barras verticales indican el error estándar.

La tasa de mineralización en el horizonte superior del suelo de 0,2 m, alcanzó un valor medio de 0,14 mgN/kg de suelo seco y día, no observándose diferencias significativas entre tratamientos (Figura 21). Este valor representa 41 kgN/ha para el período de cultivo en la capa superficial de suelo, extrapolado hasta 0,3 m de profundidad. El mayor valor observado en el tratamiento T4, podría deberse a una

4. RESULTADOS

sobreestimación del N lixiviado, medido por la cantidad de nitrato retenido por las resinas, ocasionado por movimientos de ascenso capilar del nitrógeno.

Balance de nitrógeno

Los resultados del balance de nitrógeno (Tabla 25) indican que el cultivo ha sido capaz de absorber la práctica totalidad del nitrógeno disponible en cada tratamiento, ya que, teniendo en cuenta el error estándar en todos los tratamientos, el balance final se aproxima a cero. En el caso del tratamiento T1, este nitrógeno no ha sido suficiente para cubrir sus necesidades presentando una menor extracción, un menor Nmin al finalizar el cultivo y a su vez menores valores de biomasa y de nitrógeno total en planta. El balance en el tratamiento T4 podría indicar mayores pérdidas por volatilización del nitrógeno aplicado como fertilizante, habituales en suelos con pH mayor que siete, en los que se aplica nitrosulfato amónico lo que también ha provocado una menor EUN en este tratamiento.

Tabla 25. Balance de nitrógeno (kg/ha) hasta 0,6 m de profundidad.

	Nmin ini ¹	Nfert ²	Nminer ³	Nmin fin ⁴	Ncos ⁵	Nlix ⁶	Balance	EUN ⁷
	kgN/ha							kg/kgN
T1	93±5	0	31±12	6±1 ^b	121±12 ^b	24±10	-27±14	89±8 ^a
T2	102±12	87	34±18	21±5 ^b	190±15 ^{ab}	23±3	-10±38	100±9 ^a
T3	121±11	149	31±14	36±13 ^{ab}	256±17 ^a	29±5	-20±30	86±7 ^a
T4	128±16	194	70±27	73±12 ^a	242±35 ^a	49±7	29±24	56±3 ^b
	ns		ns	**	**	ns	ns	**

1) N mineral inicial. 2) N aplicado como fertilizante. 3) N mineralizado de 0 a 0,3 m. 4) N mineral final. 5) N extraído en cosecha. 6) N lixiviado del 28/09 hasta cosecha. 7) Eficiencia en el uso del N: kg de cosecha comercial por kg de N disponible. Significación: ** (p≤0,01); ns: no significativo. Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas (p≤0,05) en una prueba de Tukey.

4.2. Año 2013. Var. Barcelona

Cobertura, Altura y Biomasa del cultivo

En la Tabla 26 se muestran los resultados de altura, cobertura y biomasa del cultivo al inicio de la cosecha. La altura ha diferenciado significativamente los tratamientos en función del nitrógeno disponible. La cobertura y la biomasa, en los tratamientos más fertilizados T3 y T4, han sido significativamente superiores a las de los tratamientos menos fertilizados T1 y T2.

Tabla 26. Cobertura, altura y biomasa del cultivo, el 09/10/2013, al inicio de la cosecha.

Tratamientos	Altura (m)		Cobertura (%)		Biomasa (Mg/ha)	
T1	0,43 ± 0,01	a	56 ± 5	a	2,99 ± 0,33	a
T2	0,55 ± 0,01	b	66 ± 3	ab	3,77 ± 0,35	ab
T3	0,64 ± 0,01	c	77 ± 2	bc	4,09 ± 0,18	b
T4	0,71 ± 0,01	d	82 ± 3	c	4,69 ± 0,17	b

Letras diferentes difieren significativamente en un test de Tukey ($p \leq 0.05$). ns: no existen diferencias significativas.

Producción total

La producción total media de coliflores en el tratamiento con menos fertilizante (T1) superó los 8.000 kg/ha y en el tratamiento con más fertilizante nitrogenado (T4) superó los 20.000 kg/ha (Tabla 27). Hubo diferencias significativas entre tratamientos, en función del nitrógeno disponible.

Tabla 27. Producción total, de hojas y de pellas (kg/ha) de la var. Barcelona y nitrógeno disponible en el ensayo de 2013.

Tratamientos	Ndisponible	Pellas	Hojas	Total
	kg/ha			
T1	67	8.084 a	19.105 a	27.189 a
T2	130	13.316 b	27.114 ab	40.430 b
T3	193	17.116 bc	31.422 bc	48.538 bc
T4	260	20.748 c	36.935 c	57.683 c
		***	***	***

*** Significación ($p \leq 0.001$) en el análisis de la varianza. Letras diferentes difieren significativamente en un test de Tukey ($p \leq 0.05$).

El análisis de regresión no lineal de la producción total relativa de coliflores en función del nitrógeno disponible ($N_{disp} = N_{min} + N_{fertilizante}$), indica que la producción se estabiliza para valores de 178 ± 37 kg N_{disp} /ha (Figura 22), valor del parámetro a en el modelo de regresión [ecuación 3]. En este caso, los tratamientos T1 y T2

presentan valores de nitrógeno disponible inferiores al nivel en el cual la producción se estabiliza. Y los tratamientos T3 y T4 presentan valores superiores al nivel en el cual la producción se estabiliza.

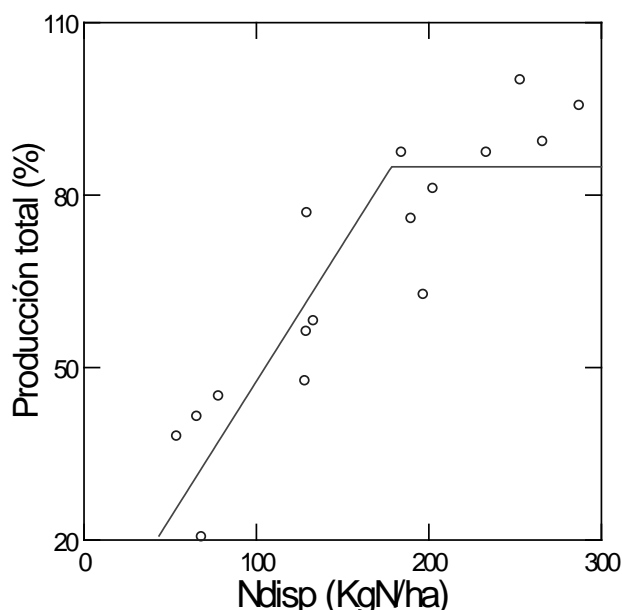


Figura 22. Producción total relativa de pellas de coliflor var. Barcelona, en función del nitrógeno disponible en el suelo (Nmin + N fertilizante).

Concentración de nitrógeno en hojas

El contenido de nitrógeno en las hojas de coliflor (Figura 23) ha mantenido valores similares a los iniciales hasta los primeros días de octubre, en el tercer muestreo, posiblemente debido a la disminución de biomasa ocurrida tras un evento de granizo. Posteriormente ha disminuido en todos los tratamientos conforme se incrementaba la biomasa del cultivo, diferenciándose en la cosecha en función del nitrógeno disponible (Figura 24). De acuerdo al modelo de Greenwood (1986), y para valores de biomasa superiores a 1 Mg/ha el tratamiento T1 ha tenido concentraciones de nitrógeno por debajo de los valores de nitrógeno crítico y ello justificaría los menores valores de producción obtenidos. El tratamiento T2, que también ha obtenido una producción menor, presenta valores de nitrógeno total por encima de la curva crítica, pero próximos a la zona de déficit que diferencia el modelo.

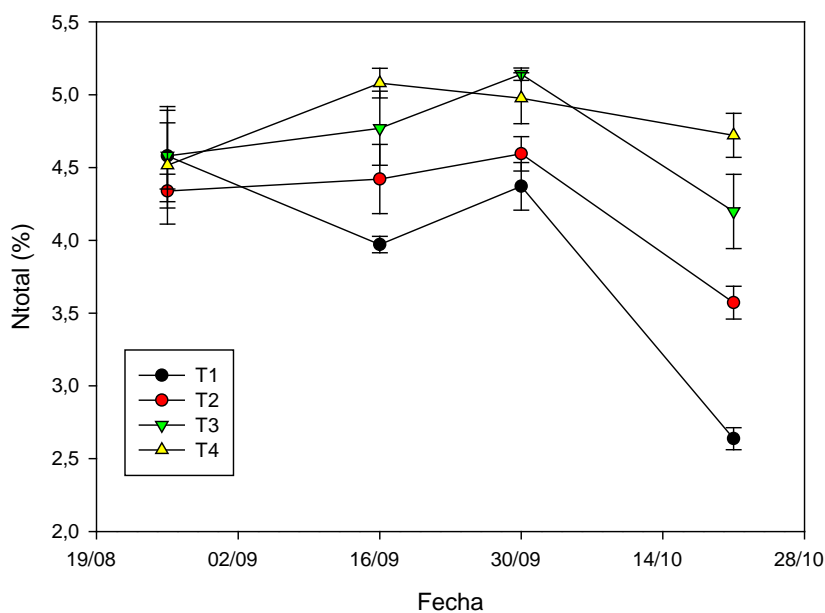


Figura 23. Concentración del nitrógeno total (%) de coliflor var. Barcelona en hojas, a lo largo del cultivo en el año 2013. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 67; 130; 193 y 260 kg N disponible /ha.

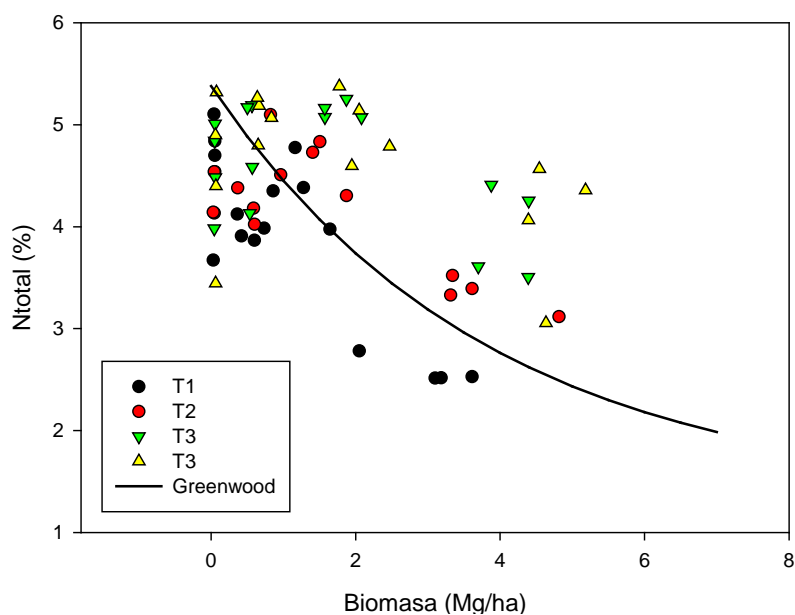


Figura 24. Concentración de nitrógeno total (%) en coliflor var. Barcelona en función de la biomasa (Mg/ha) en el año 2013. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 67; 130; 193 y 260 kg N disponible /ha. Se presenta la curva crítica del modelo de Greenwood 1986.

Contenido de nitrógeno en el suelo

El contenido de Nmin inicial (5 de agosto) en el perfil del suelo hasta 0,6 m de profundidad estuvo comprendido entre 67 y 130 kg/ha (Figura 25). Cuando se inicia la formación de las pellas, veintiocho días después de la fertilización de cobertera, el contenido en Nmin ha disminuido un 46% en el T1, un 48% en T2, un 18% T4 y ha aumentado en T3 un 20% (Figura 25). Al finalizar la recolección el Nmin ha disminuido

en todos los tratamientos, por debajo de 50 kg/ha. El horizonte superficial parece casi agotado en todos los tratamientos.

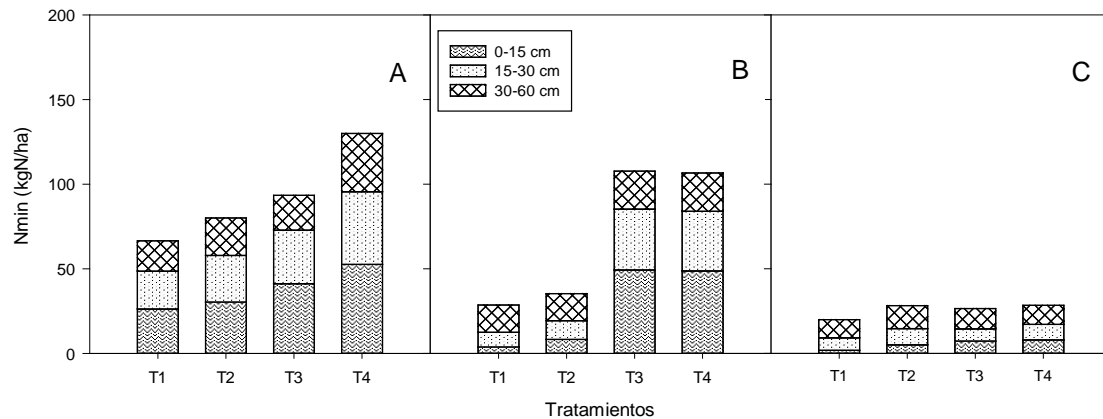


Figura 25. Nitrógeno mineral (Nmin) en el suelo (kgN/ha) de 0 a 60 cm de profundidad en la var. Barcelona, en el año 2013, (A) 5 de agosto, en el momento del trasplante, (B) 30 de septiembre, al inicio de formación de pellas y (C) 28 de octubre, al finalizar la cosecha.

Contenido de N-Nitrato en savia

En el primer muestreo, tres días antes del abonado de cobertera, la concentración de N-NO_3^- en savia oscilaba entre 1.200 y 1.300 ppm (Figura 26), sin diferencias significativas entre tratamientos. En el segundo muestreo, esta concentración disminuyó posiblemente debido al evento de granizo que afectó a las plantas, y en el tercer muestreo, al inicio de la formación de pellas, se recuperó, siendo los tratamientos fertilizados significativamente superiores al no fertilizado.

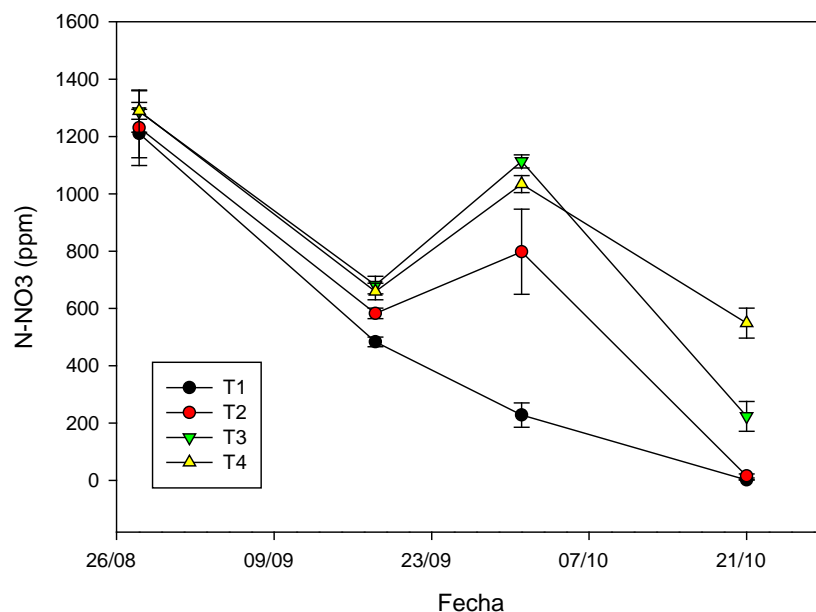


Figura 26. Concentración de N-NO_3^- (ppm) en savia, en hojas de coliflor var. Barcelona en los diferentes tratamientos. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 67; 130; 193 y 260 kg N disponible/ha. Las barras verticales indican el error estándar.

Sensor SPAD

En las medidas realizadas con el sensor SPAD (Figura 27), no se han encontrado diferencias significativas antes de la fertilización de cobertera, que se realizó dos días antes del segundo muestreo. La evolución de sus valores ha sido similar a la del nitrato en savia. En el cuarto muestreo, al inicio de la formación de la pella, se ha diferenciado significativamente el tratamiento T1, no fertilizado, del T4, más fertilizado. En el último muestreo, en cosecha, se han encontrado diferencias significativas entre los tratamientos menos fertilizados, T1 y T2, y los tratamientos más fertilizados, T3 y T4.

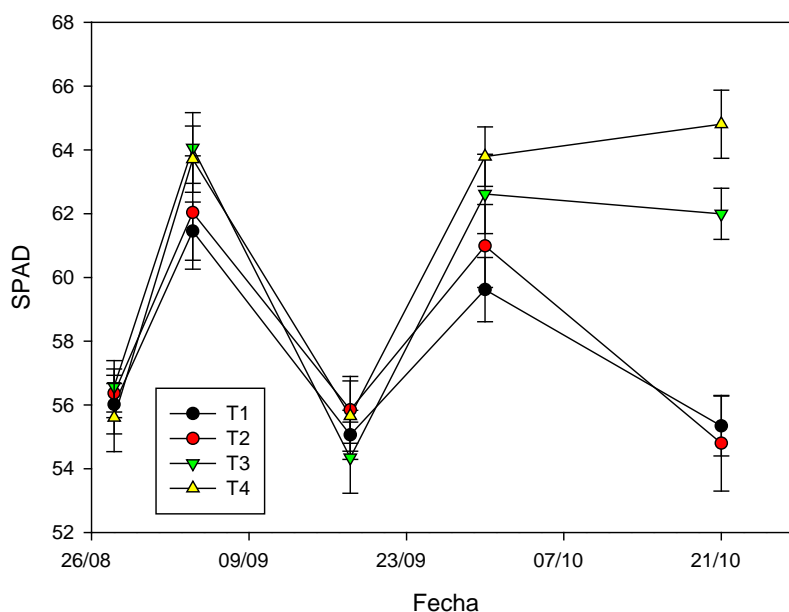


Figura 27. Contenido de clorofila en hojas de coliflor var. Barcelona, unidades SPAD, en los diferentes tratamientos. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 67; 130; 193 y 260 kg N disponible /ha. Las barras verticales indican el error estándar.

Sensor DUALEX

En las medidas realizadas con el sensor DUALEX existen diferencias significativas para los índices Chl y NBI entre tratamientos (Figuras 28 y 29) desde la fertilización de cobertera, que se realizó dos días antes del segundo muestreo, diferenciando el tratamiento T4 del resto. En el cuarto muestreo, al inicio de formación de pellas, y en el quinto, en cosecha, se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos menos fertilizados, y los más fertilizados.

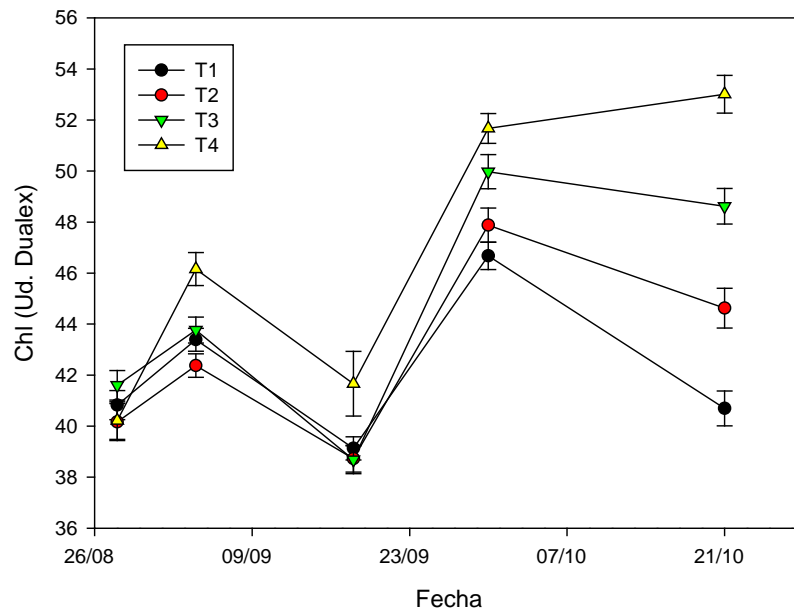


Figura 28. Índice Chl de Dualex, en hojas de coliflor var. Barcelona, en los diferentes tratamientos de nitrógeno disponible. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 67; 130; 193 y 260 kg N disponible /ha. Las barras verticales indican el error estándar.

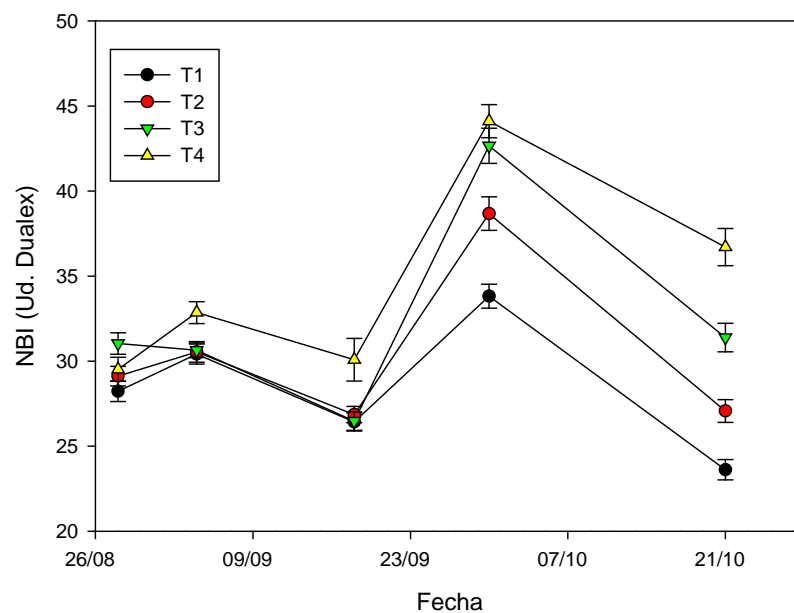


Figura 29. Índice de balance de nitrógeno NBI de Dualex, en hojas de coliflor var. Barcelona, en los diferentes tratamientos de nitrógeno disponible. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 67; 130; 193 y 260 kg N disponible /ha. Las barras verticales indican el error estándar.

Sensor MULTIPLEX

La evolución de los índices SFR y NBI del sensor MULTIPLEX se muestra en las Figuras 30 y 31. Existen diferencias significativas en ambos índices. En el cuarto muestreo, a los 26 días después del abonado de cobertera, el índice SFR del

tratamiento más fertilizado, T4, se diferencia significativamente del resto. En cosecha los tratamientos más fertilizados, T3 y T4, se diferencian del tratamiento T1, no fertilizado. Para el índice NBI, en el cuarto muestreo, a los 26 días después del abonado de cobertera, el tratamiento T1 es significativamente menor que el resto. En cosecha el tratamiento más fertilizado, T4, se diferencia significativamente del resto.

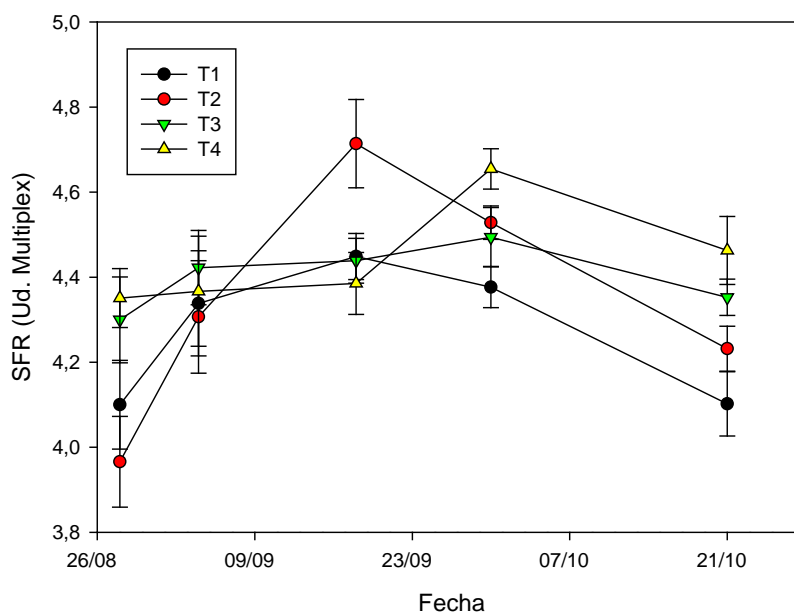


Figura 30. Índice SFR de Multiplex, en hojas de coliflor var. Barcelona, en los diferentes tratamientos de nitrógeno disponible. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 67; 130; 193 y 260 kg N disponible /ha. Las barras verticales indican el error estándar.

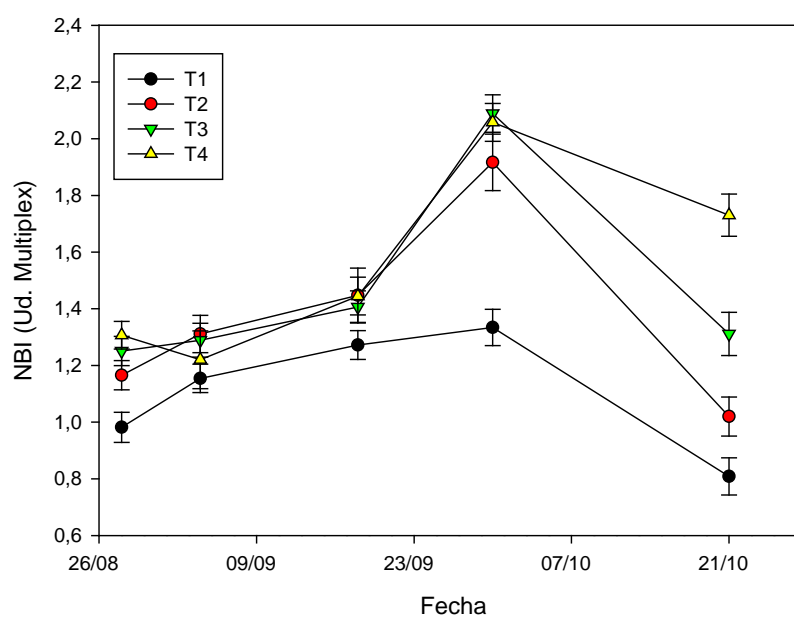


Figura 31. Índice de balance de nitrógeno NBI de Multiplex, en hojas de coliflor var. Barcelona, en los diferentes tratamientos de nitrógeno disponible. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 67; 130; 193 y 260 kg N disponible /ha. Las barras verticales indican el error estándar.

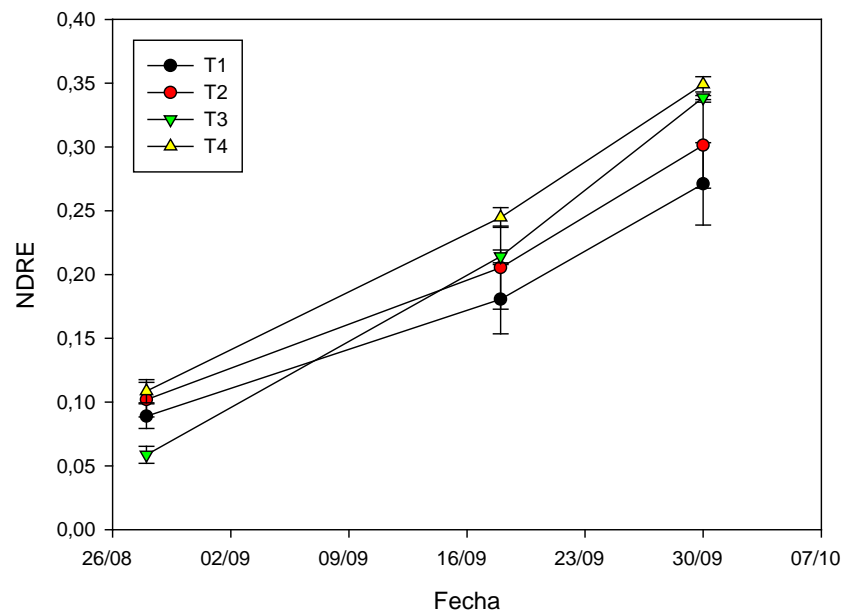
Sensor CROP CIRCLE

Figura 32. Índice NDRE de Crop Circle, en hojas de coliflor var. Barcelona, en los diferentes tratamientos de nitrógeno disponible. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 67; 130; 193 y 260 kg N disponible/ha. Las barras verticales indican el error estándar.

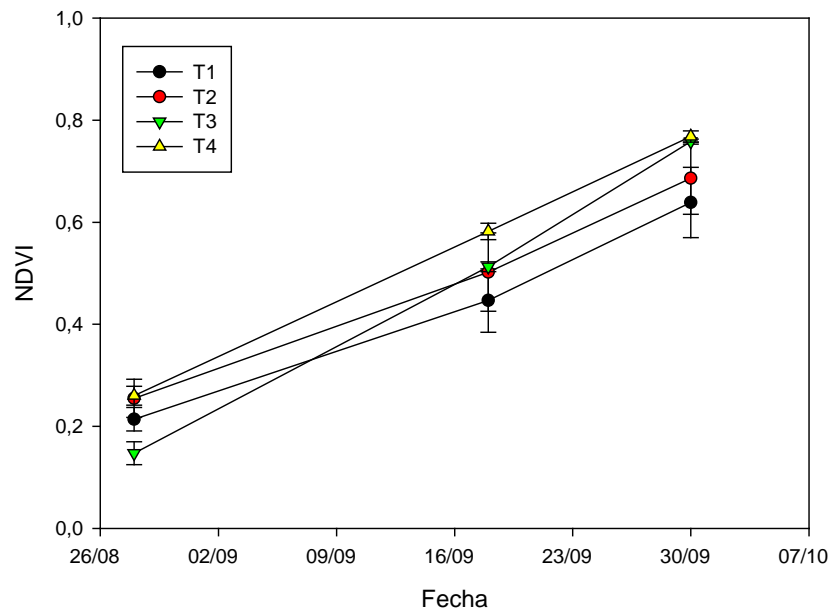


Figura 33. Índice NDVI de Crop Circle, en hojas de coliflor var. Barcelona, en los diferentes tratamientos de nitrógeno disponible. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 67; 130; 193 y 260 kg N disponible/ha. Las barras verticales indican el error estándar.

En las medidas realizadas con el sensor Crop Circle se obtuvieron diferencias significativas para los índices NDRE y NDVI, entre los tratamientos, antes de la

fertilización de cobertera que se realizó después del segundo muestreo (Figuras 32 y 33). El valor de los índices es mayor en el tratamiento T4 y disminuye, en el resto de tratamientos, en función del nitrógeno disponible.

Mineralización de la materia orgánica del suelo

La tasa de mineralización, en el horizonte superior del suelo de 0,2 m alcanzó un valor medio de 0,18 mgN/kg suelo seco y día (Figura 34), no observándose diferencias significativas entre los tratamientos T1 y T4. Este valor representa 41 kgN/ha para el período de cultivo, extrapolado a la capa superficial del suelo hasta 0,3 m.

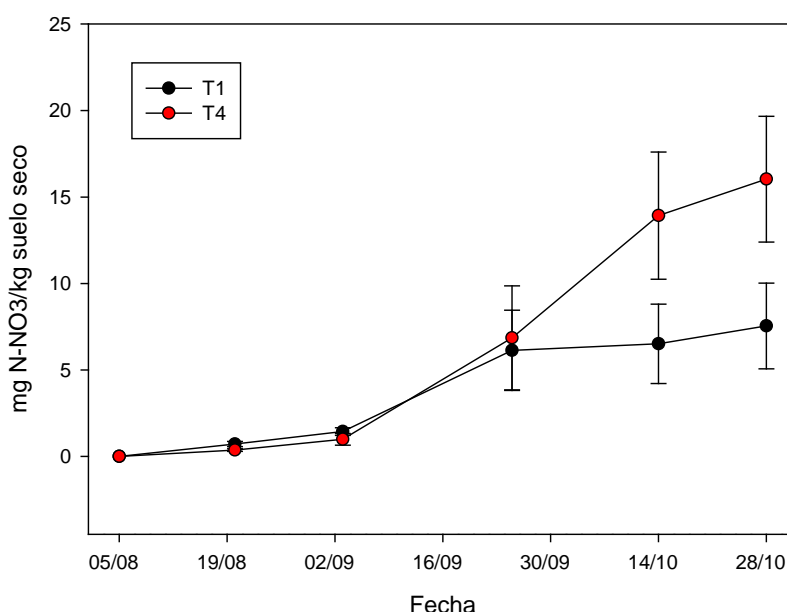


Figura 34. Mineralización (mg N/kg de suelo seco) medida en resinas a 0,2 m de profundidad, en el ensayo de coliflor de la variedad Barcelona en 2013, en el tratamiento T1 (67 kg N disponible/ha) y en el T4 (260 kg N disponible/ha). Las barras verticales indican el error estándar.

Balance de nitrógeno

En el caso de los tratamientos T1 y T2, el nitrógeno disponible no ha sido suficiente para cubrir sus necesidades presentando una menor extracción de nitrógeno por parte del cultivo, debido a una menor biomasa y a una menor concentración de nitrógeno total. El balance en el tratamiento T4 podría indicar pérdidas por volatilización del nitrógeno aplicado como fertilizante, habituales en suelos con pH mayor que siete, en los que se aplica nitrosulfato amónico (Tabla 28).

4. RESULTADOS

Tabla 28. Balance de nitrógeno (kg N/ha) hasta 0,6 m de profundidad.

	Nmin ini ¹	Nfert ²	Nminer ³	Nmin fin ⁴	Ncos ⁵	Nlix ⁶	Balance	EUN ⁷
	kgN/ha				kg/kgN			
T1	67±5 ^a	0		20±8	77±7 ^a	12±2	-1±3 ^a	76±11
T2	80±1 ^a	50	41±9	28±8	125±9 ^b	16±4	1±9 ^a	78±8
T3	93±4 ^a	100		27±11	161±12 ^b	14±1	33±20 ^{ab}	74±6
T4	130±11 ^b	130		28±6	201±10 ^c	16±5	55±9 ^b	69±3
	***			ns	***	ns	*	ns

1) N mineral inicial. 2) N aplicado como fertilizante. 3) N mineralizado de 0 a 0,3 m. 4) N mineral final. 5) N extraído en cosecha. 6) N lixiviado del 28/09 hasta cosecha. 7) Eficiencia en el uso del N: kg de cosecha comercial por kg de N disponible. Significación: *** (p≤0,001); * (p≤0,05); ns: no significativo. Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas (p≤0,05) en una prueba de Tukey.

4.3. Año 2014. Var. Barcelona

Cobertura, Altura y Biomasa del cultivo

En la Tabla 29 se muestran los resultados de altura, cobertura y biomasa del cultivo al inicio de la cosecha. La altura ha diferenciado significativamente los tratamientos en función la cantidad de nitrógeno disponible. La cobertura en el tratamiento más fertilizado ha sido significativamente superior al tratamiento T1, no fertilizado. No se han encontrado diferencias significativas en los valores de biomasa.

Tabla 29. Cobertura, altura y biomasa del cultivo, el 22/10/14, al inicio de la cosecha.

Tratamientos	Altura (m)		Cobertura (%)		Biomasa (Mg/ha)	
T1	0,51 ± 0,01	a	67 ± 2	a	3,70 ± 0,24	ns
T2	0,56 ± 0,01	b	75 ± 3	ab	3,96 ± 0,21	ns
T3	0,62 ± 0,01	c	77 ± 3	ab	4,11 ± 0,21	ns
T4	0,71 ± 0,01	d	79 ± 2	b	4,49 ± 0,23	ns

Letras diferentes difieren significativamente en un test de Tukey ($p \leq 0.05$). ns: no existen diferencias significativas.

Producción total

La producción total media de coliflores en los tratamientos T3 y T4, más fertilizados, fue del orden de 16.000 kg/ha (Tabla 30). Hubo diferencias significativas entre tratamientos, en función del nitrógeno disponible.

Tabla 30. Producción total, de hojas y de pellas (kg/ha) de la var. Barcelona y nitrógeno disponible en el ensayo de 2014.

Tratamientos	Ndisponible	Pellas	Hojas	Total
	kg/ha			
T1	72	7.328 a	24.201 a	31.529 a
T2	130	11.068 ab	30.553 b	41.621 ab
T3	189	14.517 bc	34.952 bc	49.470 bc
T4	260	17.318 c	38.965 c	56.283 c
		***	***	***

*** Significación ($p \leq 0.001$) en el análisis de la varianza. Letras diferentes difieren significativamente en un test de Tukey ($p \leq 0.05$).

El análisis de regresión no lineal de la producción total relativa de coliflores en función del nitrógeno disponible ($N_{disp} = N_{min} + N_{fertilizante}$), indica que la producción se estabiliza para valores de N_{disp} de 179 ± 41 kg N_{disp} /ha (Figura 35). En este caso, por debajo de este nivel de nitrógeno disponible se encuentran los tratamientos T1 y T2, y los tratamientos T3 y T4 se sitúan por encima.

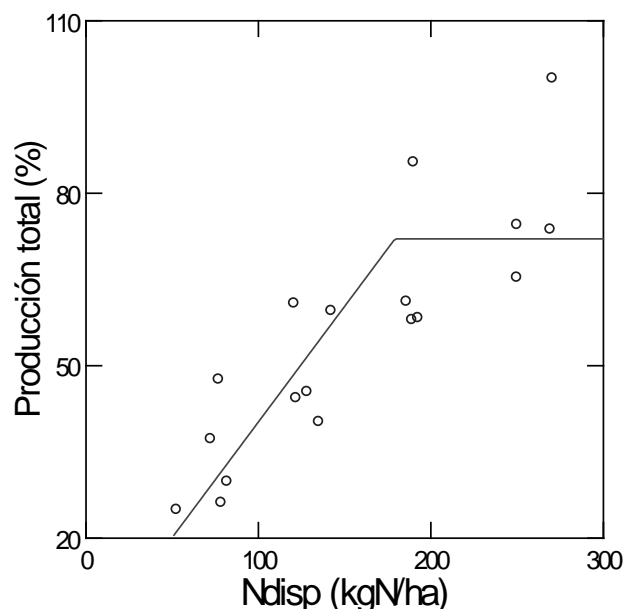


Figura 35. Producción total relativa de pellas de coliflor var. Barcelona, en función del nitrógeno disponible en el suelo ($N_{min} + N$ fertilizante).

Concentración de nitrógeno en hojas

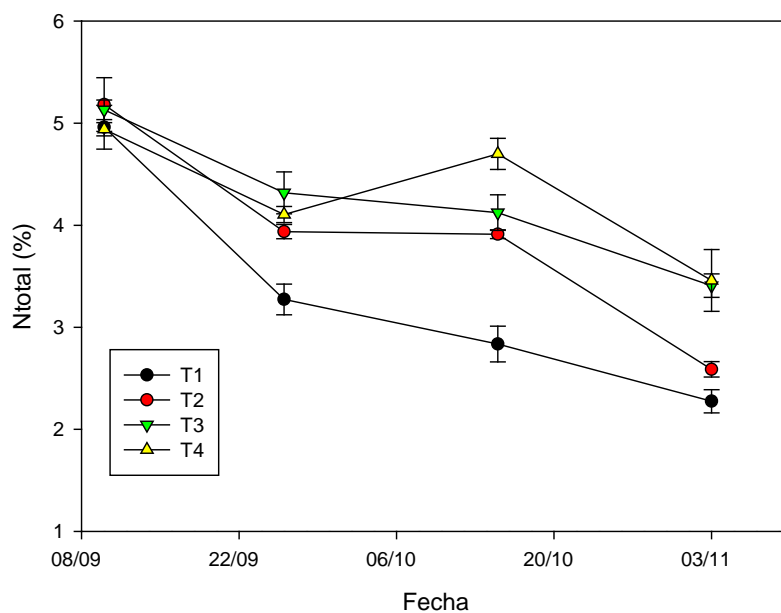


Figura 36. Concentración del nitrógeno total (%) de coliflor var. Barcelona en hojas, a lo largo del cultivo en el año 2014. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 72; 130; 189 y 260 kg N disponible /ha.

El contenido de nitrógeno en las hojas de coliflor en el primer muestreo, el día anterior a la fertilización de cobertera, se situaba en torno al 5 % en todos los tratamientos (Figura 36). En el segundo muestreo, después de la fertilización de cobertera, las concentraciones de nitrógeno disminuyeron hasta la recolección, siendo mayor esta disminución en los tratamientos menos fertilizados T1 y T2, observándose diferencias significativas entre los tratamientos. Los tratamientos T3 y T4 alcanzan valores del 3,5% al finalizar el cultivo y los tratamientos T1 y T2 alcanzan valores del 2,5 % en ese momento. De acuerdo al modelo de Greenwood (1986), han sido los tratamientos T1 y T2 los que han tenido concentraciones de nitrógeno por debajo de los valores de nitrógeno crítico (Figura 37).

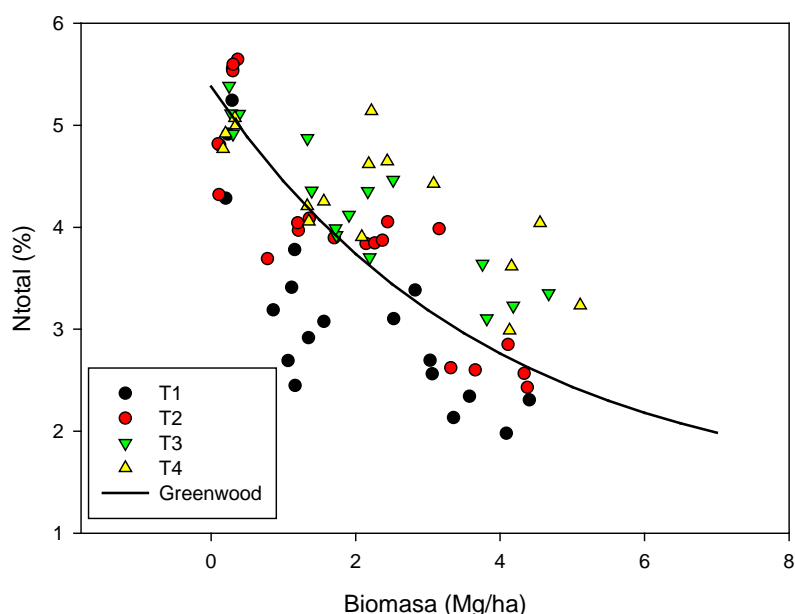


Figura 37. Concentración de nitrógeno total (%) de coliflor var. Barcelona en función de la biomasa (Mg/ha) en el año 2014. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 72; 130; 189 y 260 kg N disponible /ha. Se presenta la curva crítica del modelo de Greenwood 1986.

Contenido de nitrógeno en el suelo

El contenido de Nmin inicial (5 de agosto) en el perfil del suelo hasta 0,6 m de profundidad estuvo comprendido entre 70 y 120 kg/ha (Figura 38). A los dieciocho días desde la fertilización de cobertera, el contenido en Nmin ha disminuido en todos los tratamientos salvo en el T4, en el que ha aumentado. Al finalizar la recolección el Nmin ha disminuido en todos los tratamientos, por debajo de 25 kg/ha. El horizonte superficial hasta 0,15 m aparece casi agotado.

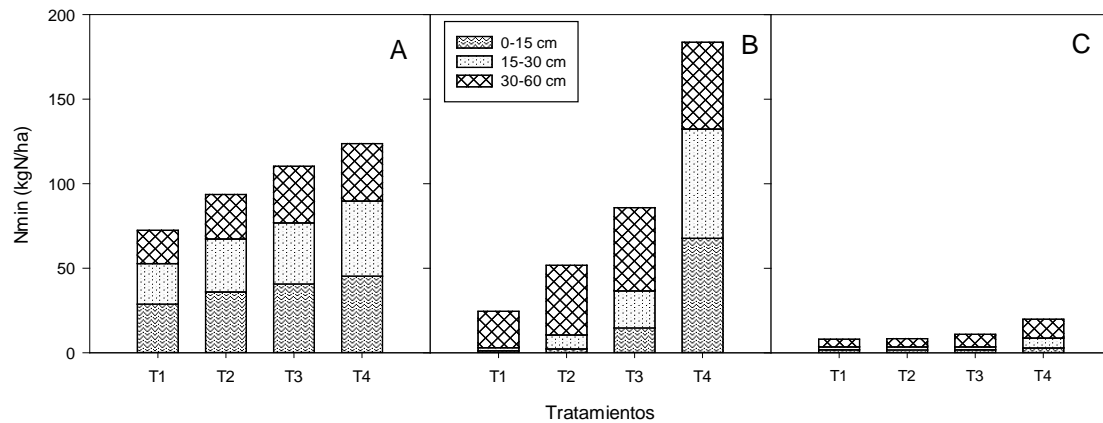


Figura 38. Nitrógeno mineral (Nmin) en el suelo, de 0 a 60 cm, en la var. Barcelona, en el año 2014, (A) 5 de agosto, en el momento del trasplante, (B) 29 de septiembre, dieciocho días después del abonado y (C) 10 de noviembre, al finalizar la cosecha.

Contenido de N-Nitrato en savia

En el primer muestreo, el día anterior al abonado de cobertera, la concentración de N-NO_3^- en savia osciló entre 1.600 y 1.800 ppm (Figura 39), sin diferencias significativas entre tratamientos. Esta concentración disminuyó, hasta valores inferiores a 800 ppm en el segundo muestreo, dieciocho días después del abonado de cobertera, existiendo diferencias significativas entre los tratamientos.

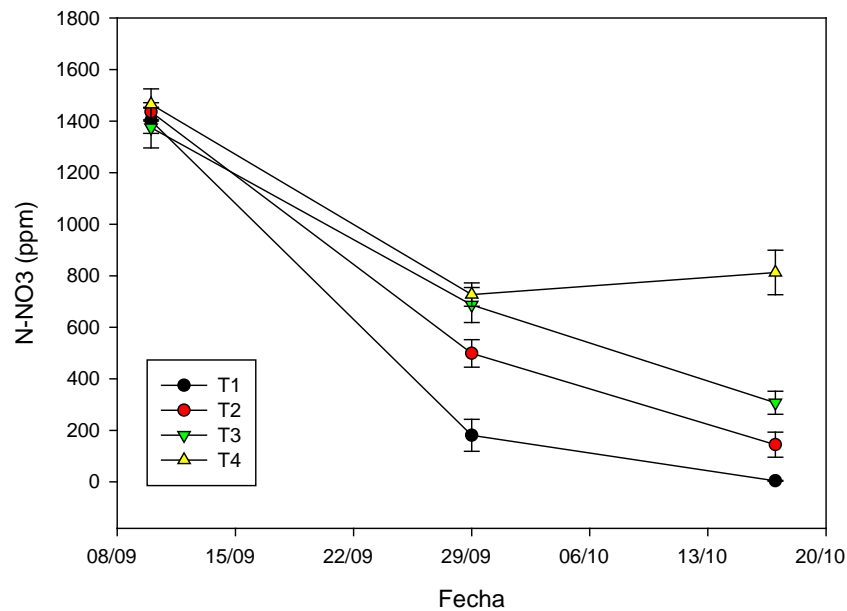


Figura 39. Concentración de N-NO_3^- (ppm) en savia, en hojas de coliflor var. Barcelona en los diferentes tratamientos. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 72; 130; 189 y 260 kg N disponible /ha. Las barras verticales indican el error estándar.

La concentración de nitrato siguió descendiendo hasta valores inferiores a 400 ppm en el tercer muestreo, al inicio de la recolección, en todos los tratamientos salvo el T4, más fertilizado.

Sensor SPAD

En las medidas realizadas con el sensor SPAD (Figura 40), no se encontraron diferencias significativas en el primer muestreo, antes de la fertilización de cobertera, ni tampoco en el segundo muestreo, dieciocho días después.

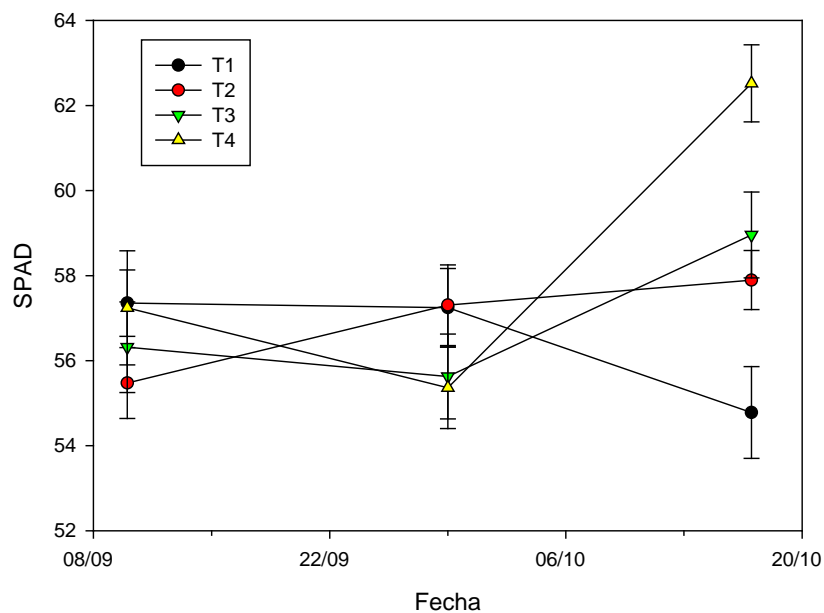


Figura 40. Contenido de clorofila en hojas de coliflor var. Barcelona, unidades SPAD, en los diferentes tratamientos. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 72; 130; 189 y 260 kg N disponible /ha. Las barras verticales indican el error estándar.

En el tercer muestreo, previo a la cosecha, se han encontrado diferencias significativas entre los tratamientos, siendo el T4 más fertilizado el que mostró los mayores valores de SPAD y el T1, no fertilizado, los menores.

Sensor DUALEX

En las medidas realizadas con el sensor DUALEX (Figuras 41 y 42) no se encontraron diferencias significativas para los índices Chl y NBI en el primer muestreo, antes de la fertilización de cobertera, ni tampoco en el segundo, dieciocho días después. En el tercer muestreo, anterior a la cosecha, se han encontrado diferencias significativas entre los tratamientos, siendo el T4 más fertilizado el que mostró los mayores valores de estos índices y el T1, no fertilizado, los menores.

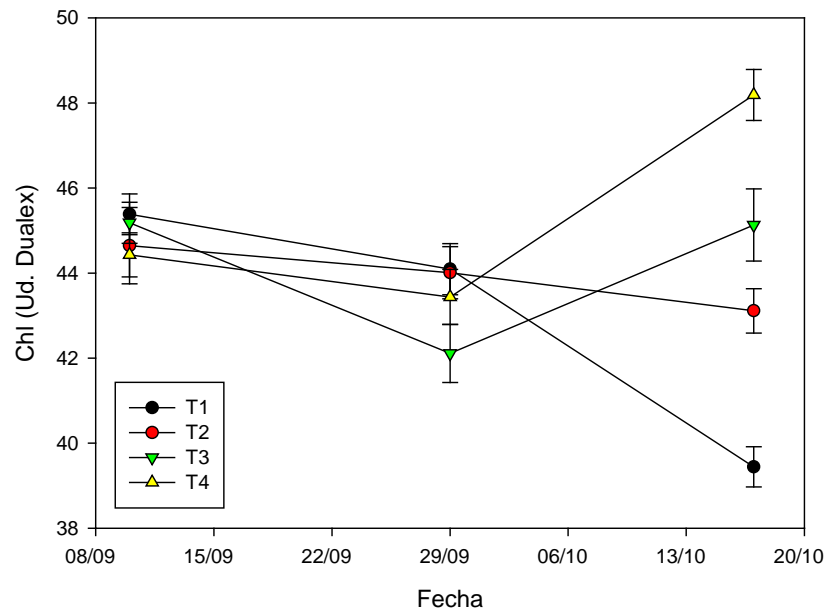


Figura 41. Índice Chl de Duallex, en coliflor cv. Barcelona, en los diferentes tratamientos de nitrógeno disponible. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 72; 130; 189 y 260 kg N disponible /ha. Las barras verticales indican el error estándar.

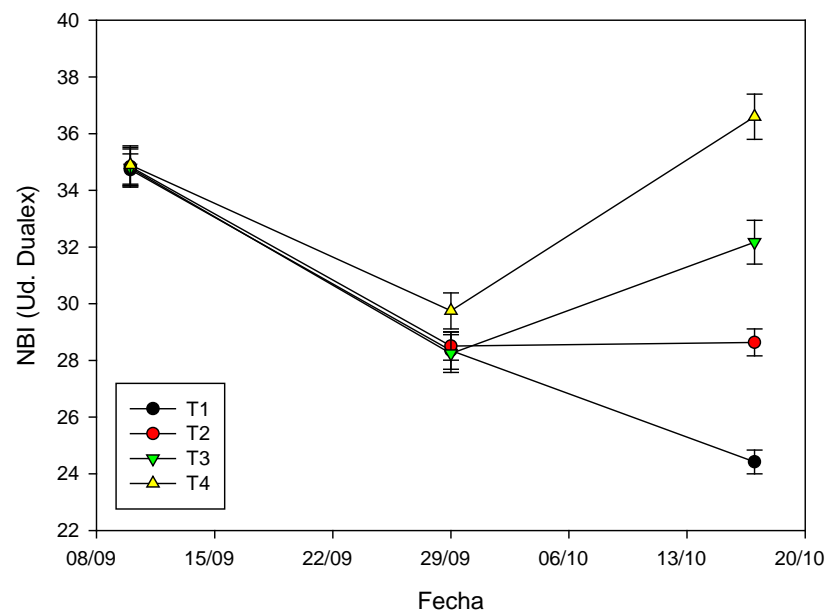


Figura 42. Índice NBI de Duallex, en coliflor cv. Barcelona, en los diferentes tratamientos de nitrógeno disponible. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 72; 130; 189 y 260 kg N disponible /ha. Las barras verticales indican el error estándar.

Sensor MULTIPLEX

La evolución de los índices SFR y NBI del sensor MULTIPLEX se muestra en las figuras 43 y 44. Existen diferencias significativas con el índice NBI, en todas las fechas y con el índice SFR a partir de la fertilización de cobertera, después del primer

muestreo. La evolución de los valores de estos índices ha sido similar en todos los tratamientos, obteniéndose los menores valores en los tratamientos menos fertilizados T1 y T2.

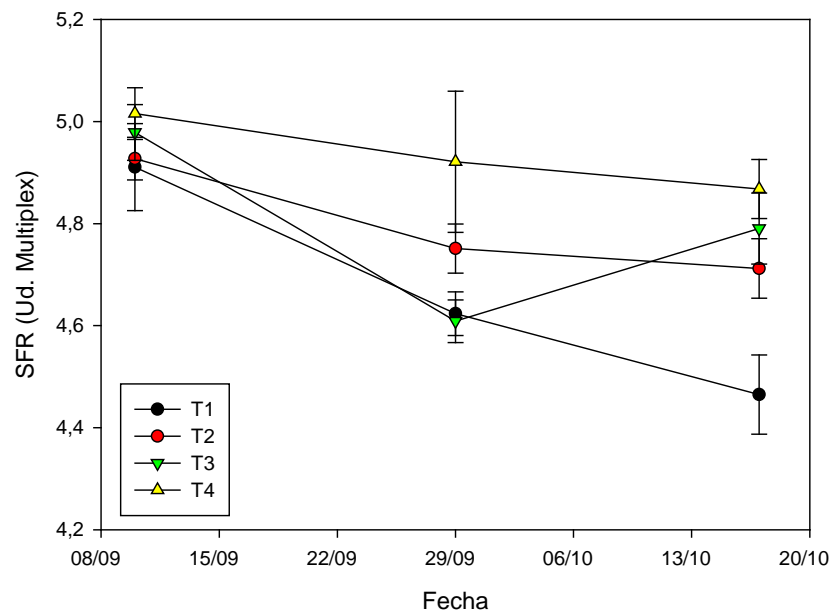


Figura 43. Índice SFR de Multiplex, en coliflor cv. Barcelona, en los diferentes tratamientos de nitrógeno disponible. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 72; 130; 189 y 260 kg N disponible /ha. Las barras verticales indican el error estándar.

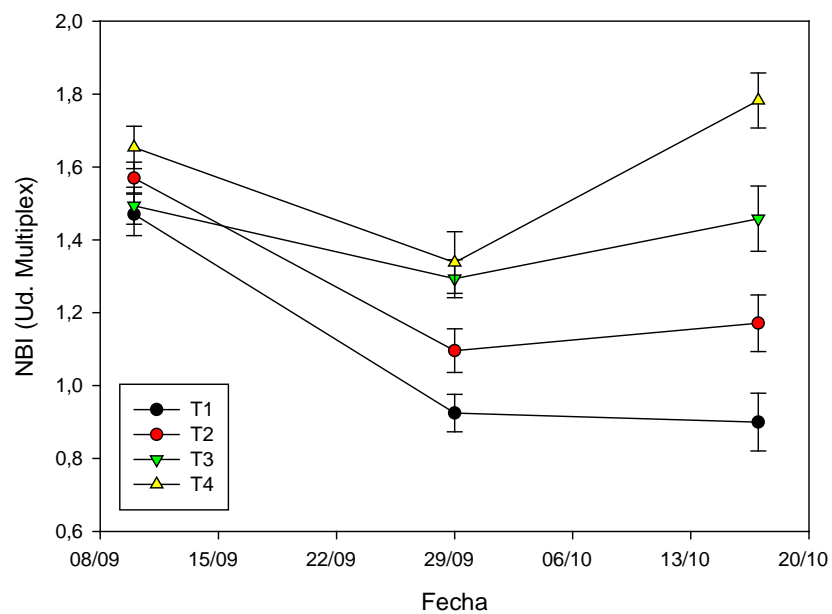


Figura 44. Índice NBI de Multiplex, en coliflor cv. Barcelona, en los diferentes tratamientos de nitrógeno disponible. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 72; 130; 189 y 260 kg N disponible/ha. Las barras verticales indican el error estándar.

Sensor CROP CIRCLE

En los trayectos realizados con el sensor Crop Circle se han obtenido diferencias significativas para los índices NDRE y NDVI entre los tratamientos, para cada fecha de muestreo (Figuras 45 y 46). Los mayores valores de estos índices se han obtenido para los tratamientos más fertilizados y los menores para los menos fertilizados.

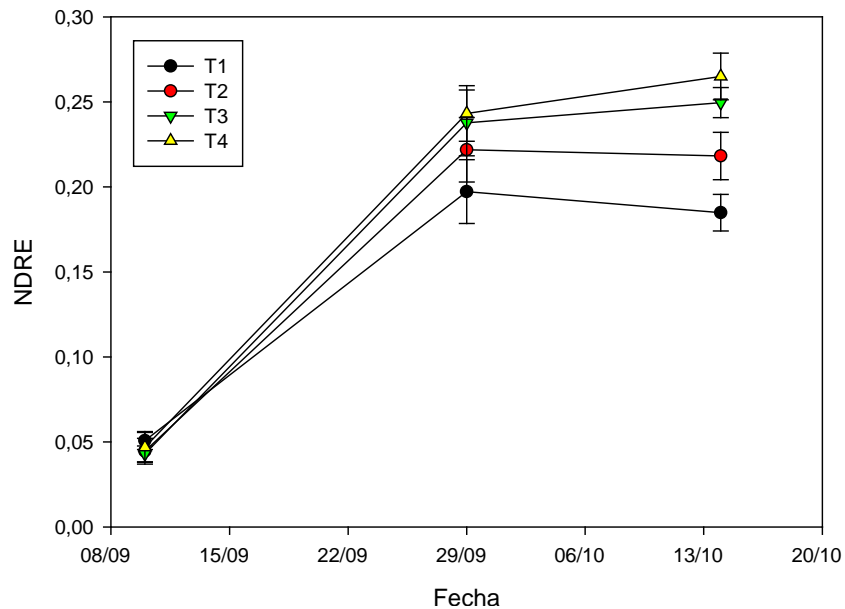


Figura 45. Índice NDRE de Crop Circle, en coliflor cv. Barcelona en los diferentes tratamientos de nitrógeno disponible. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 72; 130; 189 y 260 kg N disponible /ha. Las barras verticales indican el error estándar.

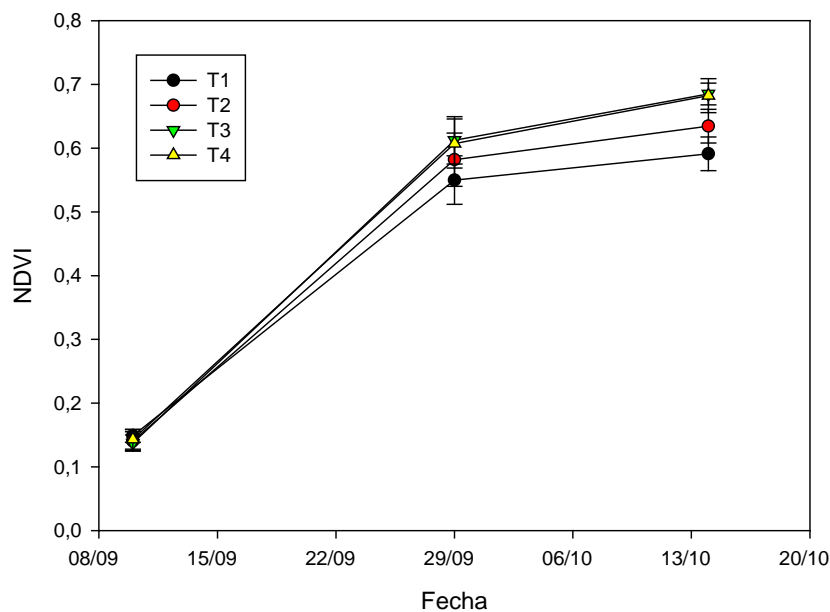


Figura 46. Índice NDVI de Crop Circle, en coliflor cv. Barcelona en los diferentes tratamientos de nitrógeno disponible. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 72; 130; 189 y 260 kg N disponible /ha. Las barras verticales indican el error estándar.

Mineralización de la materia orgánica del suelo

La tasa de mineralización, en el horizonte superior del suelo de 0,2 m alcanzó un valor medio de 0,22 mgN/kg suelo seco y día (Figura 47), no observándose diferencias significativas entre los tratamientos. Este valor representa 57 kgN/ha para el período de cultivo, extrapolado a la capa superficial del suelo hasta 0,3 m.

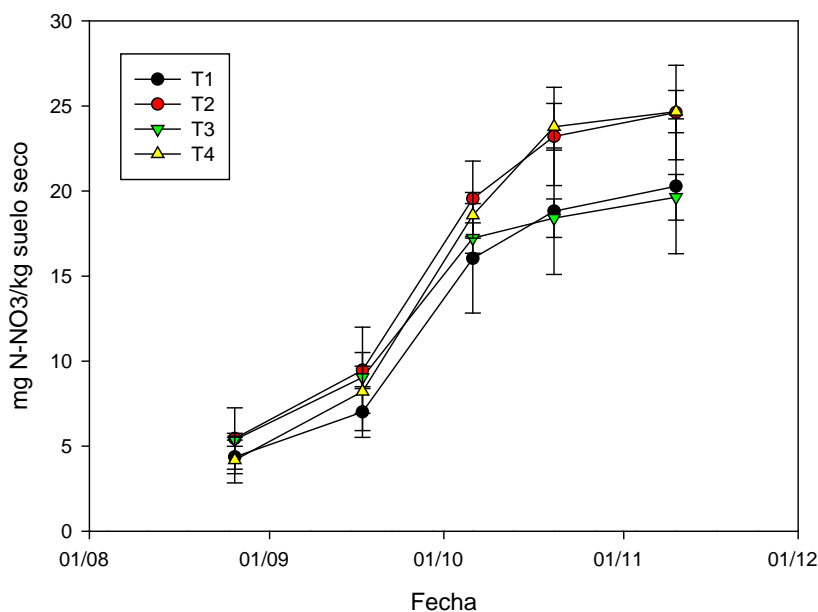


Figura 47. Mineralización (mg N/kg suelo seco) medida en resinas a 0,2 m de profundidad, en el ensayo de coliflor de la variedad Barcelona en 2014, en los tratamientos T1, T2, T3 y T4 con 72; 130; 189 y 260 kg N disponible /ha. Las barras verticales indican el error estándar.

Balance de nitrógeno

De los términos del balance se deduce que hay nitrógeno en exceso, sobre todo en los tratamientos más fertilizados, T3 y T4. Esto podría indicar pérdidas por volatilización del nitrógeno aplicado como fertilizante, habituales en suelos con pH mayor que siete, en los que se aplica nitrosulfato amónico. En el caso de los tratamientos T1 y T2, el nitrógeno disponible no fue suficiente para cubrir sus necesidades presentando una menor extracción de nitrógeno por parte del cultivo. No se han encontrado diferencias significativas en la eficiencia del uso del nitrógeno (Tabla 31).

4. RESULTADOS

Tabla 31. Balance de nitrógeno (kg/ha) hasta 0,6 m de profundidad

	Nmin ini ¹	Nfert ²	Nminer ³	Nmin fin ⁴	Ncos ⁵	Nlix ⁶	Balance	EUN ⁷
	kgN/ha							kg/kgN
T1	72±5a	0	57±3	8±1a	83±6a	17±2a	21±8a	57±7
T2	94±4b	36	57±3	8±2a	104±6a	24±2ab	50±5ab	59±5
T3	110±1bc	79	57±3	11±2a	136±8b	25±2b	75±10b	59±6
T4	124±6c	136	57±3	20±4b	155±13b	24±1ab	119±12c	55±5
	***			**	***	*	***	ns

1) N mineral inicial. 2) N aplicado como fertilizante. 3) N mineralizado de 0 a 0,3 m. 4) N mineral al finalizar el cultivo. 5) N extraído en cosecha. 6) N lixiviado por riego o lluvia. 7) Eficiencia en el uso del N: kg de cosecha comercial por kg de N disponible. Significación: *** (p≤0,001); ** (p≤0,01); * (p≤0,05); ns: no significativo. Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas (p≤0,05) en una prueba de Tukey.

4.4. Año 2013. Var. Typical

Cobertura, Altura y Biomasa del cultivo

En la tabla 32 se muestran los resultados y sus diferencias significativas, por tratamientos, de altura, cobertura y biomasa del cultivo al inicio de la cosecha. La altura ha diferenciado significativamente los tratamientos en función la cantidad de nitrógeno disponible. La cobertura en el tratamiento más fertilizado ha sido significativamente superior al tratamiento T1, no fertilizado. No se han encontrado diferencias significativas en los valores de biomasa.

Tabla 32. Cobertura, altura y biomasa del cultivo, el 21/01/2014, al inicio de la cosecha.

Tratamientos	Altura (m)		Cobertura (%)		Biomasa (Mg/ha)	
T1	0,56 ± 0,01	a	81 ± 4	a	5,93 ± 0,50	ns
T2	0,62 ± 0,01	b	89 ± 4	ab	6,43 ± 0,39	ns
T3	0,68 ± 0,01	c	92 ± 1	ab	6,76 ± 0,33	ns
T4	0,70 ± 0,01	c	93 ± 1	b	7,43 ± 0,21	ns

Letras diferentes difieren significativamente en un test de Tukey ($p \leq 0.05$). ns: no existen diferencias significativas.

Producción total

La producción total media de coliflores en los tratamientos T3 y T4, más fertilizados, fue del orden de 20.000 kg/ha (Tabla 33). Hubo diferencias significativas entre tratamientos en función del nitrógeno disponible.

Tabla 33. Producción total, de hojas y de pellas (kg/ha) de la var. Typical y nitrógeno disponible en el ensayo de 2013.

Tratamientos	Ndisponible	Pellas	Hojas	Total
	kg/ha			
T1	84	10.035 a	32.066 a	42.101 a
T2	130	14.113 ab	37.135 ab	51.248 a
T3	190	18.910 bc	45.635 ab	64.545 a
T4	260	22.392 c	50.811 b	73.203 b
		**	**	**

** Significación ($p \leq 0.01$) en el análisis de la varianza. Letras diferentes difieren significativamente en un test de Tukey ($p \leq 0.05$).

El análisis de regresión no lineal de la producción total relativa de coliflores en función del nitrógeno disponible ($N_{disp} = N_{min} + N_{fertilizante}$), indica que la producción se estabiliza para valores de 189 ± 45 kg N_{disp} /ha (Figura 48). En este caso, por debajo de este nivel de nitrógeno disponible se encuentran los tratamientos T1 y T2, los tratamientos T3 y T4 se sitúan por encima de estos niveles de nitrógeno disponible.

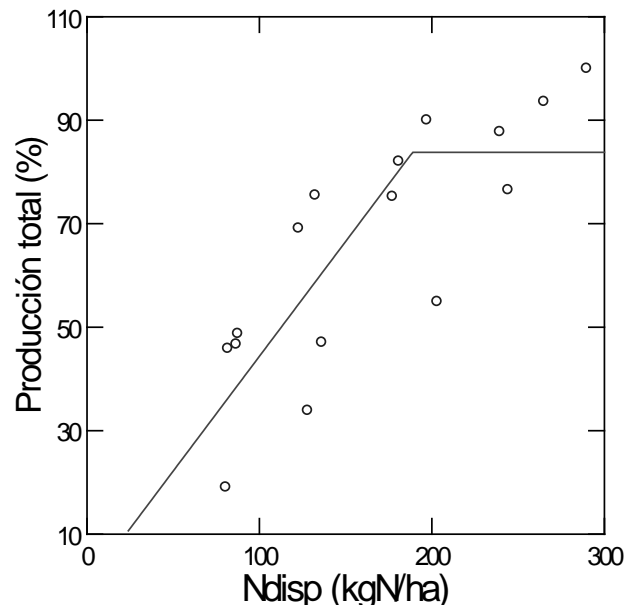


Figura 48. Producción total relativa de pellas de coliflor var. Typical, en función del nitrógeno disponible en el suelo ($N_{min} + N$ fertilizante).

Concentración de nitrógeno en hojas

El contenido de nitrógeno en las hojas de coliflor se ha mantenido en torno al 4,5% en los tratamientos T3 y T4 hasta el tercer muestreo, 12 días después de la segunda fertilización de cobertera (Figura 49). En los tratamientos T1 y T2 esta concentración se mantuvo hasta el segundo muestreo, 14 días después de la primera fertilización de cobertera. Solamente en el tercer muestreo se encontraron diferencias significativas entre tratamientos, diferenciándose el tratamiento no fertilizado, T1, del resto. Posteriormente la concentración de nitrógeno disminuyó paulatinamente hasta el 3% en los tratamientos T3 y T4 y el 2% en los tratamientos T1 y T2 en el quinto muestreo, al inicio de la recolección. De acuerdo al modelo de Greenwood (1986), los tratamientos T1 y T2 ha tenido concentraciones de nitrógeno por debajo de los valores de nitrógeno crítico (Figura 50).

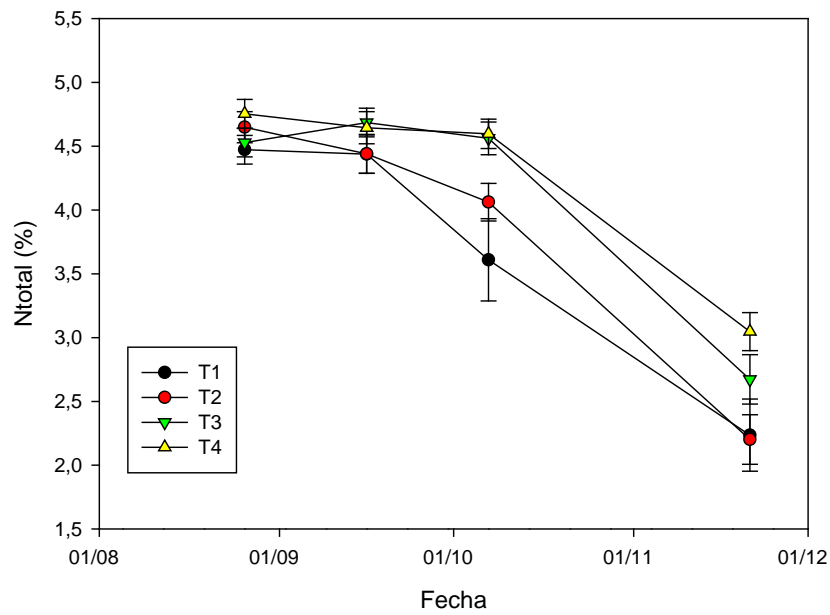


Figura 49. Concentración del nitrógeno total (%) de coliflor var. Typical en hojas, a lo largo del cultivo en el año 2013. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 84; 130; 190 y 260 kg N disponible /ha.

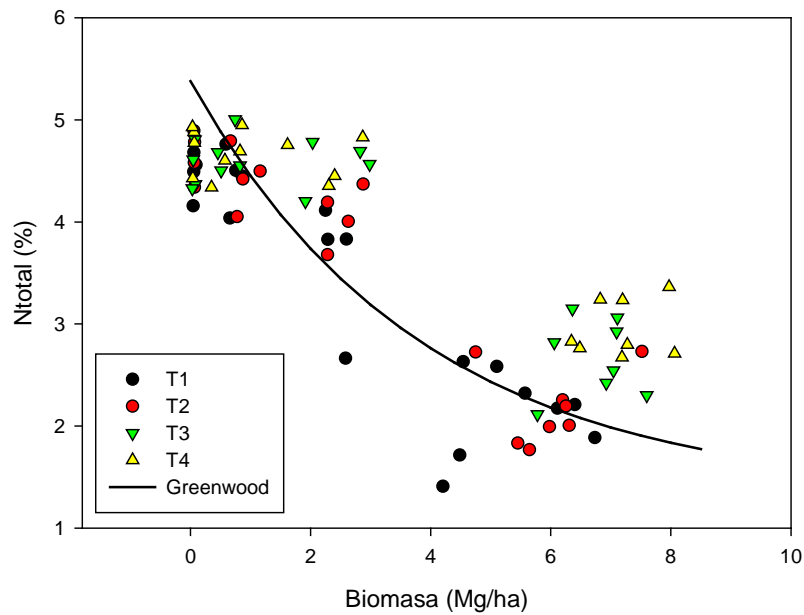


Figura 50. Concentración de nitrógeno total (%) en coliflor var. Typical en función de la biomasa (Mg/ha) en el año 2013. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 84; 130; 190 y 260 kg N disponible /ha. Se presenta la curva crítica del modelo de Greenwood 1986.

Contenido de nitrógeno en el suelo

El contenido de Nmin inicial (6 de agosto) en el perfil del suelo hasta 0,6 m de profundidad estuvo comprendido entre 80 y 180 kg/ha (Figura 51). A los quince días

desde la fertilización de cobertera, el contenido en Nmin ha disminuido hasta los 60 kg/ha en el tratamiento T1 y se ha mantenido en los tratamientos T2 y T3 y ha aumentado hasta superar los 200 kg/ha en el T4. Al finalizar la recolección el Nmin ha disminuido en todos los tratamientos, por debajo de 20 kg/ha. El horizonte superficial hasta 0,15 m aparece casi agotado.

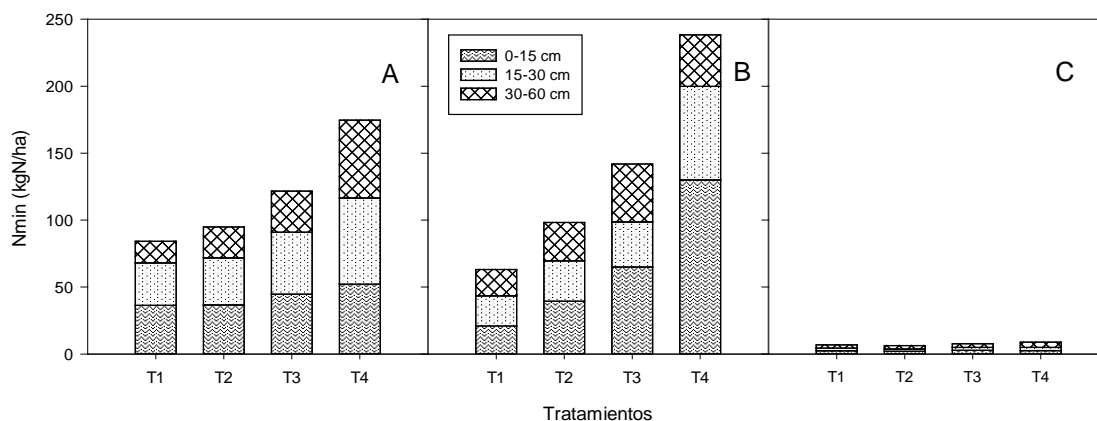


Figura 51. Nitrógeno mineral (Nmin) en el suelo, de 0 a 60 cm, en la var. Typical, en el año 2013, (A) 6 de agosto, en el momento del trasplante, (B) 16 de septiembre, quince días después del primer abonado y (C) 10 de marzo, al finalizar la cosecha.

Contenido de N-Nitrato en savia

En el primer muestreo, cuatro días antes del abonado de cobertera, la concentración de N-NO_3^- en savia oscilaba entre 1.200 y 1.400 ppm, sin diferencias significativas entre tratamientos (Figura 52).

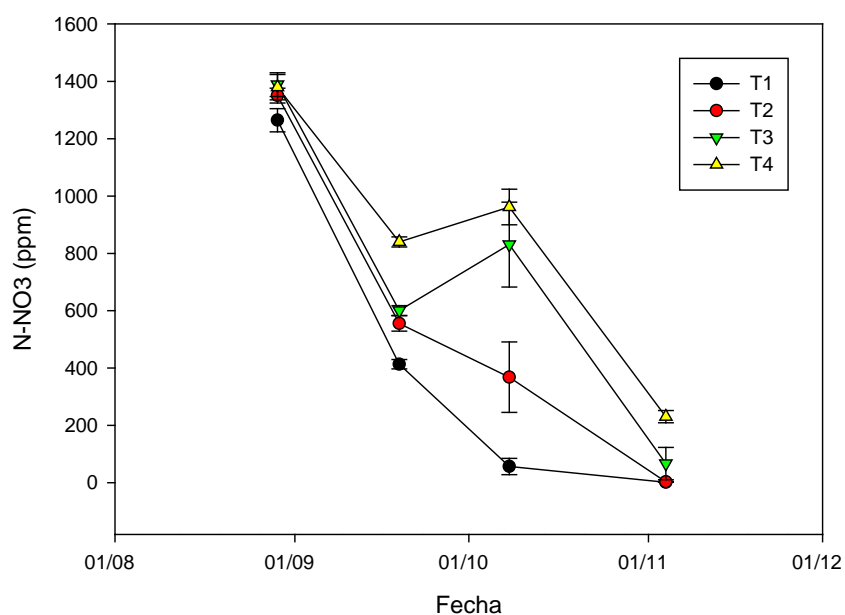


Figura 52. Concentración de N-NO_3^- (ppm) en savia, en hojas de coliflor var. Typical en los diferentes tratamientos. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 84; 130; 190 y 260 kg N disponible /ha. Las barras verticales indican el error estándar.

Esta concentración disminuyó en el segundo muestreo, después del granizo, y se recuperó en el tercer muestreo, después del segundo abonado de cobertera, siendo los tratamientos mas fertilizados, T3 y T4, significativamente superiores a los menos fertilizados, T1 y T2. En el cuarto muestreo, al inicio de la cosecha, la concentración disminuyó en todos los tratamientos por debajo de 250 ppm.

Sensor SPAD

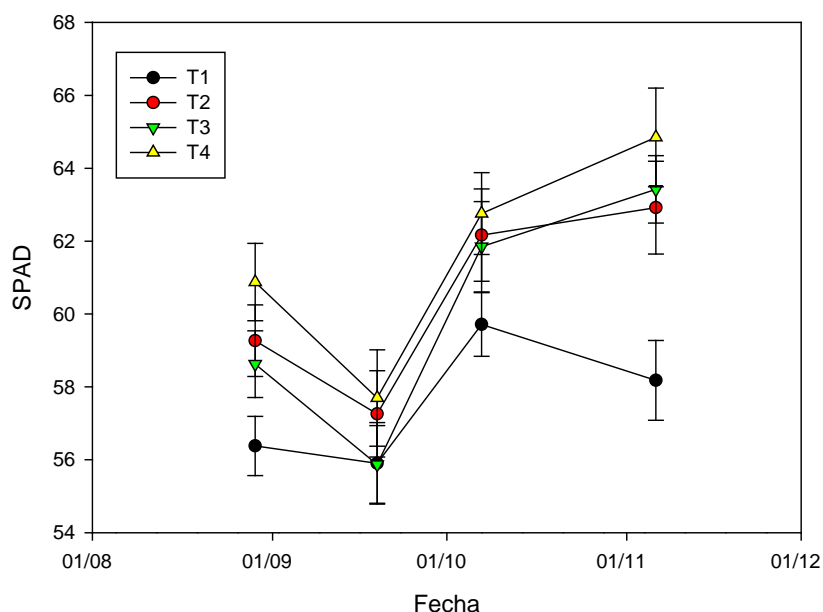


Figura 53. Contenido de clorofila en hojas de coliflor var. Typical, unidades SPAD, en los diferentes tratamientos. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 84; 130; 190 y 260 kg N disponible /ha. Las barras verticales indican el error estándar.

En el primer muestreo realizado con el sensor SPAD, se encontraron diferencias significativas antes de la primera fertilización de cobertera, siendo el tratamiento no fertilizado T1 significativamente inferior. La evolución de sus valores ha sido similar a la del nitrato en savia. También se han encontrado diferencias significativas en el cuarto muestreo, entre el tratamiento T1 y el resto al inicio de la cosecha (Figura 53).

Sensor DUALEX

En las medidas realizadas con el sensor DUALEX se encontraron diferencias significativas para los índices Chl y NBI entre tratamientos en todas las fechas desde el primer muestreo, previo a la fertilización de cobertera. La evolución de los valores de Chl ha sido similar en todos los tratamientos, salvo en el tratamiento T3 que en la segunda fecha de muestreo presentó valores inferiores a los del tratamiento T2. El

índice NBI ha mantenido sus valores en los tratamientos T3 y T4 y ha disminuido, a lo largo del cultivo, en los tratamientos T1 y T2 (Figuras 54 y 55).

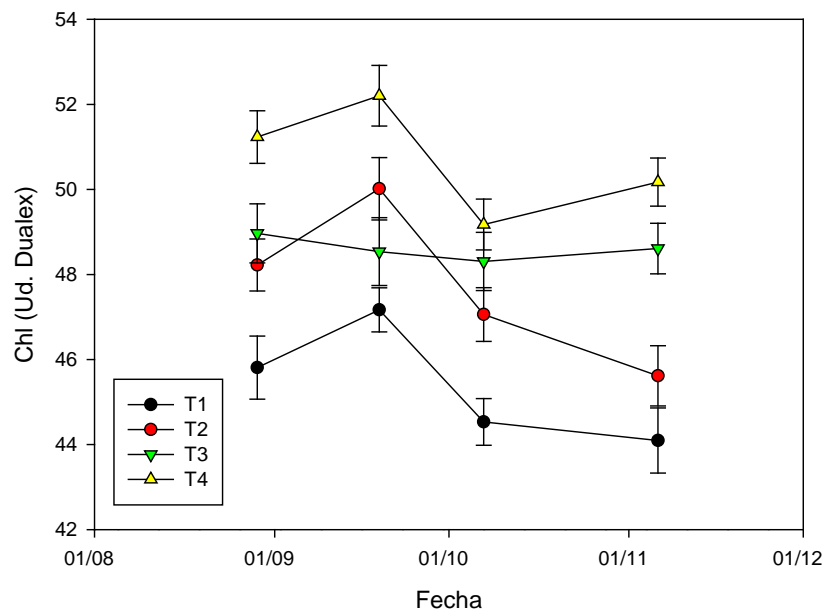


Figura 54. Índice Chl de Dualex, en coliflor cv. Typical, en los diferentes tratamientos de nitrógeno disponible. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 84; 130; 190 y 260 kg N disponible /ha. Las barras verticales indican el error estándar.

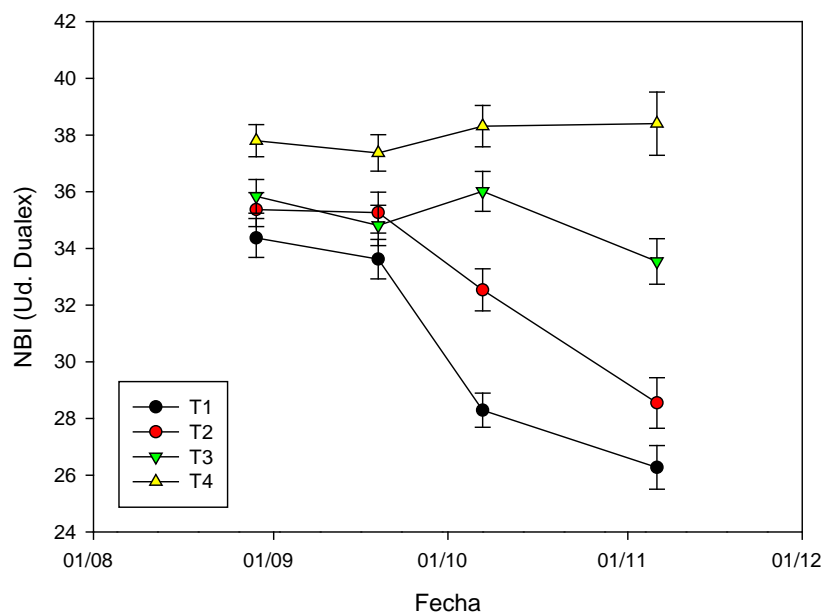


Figura 55. Índice NBI de Dualex, en coliflor cv. Typical, en los diferentes tratamientos de nitrógeno disponible. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 84; 130; 190 y 260 kg N disponible /ha. Las barras verticales indican el error estándar.

Sensor MULTIPLEX

La evolución de los índices SFR y NBI del sensor MULTIPLEX se muestra en las Figuras 56 y 57. Existen diferencias significativas para cada fecha en ambos

índices SFR y NBI, a partir de la primera fertilización de cobertera (tercer muestreo). La evolución de los valores del índice SFR ha sido similar en todos los tratamientos, siendo los valores menores en los tratamientos menos fertilizados T1 y T2. Diecisiete días después de la primera fertilización de cobertera (tercer muestreo), los valores de NBI comienzan a divergir, separando a los tratamientos T1 y T2 de los tratamientos T3 y T4.

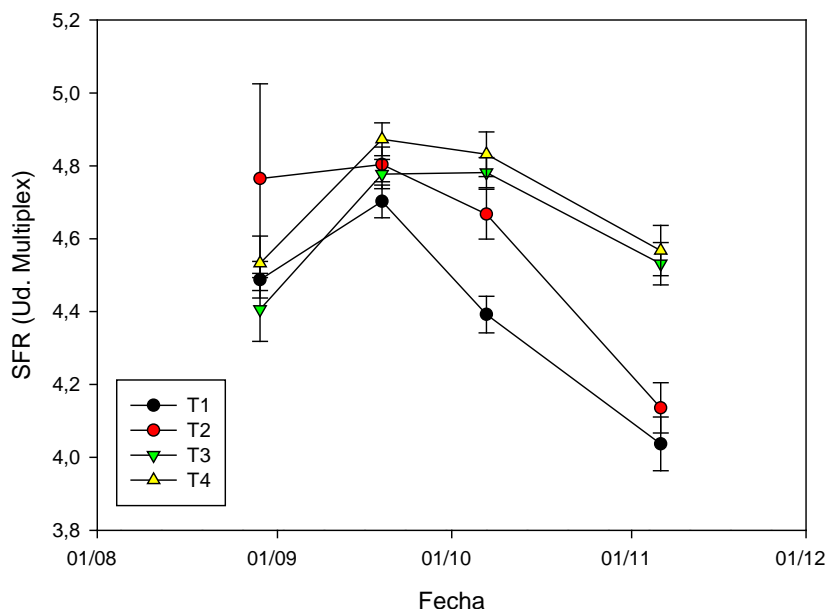


Figura 56. Índice SFR de Multiplex, en coliflor cv. Typical, en los diferentes tratamientos de nitrógeno disponible. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 84; 130; 190 y 260 kg N disponible /ha. Las barras verticales indican el error estándar.

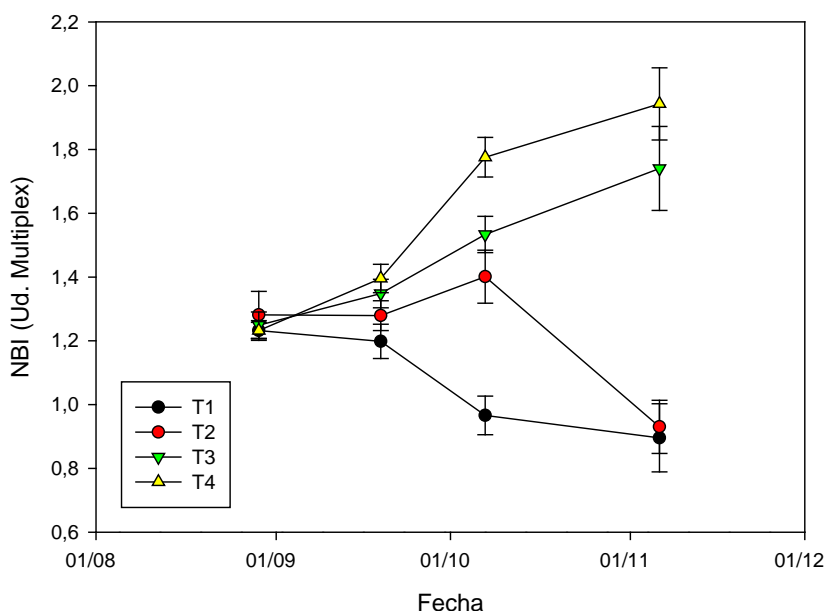


Figura 57. Índice NBI de Multiplex, en coliflor cv. Typical, en los diferentes tratamientos de nitrógeno disponible. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 84; 130; 190 y 260 kg N disponible /ha. Las barras verticales indican el error estándar.

Sensor CROP CIRCLE

En los trayectos realizados con el sensor Crop Circle se obtuvieron diferencias significativas para los índices NDRE y NDVI entre los tratamientos, para cada fecha de muestreo. En el tercer muestreo, después de la primera fertilización de cobertera, los valores NDVI y NDRE de los tratamientos se ordenan en función del nitrógeno disponible (Figuras 58 y 59).

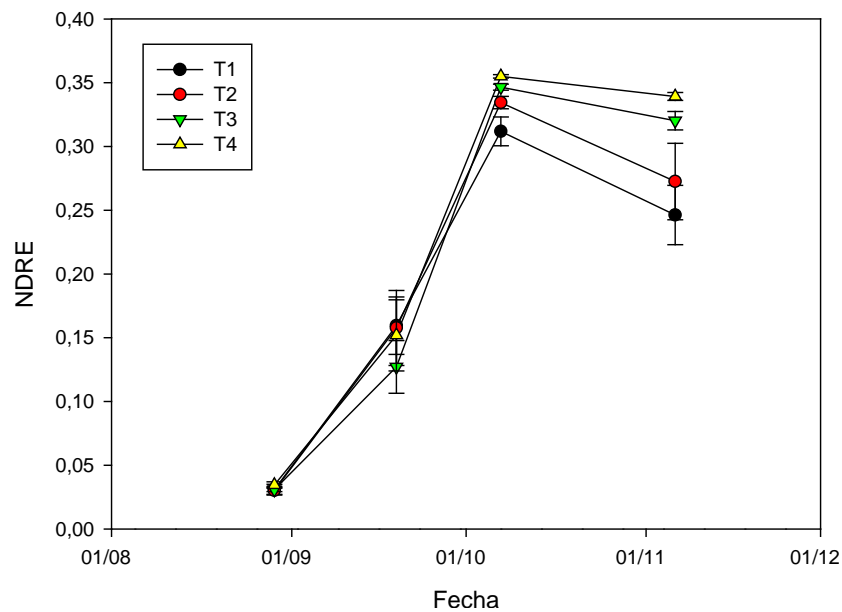


Figura 58. Índice NDRE de Crop Circle, en coliflor cv. Typical, en los diferentes tratamientos de nitrógeno disponible. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 84; 130; 190 y 260 kg N disponible /ha. Las barras verticales indican el error estándar.

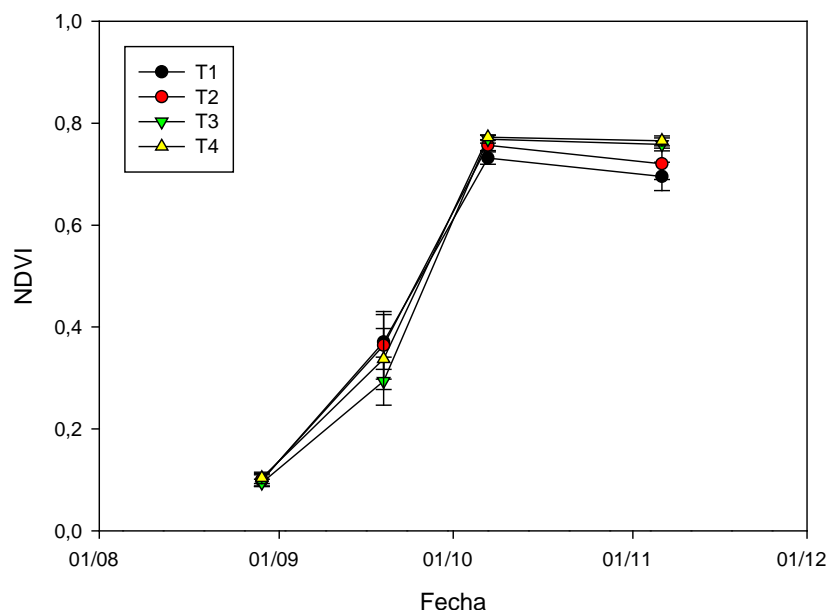


Figura 59. Índice NDVI de Crop Circle, en coliflor cv. Typical, en los diferentes tratamientos de nitrógeno disponible. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 84; 130; 190 y 260 kg N disponible /ha. Las barras verticales indican el error estándar.

Balance de nitrógeno

No se encontraron diferencias significativas en el balance ni en la eficiencia del uso del nitrógeno (Tabla 34). Se han obtenido altos valores de nitrógeno lixiviado, como consecuencia de la acumulación de precipitaciones ocurridas durante el ensayo (219 mm). El balance negativo, en todos los tratamientos, indica que las salidas de nitrógeno en el sistema han sido superiores a las entradas. Esto podría deberse a una subestimación de la mineralización de la materia orgánica y/o a una menor lixiviación del nitrógeno del suelo.

Tabla 34. Balance de nitrógeno (kg/ha) hasta 0,6 m de profundidad.

	Nmin ini ¹	Nfert ²	Nminer ³	Nmin fin ⁴	Ncos ⁵	Nlix ⁶	Balance	EUN ⁷
	kgN/ha				kg/kgN			
T1	84±2a	0	41	7±1	148±22a	36±3	-65±19	81±14
T2	95±3ab	35	41	6±1	195±14ab	76±12	-107±27	83±15
T3	122±6b	68	41	8±1	249±18b	76±12	-102±12	83±9
T4	175±12c	85	41	9±1	301±14b	52±17	-61±20	75±3
	***			ns	***	ns	ns	ns

1) N mineral inicial. 2) N aplicado como fertilizante. 3) Valor medio del N mineralizado de 0 a 0,3 m en el ensayo de la var. Barcelona 2013. 4) N mineral al finalizar el cultivo. 5) N extraído en cosecha. 6) N lixiviado por riego o lluvia. 7) Eficiencia en el uso del N: kg de cosecha comercial por kg de N disponible. Significación: *** ($p \leq 0,001$); ns: no significativo. Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$) en una prueba de Tukey.

4.5. Año 2014 var. Typical

Se presentan los resultados obtenidos con esta variedad hasta el momento de la cosecha, cuando la inundación del río Ebro impidió la realización de la misma.

Cobertura, Altura y Biomasa del cultivo

En la tabla 35 se muestran los resultados y sus diferencias significativas, por tratamientos, de altura, cobertura y biomasa del cultivo al inicio de la cosecha. La altura ha diferenciado significativamente los tratamientos en función la cantidad de nitrógeno disponible. La cobertura en el tratamiento no fertilizado ha sido significativamente inferior al resto. La biomasa ha diferenciado el tratamiento más fertilizado del no fertilizado.

Tabla 35. Cobertura, altura y biomasa del cultivo, el 30/12/2014, al inicio de la cosecha.

Tratamientos	Altura (m)		Cobertura (%)		Biomasa (Mg/ha)	
T1	0,49 ± 0,01	a	58 ± 2	a	5,37 ± 0,59	a
T2	0,61 ± 0,01	b	75 ± 3	b	7,96 ± 0,53	ab
T3	0,75 ± 0,01	c	84 ± 1	b	7,43 ± 0,63	ab
T4	0,82 ± 0,01	c	82 ± 3	b	8,84 ± 1,10	b

Letras diferentes difieren significativamente en un test de Tukey ($p \leq 0.05$). ns: no existen diferencias significativas.

Concentración de nitrógeno en hojas

En el primer muestreo el contenido de nitrógeno en las hojas de coliflor, el día anterior a la fertilización de cobertera, se situaba entre el 4 y 4,5 % en todos los tratamientos. A partir del primer muestreo, las concentraciones de nitrógeno disminuyeron hasta la recolección, siendo mayor esta disminución en los tratamientos menos fertilizados, T1 y T2, observándose diferencias significativas entre los tratamientos. Los tratamientos T3 y T4 alcanzan valores del 3,5 % al finalizar el cultivo y los tratamientos T1 y T2 alcanzan valores del 2,5 % en ese momento (Figura 60). De acuerdo al modelo de Greenwood (1986), han sido los tratamientos T1 y T2 quienes han tenido concentraciones de nitrógeno por debajo de los valores de nitrógeno crítico (Figura 61).

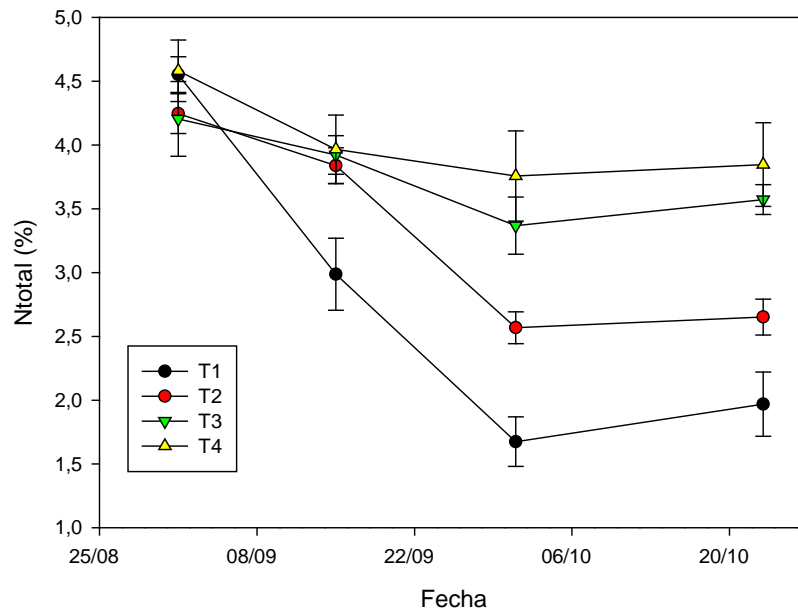


Figura 60. Concentración del nitrógeno total (%) de coliflor var. Typical en hojas, a lo largo del cultivo en el año 2014. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 65; 130; 190 y 260 kg N disponible /ha.

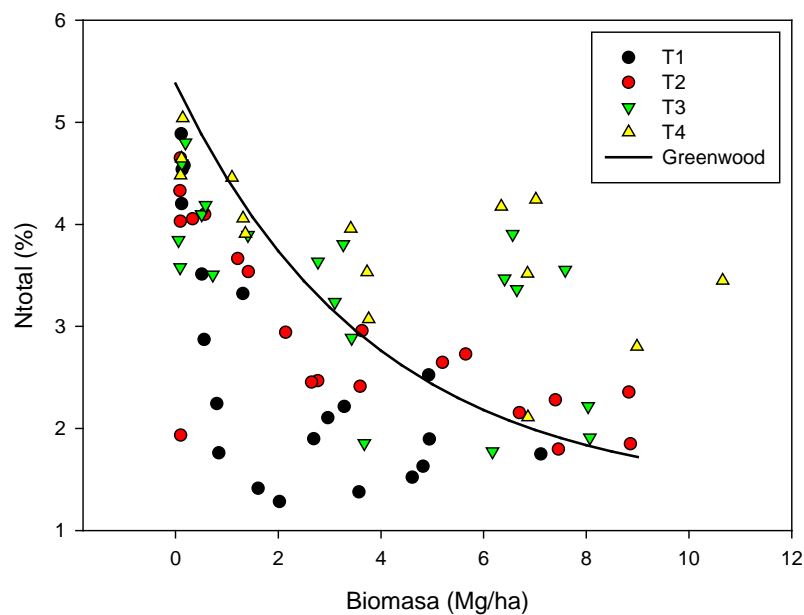


Figura 61. Concentración de nitrógeno total (%) de coliflor var. Typical en función de la biomasa (Mg/ha) en el año 2014. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 65; 130; 190 y 260 kg N disponible /ha. Se presenta la curva crítica del modelo de Greenwood 1986.

Contenido de nitrógeno en el suelo

El contenido de Nmin inicial (6 de agosto) en el perfil del suelo hasta 0,6 m de profundidad estuvo comprendido entre 60 y 140 kg/ha (Figura 62). Desde la fertilización de cobertera, el contenido de Nmin en el perfil disminuye hasta

recolección. Al finalizar ésta el Nmin ha disminuido en todos los tratamientos, por debajo de 50 kg/ha. El horizonte superficial hasta 0,15 m aparece casi agotado.

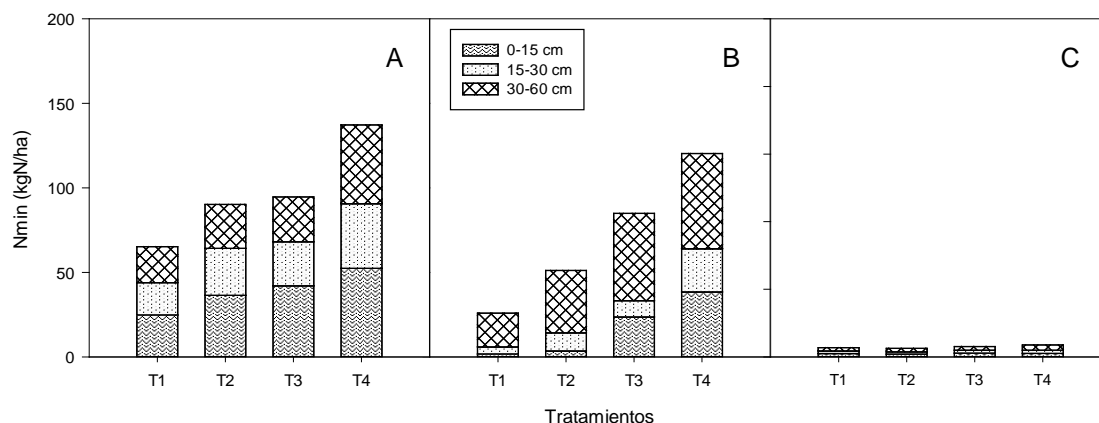


Figura 62. Nitrógeno mineral (Nmin) en el suelo, de 0 a 60 cm, en la var. Typical, en el año 2014, (A) 6 de agosto, en el momento del trasplante, (B) 15 de septiembre, después del primer abonado, y (C) 28 de octubre, una vez iniciada la formación de pellas.

Contenido de N-Nitrato en savia

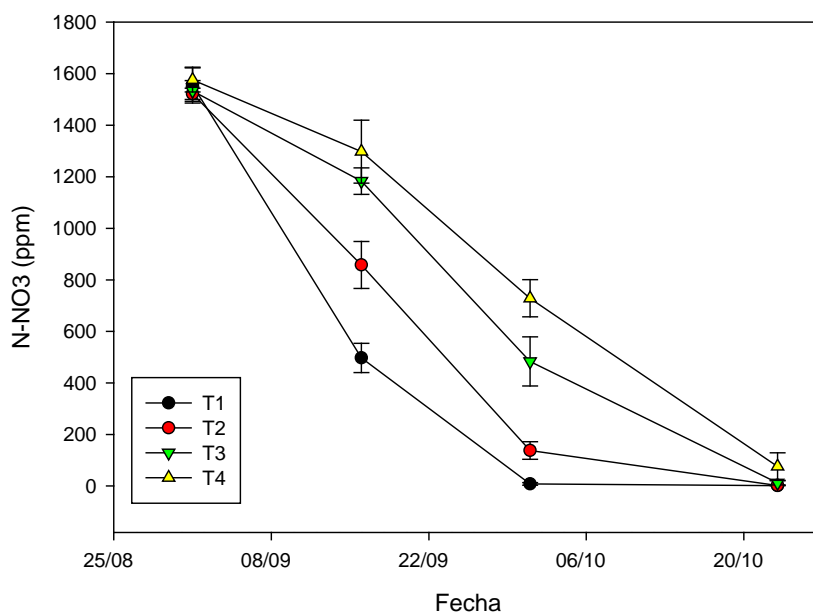


Figura 63. Concentración de N-NO_3^- (ppm) en savia, en hojas de coliflor var. Typical en los diferentes tratamientos. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 65; 130; 190 y 260 kg N disponible /ha. Las barras verticales indican el error estándar.

En el primer muestreo, un día antes del abonado de cobertera, la concentración de N-NO_3^- en savia oscilaba entre 1.400 y 1.600 ppm, sin diferencias significativas entre tratamientos. Esta concentración fue disminuyendo hasta que en el tercer muestreo, al inicio de formación de las pellas, se encontraron valores inferiores a 800 ppm, existiendo diferencias significativas entre los tratamientos. En el cuarto muestreo,

la concentración de nitrato siguió descendiendo hasta valores inferiores a 200 ppm al inicio de la recolección (Figura 63).

Sensor SPAD

A partir del primer muestreo con el sensor SPAD, después de la primera fertilización de cobertera, se han encontrado diferencias significativas, en todas las fechas. Los tratamientos más fertilizados obtuvieron los mayores valores, y los no fertilizados los menores (Figura 64).

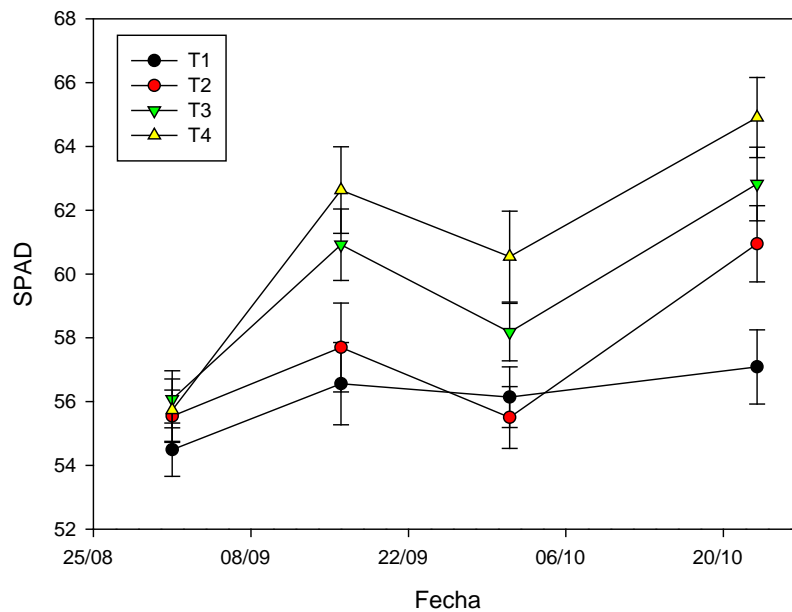


Figura 64. Contenido de clorofila en hojas de coliflor var. Typical, unidades SPAD, en los diferentes tratamientos. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 65; 130; 190 y 260 kg N disponible/ha. Las barras verticales indican el error estándar.

Sensor DUALEX

En el primer muestreo realizado con el sensor DUALEX, antes de la primera fertilización de cobertera, y en el resto de fechas se han encontrado diferencias significativas para los índices Chl y NBI. Siendo el tratamiento T4, más fertilizado, el que mostró los mayores valores de estos índices y el T1, no fertilizado, los menores (Figuras 65 y 66).

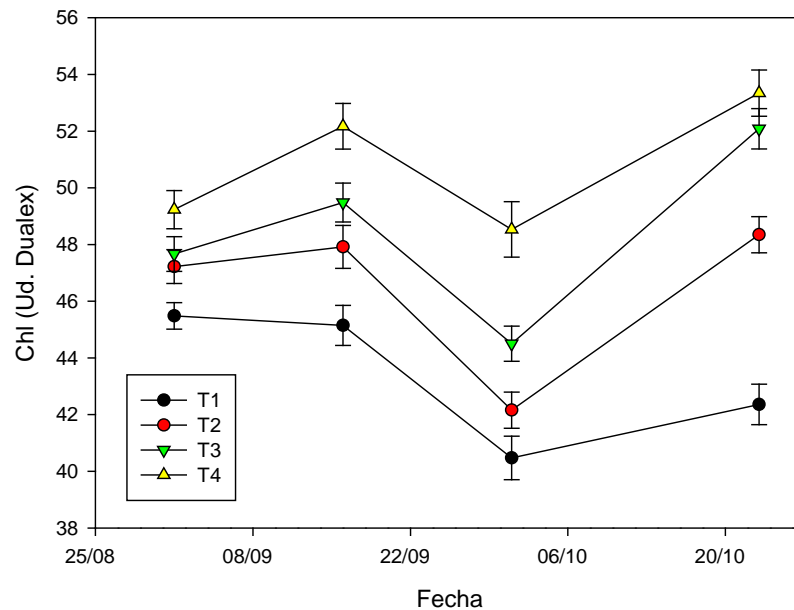


Figura 65. Índice Chl de Duallex en hojas de coliflor var. Typical, en los diferentes tratamientos de nitrógeno disponible. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 65; 130; 190 y 260 kg N disponible /ha. Las barras verticales indican el error estándar.

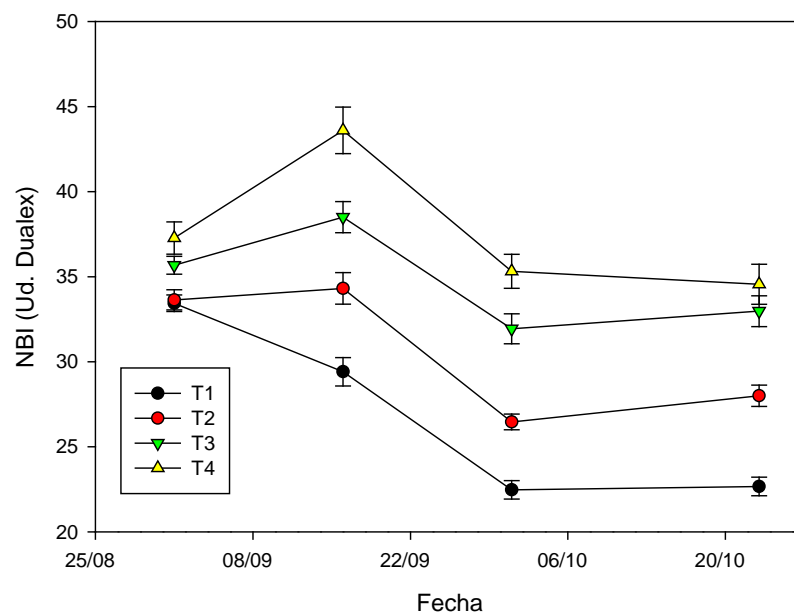


Figura 66. Índice de balance de nitrógeno NBI de Duallex en hojas de coliflor var. Typical, en los diferentes tratamientos de nitrógeno disponible. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 65; 130; 190 y 260 kg N disponible /ha. Las barras verticales indican el error estándar.

Sensor MULTIPLEX

La evolución de los índices SFR y NBI del sensor MULTIPLEX se muestra en las figuras 67 y 68. A partir del primer muestreo, después de la primera fertilización de cobertera, existen diferencias significativas para cada fecha con el índice NBI y con el índice SFR. La evolución de los valores de estos índices ha sido similar en todos los

tratamientos, obteniéndose los menores valores en los tratamientos menos fertilizados T1 y T2.

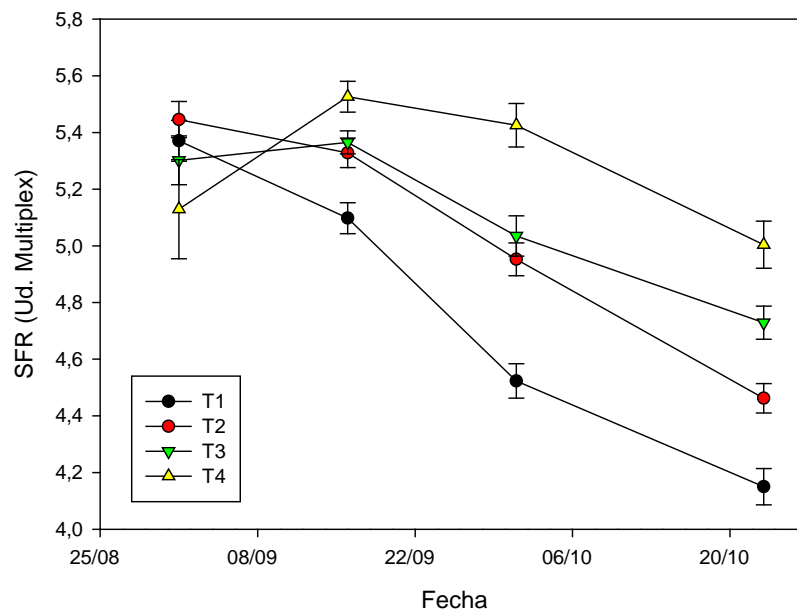


Figura 67. Índice SFR de Multiplex en hojas de coliflor var. Typical, en los diferentes tratamientos de nitrógeno disponible. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 65; 130; 190 y 260 kg N disponible /ha. Las barras verticales indican el error estándar.

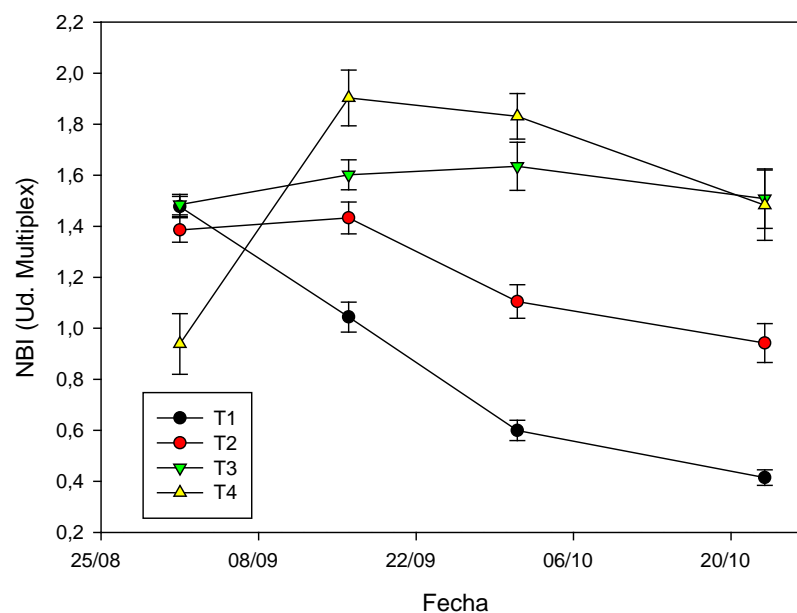


Figura 68. Índice NBI de Multiplex en hojas de coliflor var. Typical, en los diferentes tratamientos de nitrógeno disponible. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 65; 130; 190 y 260 kg N disponible /ha. Las barras verticales indican el error estándar.

Sensor CROP CIRCLE

En los trayectos realizados con el sensor Crop Circle se han obtenido diferencias significativas para los índices NDRE y NDVI entre los tratamientos, para

cada fecha de muestreo Los mayores valores de estos índices se han obtenido para los tratamientos más fertilizados y los menores para los menos fertilizados (Figuras 69 y 70).

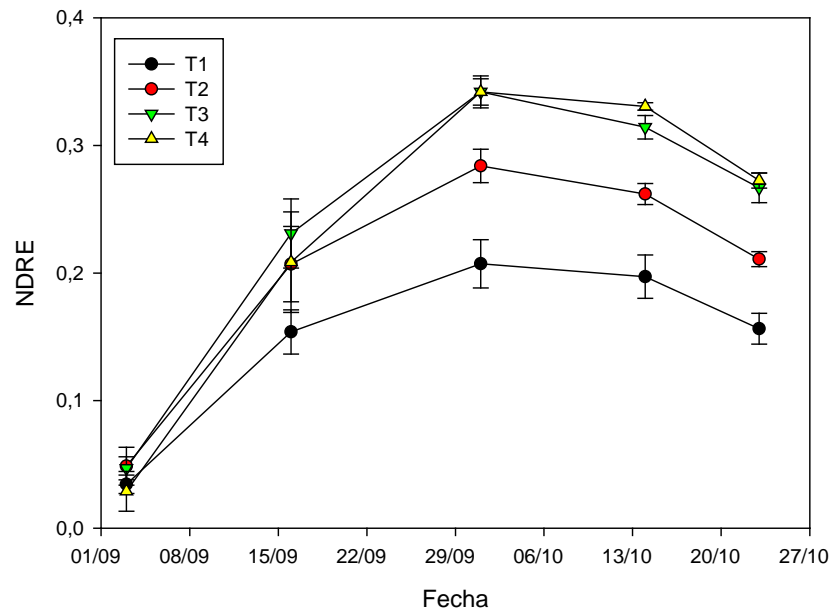


Figura 69. Índice NDRE de Crop Circle en un cultivo de coliflor var. Typical, en los diferentes tratamientos de nitrógeno disponible. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 65; 130; 190 y 260 kg N disponible /ha. Las barras verticales indican el error estándar.

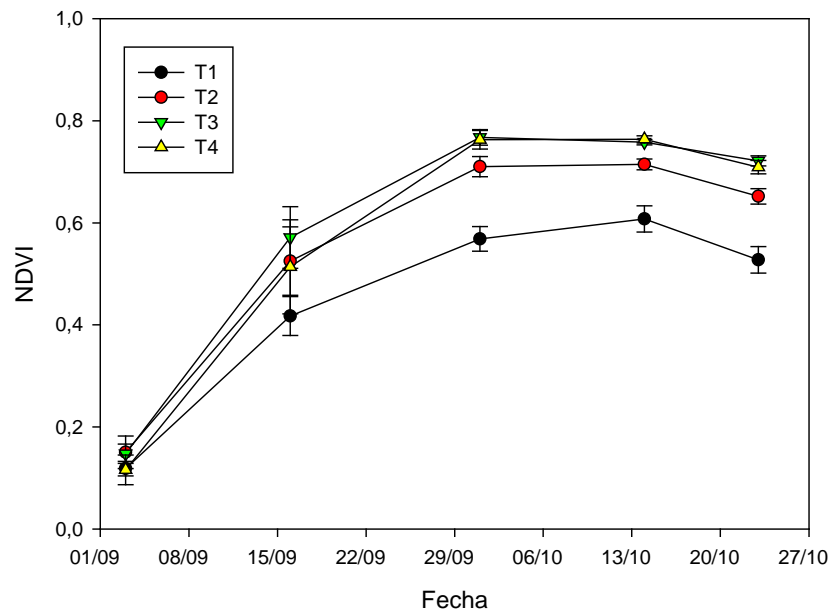


Figura 70. Índice NDVI de Crop Circle en un cultivo de coliflor var. Typical, en los diferentes tratamientos de nitrógeno disponible. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 65; 130; 190 y 260 kg N disponible /ha. Las barras verticales indican el error estándar.

4.6. Año 2012. Var. Casper

Producción total

Debido, posiblemente, al elevado contenido del suelo en nitrógeno disponible, incluso en el tratamiento no fertilizado (259 kgN/ha), no se han encontrado diferencias significativas entre tratamientos en la producción de pellas (Tabla 36).

Tabla 36. Producción total, de hojas y de pellas (kg/ha) de la var. Casper y nitrógeno disponible en el ensayo de 2012.

Tratamientos	Ndisponible	Pellas	Hojas	Total
	kg/ha			
T1	259	34.263	64.497	98.760
T2	359	33.287	61.073	94.360
T3	432	34.949	64.683	99.632
T4	524	33.855	62.165	96.019
		ns	ns	ns

ns: no significativo en el análisis de la varianza.

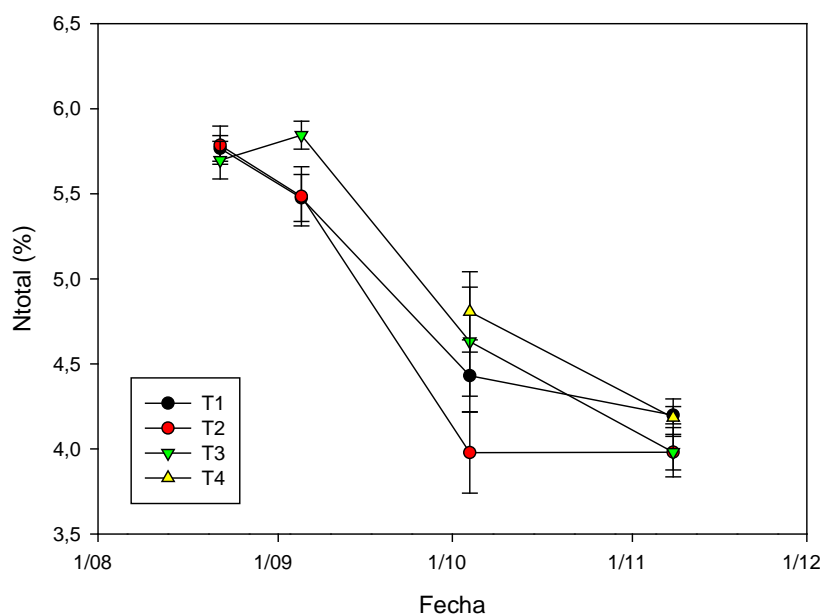
Concentración de nitrógeno en hojas

Figura 71. Evolución de la concentración de nitrógeno (%) en planta de coliflor var. Casper en función del Nmin disponible en el suelo. T1: 259 kgN/ha; T2: 359 kgN/ha; T3: 432 kgN/ha; T4: 524 kgN/ha.

En la figura 71 se representa la evolución del contenido en nitrógeno (%) en hojas a lo largo del cultivo. En el primer muestreo, a los veinte días desde el trasplante, las concentraciones de N en hoja están en el entorno del 6% y van

disminuyendo conforme aumenta la biomasa del cultivo. No se han encontrado diferencias significativas en las diferentes fechas aunque el tratamiento con 259 kgN/ha ha mostrado los valores más bajos al final del cultivo. En el cuarto muestreo, en la recolección, se han obtenido valores muy similares entre tratamientos, en torno al 4%.

Contenido de nitrógeno en el suelo

El contenido en Nmin al inicio del cultivo, hasta 0,6 m de profundidad, estuvo comprendido entre 259 y 424 kg/ha. El finalizar la recolección el Nmin ha disminuido en todos los tratamientos hasta valores comprendidos entre 14 y 36 kg/ha. El horizonte superficial hasta 0,15 m aparece casi agotado en todos los tratamientos (Figura 72).

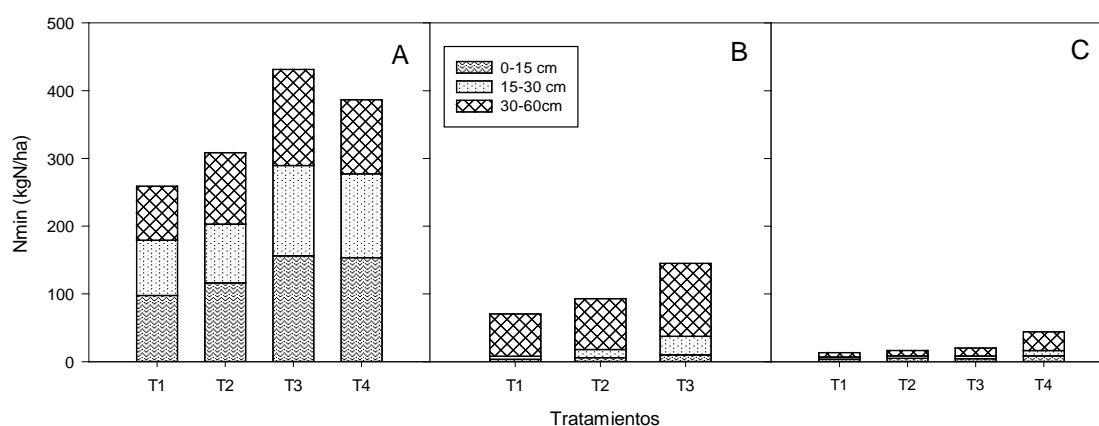


Figura 72. Nitrógeno mineral (Nmin) en el suelo, de 0 a 60 cm, en un cultivo de coliflor var. Casper, en el año 2012, (A) 23 de julio, en el momento del trasplante, (B) 3 de octubre, 26 días después del abonado de cobertera e inicio de la recolección y (C) 12 de noviembre, al finalizar la cosecha.

Contenido de N-Nitrato en savia

En el segundo muestreo, quince días antes del abonado de cobertera, la concentración de N-NO_3^- en savia oscilaba entre 5.000 y 6.000 ppm, sin diferencias significativas entre tratamientos. Esta concentración fue disminuyendo hasta la cosecha, siendo la concentración en el tratamiento de 259 kgN/ha inferior al resto, pero todos ellos han estado por encima de los niveles críticos indicados por Kubota *et al.* (1997) para cada fecha (Figura 73).

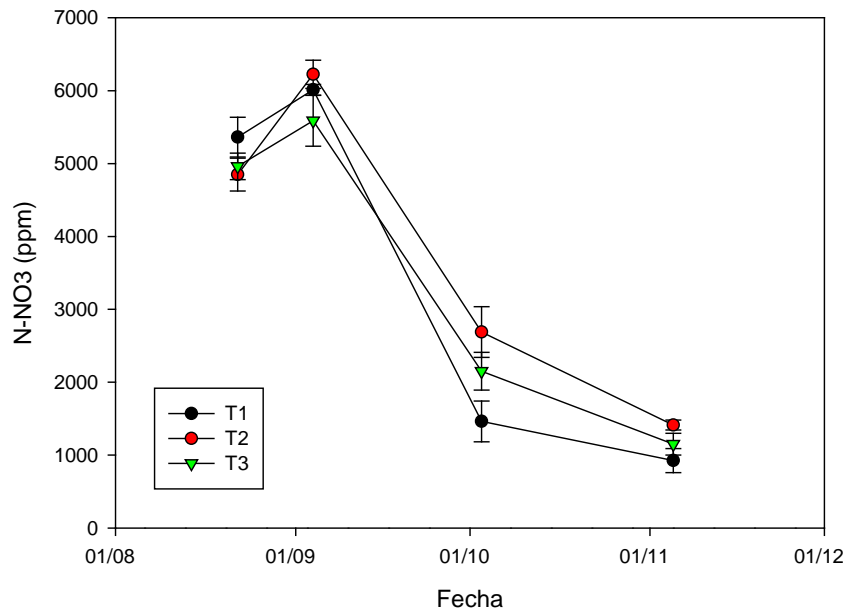


Figura 73. Concentración de N-NO_3^- (ppm) en savia, en hojas de coliflor var. Casper en los diferentes tratamientos en función del nitrógeno disponible en el suelo. T1: 259 kgN/ha; T2: 359 kgN/ha; T3: 432 kgN/ha. Las barras verticales indican el error estándar.

Balance de nitrógeno

Los resultados del balance de nitrógeno indican que el tratamiento T1, con menor Nmin disponible, ha sido el más eficiente con las menores pérdidas de N. En el resto de los tratamientos, podrían haber ocurrido pérdidas de nitrógeno por lixiviación de nitratos y/o volatilización del nitrógeno aplicado como fertilizante, habituales en suelos con pH mayor que siete, en los que se aplica nitrosulfato amónico (Tabla 37).

Tabla 37. Balance de nitrógeno (kg/ha) hasta 0,6 m de profundidad.

	Nmin ini ¹	Nfert ²	Nmin fin ³	Nhojas ⁴	Ninfl ⁵	Balance	EUN ⁶
	kgN/ha					kg/kgN	
T1	259±13 ^a	0	14±1 ^a	200±5	99±4	-54±19 ^a	134±11 ^c
T2	309±12 ^b	50	17±2 ^a	194±2	95±1	53±15 ^b	93±2 ^b
T3	432±13 ^c	0	20±3 ^a	199±9	93±3	120±11 ^c	81±3 ^a
T4	424±22 ^c	100	36±7 ^b	201±5	102±6	185±23 ^d	65±4 ^a
	***		**	ns	ns	***	***

1) N mineral inicial. 2) N aplicado como fertilizante. 3) N mineral final. 4) N extraído en cosecha en hojas. 5) N extraído en cosecha en pellas. 6) Eficiencia en el uso del N: kg de cosecha comercial por kg de N disponible (Nmin inicial + Nfertilizante). Significación: ** ($p \leq 0,01$); *** ($p \leq 0,001$); ns: no significativo. Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$) en una prueba de Duncan.

4.7. Año 2014. Var. Casper

Cobertura, Altura y Biomasa del cultivo

En la tabla 38 se muestran los resultados y sus diferencias significativas, por tratamientos, de altura, cobertura y biomasa del cultivo al inicio de la cosecha. La altura ha diferenciado significativamente el tratamiento no fertilizado del más fertilizado, T4. La cobertura no ha mostrado diferencias significativas entre tratamientos. La biomasa ha diferenciado el tratamiento más fertilizado del no fertilizado.

Tabla 38. Cobertura, altura y biomasa del cultivo, el 20/11/2014, al inicio de la cosecha.

Tratamientos	Altura (m)		Cobertura (%)		Biomasa (Mg/ha)	
T1	0,61 ± 0,02	a	81 ± 2	ns	8,75 ± 0,64	a
T2	0,64 ± 0,01	ab	81 ± 4	ns	9,46 ± 0,42	ab
T3	0,67 ± 0,02	bc	86 ± 1	ns	10,52 ± 0,66	ab
T4	0,71 ± 0,01	c	88 ± 1	ns	11,45 ± 0,60	b

Letras diferentes difieren significativamente en un test de Tukey ($p \leq 0.05$). ns: no existen diferencias significativas.

Producción total

La producción total media de coliflores, fue del orden de 30.000 kg/ha (Tabla 39). Hubo diferencias significativas entre tratamientos, en función del nitrógeno disponible, de modo que la producción en los tratamientos T3 y T4 ha sido significativamente superior a la de los tratamientos T1 y T2.

Tabla 39. Producción total, de hojas y de pellas (kg/ha) de la var. Casper y nitrógeno disponible en el ensayo de 2014.

Tratamientos	Ndisponible	Pellas	Hojas	Total
	kg/ha			
T1	104	26.107 a	55.535 a	81.642 a
T2	134	26.780 a	59.660 ab	86.440 ab
T3	190	30.524 b	64.130 ab	94.654 bc
T4	260	32.253 b	66.780 b	99.033 c
		**	***	*

*** Significación ($p \leq 0.001$); ** Significación ($p \leq 0.01$); * Significación ($p \leq 0.05$) en el análisis de la varianza. Letras diferentes difieren significativamente en un test de Tukey ($p \leq 0.05$).

El análisis de regresión no lineal de la producción total relativa de coliflores en función del nitrógeno disponible ($N_{disp} = N_{min} + N_{fertilizante}$), indica que la producción se estabiliza para valores de N_{disp} de 143 ± 7 kg N_{disp} /ha, valor del parámetro a en el modelo de regresión [ecuación 3] (Figura 74). Entendiendo que los tratamientos con estado deficitario nutricional serán aquellos que presenten un valor de nitrógeno

disponible inferior al valor en el que se estabiliza la producción. En este caso, los tratamientos T1 y T2 presentan valores de nitrógeno disponible inferiores al nivel en el cual la producción se estabiliza. Y los tratamientos T3 y T4 se sitúan por encima de estos niveles de nitrógeno disponible.

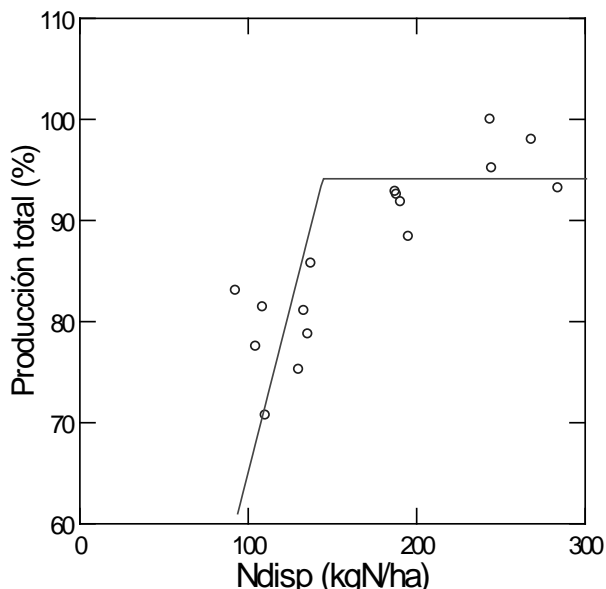


Figura 74. Producción total relativa de pellas de coliflor var. Casper 2014, en función del nitrógeno mineral disponible en el suelo ($N_{min} + N$ fertilizante).

Concentración de nitrógeno en hojas

En el primer muestreo, el día anterior a la fertilización de cobertera, el contenido de nitrógeno en las hojas de coliflor, se situaba entre el 5 y 5,5 % en todos los tratamientos. A partir del primer muestreo, las concentraciones de nitrógeno disminuyeron hasta la recolección, siendo mayor esta disminución en los tratamientos menos fertilizados T1 y T2, y observándose diferencias significativas entre los tratamientos. Los tratamientos T3 y T4 alcanzan valores del 3 % al finalizar el cultivo y los tratamientos T1 y T2 alcanzan valores del 2,5 % en ese momento (Figura 75). De acuerdo al modelo de Greenwood (1986), han sido los tratamientos T1 y T2 quienes han tenido concentraciones de nitrógeno por debajo de los valores de nitrógeno crítico (Figura 76).

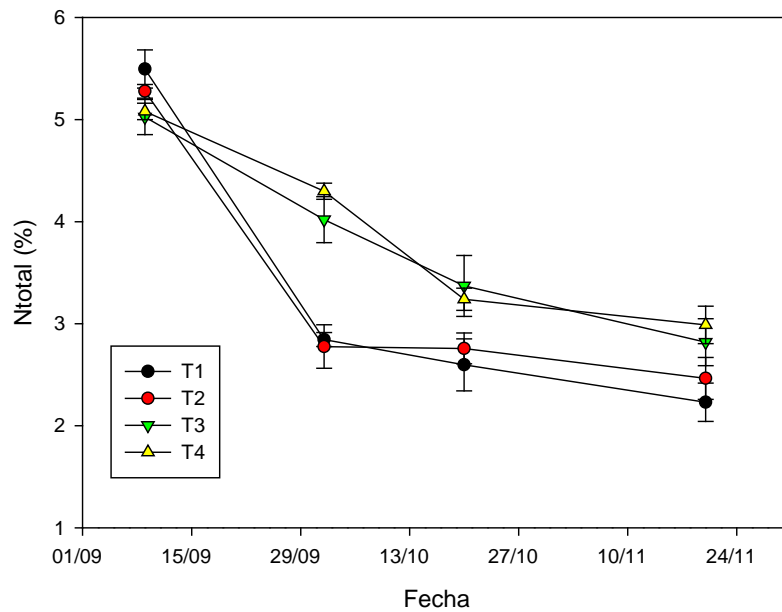


Figura 75. Concentración de nitrógeno total (%) de coliflor var. Casper a lo largo del cultivo en el año 2014. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 104; 134; 190 y 260 kg N disponible /ha.

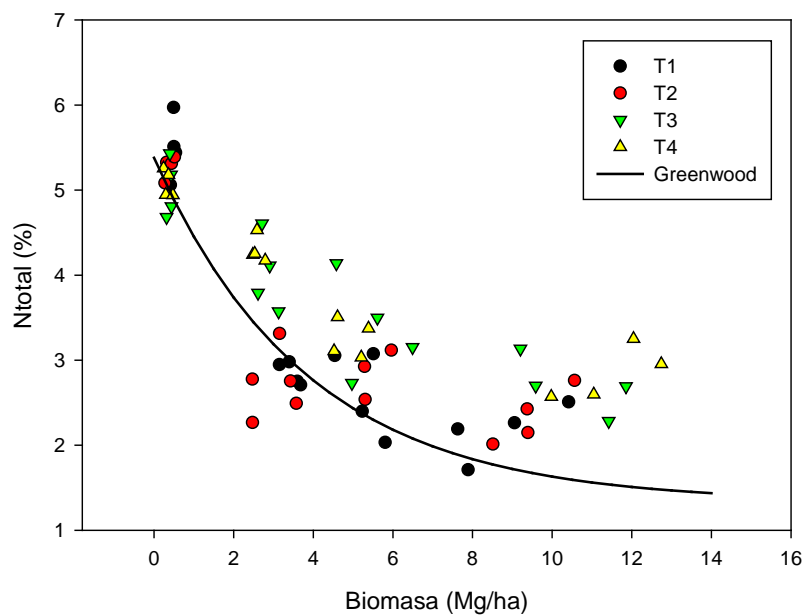


Figura 76. Concentración de nitrógeno total (%) de coliflor var. Casper en función de la biomasa (Mg/ha) en el año 2014. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 104; 134; 190 y 260 kg N disponible /ha. Se presenta la curva crítica del modelo de Greenwood 1986.

Contenido de nitrógeno en el suelo

El contenido de Nmin inicial (12 de agosto) en el perfil del suelo hasta 0,6 m de profundidad estuvo comprendido entre 100 y 150 kg/ha (Figura 77). Desde la fertilización de cobertera, el contenido de Nmin en el perfil disminuye hasta recolección. Al finalizar ésta, el Nmin ha disminuido quedando por debajo de 10

kgN/ha en todos los tratamientos. El horizonte superficial hasta 0,15 m aparece casi agotado.

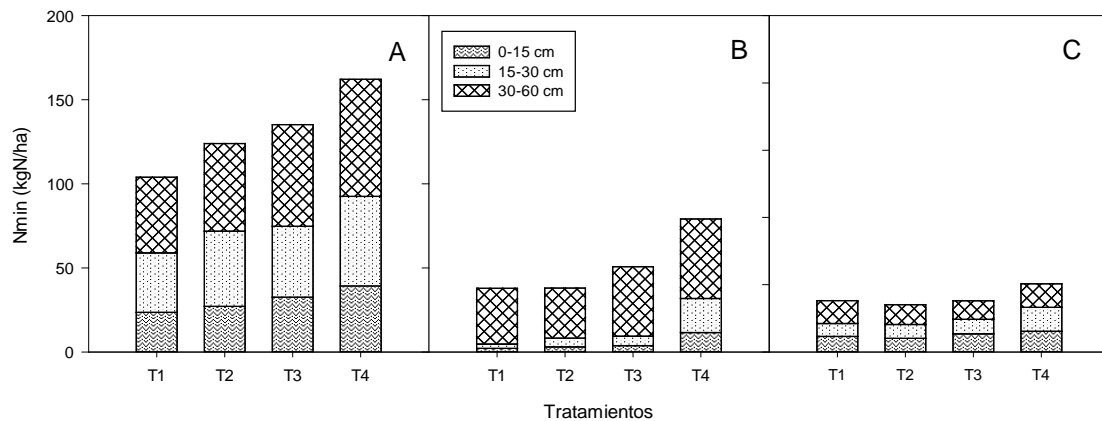


Figura 77. Nitrógeno mineral (Nmin) en el suelo, de 0 a 60 cm, en la var. Casper, en el año 2014, (A) 12 de agosto, en el momento del trasplante, (B) 29 de septiembre, después del abonado y (C) 1 de diciembre, al finalizar la cosecha.

Contenido de N-Nitrato en savia

En el primer muestreo, un día antes del abonado de cobertera, la concentración de N-NO_3^- en savia oscilaba entre 1.000 y 1.200 ppm (Figura 78), sin diferencias significativas entre tratamientos.

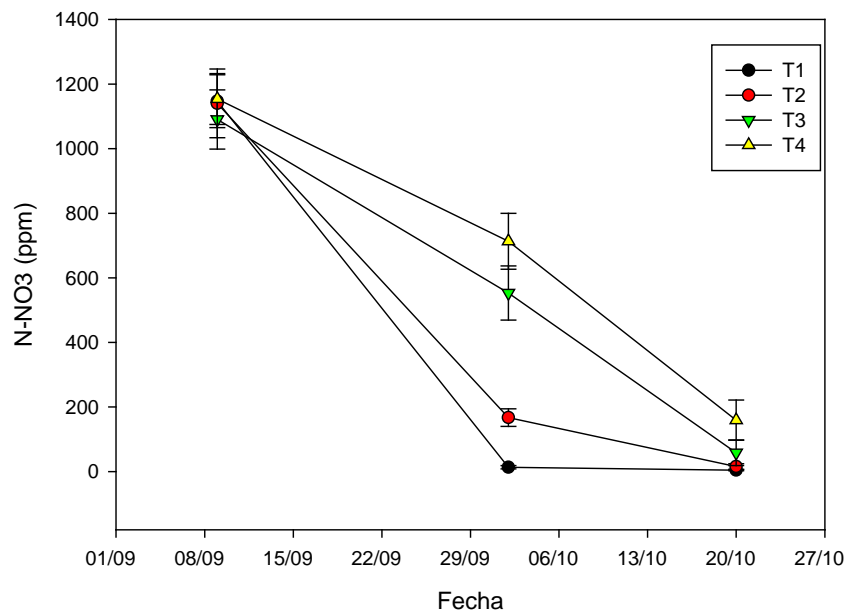


Figura 78. Concentración de N-NO_3^- (ppm) en savia, en hojas de coliflor var. Casper en los diferentes tratamientos. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 104; 134; 190 y 260 kg N disponible /ha. Las barras verticales indican el error estándar.

En el segundo muestreo, dieciocho días después del abonado de cobertera, esta concentración disminuyó hasta valores inferiores a 800 ppm, existiendo diferencias significativas entre los tratamientos más fertilizados, T3 y T4, y los menos fertilizados T1 y T2. En el tercer muestreo la concentración de nitrato siguió descendiendo hasta valores inferiores a 200 ppm al inicio de la recolección, diferenciándose significativamente el tratamiento más fertilizado, T4, del menos fertilizado, T1.

Sensor SPAD

En el primer muestreo de las medidas realizadas con el sensor SPAD, antes de la fertilización de cobertera, se han encontrado diferencias significativas. En la primera de las medidas, el tratamiento T1 mostró los mayores valores de SPAD, y por tanto no indicaba menores contenidos de clorofila que el resto de tratamientos fertilizados. En el tercer muestreo, en cosecha, los valores no se clasificaron en función del nitrógeno disponible en cada tratamiento (Figura 79). El tratamiento T3 en el tercer muestro ha mostrado valores próximos a los del tratamiento no fertilizado.

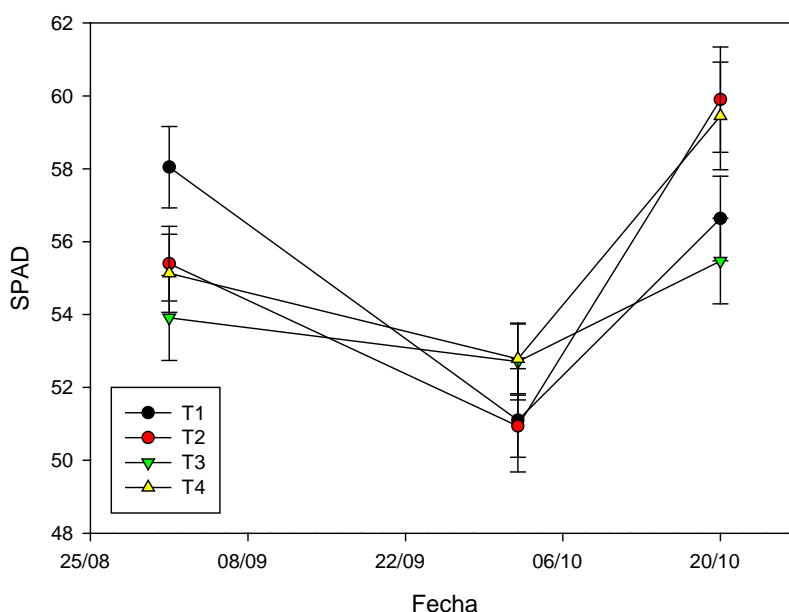


Figura 79. Contenido de clorofila en hojas de coliflor var. Casper, unidades SPAD, en los diferentes tratamientos. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 104; 134; 190 y 260 kg N disponible /ha. Las barras verticales indican el error estándar.

Sensor DUALEX

En el primer muestreo realizado con el sensor DUALEX, antes de la primera fertilización de cobertera no se han encontrado diferencias significativas para los índices Chl y NBI. En el segundo muestreo, para el índice Chl, el tratamiento T1 se ha

diferenciado significativamente del resto y para el índice NBI han sido los tratamientos T1 y T2 los que se han diferenciado del T3 y T4. En el tercer muestreo, en días previos a la cosecha, se han encontrado diferencias significativas entre los tratamientos, siendo el T4 más fertilizado quien mostró los mayores valores de estos índices y el T1, no fertilizado, los menores (Figuras 80 y 81).

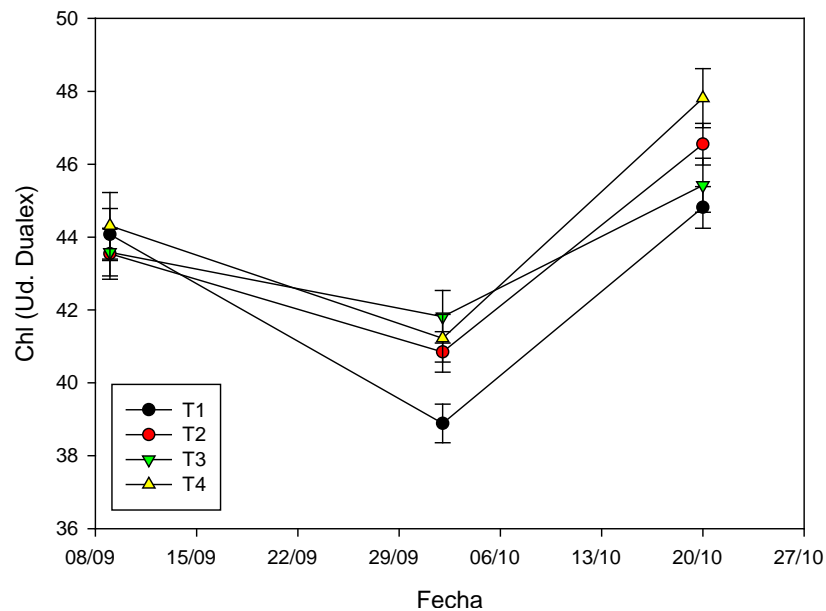


Figura 80. Índice Chl de Dualex en hojas de coliflor var. Casper, en los diferentes tratamientos de nitrógeno disponible. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 104; 134; 190 y 260 kg N disponible /ha. Las barras verticales indican el error estándar.

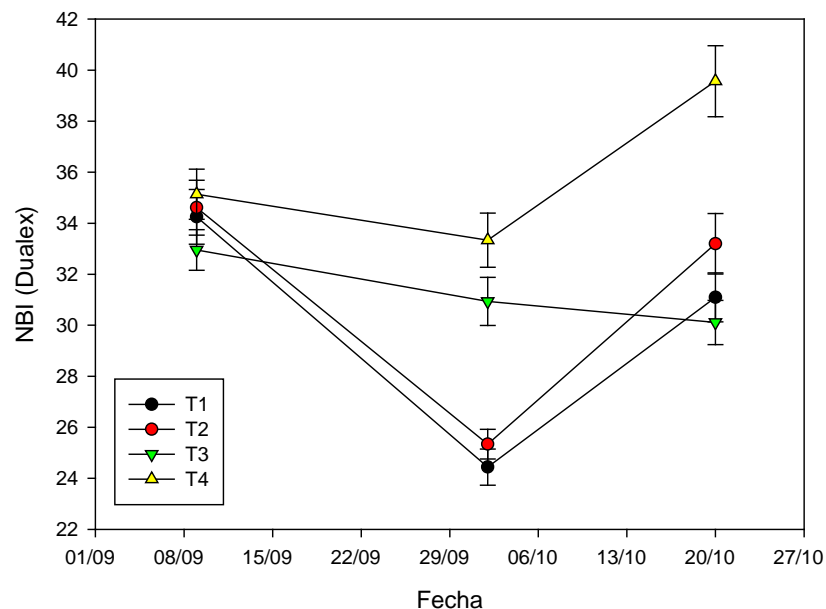


Figura 81. Índice NBI de Dualex en hojas de coliflor var. Casper, en los diferentes tratamientos de nitrógeno disponible. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 104; 134; 190 y 260 kg N disponible /ha. Las barras verticales indican el error estándar.

Sensor MULTIPLEX

La evolución de los índices SFR y NBI del sensor MULTIPLEX se muestra en las figuras 82 y 83. A partir del primer muestreo, después de la fertilización de cobertera, existen diferencias significativas para cada fecha con el índice NBI y con el índice SFR.

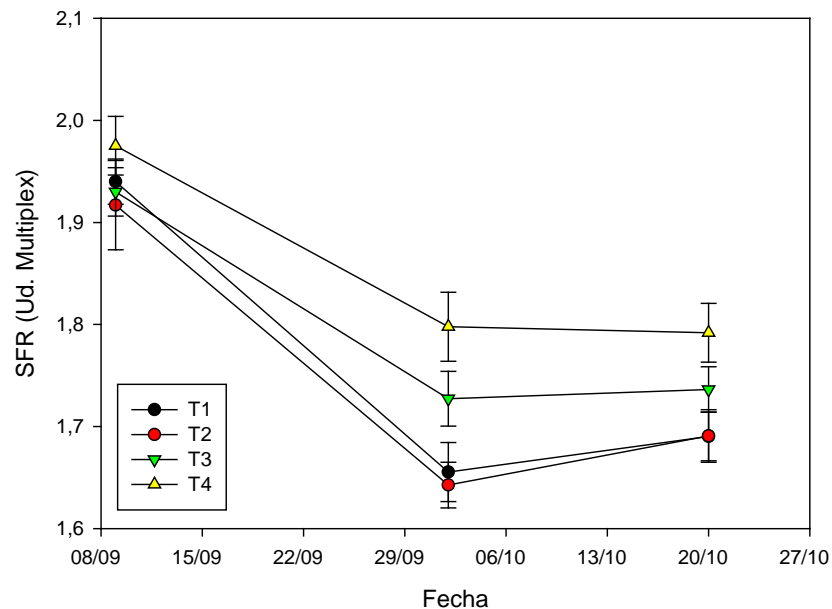


Figura 82. Índice SFR de Multiplex en hojas de coliflor var. Casper, en los diferentes tratamientos de nitrógeno disponible. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 104; 134; 190 y 260 kg N disponible /ha. Las barras verticales indican el error estándar.

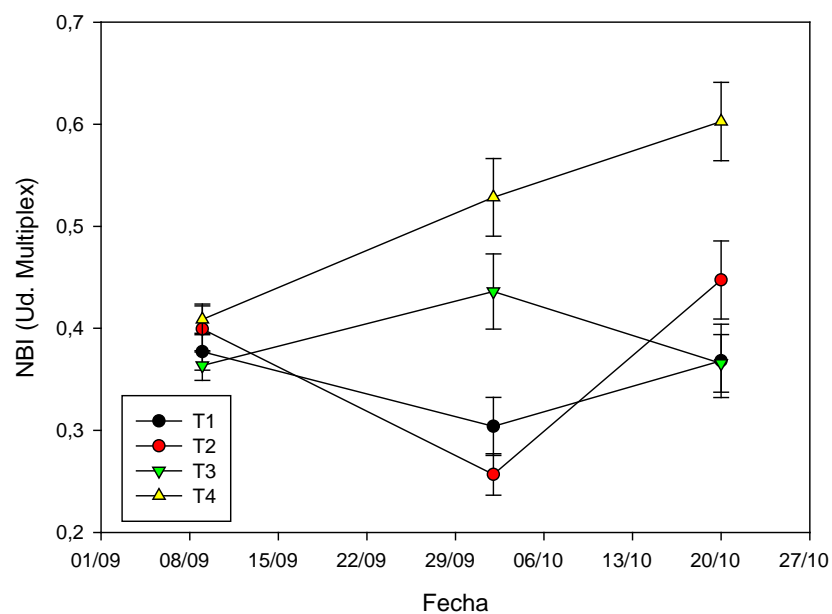


Figura 83. Índice NBI de Multiplex en hojas de coliflor var. Casper, en los diferentes tratamientos de nitrógeno disponible. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 104; 134; 190 y 260 kg N disponible /ha. Las barras verticales indican el error estándar.

La evolución de los valores de estos índices ha sido similar en todos los tratamientos, obteniéndose los menores valores en los tratamientos menos fertilizados T1 y T2. El tratamiento T3 en el tercer muestreo, para el índice NBI, ha mostrado una tendencia descendiente que difiere del resto de tratamientos, esto concide con lo observado con el sensor Dualex y SPAD.

Sensor CROP CIRCLE

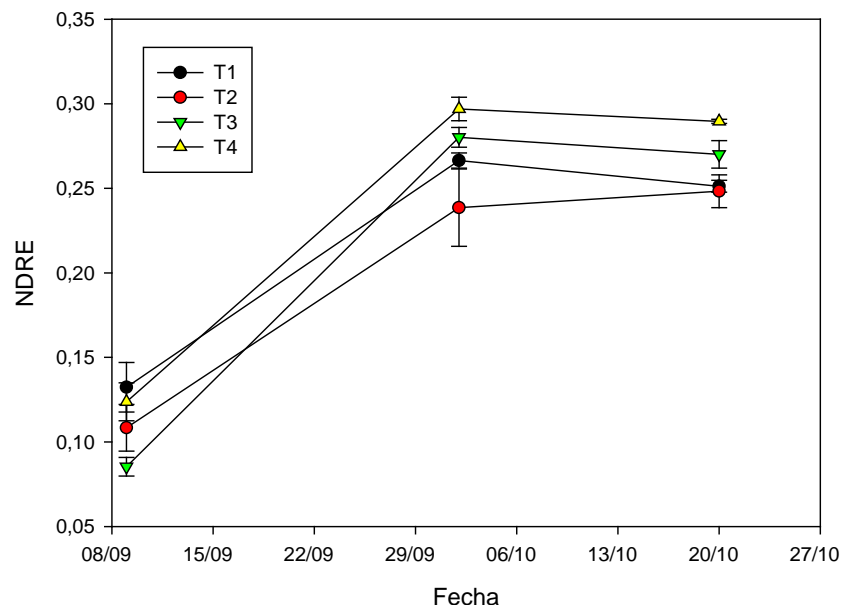


Figura 84. Índice NDRE de Crop Circle en hojas de coliflor var. Casper, en los diferentes tratamientos de nitrógeno disponible. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 104; 134; 190 y 260 kg N disponible /ha. Las barras verticales indican el error estándar.

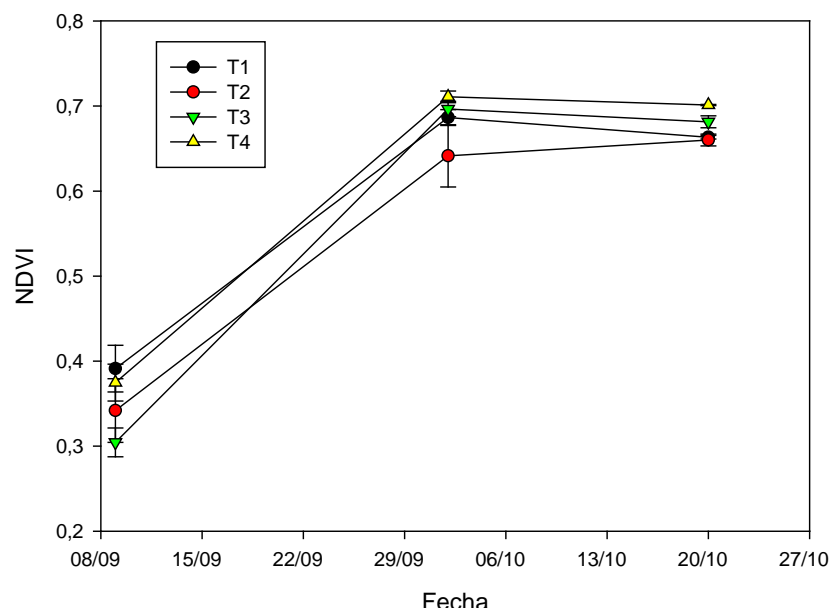


Figura 85. Índice NDVI de Crop Circle en hojas de coliflor var. Casper, en los diferentes tratamientos de nitrógeno disponible. T1, T2, T3 y T4 son los tratamientos, con 104; 134; 190 y 260 kg N disponible /ha. Las barras verticales indican el error estándar.

4. RESULTADOS

En los trayectos realizados con el sensor Crop Circle se han obtenido diferencias significativas para los índices NDRE y NDVI entre los tratamientos, para cada fecha de muestreo. Los mayores valores de estos índices se han obtenido para los tratamientos más fertilizados y los menores para los menos fertilizados (Figuras 84 y 85).

Balance de nitrógeno

Los resultados del balance de nitrógeno (Tabla 40) indican un balance negativo en todos los tratamientos, siendo superiores las salidas de nitrógeno del sistema a las entradas, lo que podría deberse a un aporte de nitrógeno a través de la mineralización de la materia orgánica, no medida en este ensayo. Las extracciones fueron significativamente superiores en el tratamiento más fertilizado, T4. En este ensayo no obtuvimos datos suficientes para estimar el lixiviado de nitrógeno y así poder contabilizarlo en el balance.

Tabla 40. Balance de nitrógeno (kg/ha) hasta 0,6 m de profundidad.

	Nmin ini ¹	Nfert ²	Nmin fin ³	Ncos ⁴	Balance	EUN ⁵
	kgN/ha					kg/kgN
T1	104±4a	0	8±1	202±27a	-106 ± 27	253±18a
T2	124±10b	10	7±0	208±20a	-81 ± 19	200±4b
T3	135±55b	55	8±1	261±22ab	-79 ± 23	161±3c
T4	162±98c	98	10±1	286±17b	-36 ± 13	125±6d
	***		ns	*	ns	***

1) N mineral inicial. 2) N aplicado como fertilizante. 3) N mineral al finalizar el cultivo. 4) N extraído en cosecha. 5) Eficiencia en el uso del N: kg de cosecha comercial por kg de N disponible. Significación: *** (p≤0,001); * (p≤0,05) ns: no significativo. Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas (p≤0,05) en una prueba de Tukey.

5. DISCUSIÓN

5. Discusión

5.1. Cosecha y umbral de fertilización

En el ensayo de la variedad Barcelona, en el año 2012, fueron necesarios 192 kg/ha de nitrógeno disponible para alcanzar la máxima cosecha potencial de pellas. El tratamiento T2 presentó niveles de producción similares a los más fertilizados (T3 y T4).

En el año 2013, en la variedad Barcelona, se requirieron 178 kg/ha de nitrógeno disponible para alcanzar una cosecha total de pellas cercana a 20 t/ha. En el año 2014, 179 kg/ha de nitrógeno disponible se necesitaron para alcanzar una cosecha total superior a 16 t/ha.

En la variedad Barcelona, en los tres ensayos, el valor medio de Ndisponible por encima del cual no se ha encontrado respuesta en la producción ha sido de 184 ± 20 kgN/ha. En la variedad Typical en el año 2013 esta cantidad fue de 189 ± 45 kgN/ha. En Casper en el año 2012, debido a los altos valores de nitrógeno mineral disponibles en el suelo, no se obtuvieron diferencias de producción y en el año 2014, para esta misma variedad, el valor encontrado fue 143 ± 7 kgN/ha, estos valores fueron sensiblemente inferiores al del resto de ensayos. Posiblemente, los mayores valores de cosecha en esta variedad se han visto afectados por la metodología empleada en la recolección, en la que no se consideró adecuadamente el destrío y por ser una coliflor destinada a industria y cuyo peso medio de pella es superior al de las variedades destinadas al consumo en fresco, como son Barcelona y Typical.

Los valores encontrados, con su intervalo de confianza, se aproximan al óptimo de fertilización nitrogenada para este cultivo, que según Everaarts *et al.* (1996), se encuentra en torno a 224 kg N/ha. Csizinszky (1996) obtuvo la máxima producción en coliflor verde con 294 kg N/ha de fertilizante. Rahn *et al.* (1998), determinaron el techo de producción para valores entre 240 y 300 kg N/ha de fertilizante. Rather *et al.* (2000) determinaron la dosis óptima en 250 kg N/ha, como suma de N mineral en el suelo (Nmin) en el momento del trasplante y el N aplicado como fertilizante; estos autores concluyeron que cuando el Nmin era superior a 210 kg N/ha en el horizonte de suelo entre 0 y 30 cm o superior a 270 kg N/ha en el perfil del suelo de 0 a 90 cm, no se encontró respuesta a la fertilización nitrogenada.

5.2. Nitrógeno en planta

En la variedad Barcelona, en el año 2012, la concentración de nitrógeno en las hojas de coliflor en el primer muestreo fue superior al 5% en todos los tratamientos.

Disminuyó en todos los tratamientos conforme se incrementaba la biomasa del cultivo, hasta alcanzar la cosecha, en la que se obtuvieron valores del 2,5 % para el T1, 3,5% para el T2 y valores superiores al 4% para los tratamientos T3 y T4. Para este ensayo, de acuerdo al modelo de Greenwood (1986), solamente el tratamiento T1 tuvo concentraciones de nitrógeno por debajo de los valores de nitrógeno crítico, justificando la menor producción obtenida para este tratamiento.

En el año 2013, para la variedad Barcelona, el contenido de nitrógeno en las hojas de coliflor se situó en torno al 4,5% en el primer muestreo en todos los tratamientos. Posteriormente mantuvo valores similares a los iniciales posiblemente debido a la disminución de biomasa ocurrida tras un evento de granizo. Al finalizar el cultivo el tratamiento T1 obtuvo un valor cercano al 2,5%, el T2 un 3,5% y los tratamientos T3 y T4 valores superiores al 4,5%. De acuerdo al modelo de Greenwood (1986), T1 ha tenido concentraciones de nitrógeno por debajo de los valores de nitrógeno crítico y ello justificaría los menores valores de producción obtenidos. El tratamiento T2, que también ha obtenido una producción menor, presenta valores de nitrógeno total por encima de la curva crítica, pero próximos a la zona de déficit que diferencia el modelo.

En el año 2014, en el ensayo de la variedad Barcelona, el contenido de nitrógeno en las hojas de coliflor en el primer muestreo, el día anterior a la fertilización de cobertera, se situaba en torno al 5 % en todos los tratamientos. Los tratamientos T3 y T4 alcanzan valores del 3,5% al finalizar el cultivo y los tratamientos T1 y T2 alcanzan valores del 2,5 % en ese momento. De acuerdo al modelo de Greenwood (1986), han sido los tratamientos T1 y T2 los que han tenido concentraciones de nitrógeno por debajo de los valores de nitrógeno crítico.

Para la variedad Typical, en el año 2013, el contenido de nitrógeno en las hojas de coliflor se ha mantenido en torno al 4,5% en los tratamientos T3 y T4. Posteriormente la concentración de nitrógeno disminuyó paulatinamente hasta el 3% en los tratamientos T3 y T4 y el 2% en los tratamientos T1 y T2, al inicio de la recolección. De acuerdo al modelo de Greenwood (1986), los tratamientos T1 y T2 han tenido concentraciones de nitrógeno por debajo de los valores de nitrógeno crítico.

En el año 2014, en la variedad Typical, en el primer muestreo el contenido de nitrógeno en las hojas de coliflor, se situaba entre el 4 y 4,5 % en todos los tratamientos. Los tratamientos T3 y T4 alcanzan valores del 3,5 % al finalizar el cultivo y los tratamientos T1 y T2 alcanzan valores del 2,5 % en ese momento. De acuerdo al

modelo de Greenwood (1986), han sido los tratamientos T1 y T2 quienes han tenido concentraciones de nitrógeno por debajo de los valores de nitrógeno crítico.

En la variedad Casper, en el año 2012, en el primer muestreo las concentraciones de N en hoja están en el entorno del 6% y van disminuyendo conforme aumenta la biomasa del cultivo. En el cuarto muestreo, en la recolección, se han obtenido valores muy similares entre tratamientos, en torno al 4%. En este ensayo, no se tomaron datos de biomasa y por ello no se representó la curva crítica de nitrógeno.

En el año 2014, para la variedad Casper, en el primer muestreo el contenido de nitrógeno en las hojas de coliflor, se situaba entre el 5 y 5,5 % en todos los tratamientos. Los tratamientos T3 y T4 alcanzan valores del 3 % al finalizar el cultivo y los tratamientos T1 y T2 alcanzan valores del 2,5 % en ese momento. De acuerdo al modelo de Greenwood (1986), han sido los tratamientos T1 y T2 quienes han tenido concentraciones de nitrógeno por debajo de los valores de nitrógeno crítico.

El contenido de nitrógeno en la coliflor fue estudiado por Rincón *et al.* (2001) en España, aplicando una fertilización nitrogenada de 325 kg N/ha, y obteniendo un porcentaje medio de nitrógeno a los 20 días desde el trasplante cercano al 6%, alcanzando valores en torno al 5% al finalizar el cultivo. En el experimento en coliflor de Rincón *et al.* (2001), la concentración de nitrógeno total va disminuyendo hasta finalizar el cultivo. Al igual que ocurre en otros ensayos realizados en coliflor por Kage *et al.* (2002) y en brócoli en los estudios de Magnifico *et al.* (1979) y Rincón *et al.* (1999), en los que la tendencia se repite.

La concentración de nitrógeno total en las hojas de coliflor ha mostrado un comportamiento similar en todos los ensayos. Situándose en los primeros muestreos por encima del 4% de concentración de nitrógeno total, obteniéndose mayores valores iniciales en la variedad Casper, y posteriormente, hasta alcanzar la cosecha, este valor va disminuyendo en todos los ensayos debido al efecto de dilución en hojas producido por el incremento de la biomasa del cultivo. Al finalizar el cultivo, los tratamientos con menor nitrógeno disponible presentan menores valores de concentración de nitrógeno total en hoja. A pesar de ser un método destructivo y laborioso, ha sido capaz de discriminar los tratamientos deficitarios a lo largo del ciclo de cultivo en los diferentes ensayos.

La relación existente entre la concentración de nitrógeno total y la biomasa del cultivo, ha sido estudiada por diversos autores como Greenwood (1986 y 1996) o Rahn *et al.* (2010a y 2010b) y expuesta en la introducción y en el apartado de material

y métodos de este trabajo. Esta relación ha sido capaz de discriminar a través de la curva crítica de nitrógeno los tratamientos considerados como deficitarios, que se encontraban con un nivel de nitrógeno disponible por debajo del valor por el cual no se obtuvo respuesta en la producción del cultivo.

Esta discriminación fue más sensible a partir de biomásas superiores a 1 Mg/ha, por debajo de la cual la concentración de nitrógeno crítico es independiente de la biomasa aérea según estudios citados por Justes *et al.* (1994).

5.3. Nitrógeno en el suelo

El análisis del nitrógeno mineral presente en los primeros 60 cm del suelo ha mostrado en todos los ensayos el horizonte superficial agotado al finalizar el cultivo. A pesar de no encontrar diferencias significativas debido a la variabilidad presente en el propio suelo, sí que ha agrupado e identificado los tratamientos en función del nitrógeno mineral disponible en el suelo a lo largo del cultivo.

Aunque se trata de un método de análisis laborioso, el análisis del nitrógeno mineral en el suelo ha permitido conocer la cantidad de nitrógeno mineral, nítrico y amoniacal disponible para el cultivo en los momentos en los que se han realizado los muestreos. Este análisis de suelo podría hacerse en distintos momentos a lo largo del cultivo: 1) al inicio del mismo en una determinada profundidad del suelo, caso por ejemplo del sistema denominado Nmin (Feller y Fink, 2002), y 2) determinar el abonado de cobertera en función del análisis de suelo de los primeros 30 cm y dependiendo de los valores obtenidos diagnosticar si es previsible que el abonado pueda aumentar la producción o no (Krusekopf *et al.*, 2002). Estos sistemas son de gran utilidad en el caso de los cultivos hortícolas porque es muy frecuente que los valores de Nmin residual en el suelo procedentes del cultivo anterior sean muy elevados (Ramos *et al.*, 2002; Vázquez *et al.*, 2006) y, por tanto, el abonado se pueda reducir mucho o incluso suprimirse.

Retrasar el análisis de suelo hasta momentos antes de la fertilización de cobertera, nos permitiría ajustar de forma más eficaz el abonado nitrogenado, ya que tendríamos en cuenta la posible mineralización de la materia orgánica del suelo desde el inicio del cultivo, así como las posibles pérdidas por lixiviación. Pudiendo así, ajustar la dosis de forma más precisa.

El principal inconveniente de estos sistemas es el coste del muestreo y análisis del suelo y la elevada variabilidad espacial del nitrato en el suelo (López-Granados *et al.*, 2002; Giebel *et al.*, 2006). Para disminuir el coste de los análisis se han

desarrollado métodos sencillos y económicos (Hartz, 1994; Sepúlveda *et al.*, 2003; Thompson *et al.*, 2009).

5.4. Mineralización

En el ensayo de la variedad Barcelona, en los años 2012 y 2013, la mineralización de la materia orgánica del suelo medida en campo alcanzó un valor medio de 41 kg N/ha para el período de cultivo en la capa superficial de suelo, extrapolado hasta 0,3 m de profundidad.

En el ensayo de 2014, para la misma variedad, la mineralización alcanzó un valor medio 57 kg N/ha para el período de cultivo, extrapolado a la capa superficial del suelo hasta 0,3 m.

En los sistemas basados en medidas de suelo, en modelos de simulación o en el balance de N, el aporte de N por la mineralización de la materia orgánica del suelo puede ser una parte importante del N disponible para los cultivos y, por tanto, su determinación es de interés. Fink y Scharpf (2000) y Tremblay *et al.* (2001) en trabajos utilizando plantas hortícolas estimaron una tasa de mineralización de 5 kg N/ha y semana lo que supone que en un cultivo de coliflor de 90 días se podría alcanzar una aportación de 60 kg N/ha, siendo estos valores próximos a los obtenidos en nuestros ensayos.

Las extracciones de nitrógeno para este cultivo, según diversos estudios, pueden variar entre 150 y 300 kg N/ha (Everaarts *et al.*, 1996), 170 y 250 kg N/ha (Everaarts, 2000) y 250 y 498 kg N/ha (Vázquez *et al.*, 2010). En nuestros ensayos, las extracciones medias (hojas y pellas) de la coliflor, en los tratamientos considerados no deficitarios, han sido de 246 kg N/ha. Teniendo en cuenta la mineralización media obtenida, 46 kg N/ha, el aporte de nitrógeno a través de la mineralización de la materia orgánica del suelo podría suponer cerca de un 20% de las extracciones de nitrógeno de la planta en nuestros ensayos.

5.5. Balances de nitrógeno

En los tratamientos deficitarios el nitrógeno disponible no ha sido suficiente para cubrir sus necesidades, presentando una menor extracción de nitrógeno por parte del cultivo.

La mineralización fue una fuente relativamente importante de nitrógeno, dependiendo de la fertilidad del suelo. La tasa de mineralización media en los ensayos de Valdegón alcanzó 41 kg N/ha en los años 2012 y 2013, y 57 kg N/ha en el año 2014, para el periodo de cultivo en la capa superior de 0,3 m.

Pueden ocurrir pérdidas significativas, que no han sido evaluadas, por volatilización del nitrógeno aplicado como fertilizante (parámetro no medido), habituales en suelos con pH básico en los que se aplica nitrosulfato amónico como fertilizante (Meisinger y Randall, 1991).

La lixiviación estimada en casi todos los ensayos no ha sido muy importante, quizás debido a una buena programación del riego. Sin embargo, en el ensayo de la variedad Typical, en el año 2013, se alcanzaron valores de lixiviación de 76 kg N/ha en algunos tratamientos, lo que puede deberse a la acumulación de precipitaciones en varios periodos (219 mm).

Las extracciones medias (hojas y pellas) de la coliflor en los ensayos realizados, en los tratamientos considerados no deficitarios (aquellos que se encontraban con valores de nitrógeno disponible en el suelo por encima del valor por el cual no obteníamos respuesta en la producción), han sido de 246 kg/ha. El nitrógeno disponible medio ($N_{\text{min}} + N_{\text{fertilizante}}$) ha sido de 190 kg/ha, y la mineralización media de 46 kg N/ha, muy próxima a los valores encontrados por Tremblay *et al.* (2001) en un cultivo de coliflor de 90 días.

Para cubrir las necesidades de 246 kg/ha y sin considerar la eficacia del fertilizante, ni las pérdidas de nitrógeno, se han aplicado ($N_{\text{disponible}} + \text{mineralización}$) 270 kg N/ha. Rather *et al.* (2000), determinaron la dosis óptima en 250 kg N/ha, como suma de N mineral en el suelo (N_{min}) en el momento del trasplante y el N aplicado como fertilizante.

El umbral medio de $N_{\text{disponible}}$ visto anteriormente para Barcelona y Typical se sitúa en torno a 186 kg N/ha, si le sumamos la mineralización media medida, 46 kg N/ha, hace un total de 232 kg N/ha, valor muy cercano a las necesidades medias de 246 kg/ha.

Se puede concluir en este apartado que los resultados del análisis del balance en los diferentes ensayos, confirman la utilidad del método N_{min} para el diseño de la fertilización nitrogenada de la coliflor, así como la importancia que puede adquirir el nitrógeno mineralizado en el balance y la necesidad de reducir las pérdidas por lixiviación a través de una correcta programación del riego. Las extracciones medias de las variedades de coliflor estudiadas, en los tratamientos considerados no deficitarios, se sitúan en 246 kg de nitrógeno por hectárea.

5.6. Sensor SPAD

Los resultados obtenidos con el sensor SPAD han sido muy variables y de baja repetibilidad. En general, no se han detectado diferencias entre tratamientos antes de

la fertilización de cobertera, es decir hasta treinta días aproximadamente desde el trasplante. Posteriormente, solo en una ocasión, SPAD fue capaz de detectar diferencias en un período comprendido en los veinte días desde la aplicación del fertilizante. SPAD fue capaz de detectar diferencias en las determinaciones más tardías, cercanas a la formación de las pellas.

El muestreo con SPAD es rápido, aunque por ser un método de medida por transmitancia (pinzamiento de hoja) se ve afectado por varios factores, vgr. hora del día, humedad superficial de la hoja, grosor o posición de la misma etc. que obligan a realizar un protocolo estricto para su determinación (Hoel y Solhaug, 1998; Martínez y Guimet, 2004). Algunos trabajos muestran que el medidor de clorofila solo es capaz de detectar deficiencias severas de nitrógeno (Villeneuve *et al.*, 2002), o precisa de una parcela bien fertilizada como referencia (Westcott y Wraith, 1995). Otros autores cuestionan su uso para evaluar de manera fiable la concentración de N en la planta (Himelrick *et al.*, 1993). Hartz *et al.*, (1993) en pimiento, Goffart *et al.*, (2006) en escarola y Gianquinto *et al.*, (2003) en patata recomiendan su uso, mientras que Villeneuve *et al.*, (2002) en brócoli ó Tremblay *et al.*, (2002) en judía verde lo desaconsejan para la recomendación de abonado.

5.7. Sensor DUALEX

Los valores iniciales de Chl de Dualex en la var. Barcelona estuvieron en torno a 44 unidades (Tabla 41). En la determinación final, los valores en los tratamientos más fertilizados (T3 y T4) habían mantenido el valor o se habían incrementado hasta un 9%, mientras que había disminuido un 2,3% en los tratamientos menos fertilizados (T1 y T2). El índice NBI partía de unos valores iniciales próximos a 4 unidades, que se incrementaron ligeramente (2%) al finalizar las medidas en los tratamientos más fertilizados y disminuyó radicalmente en los menos fertilizados (20,7% de media). Parece por tanto que, a lo largo del cultivo los índices Chl y NBI mantienen o incrementan ligeramente sus valores en los tratamientos fertilizados mientras que disminuyen en los no fertilizados, habiendo una gradación entre T1 y T4. Este descenso ha sido muy evidente con el índice NBI.

Tabla 41. Valores iniciales y finales medios de Dualex, de los tratamientos fertilizados (F) y no fertilizados (NF), en los ensayos de la variedad Barcelona en los años 2012, 2013 y 2014, con el porcentaje de variación ($\pm\Delta$).

	Chl inicial	Chl final	$\pm\Delta$	NBI inicial	NBI final	$\pm\Delta$
Dualex F	46,2	50,3	8,9%	35,0	35,7	2,0%
Dualex NF	43,5	42,5	-2,3%	33,0	26,2	-20,7%

En la variedad Typical (Tabla 42), los valores iniciales de Chl de Dualex se situaron cercanos a 48 unidades y se incrementaron ligeramente (3,5%) en los tratamientos fertilizados mientras que descendieron (-3,4%) en los no fertilizados. Sobre un valor inicial de 35 unidades, el NBI descendió tanto en los tratamientos fertilizados como en los no fertilizados pero en éstos últimos lo hizo en mayor proporción (-22,9%).

Tabla 42. Valores iniciales y finales medios de Dualex, de los tratamientos fertilizados (F) y no fertilizados (NF), en los ensayos de la variedad Typical en los años 2013 y 2014, con el porcentaje de variación ($\pm\Delta$).

	Chl inicial	Chl final	$\pm\Delta$	NBI inicial	NBI final	$\pm\Delta$
Dualex F	49,3	51,1	3,5%	36,4	34,9	-4,3%
Dualex NF	46,7	45,1	-3,4%	34,2	26,4	-22,9%

En las dos variedades el contenido en clorofila se mantiene o aumenta ligeramente en los tratamientos fertilizados y disminuye en los no fertilizados. El índice NBI se muestra más discriminante debido a la introducción del factor estrés proporcionado por el índice de flavonoides empleado en el cálculo. Esta tendencia del índice NBI coincide con lo observado en los ensayos de Padilla *et al.* (2014) en melón y Cerovic *et al.* (2015) en vid.

Los resultados obtenidos con el sensor DUALEX indican que, en general, ha sido más repetible y sensible que SPAD para detectar diferencias entre tratamientos antes de la fertilización de cobertera y en el período comprendido en los veinte días desde la aplicación del fertilizante, lo que podría ser útil para poder corregir las posibles deficiencias de fertilización nitrogenada dependiendo de la duración del ciclo del cultivo. El sensor DUALEX proporciona dos índices relativos al contenido en clorofila Chl y al balance de nitrógeno NBI. Aunque parece que el índice NBI es más discriminante que el índice Chl, el uso de ambos permite realizar un mejor diagnóstico del estado de la planta en relación con la fertilización nitrogenada. El muestreo con DUALEX es rápido, y también, al ser un método de medida por transmitancia (pinzamiento de hoja) se ve afectado por los mismos factores que SPAD.

5.7.1. Curva crítica NBI de Dualex

Después de analizar los resultados obtenidos en los ensayos con el sensor Dualex, en los que mostró sensibilidad para diferenciar significativamente los tratamientos deficitarios, se observó que existía una correlación lineal significativa entre los valores del índice NBI de Dualex y la concentración de nitrógeno total en la hoja durante el desarrollo del cultivo. Padilla *et al.* (2014) en melón y Cerovic *et al.* (2015) en vid, encontraron altas correlaciones entre el índice NBI y la concentración de nitrógeno en la hoja de la planta.

En la figura 86 se presentan los valores obtenidos para el índice NBI de Dualex y la concentración de nitrógeno total en hoja para la variedad Barcelona en los ensayos de 2012, 2013 y 2014.

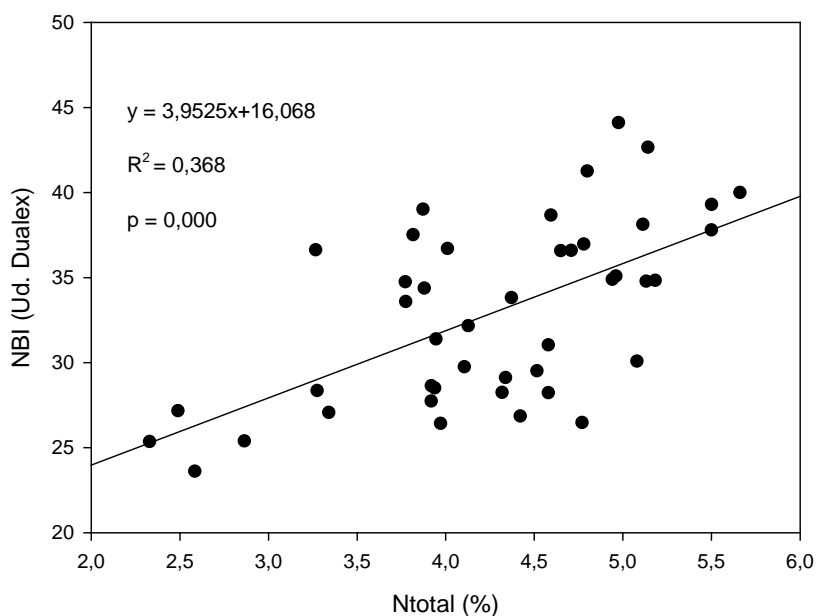


Figura 86. Relación entre el índice NBI de Dualex y la concentración de nitrógeno total en la hoja de coliflor de la variedad Barcelona durante los años 2012, 2013 y 2014. El valor p indica el grado de significación estadística.

En la figura 87 se presentan los valores para la variedad Typical durante los años 2013 y 2014.

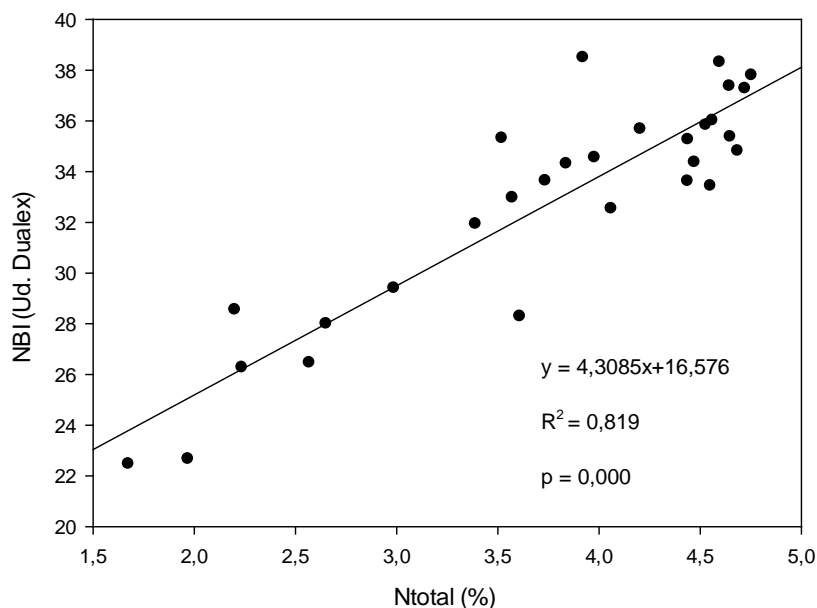


Figura 87. Relación entre el índice NBI de Dualex y la concentración de nitrógeno total en la hoja de coliflor de la variedad Typical durante los años 2013 y 2014. El valor p indica el grado de significación estadística.

Se realizó una comparación de los parámetros de regresión en ambas variedades y se comprobó que no existían diferencias significativas entre ellos. Por ello fue posible establecer una regresión común para ambas variedades y cuyo resultado se presenta en la figura 88.

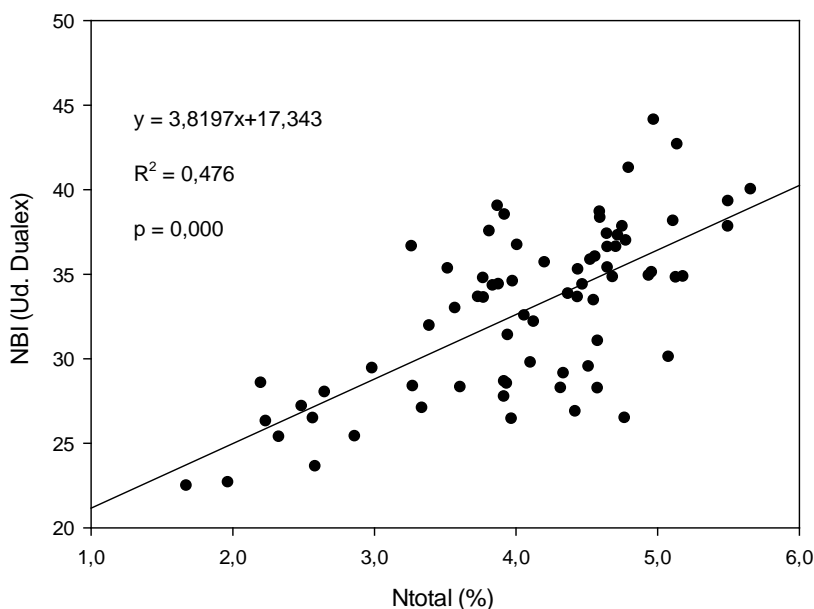


Figura 88. Relación entre el índice NBI de Dualex y la concentración de nitrógeno total en la hoja de coliflor de las variedades Barcelona y Typical. El valor p indica el grado de significación estadística.

Una vez comprobada la existencia de la relación lineal, muy significativa, entre ambos parámetros, y dado que la concentración de nitrógeno total está relacionada con la biomasa por medio de las funciones de nitrógeno crítico se ha ajustado una función del NBI y la biomasa del cultivo. Dicha función tiene una interpretación similar a la del modelo de nitrógeno crítico y pretende delimitar una región de NBI crítico.

Para la construcción de la curva crítica del índice NBI de Dualex, se utilizaron los resultados de biomasa y los del índice NBI de Dualex. Se siguió la metodología indicada por Olasolo (2013) para ajustar la curva crítica de nitrógeno en judía y para ello se eligieron, de entre los tratamientos significativamente más productivos, los que presentaron menores valores. Con estos datos se ajustó un modelo no lineal, derivado de Greenwood (1986), y de ecuación:

$$y = a * (1 + e^{-b*x}) \quad [8]$$

siendo “y” el valor del índice NBI (ud. Dualex) y “x” la biomasa del cultivo (Mg/ha). Se ajustó un modelo para la variedad de ciclo más corto, Barcelona, y otro modelo para la variedad Typical de ciclo medio. Los dos modelos presentaban parámetros y regresiones altamente significativas. Se comprobó que no existían diferencias significativas entre los parámetros de ambos modelos, y se ajustó un modelo común para las dos variedades. La función ajustada ha resultado:

$$y = 19,815 (1 + e^{-0,23 x}) \quad [9]$$

siendo la regresión y los parámetros altamente significativos (Tabla 43)

Tabla 43. Suma de cuadrados (SC), grados de libertad (gdl), cuadrados medios (CM) y valor del estadístico F. Valor de los parámetros “a” y “b” de la función [8], error estándar (SE) y valor del estadístico t ($t_{observada}$). Significación: *** = $p \leq 0.001$.

Fuente	SC	gdl	CM	F	Parámetro		SE	$t_{observada}$
Regresión	19.036,60	2	9.518,30	2060,8***				
Error	73,89	16	4,61871		a =	19,815	0,598	33,11***
Total	19.110,50	18			b =	0,23	0,041	5,56***
R^2 corregida	0,8008							

En la figura 89 se representa el modelo común obtenido para las dos variedades, así como los límites superior e inferior del intervalo de confianza (95%) del mismo. Para biomazas mayores de 1 Mg/ha la curva crítica identifica correctamente el 92% de los tratamientos más productivos, no deficitarios en nitrógeno y el 79% de los tratamientos deficitarios. Por ello, esta curva crítica determinaría los valores umbral por

debajo de los cuales el cultivo de coliflor se encontraría en un estado de déficit nutricional de nitrógeno.

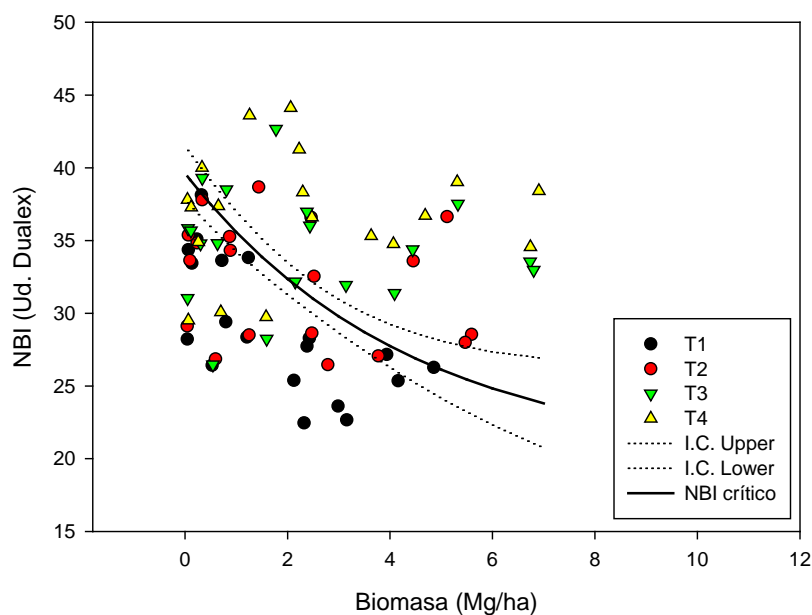


Figura 89. Índice NBI de Dualox y biomasa (Mg/ha) de las var. Barcelona y Typical en los ensayos de 2012, 2013 y 2014. Curva crítica ajustada de NBI en función de la biomasa del cultivo (NBI crítico) e intervalo de confianza al 95% (I.C. Upper e I.C. Lower).

Teniendo en cuenta los valores de la curva crítica obtenidos, el intervalo de confianza del modelo y la biomasa del cultivo, podemos proponer unos valores de suficiencia mínimos (Tabla 44):

Tabla 44. Valores de suficiencia mínimos para el índice NBI de Dualox en función de la biomasa, en tres estados fenológicos del cultivo.

	50% Suelo cubierto	Botón floral 1 mm	Previo a cosecha
Biomasa (Mg/ha)	1	2	4
NBI (Ud. Dualox)	34-36	31-33	27-29

A continuación se representan, en función de la biomasa del cultivo, los valores de NBI de cada ensayo de las variedades Barcelona y Typical respecto a la curva crítica elaborada (Figuras 90, 91, 92, 93 y 94).

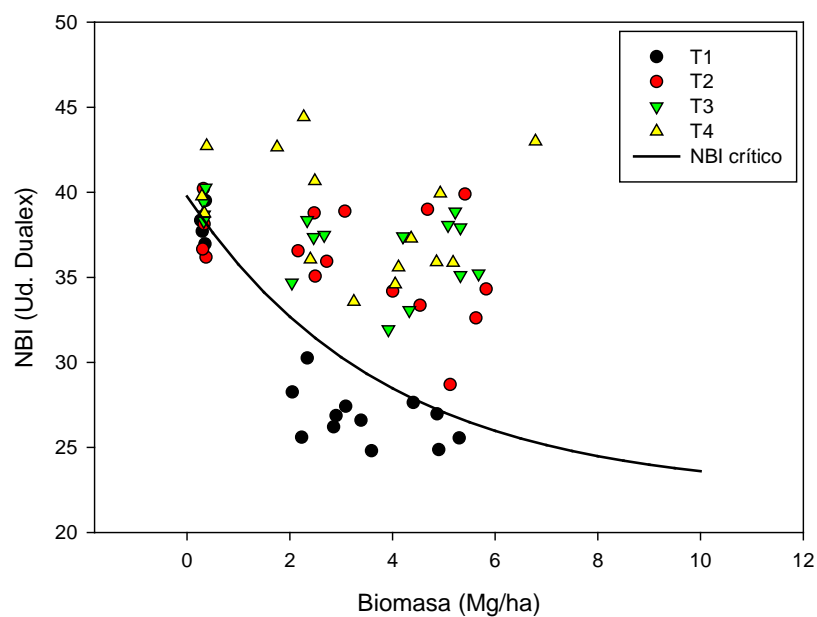


Figura 90. Curva crítica e índice NBI de Dualex en función de la biomasa del cultivo para el ensayo de la variedad Barcelona en el año 2012.

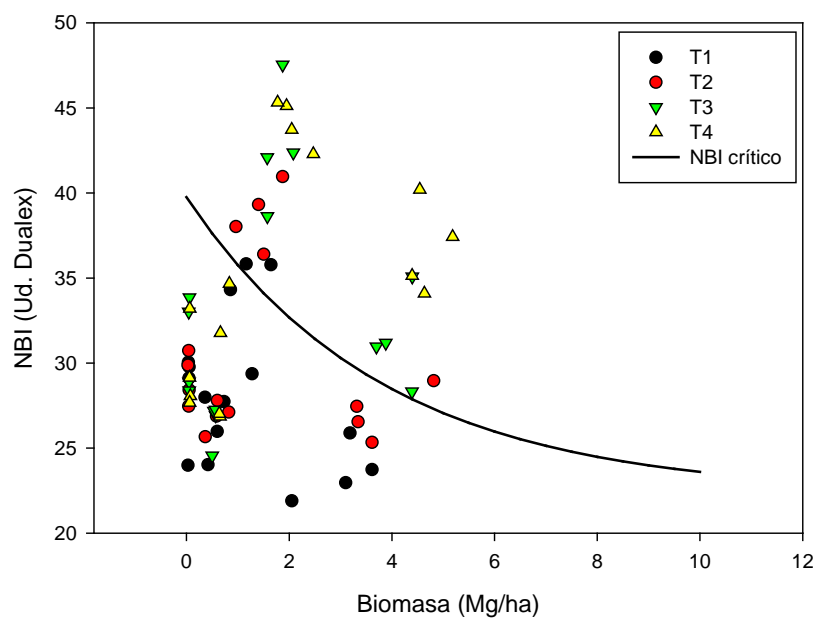


Figura 91. Curva crítica e índice NBI de Dualex en función de la biomasa del cultivo para el ensayo de la variedad Barcelona en el año 2013.

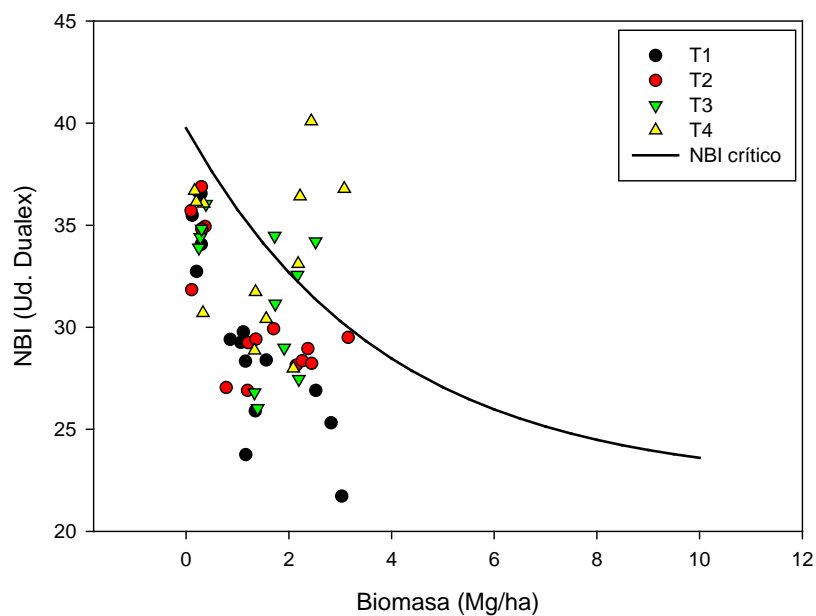


Figura 92. Curva crítica e índice NBI de Dualox en función de la biomasa del cultivo para el ensayo de la variedad Barcelona en el año 2014.

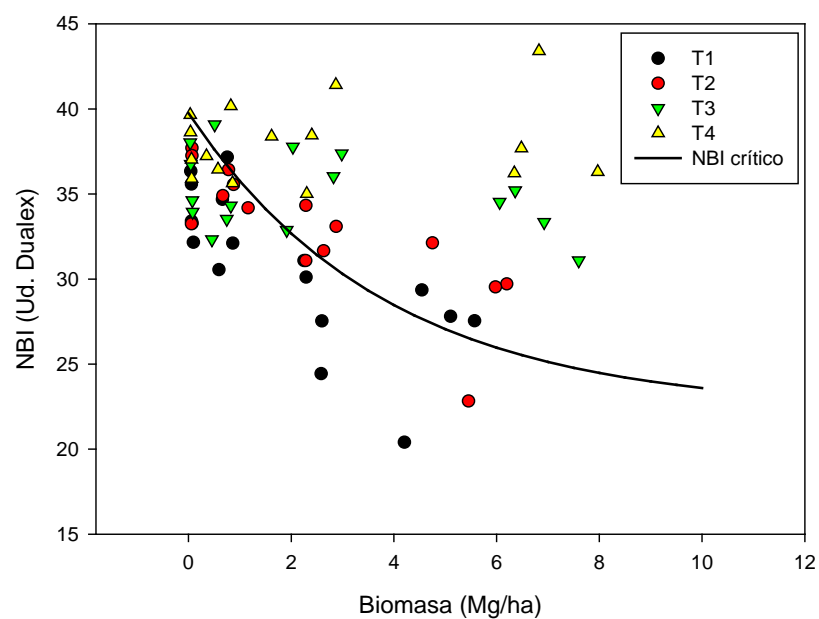


Figura 93. Curva crítica e índice NBI de Dualox en función de la biomasa del cultivo para el ensayo de la variedad Typical en el año 2013.

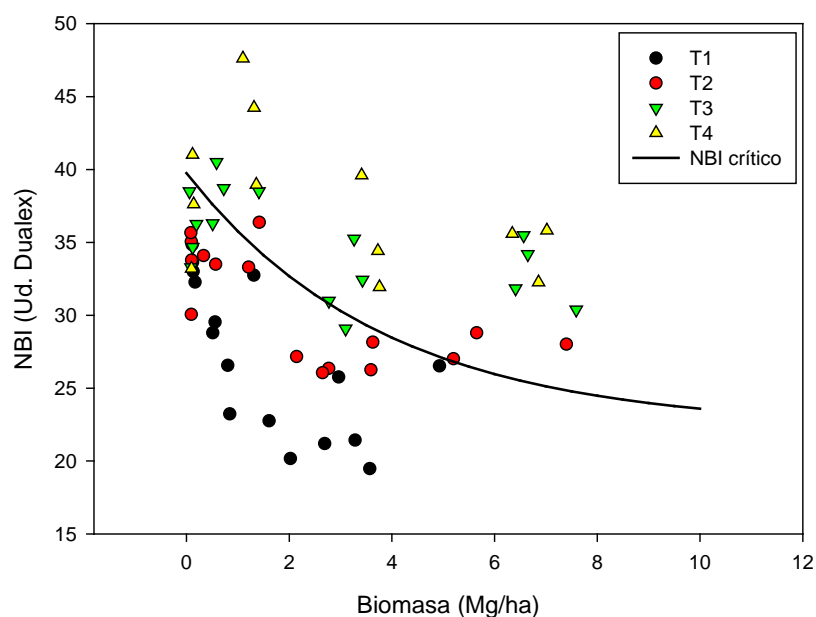


Figura 94. Curva crítica e índice NBI de Duallex en función de la biomasa del cultivo para el ensayo de la variedad Typical en el año 2014.

En cada ensayo realizado se ha empleado la metodología empleada en vid, por Cerovic *et al.*, (2015), en la que valora el modelo en función de los parámetros de sensibilidad, especificidad, índice de Youden e índice de precisión. La sensibilidad del modelo se define como el porcentaje de tratamientos con mayores valores de NBI y mayores valores de producción, identificados correctamente. La especificidad hace referencia al porcentaje de tratamientos con menores valores de NBI y menores valores de producción identificados correctamente. Por otro lado, los índices de Youden (Youden, 1950) y de precisión (Cerovic *et al.*, 2015) relacionan la sensibilidad y la especificidad del modelo para clasificarlo en función de la aptitud del ajuste realizado. Para valores de los índices cercanos a 1 el ajuste será más robusto, y al contrario para valores próximos a 0. En la tabla 45 se presentan los valores de sensibilidad, especificidad, índice de Youden e índice de precisión para todos los ensayos realizados.

Tabla 45. Curva crítica NBI de Duallex. Valor de los índices de sensibilidad, de especificidad, de Youden y de precisión en los ensayos realizados durante 2012, 2013 y 2014 con las var. Barcelona y Typical.

	Var. Barcelona			Var. Typical	
Índices	2012	2013	2014	2013	2014
Sensibilidad	1,00	1,00	0,44	1,00	1,00
Especificidad	0,92	0,69	0,95	0,44	0,74
Índice de Youden	0,92	0,69	0,39	0,44	0,74
Índice de Precisión	0,98	0,84	0,72	0,72	0,86

La especificidad del modelo, que clasifica los tratamientos con menores producciones y menores valores de NBI, nos permite valorar la aptitud del modelo para poder identificar los tratamientos deficitarios que podrían ser susceptibles de ser corregidos mediante fertilización. Por eso, de todos los valores de la tabla, de cara a la posible detección de deficiencias nos centraremos, principalmente, en la especificidad del modelo.

En la tabla 45 se observa que para la variedad Barcelona en los años 2012 y 2014 se obtuvieron valores de especificidad muy altos, 0,92 y 0,95. Sin embargo, para el año 2013 en esta variedad el valor de especificidad fue sensiblemente menor, lo que puede ser debido al efecto que produjo el granizo sobre las plantas, provocando una defoliación moderada y alterando el ciclo vegetativo de las coliflores.

En la variedad Typical el comportamiento es similar al de la variedad Barcelona, mostrando valores de especificidad muy altos en el año 2014. En el año 2013, posiblemente debido al granizo, los valores descendieron sensiblemente.

Los índices de Youden y de precisión del modelo presentan valores altos para los ajustes realizados en cada ensayo. Únicamente en el año 2014 en la variedad Barcelona y en año 2013 en la variedad Typical se obtuvieron valores para el índice de Youden sensiblemente inferiores respecto al resto de ensayos. Esto se debe a que en el año 2014, para la variedad Barcelona, la sensibilidad del modelo obtuvo valores más bajos que el resto de ensayos, y en año 2013, para la variedad Typical, la especificidad fue sensiblemente inferior que en el resto de experimentos, posiblemente debido al efecto del granizo.

El índice de precisión ha mostrado valores muy altos para el modelo en todos los ensayos realizados.

5.8. Sensor MULTIPLEX

Los resultados obtenidos con el sensor MULTIPLEX han sido similares a los obtenidos con el sensor DUALEX para detectar diferencias entre tratamientos antes de la fertilización de cobertera y en el período comprendido en los veinte días desde la aplicación del fertilizante, lo que podría ser útil para poder corregir las posibles deficiencias de fertilización nitrogenada dependiendo de la duración del ciclo del cultivo. El sensor MULTIPLEX, basado en relaciones de fluorescencia, proporciona dos índices relativos al contenido en clorofila SFR y al balance de nitrógeno NBI. Al igual que DUALEX, el índice NBI parece más discriminante que el índice SFR, pero el uso de ambos permite realizar un mejor diagnóstico del estado de la planta en relación con la fertilización nitrogenada.

El muestreo con MULTIPLEX es rápido al ser un método de medida de fluorescencia y aunque en estos ensayos se ha utilizado un detector manual, es posible su instalación en un vehículo permitiendo realizar recorridos.

En la variedad Barcelona (Tabla 46) Los resultados son similares a los observados en el caso de Dualex. El índice SFR inicial ha estado en torno a 5 unidades y se ha mantenido en los tratamientos fertilizados mientras que ha disminuido del orden del 5% en los no fertilizados. El índice NBI partía de unos valores próximos a 1,6 unidades y ha mantenido este valor a lo largo del cultivo en los tratamientos fertilizados mientras que ha disminuido hasta un 33% de media en los no fertilizados. Al igual que con Dualex ha habido una gradación entre T1 y T4 y también el índice NBI ha sido más discriminante.

Tabla 46. Valores iniciales y finales medios de Multiplex, de los tratamientos fertilizados (F) y no fertilizados (NF), en los ensayos de la variedad Barcelona en los años 2012, 2013 y 2014, con el porcentaje de variación ($\pm\Delta$).

	SFR inicial	SFR final	$\pm\Delta$	NBI inicial	NBI final	$\pm\Delta$
Multiplex F	5	5	=	1.6	1.6	=
Multiplex NF	4.8	4,5	-4.8%	1.4	1.0	-32.8%

El valor SFR de Multiplex para la variedad Typical (Tabla 47), permaneció estable en los tratamientos fertilizados y disminuyó un 16,4% en los no fertilizados. El índice NBI de este sensor se incrementó hasta un 16,6% en los tratamientos fertilizados y disminuyó fuertemente en los no fertilizados hasta un 40,8%.

Tabla 47. Valores iniciales y finales medios de Multiplex, de los tratamientos fertilizados (F) y no fertilizados (NF), en los ensayos de la variedad Typical 2013 y 2014, con el porcentaje de variación ($\pm\Delta$).

	SFR inicial	SFR final	$\pm\Delta$	NBI inicial	NBI final	$\pm\Delta$
Multiplex F	4.7	4.7	=	1.4	1.7	16.6%
Multiplex NF	5.0	4.2	-16.4%	1.3	0.8	-40.8%

Al igual que en Dualex, en las dos variedades el contenido en clorofila se mantiene o aumenta ligeramente en los tratamientos fertilizados y disminuye en los no fertilizados. El índice NBI se muestra más discriminante debido a la introducción del factor estrés proporcionado por el índice de flavonoides empleado en el cálculo. Esta

tendencia del índice NBI coincide con lo observado en el ensayo de Galambošová *et al.* (2014) en trigo.

5.8.1. Curva crítica Multiplex

Al igual que con Dualex, después de analizar los resultados obtenidos en los ensayos con el sensor Multiplex, en los que también mostró sensibilidad para diferenciar significativamente los tratamientos deficitarios, se observó que existía una correlación lineal significativa entre los valores del índice NBI de Multiplex y la concentración de nitrógeno total en la hoja a lo largo del desarrollo del cultivo en las diferentes fechas de medición. Galambošová *et al.* (2014), encontraron en trigo altas correlaciones lineales entre el índice NBI de Multiplex y la concentración de nitrógeno en la hoja de la planta.

En la figura 95 se comparan los valores obtenidos para el índice NBI de Multiplex y la concentración de nitrógeno total en hoja para la variedad Barcelona durante los años 2012, 2013 y 2014. En la figura 96 se comparan los valores para la variedad Typical durante los años 2013 y 2014.

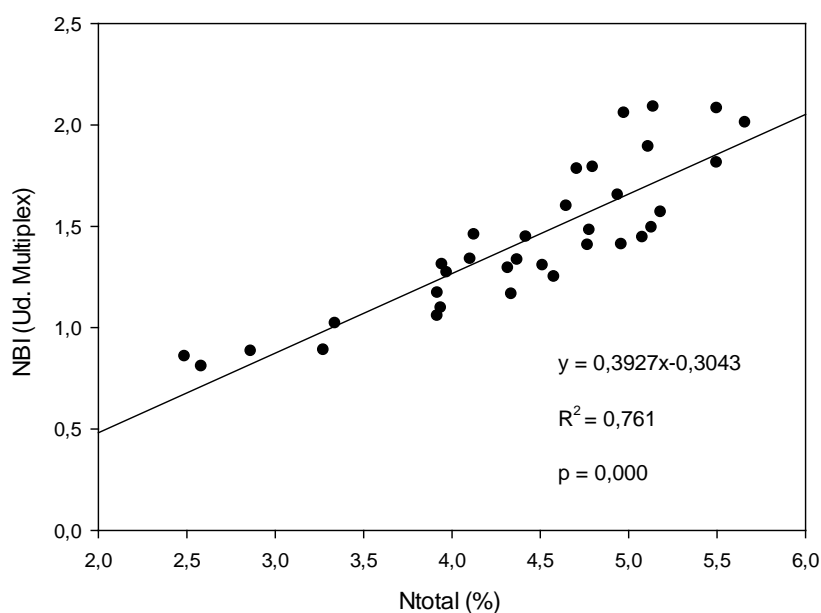


Figura 95. Relación entre el índice NBI de Multiplex y la concentración de nitrógeno total en la hoja de coliflor de la variedad Barcelona durante los años 2012, 2013 y 2014. El valor p indica el grado de significación estadística.

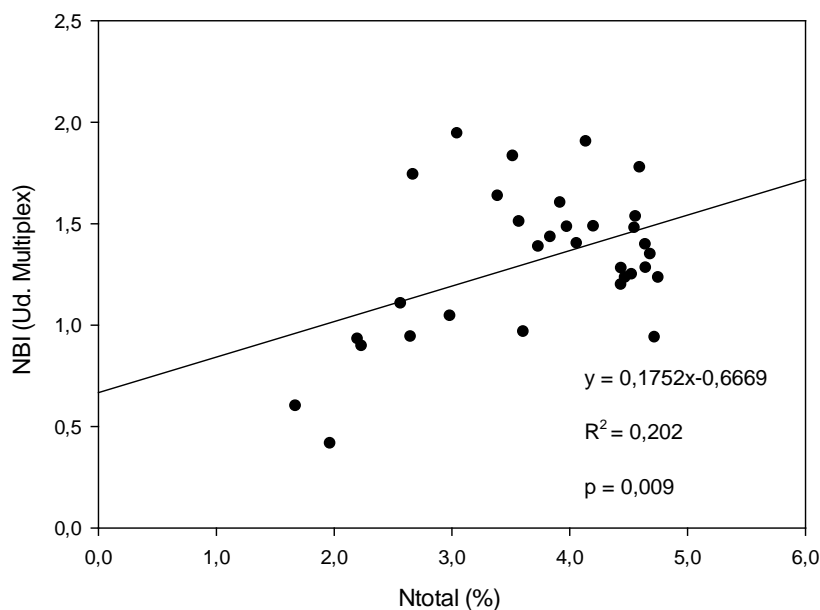


Figura 96. Relación entre el índice NBI de Multiplex y la concentración de nitrógeno total en la hoja de coliflor de la variedad Typical durante los años 2013 y 2014. El valor p indica el grado de significación estadística.

Se realizó una comparación de los parámetros de regresión en ambas variedades y se comprobó que no existían diferencias significativas entre ellos. Por ello fue posible establecer una regresión común para ambas variedades y cuyo resultado se presenta en la figura 97:

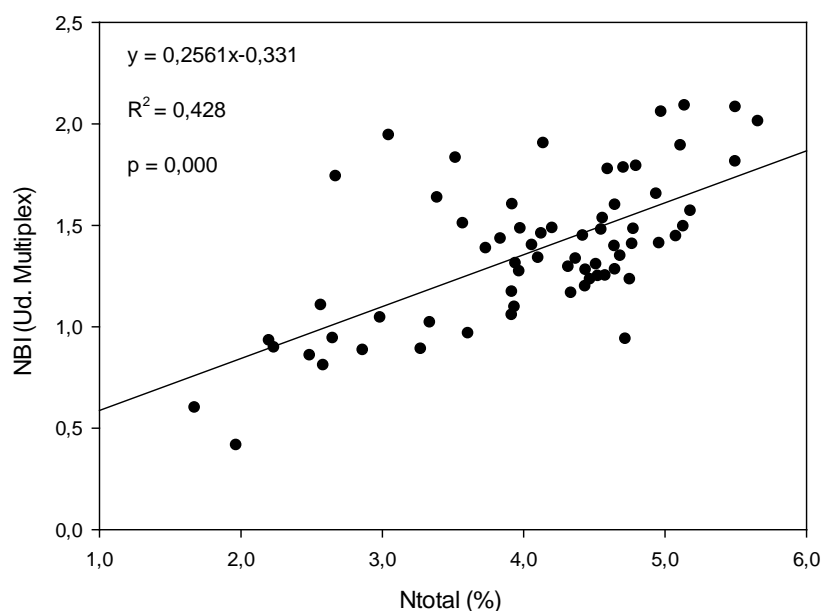


Figura 97. Relación entre el índice NBI de Multiplex y la concentración de nitrógeno total en la hoja de coliflor de las variedades Barcelona y Typical. El valor p indica el grado de significación estadística.

Una vez comprobada la existencia de la relación lineal, muy significativa, entre ambos parámetros, se ha ajustado una función de NBI en función de la biomasa del cultivo, siguiendo la misma metodología empleada con el sensor Duallex descrita en el apartado anterior. La función obtenida es:

$$y = 0,973 (1 + e^{-0,467 x}) \quad [10]$$

donde “y” es el valor crítico del índice NBI, “x” es la biomasa del cultivo.

siendo la regresión y los parámetros altamente significativos (Tabla 48)

Tabla 48. Suma de cuadrados (SC), grados de libertad (gdl), cuadrados medios (CM) y valor del estadístico F. Valor de los parámetros “a” y “b” de la función [10], error estándar (SE) y valor del estadístico t ($t_{\text{observada}}$). Significación: *** = $p \leq 0.001$.

Fuente	SC	gdl	CM	F	Parámetro		SE	$t_{\text{observada}}$
Regresión	38,164	2	19,082	596,3***				
Error	0,55	17	0,032		a =	0,973	0,072	13,492***
Total	38,713	19			b =	0,467	0,178	2,618*
R^2 corregida	0,747							

En la figura 98 se representa el modelo común obtenido para las dos variedades, así como los límites superior e inferior del intervalo de confianza (95%) del mismo.

Del mismo modo que ocurre en Duallex, a partir de una biomasa aproximada de 1 Mg/ha la curva crítica identifica el 92% de los tratamientos deficitarios (Figura 98). Por ello, a partir de un determinado valor de biomasa del cultivo, esta curva crítica podría determinar los valores umbral por debajo de los cuales el cultivo de coliflor se encontraría en un estado de déficit nutricional de nitrógeno.

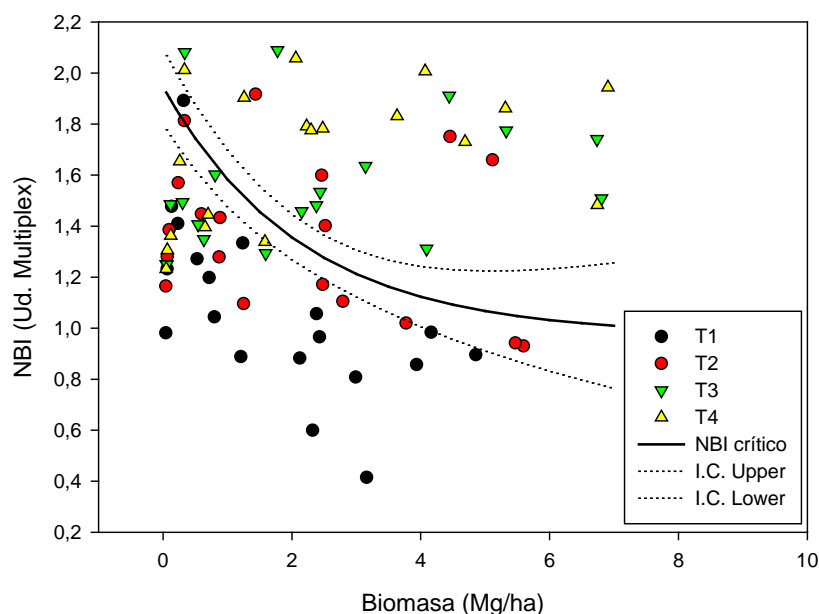


Figura 98. Índice NBI de Multiplex y biomasa (Mg/ha) de las var. Barcelona y Typical en los ensayos de 2012, 2013 y 2014. Curva crítica ajustada de NBI en función de la biomasa del cultivo (NBI crítico) e intervalo de confianza al 95% (I.C. Upper e I.C. Lower).

Teniendo en cuenta los valores de la curva crítica obtenidos, el intervalo de confianza del modelo y la biomasa del cultivo, podemos proponer unos valores de suficiencia mínimos (Tabla 49).

Tabla 49. Valores de suficiencia mínimos para el índice NBI de Multiplex en función de la biomasa, en tres estados fenológicos del cultivo.

	50% Suelo cubierto	Botón floral 1 mm	Previo a cosecha
Biomasa (Mg/ha)	1	2	4
NBI (Ud. Multiplex)	1,4-1,6	1,2-1,4	0,9-1,0

A continuación se representan, en función de la biomasa del cultivo, los valores de NBI de cada ensayo de las variedades Barcelona y Typical respecto a la curva crítica (Figuras 99, 100, 101, 102 y 103).

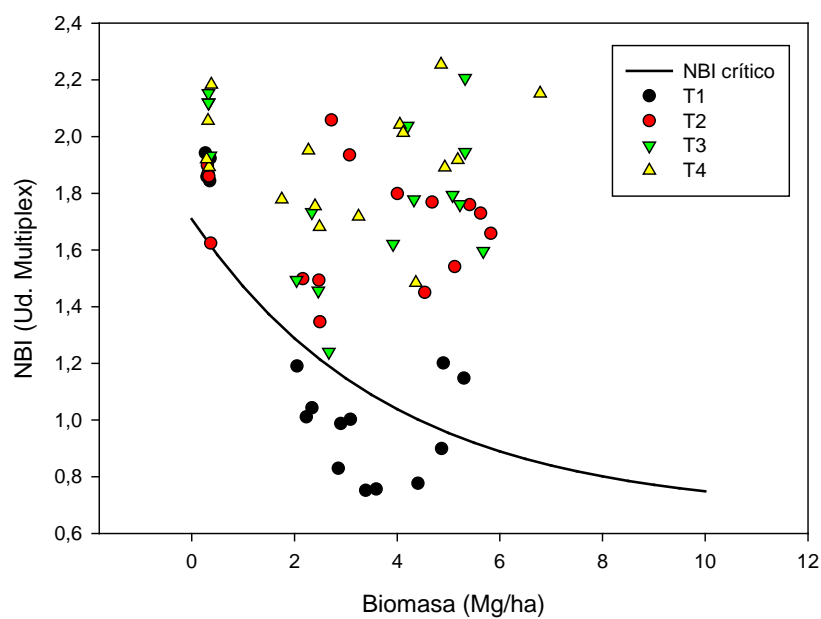


Figura 99. Curva crítica e índice NBI de Multiplex en función de la biomasa del cultivo para el ensayo de la variedad Barcelona el año 2012.

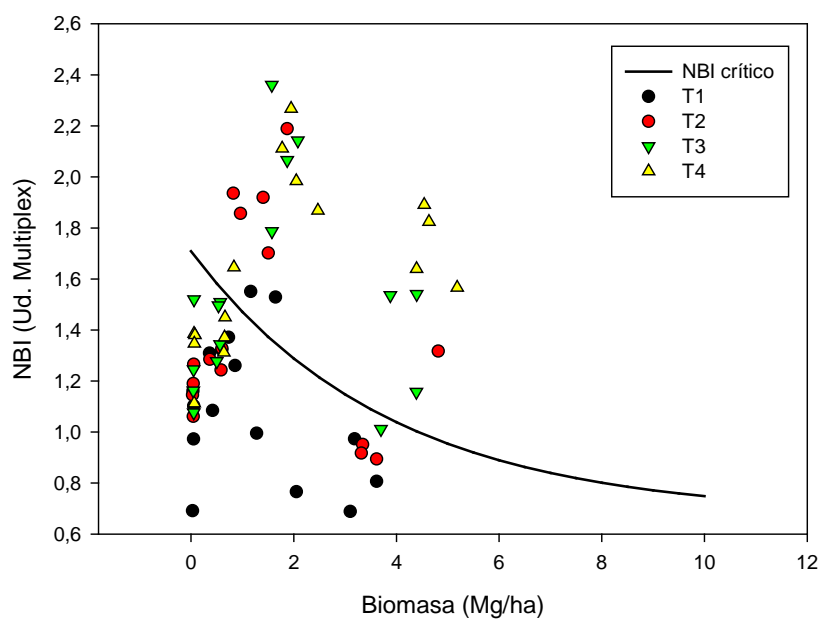


Figura 100. Curva crítica e índice NBI de Multiplex en función de la biomasa del cultivo para el ensayo de la variedad Barcelona el año 2013.

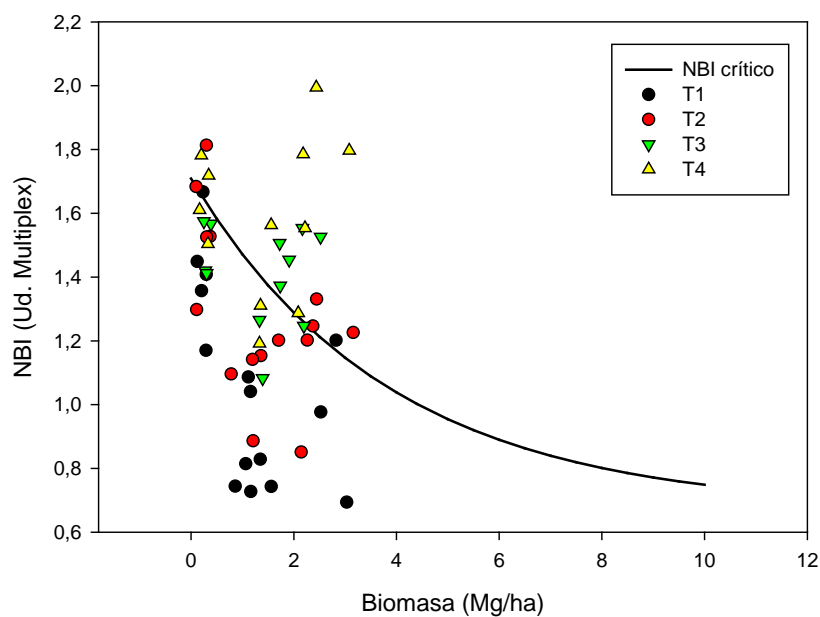


Figura 101. Curva crítica e índice NBI de Multiplex en función de la biomasa del cultivo para el ensayo de la variedad Barcelona el año 2014.

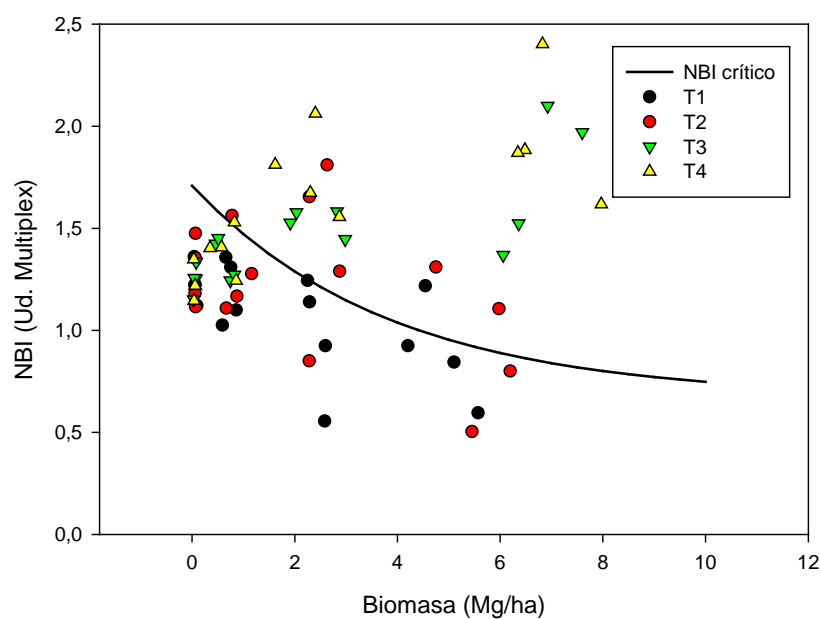


Figura 102. Curva crítica e índice NBI de Multiplex en función de la biomasa del cultivo para el ensayo de la variedad Typical el año 2013.

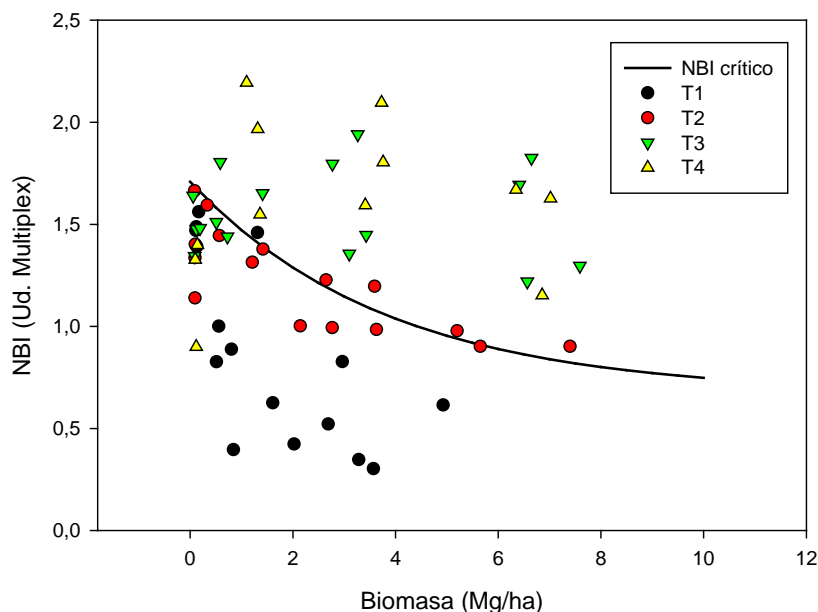


Figura 103. Curva crítica e índice NBI de Multiplex en función de la biomasa del cultivo para el ensayo de la variedad Typical el año 2014.

En cada ensayo realizado se ha utilizado la metodología empleada para Dualex en el apartado 5.7 en la que se valora el modelo en función de los parámetros de sensibilidad, especificidad, índice de Youden e índice de precisión. En la tabla 50 se presentan estos valores para todos los ensayos realizados.

Tabla 50. Curva crítica NBI de Multiplex. Valor de los índices de sensibilidad, de especificidad, de Youden y de precisión en los ensayos realizados durante 2012, 2013 y 2014 con las var. Barcelona y Typical.

Índices	Var. Barcelona			Var. Typical	
	2012	2013	2014	2013	2014
Sensibilidad	0,97	0,94	0,56	1,00	1,00
Especificidad	0,83	0,56	0,90	0,63	0,95
Índice de Youden	0,81	0,50	0,46	0,63	0,95
Índice de Precisión	0,94	0,75	0,75	0,81	0,97

La especificidad del modelo, que clasifica los tratamientos con menores producciones y menores valores de NBI, nos permite valorar la calidad del modelo para poder identificar los tratamientos deficitarios que podrían ser susceptibles de ser corregidos mediante fertilización. Por eso, de todos los valores de la tabla, de cara a la posible detección de deficiencias nos centraremos, principalmente, en la especificidad del modelo.

En la tabla 50 se observa que para la variedad Barcelona en los años 2012 y 2014 se obtuvieron valores de especificidad muy altos, (0,83 y 0,90). Sin embargo, para el año 2013 en esta variedad el valor de especificidad fue sensiblemente menor, lo que puede ser debido al efecto que produjo el granizo sobre las plantas, provocando una defoliación moderada y alterando el ciclo vegetativo de las coliflores.

En la variedad Typical el comportamiento es similar al de la variedad Barcelona, mostrando valores de especificidad muy altos en el año 2014. En el año 2013, posiblemente debido al granizo, los valores descendieron sensiblemente.

Los índices de Youden y de precisión del modelo presentan valores altos para los ajustes realizados en cada ensayo. Únicamente en el año 2014 en la variedad Barcelona se obtuvieron valores para el índice de Youden inferiores a 0,5. Esto se debe a que en el año 2014, para la variedad Barcelona, la sensibilidad del modelo obtuvo valores más bajos que el resto de ensayos.

El índice de precisión ha mostrado valores muy altos para el modelo en todos los ensayos realizados.

5.9. Sensor CROP CIRCLE

El sensor CROP CIRCLE, basado en relaciones de reflectancia, proporciona dos índices relativos al contenido en clorofila y a la biomasa del cultivo, NDRE y NDVI. Cuando hay diferencias en el crecimiento, el índice NDVI es un buen detector y en estados más avanzados del cultivo, el índice NDRE detecta las diferencias de color ocasionadas por los diferentes contenidos en clorofila de la hoja. Al proporcionar las reflectancias en las bandas del rojo, rojo lejano e infrarrojo próximo, permite el cálculo de otros índices, como el REDVI, que presentan altas correlaciones con el estado nutricional de la planta.

El índice NDVI (Rouse *et al.*, 1973) es un índice de vegetación utilizado para estimar la biomasa vegetal. En la figura 104, con datos de las fechas inicial y final de muestreo de los ensayos de 2013 y 2014 en las var. Barcelona y Typical, se observa la relación existente entre la biomasa de las variedades Barcelona y Typical y el índice NDVI y que muestra una buena correlación lineal.

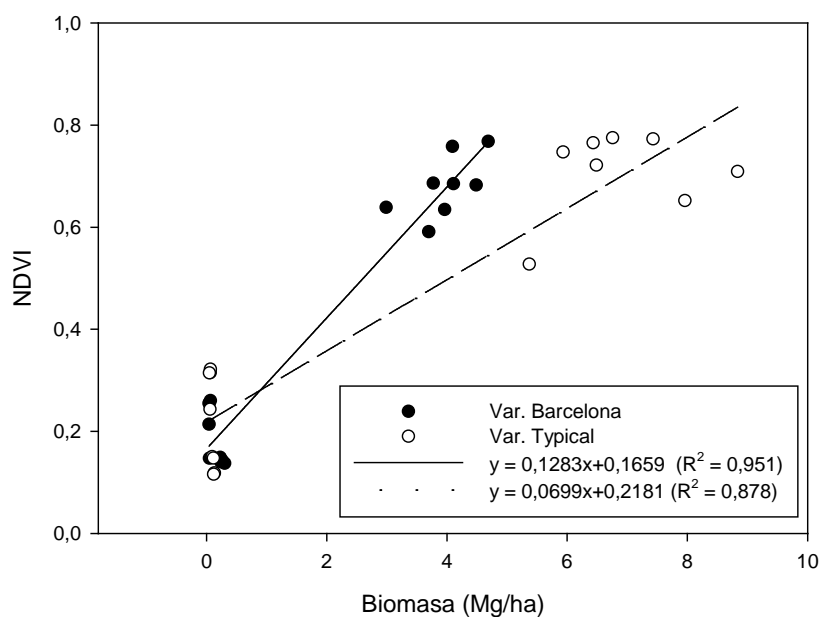


Figura 104. Relación entre el índice NDVI y la biomasa del cultivo en Mg/ha para las variedades Barcelona y Typical.

El índice NDRE (Barnes *et al.*, 2000), es un estimador del contenido en clorofila e indirectamente del contenido de nitrógeno. La relación entre este índice y el índice NDVI para los tratamientos más fertilizados (media de T3 y T4) y menos fertilizados (T1 y T2) en los años 2013 y 2014 se muestran en la figura siguiente:

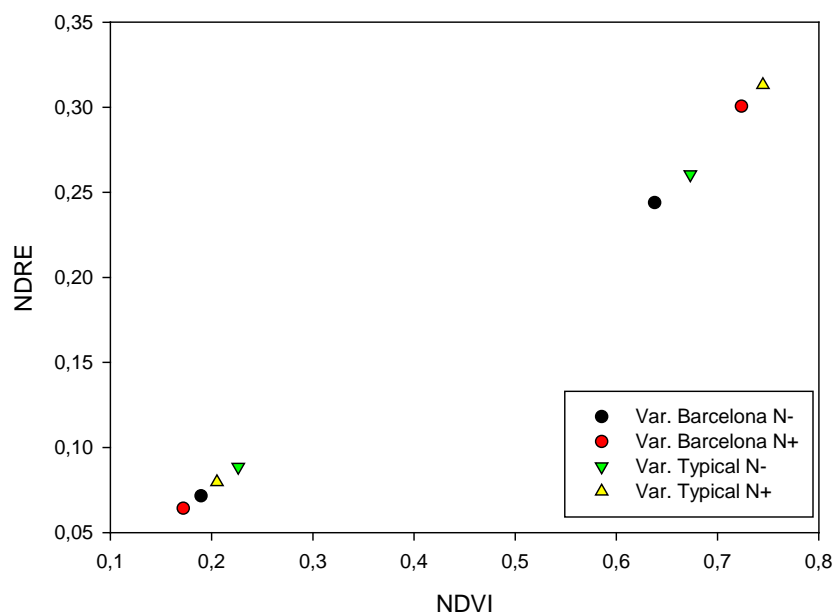


Figura 105. Relación entre el índice NDVI y el índice NDRE para las variedades Barcelona y Typical en los años 2013 y 2014. N+: tratamientos más fertilizados, T3 y T4; N-: tratamientos menos fertilizados.

En todos los tratamientos, en ambas variedades hay un incremento de los valores de NDVI y NDRE en paralelo al desarrollo del cultivo. Este incremento es

debido al incremento en la reflectancia en la región del infrarrojo cercano (NIR) junto con la disminución de la reflectancia en la región del rojo (R) y del rojo lejano (RE). Las plantas absorben fotones de luz roja y azul para llevar a cabo su actividad fotosintética, por ello, la reflectancia en el rojo será mayor en plantas estresadas y menor en plantas sanas (debido a la absorción de fotones de esa longitud de onda por parte de las clorofilas). En el infrarrojo cercano la tendencia es opuesta, las plantas sanas presentan una mayor reflectancia y las estresadas absorben una mayor cantidad de esta radiación. Casa *et al.* (2014), encontraron en trigo, habas y maíz altas correlaciones entre el contenido de clorofila de la hoja y la relación de reflectancias del NIR y el Red-Edge.

La reflectancia inicial en el NIR del 27% en ambas variedades se incrementa hasta valores del 37 y 39% en las var. Barcelona y Typical, en los tratamientos más fertilizados, y del 34 y 28% en dichas variedades en los tratamientos menos fertilizados. La reflectancia inicial en el R del 19% en ambas variedades disminuye hasta el entorno del 5,5%, también en ambas, en los tratamientos fertilizados y con menos intensidad en los menos fertilizados, hasta el entorno del 7%. En la región RE, los valores iniciales de reflectancia son similares en ambas variedades, en torno al 23% y disminuyen hasta valores del 19% en los tratamientos mas fertilizados y del 21% en los menos fertilizados. Esta evolución de los valores de reflectancia en las regiones R, RE y NIR ocasionan un mayor incremento de los valores de NDVI y NDRE en los tratamientos más fertilizados en relación a los menos fertilizados.

Los resultados obtenidos con el sensor CROP CIRCLE se han mostrado más discriminantes que los obtenidos con los sensores SPAD, DUALEX Y MULTIPLEX para detectar diferencias entre tratamientos durante todo el período de medidas, desde antes de la fertilización de cobertera hasta el inicio de la cosecha, ya que ha sido capaz de detectar diferencias entre tratamientos con antelación al resto de equipos y debido al número de muestras tomadas, realizadas en continuo, presenta valores de significación estadística mayores que el resto de equipos y un menor error muestral.

El muestreo con CROP CIRCLE es rápido al ser un método de medida por reflectancia, pudiendo ir instalado sobre vehículos y permitiendo realizar recorridos y un amplio muestreo de las parcelas.

Crop Circle también mostró sensibilidad para diferenciar significativamente los tratamientos deficitarios, pero además se observó que existía una correlación significativa entre los valores del índice REDVI (Tucker *et al.*, 1979) y el índice de

nutrición nitrogenada NNI, (Lemaire y Gastal, 1997). Esta correlación también fue encontrada por Cao *et al.* (2013) en un ensayo de arroz. El índice REDVI se expresa como la diferencia de reflectancias entre el NIR (infrarrojo cercano) y el Red-Edge. Este índice, al igual que muchos otros como NDRE (Barnes *et al.*, 2000), RESAVI (Sripada *et al.*, 2006) o RERDVI (Roujean *et al.*, 1995) se centran en la región del espectro entre el red-edge y el infrarrojo cercano, en la cual, tal y como se ha mencionado en la introducción de este trabajo, se encuentran mayores diferencias de absorción de luz entre las plantas.

El índice NNI se calcula como el cociente entre la concentración de nitrógeno total y la concentración de nitrógeno crítico, por debajo de la cual la planta se encontraría en déficit nutricional. Cuando este índice presenta valores por debajo de 1, la planta presentaría déficit nutricional y por encima de este valor nos encontraríamos en condiciones de consumo de lujo por parte de la planta. Esto se aplica para biomasa mayores de 1 Mg/ha, a partir de la cual la concentración de nitrógeno crítico depende de la biomasa aérea según estudios citados por Justes *et al.*, (1994). Se observó que, para la variedad Barcelona durante los años 2012, 2013 y 2014, para la variedad Typical en los años 2013 y 2014, y de forma conjunta para las dos variedades, existía una correlación altamente significativa entre los valores de los índices REDVI y NNI (Figuras 106, 107). Esto coincide con los resultados encontrados por Cao *et al.*, (2013) en esta región del espectro, a lo largo del ciclo de un cultivo de arroz.

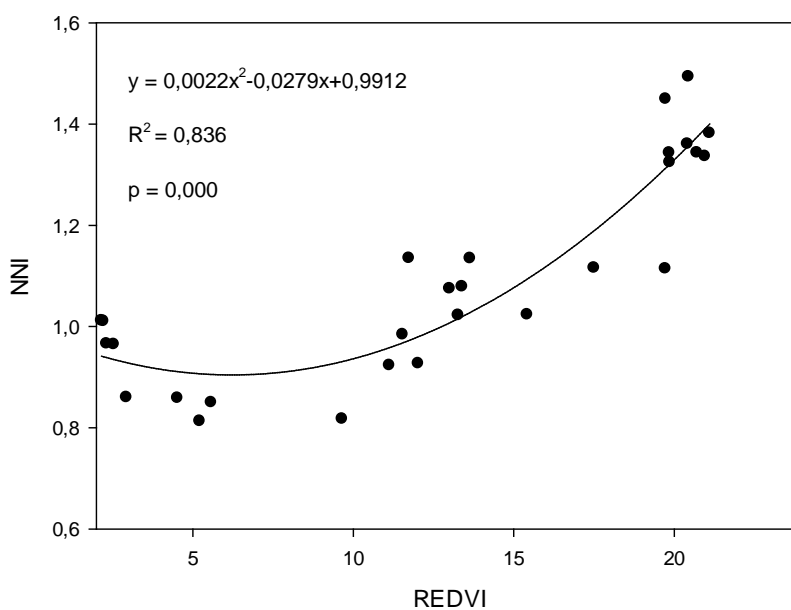


Figura 106. Relación entre los índices NNI y REDVI para la variedad Barcelona durante los años 2012, 2013 y 2014. El valor p indica el grado de significación estadística.

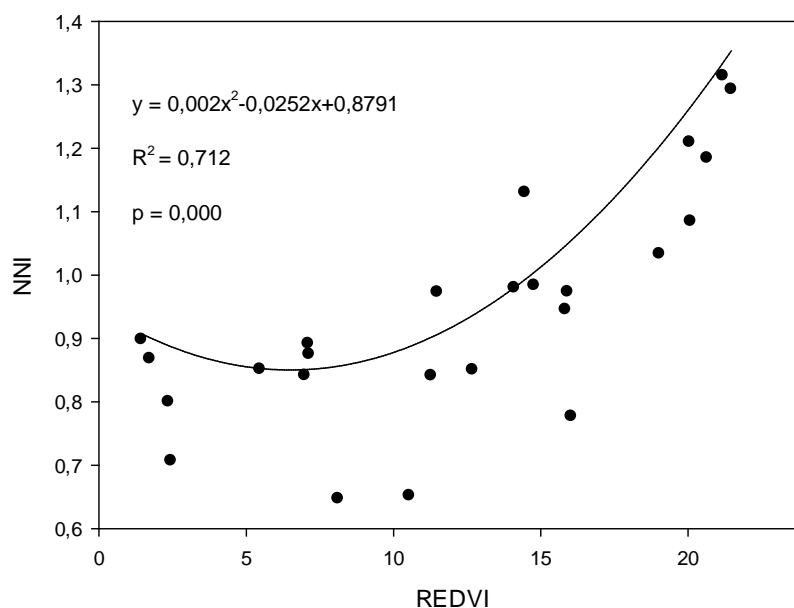


Figura 107. Relación entre los índices NNI y REDVI para la variedad Typical durante los años 2013 y 2014. El valor p indica el grado de significación estadística.

Se realizó una comparación de los parámetros de regresión en ambas variedades y se comprobó que no existían diferencias significativas entre ellos. Por ello fue posible establecer una regresión común para ambas variedades y cuyo resultado se presenta en la figura 108.

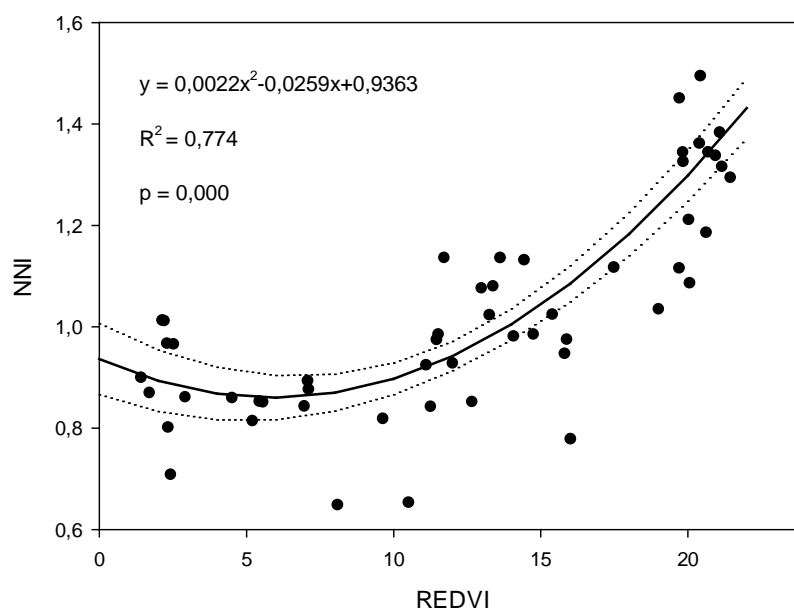


Figura 108. Relación entre los índices NNI y REDVI para las variedades Barcelona y Typical. El valor p indica el grado de significación estadística. Las curvas de puntos paralelas a la regresión representan el intervalo de confianza al 95%.

En la figuras se observa como a partir del momento en el que se alcanzan aproximadamente 10 unidades del índice REDVI, la pendiente de la función que relaciona los índices NNI y REDVI se modifica sensiblemente. Esto se debe a que hasta ese momento la planta no ha alcanzado una biomasa superior a 1 Mg/ha, coincidiendo con el 50% de suelo cubierto. Para biomásas menores (en las primeras fases del desarrollo vegetativo de la planta) la concentración de nitrógeno crítico es independiente de la biomasa aérea según estudios citados por Justes et al. (1994), y el índice NNI está directamente relacionado con la concentración de nitrógeno crítico. A partir de esa biomasa de 1 Mg/ha (50% de suelo cubierto) el índice REDVI puede ser un buen estimador del índice NNI, por lo que podría utilizarse junto con los índices NDVI y NDRE para diferenciar tratamientos con un estado nutricional deficitario.

5.10. Nitrato en savia

Antes del abonado de cobertera, la concentración media de N-NO_3^- en savia en todos los tratamientos fue de 2100 ± 873 ppm. Normalmente oscilaba entre 1300 y 1500 ppm salvo en dos ensayos donde se alcanzaron valores muy elevados de 2500 y 5500 ppm. En términos generales, esta concentración fue disminuyendo a lo largo del cultivo hasta cosecha, en función del nitrógeno disponible. El tratamiento T1, no fertilizado, finalizó el cultivo con valores próximos a cero, mientras que los cultivos más fertilizados presentaron valores superiores.

La concentración de N-NO_3^- en savia, ha sido un indicador muy sensible, y repetible, capaz de mostrar diferencias significativas entre tratamientos, sobre todo después de la fertilización de cobertera. Esta determinación se ha realizado aproximadamente un mes después del trasplante. La concentración del nitrato, antes de la fertilización de cobertera no ha mostrado diferencias significativas en ninguno de los ensayos y por tanto no ayudaría a ajustar esta fertilización. Al igual que otras medidas en planta, puede estar afectada por otros factores p.ej. déficit hídrico, etc. Es una medida destructiva que requiere tiempo e instalaciones para poder realizarla. Ha sido descrita como una técnica valiosa y rápida para estimar las necesidades de nitrógeno (Kubota *et al.*, 1997), otros autores (Olsen y Lyons, 1994) concluyeron que la concentración de nitrato en savia es un indicador sensible del estado nutricional de nitrógeno de la planta así como de las variaciones del contenido de nitrato en el suelo. También ha sido criticada por la alta variabilidad de sus resultados y la no concordancia de niveles críticos (Westerveld *et al.*, 2003).

5.10.1. Curva crítica N-NO₃⁻ en savia

Para la construcción de la curva crítica del contenido de N-NO₃⁻ en savia a lo largo del cultivo, se utilizaron los resultados relativos tanto del tiempo del cultivo como de la concentración de N-NO₃⁻. Estos resultados se asociaron con la producción total de pellas. Se descartaron los tratamientos significativamente menos productivos y de los más productivos se escogieron los resultados con los menores valores, se siguió la metodología indicada por Olasolo (2013) para ajustar la curva crítica de nitrógeno en judía. Con estos datos se ajustó un modelo no lineal del tipo $y = B \text{ EXP } (-C x)$, siendo y el contenido relativo de N-NO₃⁻ (%) y x el tiempo de cultivo relativo (%). Se ajustó un modelo común para las variedades de ciclo más corto, Barcelona y Casper y otro para la cv. Typical de ciclo medio. Para las variedades de ciclo corto, la función ajustada ha resultado:

$$y = 182,7 e^{-0,032 x} \quad [11]$$

siendo la regresión y los parámetros altamente significativos (Tabla 51 y Figura 109 A).

Tabla 51. Suma de cuadrados (SC), grados de libertad (gdl), cuadrados medios (CM) y valor del estadístico F. Valor de los parámetros “a” y “b” de la función [11], error estándar (SE) y valor del estadístico t ($t_{\text{observada}}$). Significación: *** = $p \leq 0.001$.

Fuente	SC	gdl	CM	F	Parámetro		SE	$t_{\text{observada}}$
Regresión	89.342,9	2	44.671,5	316,4***				
Error	4.800,1	34	141,2		a =	182,771	21,003	8,70***
Total	94.143,0	36			b =	0,032	0,003	9,83***
R ² corregida	0,828							

A partir del modelo ajustado, los valores críticos para las var. Barcelona y Casper se alcanzarían por debajo de 1195, 651, 488 y 292 ppm de N-NO₃⁻ en el 10%, 50% de suelo cubierto, botón floral de 1 mm e inicio de cosecha respectivamente. En el caso de las variedades de ciclo corto los valores hallados son similares a los recomendados por el modelo de Kubota *et al.* (1997). Previo a la primera cosecha, los cv. Barcelona y Casper presentan un valor crítico de 292 ppm, coincidiendo con los valores descritos por Hochmuth en 2015 (300-500 ppm) y Kubota *et al.* en 1997 (290 ppm). Siguiendo la metodología descrita anteriormente, en los sensores Dualex y Multiplex, para el cálculo de sensibilidad, especificidad e índices de Youden y de precisión, el modelo para las variedades Barcelona y Casper discrimina el 77% de los tratamientos no deficitarios y el 70% de los deficitarios (Tabla 52).

5. DISCUSIÓN

Tabla 52. Curva crítica de nitrato en savia. Valor de los índices de sensibilidad, de especificidad, de Youden y de precisión en los ensayos realizados con las var. Barcelona y Casper.

Sensibilidad	0,77
Especificidad	0,70
Índice de Youden	0,46
Índice de Precisión	0,73

Para la variedad Typical de ciclo medio, se ha ajustado la función teniendo en cuenta que se carecía de resultados experimentales más allá del estado de botón floral de 1 mm. La función ajustada ha resultado:

$$y = 120,9 e^{-0,041 x} \quad [12]$$

siendo la regresión y los parámetros altamente significativos (Tabla 53 y Figura 109 B).

Tabla 53. Suma de cuadrados (SC), grados de libertad (gdl), cuadrados medios (CM) y valor del estadístico F. Valor de los parámetros “a” y “b” de la función [12], error estándar (SE) y valor del estadístico t ($t_{\text{observada}}$). Significación: *** = $p \leq 0.001$.

Fuente	SC	gdl	CM	F	Parámetro		SE	$t_{\text{observada}}$
Regresión	87.570,7	2	43.785,3	182,7***				
Error	6.232,3	26	239,7		a =	120,875	13,252	9,12***
Total	93.803,0	28			b =	0,041	0,006	6,56***
R ² corregida	0,676							

Los parámetros que evalúan la aptitud del modelo (Tabla 54) indican que para esta variedad se ha obtenido una sensibilidad mayor respecto al modelo obtenido para las variedades de ciclo corto, pero una menor especificidad.

Tabla 54. Curva crítica de nitrato en savia. Valor de los índices de sensibilidad, de especificidad, de Youden y de precisión en los ensayos realizados con la var. Typical.

Sensibilidad	0,89
Especificidad	0,35
Índice de Youden	0,24
Índice de Precisión	0,56

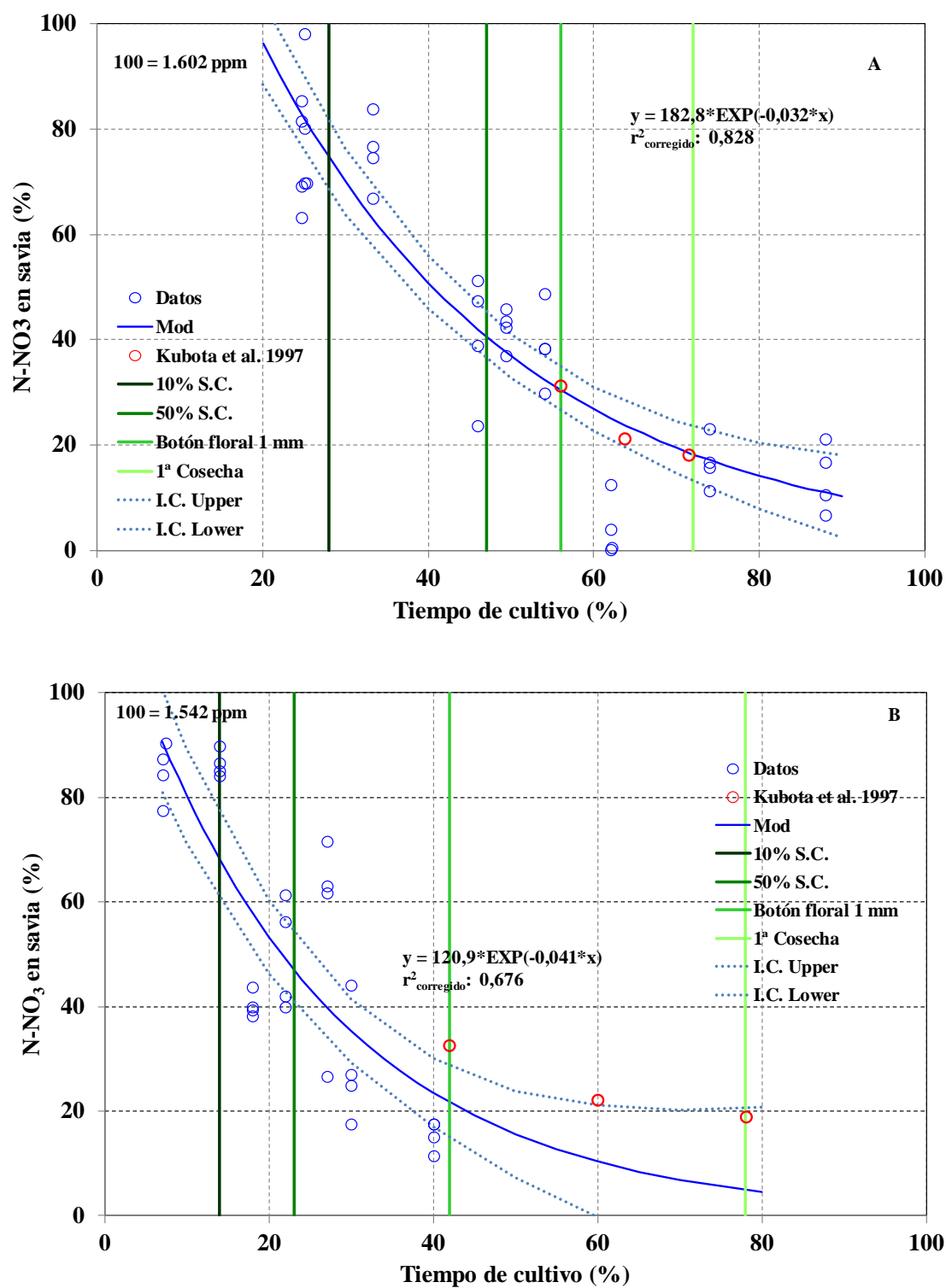


Figura 109. Contenido relativo crítico de N-NO₃⁻ en savia (%) en función del tiempo de cultivo relativo (%). A: cv. Barcelona y Casper. B: cv. Typical. S.C.: porcentaje de suelo cubierto. Se incluyen las recomendaciones de Kubota *et al.* (1997), procedentes de resultados de Doerge *et al.* (1991).

A continuación se representan, en función del porcentaje del cultivo, la concentración de nitrato en savia de cada ensayo de las variedades Barcelona, Casper y Typical respecto a la curva crítica obtenida (Figuras 110, 111, 112, 113, 114 y 115).

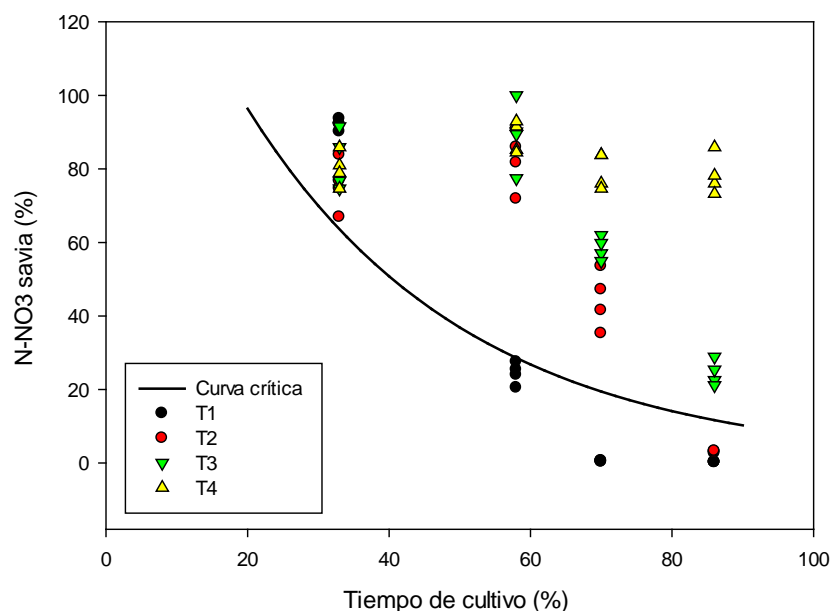


Figura 110. Curva crítica y contenido de nitrato en savia en función del tiempo de cultivo para el ensayo de la variedad Barcelona en el año 2012.

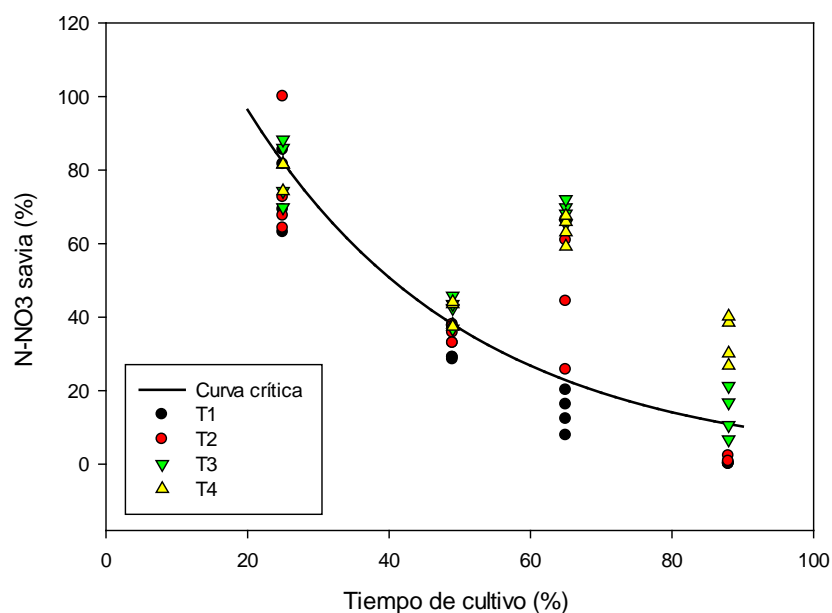


Figura 111. Curva crítica y contenido de nitrato en savia en función del tiempo de cultivo para el ensayo de la variedad Barcelona en el año 2013.

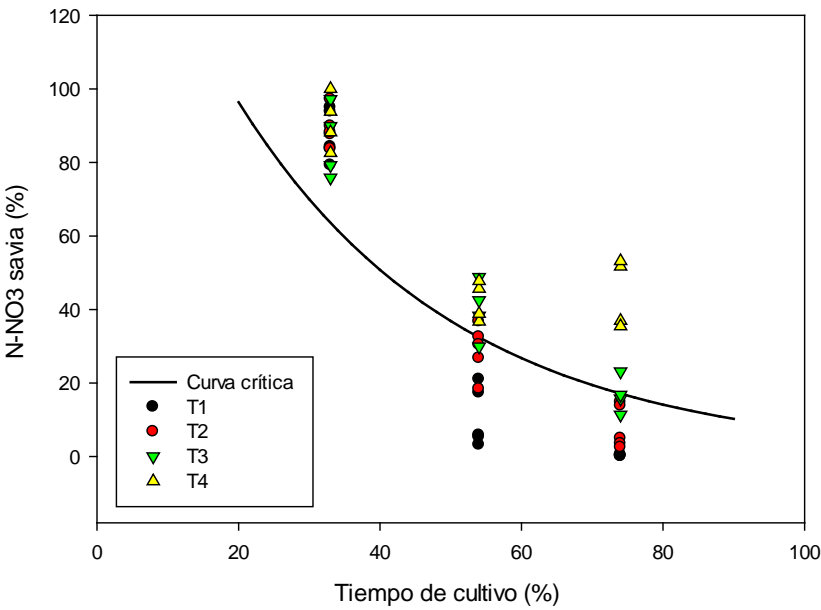


Figura 112. Curva crítica y contenido de nitrato en savia en función del tiempo de cultivo para el ensayo de la variedad Barcelona en el año 2014.

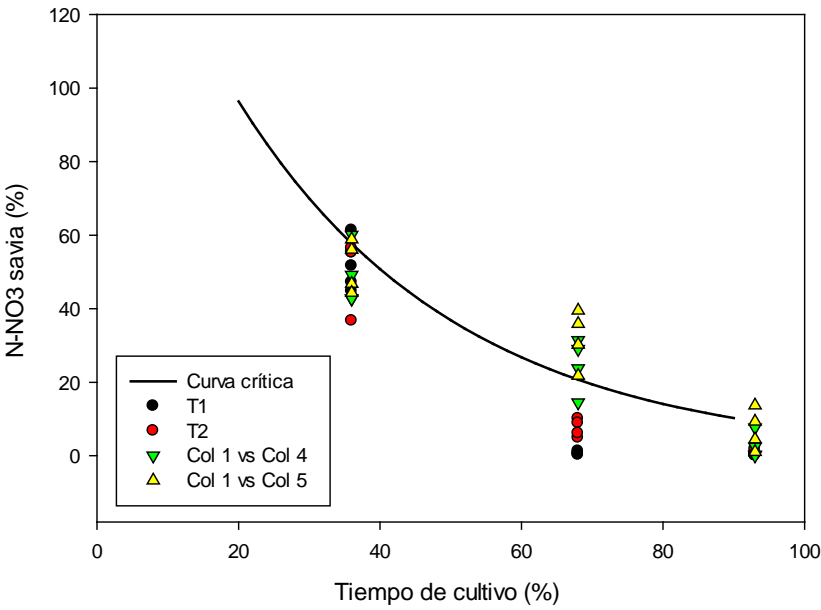


Figura 113. Curva crítica y contenido de nitrato en savia en función del tiempo de cultivo para el ensayo de la variedad Casper en el año 2014.

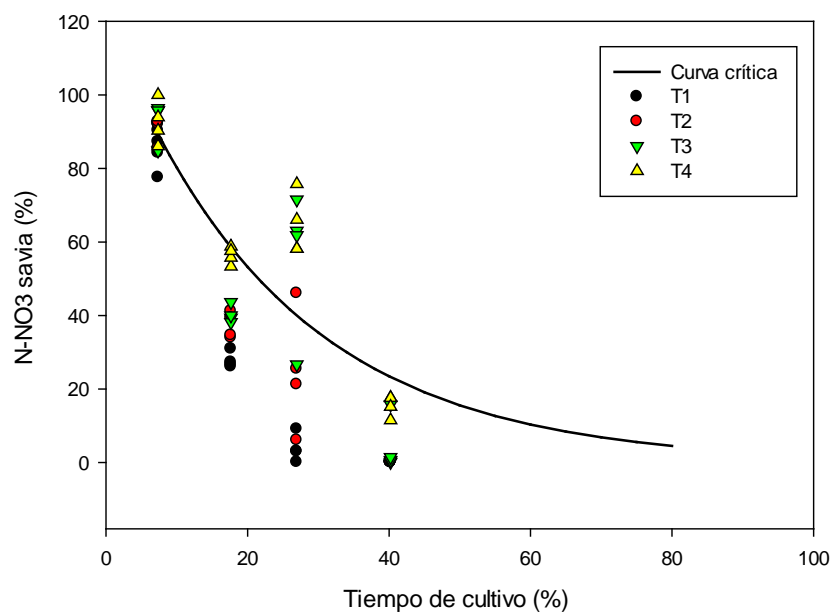


Figura 114. Curva crítica y contenido de nitrato en savia en función del tiempo de cultivo para el ensayo de la variedad Typical en el año 2013.

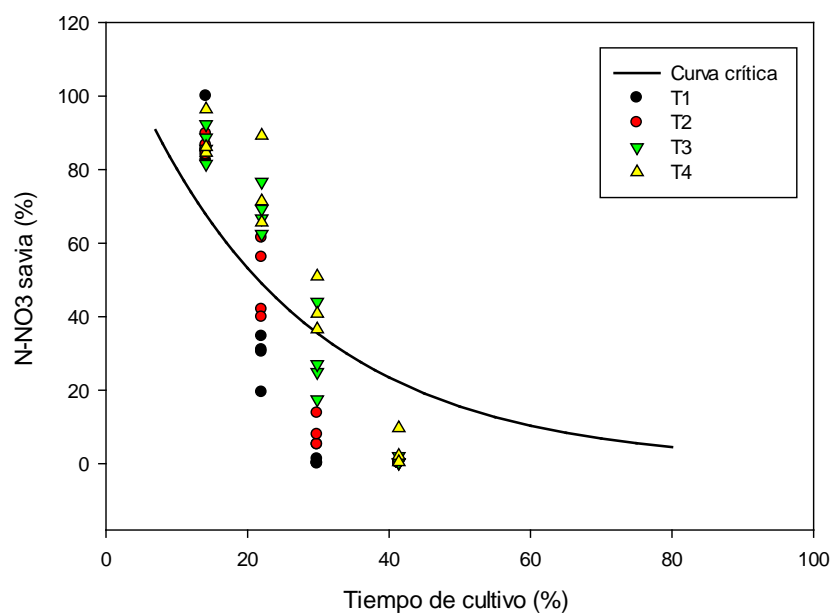


Figura 115. Curva crítica y contenido de nitrato en savia en función del tiempo de cultivo para el ensayo de la variedad Typical en el año 2014.

Para comprobar la aptitud del modelo en cada ensayo realizado se valora el modelo en función de los parámetros de sensibilidad, especificidad, índice de Youden e índice de precisión. En la tabla 55 se presentan los valores de sensibilidad, especificidad, índice de Youden e índice de precisión para todos los ensayos realizados.

Tabla 55. Curva crítica de nitrato en savia. Valor de los índices de sensibilidad, de especificidad, de Youden y de precisión en los ensayos realizados para todos los ensayos.

	Barcelona			Casper	Typical	
	2012	2013	2014	2014	2013	2014
Sensibilidad	0,92	0,72	0,83	0,46	0,86	0,89
Especificidad	0,75	0,78	0,37	0,96	0,38	0,35
Índice de Youden	0,67	0,50	0,20	0,42	0,23	0,24
Índice de Precisión	0,88	0,75	0,57	0,71	0,60	0,56

En la tabla 55 se observa que para la variedad Barcelona en los años 2012 y 2013 se obtuvieron valores de especificidad muy altos (0,75 y 0,78). Sin embargo, para el año 2014 en esta variedad el valor de especificidad fue sensiblemente menor. En la variedad Casper, en el año 2014, también se obtuvieron valores de especificidad muy altos (0,96). La sensibilidad del modelo ha sido alta en todos los ensayos, salvo en la variedad Casper. Y el índice de precisión del modelo ha mostrado valores superiores al 50 % en todos los ensayos.

Consideraciones finales

Para algunos índices de los equipos DUALEX, MULTIPLEX y CROP CIRCLE se han encontrado altas correlaciones con el contenido de nitrógeno de la planta, lo que ha servido para, en función del estado fenológico del cultivo, ajustar modelos que relacionan la medida realizada con la biomasa del cultivo. En las curvas críticas obtenidas para los sensores se observa como a partir de una biomasa aproximada de 1 Mg/ha (50% de suelo cubierto) la medida se estabiliza y es a partir de este momento cuando comienzan a distinguirse tratamientos deficitarios de los no deficitarios, al igual que ocurre con el contenido de nitrógeno total en hoja. Por ello, estos modelos podrían servir para determinar un déficit nutricional nitrogenado y poder corregirlo mediante fertilización. La metodología, descrita en los apartados anteriores, podría implementarse en otras variedades y/o cultivos, con un mayor número de ensayos y un mayor número de muestras, para determinar valores críticos y emplear estos equipos como estimadores del contenido de nitrógeno en la planta.

Estas deficiencias tendrían que ser detectadas a tiempo para ser corregidas en la fertilización de cobertera. El tiempo de aplicación de esta corrección dependerá del ciclo del cultivo, de su estado de desarrollo antes del inicio de formación de la pella, y de la técnica de aplicación del fertilizante, pudiendo alargarse en el tiempo en caso de fertirrigación.

En cuanto a las medidas destructivas, la concentración de nitrógeno total en las hojas de coliflor y de N-NO_3^- en savia han mostrado un comportamiento similar en todos los ensayos. A pesar de ser métodos destructivos y laboriosos, ha sido capaces de discriminar los tratamientos deficitarios a lo largo del ciclo de cultivo en los diferentes ensayos.

De todos los métodos empleados en el estudio, los resultados obtenidos para el análisis de N_{min} confirman la utilidad del método para el diseño de la fertilización nitrogenada de la coliflor, así como la importancia que pueden adquirir en el balance el nitrógeno mineralizado, las posibles pérdidas por volatilización y la necesidad de reducir las pérdidas por lixiviación a través de una correcta programación del riego. Siendo, éste, el método que mayor información ofrece de los estudiados para la toma de decisiones en una correcta fertilización nitrogenada, ya que es el único que nos permite conocer el contenido de nitrógeno disponible en el suelo.

Los resultados observados con los equipos de medidas no destructivas, complementan los resultados de N_{min} y demuestran la utilidad de estos métodos para detectar deficiencias en el estado nutricional de las plantas. De ellos, el medidor de reflectancia CROP CIRCLE ACS-430 ha permitido analizar de forma continua un gran número de muestras en un corto espacio de tiempo, disminuyendo así el error de muestreo y obteniendo valores más representativos del cultivo que con el resto de equipos empleados. Este equipo también permite realizar la toma de muestras desde un vehículo y georreferenciar estas medidas, obteniendo así una información precisa de nuestra parcela con vistas a programar una fertilización diferenciada.

Teniendo en cuenta todos los resultados obtenidos, el único método capaz de precisar cuantitativamente una recomendación de abonado a día de hoy sería el análisis de N_{min} . Retrasar el análisis de suelo hasta momentos antes de la fertilización de cobertera, nos permitiría ajustar de forma más eficaz el abonado nitrogenado, ya que tendríamos en cuenta la posible mineralización de la materia orgánica del suelo desde el inicio del cultivo, así como las posibles pérdidas por lixiviación.

En mi opinión, en los próximos años, y debido al desarrollo exponencial de la tecnología, el empleo de equipos de reflectancia, tanto a nivel de laboratorio como a nivel de campo, que sean capaces de realizar medidas de forma rápida y precisa a lo largo del espectro electromagnético supondrá un salto cualitativo en el conocimiento de la radiación espectral y en el análisis de la información que las plantas reflejan, absorben o transmiten en forma de luz.

Es necesario un trabajo de base en el estudio de información de longitudes de onda concretas que nos ayuden a diseñar equipos con una mayor capacidad discriminante sobre los procesos fisiológicos que ocurren en las plantas y poder aplicar esta tecnología desarrollada desde el laboratorio al campo y posteriormente implementarla en sistemas de mayor versatilidad como puedan ser drones, aviones no tripulados o imágenes tomadas a través de satélite.

El objetivo de estos equipos debería centrarse no sólo en la detección temprana de deficiencias nutricionales, sino también en la cuantificación de estas deficiencias para así poder corregirlas cuantitativamente.

6. CONCLUSIONES

6. Conclusiones

1. En la variedad Barcelona, el valor medio de Ndisponible por encima del cual no se ha encontrado respuesta en la producción ha sido de 184 ± 20 kgN/ha. En la variedad Typical en el año 2013 esta cantidad fue de 189 ± 45 kgN/ha. En Casper en el año 2012, no se obtuvieron diferencias de producción y en el año 2014, para esta misma variedad, el valor encontrado fue 143 ± 7 kgN/ha, estos valores fueron sensiblemente inferiores al del resto de ensayos.
2. La concentración media de nitrógeno total en las hojas de coliflor de la variedad Barcelona se encontraba al inicio del cultivo por encima del 4,5% y en cosecha en torno al 3,5%. En la variedad Typical estos valores medios se situaron entre el 4,5% y el 3%. En la variedad Casper los valores medios estuvieron comprendidos entre el 5,3% y el 4%, y el 2,5% en dos años diferentes. Esta concentración ha mostrado un comportamiento similar en todos los ensayos y ha sido capaz de discriminar los tratamientos deficitarios a lo largo del ciclo de cultivo en los diferentes ensayos.
3. La relación entre el nitrógeno total y la biomasa del cultivo ha sido capaz de discriminar a través de la curva crítica de nitrógeno los tratamientos considerados como deficitarios. Esta discriminación fue más patente a partir de biomásas superiores a 1 Mg/ha.
4. Las extracciones medias de las variedades de coliflor estudiadas se sitúan en 246 kg de nitrógeno por hectárea.
5. En los ensayos de la variedad Barcelona, la mineralización de la materia orgánica del suelo medida en campo alcanzó un valor medio de 46 kg N/ha para el período de cultivo en los primeros 30 cm del suelo. El aporte de nitrógeno a través de la mineralización de la materia orgánica del suelo podría suponer cerca de un 20% de las extracciones de nitrógeno de la planta.
6. Los resultados del análisis del balance en los diferentes ensayos, confirman la utilidad del método Nmin para el diseño de la fertilización nitrogenada de la coliflor, así como la importancia que puede adquirir en el balance el nitrógeno mineralizado, las posibles pérdidas por volatilización y realizar una correcta programación del riego para reducir las pérdidas por lixiviación.
7. Retrasar el análisis de suelo hasta momentos antes de la fertilización de cobertera, permitiría ajustar de forma más eficaz el abonado nitrogenado, ya que tendríamos en cuenta la posible mineralización de la materia orgánica del suelo desde el inicio del cultivo, así como las posibles pérdidas por lixiviación.
8. Los resultados obtenidos con el sensor SPAD han sido muy variables y de baja repetibilidad.

9. Los resultados obtenidos indican que las medidas con el sensor DUALEX han sido más repetibles y sensibles que las realizadas con el sensor SPAD para detectar diferencias entre tratamientos antes de la fertilización de cobertera y en el período comprendido en los veinte días desde la aplicación del fertilizante.
10. Se ha observado una correlación lineal significativa entre los valores del índice NBI de DUALEX y la concentración de nitrógeno total en la hoja durante el desarrollo del cultivo.
11. La curva crítica propuesta del índice NBI de DUALEX identifica correctamente el 92% de los tratamientos no deficitarios en nitrógeno y el 79% de los tratamientos deficitarios.
12. Los resultados obtenidos con el sensor MULTIPLEX han sido similares a los obtenidos con el sensor DUALEX para detectar diferencias entre tratamientos.
13. Se observó que existía una correlación lineal significativa entre los valores del índice NBI de MULTIPLEX y la concentración de nitrógeno total en la hoja a lo largo del desarrollo del cultivo en las diferentes fechas de medición.
14. La curva crítica propuesta del índice NBI de MULTIPLEX identifica el 92% de los tratamientos deficitarios.
15. Los resultados obtenidos con el sensor CROP CIRCLE se han mostrado más discriminantes que los obtenidos con los sensores SPAD, DUALEX Y MULTIPLEX para detectar diferencias entre tratamientos durante todo el período de medidas, desde antes de la fertilización de cobertera hasta el inicio de la cosecha.
16. Se observó una correlación significativa entre los valores de los índices REDVI y NNI, a partir de una biomasa superior a 1 Mg/ha.
17. La concentración de N-NO_3^- en savia, ha sido un indicador muy sensible, y repetible, capaz de mostrar diferencias significativas entre tratamientos, sobre todo después de la fertilización de cobertera.
18. La curva crítica ajustada de nitrato en savia para las variedades de ciclo corto discrimina el 77% de los tratamientos no deficitarios y el 70% de los deficitarios. En el caso de la curva crítica ajustada para la variedad Typical se ha obtenido una sensibilidad mayor respecto al modelo obtenido para las variedades de ciclo corto, pero una menor especificidad.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

7.Referencias bibliográficas

- Abuzeid, A.E., Wilcockson, S.J. (1989). Effects of sowing date, plant density and year on growth and yield of Brussels sprouts (*Brassica oleracea* var. *bull* at a subvar. *gemmifera*). The Journal of Agricultural Science, 112, 359-375.
- Agati, G., Foschi, L., Grossi, N., Volterrani, M. (2015). In field noninvasive sensing of the nitrogen status in hybrid bermudagrass (*Cynodon dactylon* × *C. transvaalensis* Burt Davy) by a fluorescence based method. Eur. J. Agron., 63, 89–96.
- Agati, G., Foschi, L., Grossi, N., Guglielminetti, L., Cerovic, Z. G., Volterrani, M. (2013). Fluorescence-based versus reflectance proximal sensing of nitrogen content in *Paspalum vaginatum* and *Zoysia matrella* turfgrasses. Eur. J. Agron., 45, 39–51.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith M. (1998). Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage Paper 56. Roma. 300 pp.
- Allen, W., Richardson, A. (1968). Interaction of light with a plant canopy. J. Opt. Soc. Am. 58:1023-1028.
- Allen, W., Gausman, H., Richardson, A. y Thomas, J. (1969). Interaction of isotropic light with a compact plant leaf. J. Opt. Soc. Am. 59: 1376-1379.
- Alt, D. Wiemann, F. (1990). Nitrogen in the harvested material and the crop residues of vegetables. Gemüse, 26, 352-356.
- ANFFE. 2013/14. Consumo Agrícola de Fertilizantes. <http://www.anffe.com/>
- AOAC (1990). Official methods of analysis. 15th Ed. Harwitte W. (Ed), pp. 127-129. Association of official analytical chemist. Washington (EEUU).
- Balasubramanian, V., Morales, A.C., Cruz, R.T., Thiyagarajan, T.M., Nagarajan, R., Babu, M., Abdulrachman, S., Hai, L.H., (2000). Adaptation of the chlorophyll meter (SPAD) technology for real-time N management in rice: a review. Int. Rice Res. Inst. 5, 25–26.
- Baret, F., Houlès, V., Guérif, M. (2007). Quantification of plant stress using remote sensing observations and crop models: the case of nitrogen management. J. Exp. Botany 58, 869-880.

Barker, D.W., Sawyer, J.E. (2010). Using active canopy sensors to quantify corn nitrogen stress and nitrogen application rate. *Agron. J.*, 102, 964-971.

Barnes, E. M., Clarke, T. R., Richards, S. E., Colaizzi, P. D., Haberland, J., Kostrzewski, M., & Lascano, R. J. (2000). Coincident detection of crop water stress, nitrogen status and canopy density using ground based multispectral data. In *Proceedings of the 5th International Conference on Precision Agriculture*, Bloomington, MN (16-19).

Batchelor, W.D., Basso, B., Paz, J.O. (2002). Examples of strategies to analyse spatial and temporal yield variability using crop models. *European Journal of Agronomy*, 18, 141-158.

Beverly, R.B. (1994). Stem sap testing as a real-time guide to tomato seedling nitrogen and potassium fertilization. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 25, 1045-1056.

Böhmer, M., Wiebe, H., Wehrmann, J. (1981). Zur Stickstoffdüngung bei Blumenkohl. *Gemüse* 17, 44–47. Citado en: Pannier, J., Hofman, G., Vanparys, L. (1996). Optimization of a nitrogen advice system: Target values as a function of N-mineralization rates. In *Progress in Nitrogen Cycling Studies* (pp. 353-358). Springer Netherlands.

Booij, R., Struik, P.C. (1990). Effects of temperature on leaf and curd initiation in relation to juvenility of cauliflower. *Scientia Horticulturae*, 44, 201-214.

Bremner, J.M. (1997). Sources of nitrous oxide in soils. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 49, 7-16.

Breschini, S.J., Hartz, T.K. (2002). Pre-sidedress soil nitrate testing reduces nitrogen fertilizer use and nitrate leaching hazard in lettuce production. *HortScience* 37(7), 1061-1064.

Brisson, N., Gary, C., Justes, E., Roche, D., Zimmer, D., Sierra, J., Bertuzzi, P., Burger, P., Bussiere, F., Cabidoche, Y. M., Cellier, P., Debaeke, P., Gaudillere, J.P., Henault, C., Maraux, F., Seguin, B., Sinoquet, H., (2003). An overview of the crop model STICS. *Eur. J. Agron.*, 18, 309-332.

Campillo, C., Garcia, M. I., Daza, C., Prieto, M. H. (2010). Study of a non-destructive method for estimating the leaf area index in vegetable crops using digital images. *HortScience*, 45(10), 1459-1463.

- Cannavo, P., Recous, S., Parnaudeau, V. Reau, R. (2008). Modeling N dynamics to assess environmental impacts of cropped soils. *Advances in Agronomy*, 97, 131-174.
- Cartelat, A., Cerovic, Z. G., Goulas, Y., Meyer, S., Lelarge, C., Prioul, J.-L., Barbottin, A., Jeuffroy, M.-H., Gate, P., Agati, G., Moya, I. (2005). Optically assessed contents of leaf polyphenolics and chlorophyll as indicators of nitrogen deficiency in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Field Crops Research*, 91, 35-49.
- Casa, R., Castaldi, F., Pascucci, S., Pignatti, S. (2014). Chlorophyll estimation in field crops: an assessment of handheld leaf meters and spectral reflectance measurements. *J. Agric. Sci.* 2014, 1–15.
- Cao, Q., Miao, Y., Wang, H., Huang, S., Cheng, S., Khosla, R., Jiang, R. (2013). Non-destructive estimation of rice plant nitrogen status with crop circle multispectral active canopy sensor. *Field Crops Research*, 151, 133–144.
- CEE (1998). Reglamento (CE) nº 963/98. Normas de comercialización aplicables a las coliflores y alcachofas. *Diario Oficial de la Unión Europea* num. 6 de 8 de mayo de 1998.
- Cerovic, Z. G., Masdoumier, G., Ben Ghazlen, N., Latouche, G. (2012). A new optical leaf-clip meter for simultaneous non-destructive assessment of leaf chlorophyll and epidermal flavonoids. *Physiol. Plant.* 2012, 146, 251–260.
- Cerovic, Z.G., Ben Ghazlen, N., Milhade, C., Obert, M., Debuisson, S., Le Moigne, M.(2015). Non-destructive diagnostic test for nitrogen nutrition of grapevine (*Vitis vinifera* L.) based on Dualex leaf-clip measurements in the field. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 63, 3669-3680.
- Chishaki, N., Horiguchi, T. (1997). Responses of secondary metabolism in plants to nutrient deficiency. *Soil Science and Plant Nutrition*, 43, 987-991.
- Clevers, J. G. P. W., De Jong, S. M., Epema, G. F., Van Der Meer, F. D., Bakker, W. H., Skidmore, A. K., Scholte, K. H. (2002). Derivation of the red edge index using the MERIS standard band setting. *International Journal of Remote Sensing*, 23(16), 3169-3184.
- Csizinszky, A.A. (1996). Optimum planting time, plant spacing, and nitrogen and potassium rates to maximize yield of green cauliflower. *HortScience*, 31, 930-933.

- Delgado, J., Follett, R.F., Shaffer, M.J. (2000). Simulation of nitrate-nitrogen dynamics for cropping systems with different rooting depths. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 64, 1050-1054.
- DiStefano, J.F., Gholz, H.L. (1986). A proposed use of ion exchange resins to measure nitrogen mineralization and nitrification in intact soil cores. *Comm. in Soil Sci. Plant Anal.*, 17, 989-998.
- Doerge, T.A., Roth, R.L., Gardner, B.R. (1991). Nitrogen fertilizer management in Arizona. Univ. of Arizona, College of Agriculture, Rpt. 191025.
- Doltra, J, Muñoz, P. (2010). Simulation of nitrogen leaching from a fertigated crop rotation in a Mediterranean climate using the EU-Rotate_N and Hydrus-2D models. *Agricultural Water Management*, 97, 277-285.
- Doltra, J., Muñoz, P., Antón, A., Ariño, J. (2010). Soil and plant nitrogen dynamics of a tomato crop under different fertilization strategies. *Acta Hort. (ISHS)*, 852, 207-214.
- Dubrulle, P., Machet, J. M., Damay, N. (2003). Azofert: a new decision support tool for fertiliser N recommendations. 12th Nitrogen Workshop, Exeter, Devon, UK. Wageningen Academic Publishers. pp. 500-501.
- El-Shikha, D. M., Waller, P., Hunsaker, D., Clarke, T., Barnes, E. (2007). Ground-based remote sensing for assessing water and nitrogen status of broccoli. *Agricultural Water Management*, 92, 183-193.
- Errebhi, M., Rosen, C.J., Birong, D.E. (1998). Calibration of petiole sap nitrate test for irrigated 'Russet burbank' potato. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 29, 23-35.
- Estiarte, M., Fililla, I., Serra, J. Peñuelas, J. (1994). Effects of nutrient and water stress on leaf phenolic content of peppers and susceptibility to generalist herbivore *Heliocoverpa armigera* (Hubner). *Oecologia*, 99, 387-391.
- Evans, J. R. (1989). Photosynthesis and nitrogen relationships in leaves of C3 plants. *Oecologia*, 78(1), 9-19.
- Everaarts, A.P. (1993). General and quantitative aspects of nitrogen fertilizer use in the cultivation of *Brassica* vegetables. *Acta Horticulturae*, 339, 149-160.
- Everaarts, A.P. (2000). Nitrogen balance during growth of cauliflower. *Sci. Hort.*, 83, 173-186.

Everaarts, A.P., de Moel, C.P. (1991). Growth, development and yield of white cabbage (*Brassica oleracea* var. *capitata*) in relation to time of planting (in Dutch). Verslag 132. PAGV, Lelystad. 50 pp.

Everaarts, A.P., de Moel, C.P. Van Noordwijk, M. (1996). The effect of nitrogen and the method of application on nitrogen uptake of cauliflower and on nitrogen in crop residues and soil at harvest. Netherlands Journal of Agricultural Science, 44, 43-55.

Feller, C., Fink, M. (2002). N-min target values for field vegetables. Acta Horticulturae 571, 195-201.

Fink, M., Scharpf, H.C. (2000). Apparent nitrogen mineralization and recovery of nitrogen supply in field trials with vegetable crops. Journal of Horticultural Science and Biotechnology, 75, 723-726.

Fisk, M.C., Schmidt S.K. (1995). Nitrogen mineralization and microbial biomass nitrogen dynamics in three alpine tundra communities. Soil Sci. Soc. Am. J., 59, 1036-1043.

Fitzgerald, G.J., Rodríguez, D., Christensen, L.K., Belford, R., Sadras, V.O., Clarke, T.R. (2006). Spectral and thermal sensing for nitrogen and water status in rainfed and irrigated wheat environments. Precision Agric., 7, 233-248.

Galambošová, J., Macák, M., Živčák, M., Rataj, V., Slamka, P., & Olšovská, K. (2014). Comparison of Spectral Reflectance and Multispectrally Induced Fluorescence to Determine Winter Wheat Nitrogen Deficit. Advanced Materials Research, 1059, 127-133.

García, M.I., Prieto, M.H., González, J.A., Moñino, M. J. (2003). Producción, calidad y estado nutricional de un cultivo de lechuga bajo diferentes sistemas de producción, en las vegas del Guadiana. Actas de Horticultura (SECH), 39, 374-376.

Gardner, B.R., Roth, R.L. (1989). Midrib nitrate concentration as a means for determining nitrogen needs of broccoli. Journal of Plant Nutrition, 12, 111-125.

Gates, D., Keegan, H., Schleter, J., Weidner, V. (1965). Spectral properties of plants. Appl. Opt. 4: 11-20.

Gates, D. M. (1965). Spectral properties of plants. Applied Optics. 4: 11-20.

Gausman, H. (1974). Leaf reflectance of near-infrared. Photogramm. Eng. 40: 183-191.

Gausman, H., Allen, W. (1973). Optical parameters of leaves of 30 plant species. *Plant Physiol.* 52: 57-62.

Gausman, H., Allen, W., Cardenas, R. (1969). Reflectance of cotton leaves and their structure. *Remote Sens. Environ.* 1: 19-22.

Gianquinto, G., Sambo, P., Pimpini, F. (2003). The use of SPAD 502 chlorophyll meter for dynamically optimization the nitrogen supply in potato crop: first results. *Acta Horticulturae*, 607, 191-196.

Gianquinto, G., Goffart, J.P., Olivier, M., Guarda, G., Colauzzi, M., Dalla Costa, L. Delle Vedove, G., Vos, J., Mackerron, D.K.L. (2004). The use of hand-held chlorophyll meters as tool to assess the nitrogen status and to guide nitrogen fertilization of potato crop. *Potato Res.*, 47, 35-80.

Gianquinto, G., Sambo, P., Borsato, D., (2006). Determination of SPAD threshold values in order to optimise the nitrogen supply in processing tomato. *Acta Horticulturae*, 700, 159-166.

Giebel, A., Wendroth, O., Reuter, H.I., Kersebaum, K.C., Schwarz, J. (2006). How representatively can we sample soil mineral nitrogen? *Journal of Plant Nutrition and Soil Sciences*, 169, 52-59.

Gitelson, A., Merzlyak, M. N. (1994). Spectral reflectance changes associated with autumn senescence of *Aesculus hippocastanum* L. and *Acer platanoides* L. leaves. Spectral features and relation to chlorophyll estimation. *Journal of Plant Physiology*, 143(3), 286-292.

Gobierno de La Rioja (2015). Estadística Agraria Regional 2012. Consejería de Agricultura, Ganadería y Medio Ambiente 2013, 128 pag.

Godoy, L.C.G., Villas Bôas, R.L., Büll, L.T. (2003). Utilização da medida do clorofilômetro no manejo da adubação nitrogenada em plantas de pimentão. *Revista Brasileira do Ciencia Solo*, 27, 1049-1056.

Goffart, J.P., Renard, S., Frankinet, M., Sinnaeve, G., Delvigne, A., Maréchal, J. (2006). Leaf chlorophyll content measurements for nitrogen fertilization management of curled-leaves endives in open field. *Acta Horticulturae*, 700, 207-211.

Goffart, J.P., Olivier, M., Frankinet, M. (2008). Potato crop nitrogen status assessment to improve N fertilization management and efficiency: Past-Present-Future. *Potato Research*, 51, 355-383.

Goulas, Y., Cerovic, Z.G., Cartelat, A. Moya, I. (2004). Dualex: a new instrument for field measurements of epidermal ultraviolet absorbance by chlorophyll fluorescence. *Applied Optics*, 43, 4488-4496.

Greenwood, D.J. (2001). Modeling N-response of field vegetable crops grown under diverse conditions with N_ABLE: a review. *Journal of Plant Nutrition*, 24, 1799-1815.

Greenwood, D.J., Neeteson, J.J. Draycott, A. (1986). Quantitative relationships for the dependence of growth rate of arable crops on their nitrogen content, dry weight and aerial environment. *Plant & Soil*, 91, 281-301.

Greenwood, D.J., Lemaire, G., Gosse, G., Cruz, P., Draycott, A., Neeteson, J.J.. (1990). Decline in percentage N of C3 and C4 crops with increasing plant mass. *Annals of Botany* 67: 181-190.

Greenwood, D.J., Rahn, C., Draycott, A., Vaidyanathan, L.V. Paterson, C. (1996). Modelling and measurement of the effects of fertilizer-N and crop residue incorporation on N-dynamics in vegetable cropping. *Soil Use and Management*, 12, 13-24.

Hatch, D.J., Bhogal, A., Lowell, R.D., Shepherd, M.A. Jarvis, S.C. (2000). Comparison of different methodologies for field measurement of net nitrogen mineralization in pasture soils under different soil conditions. *Biol. Fertil. Soils*, 32, 287-293.

Hartz, T.K. (1994). A quick test procedure for soil nitrate-nitrogen. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 25, 511-515.

Hartz, T.K. (2002a) The assessment of soil and crop nutrient status in the development of efficient fertilizer recommendations. *Acta Horticulturae* 627, 231-240.

Hartz, T.K. (2002b). Efficient management for cool-season vegetables. *Vegetable Research and Information Center*. University of California. Davis.

Hartz, T. K. (2003). The assessment of soil and crop nutrient status in the development of efficient fertilizer recommendations. *Acta Horticulturae*, 627, 231-240.

Hartz, T.K., Lestrangle, M., May, D.M. (1993). Nitrogen requirements of drip irrigated peppers. *HortScience*, 28, 1097-1099.

- Hartz, T.K., Bendixen, W.E., Wierdsma, L. (2000). The value of presidedress soil nitrate testing as a nitrogen management tool in irrigated vegetable production. *HortScience*, 35, 651-656.
- Heckman, J.R., Hlubik, W.T., Probst, D.J., Paterson, J.W. (1995). Pre-sidedress soil nitrate test for sweet corn. *HortScience*, 30(5), 1033-1036.
- Heckman, J.R. (2002). In-season soil nitrate testing as a guide to nitrogen management for annual crops. *HortTechnology*, 12, 706-710.
- Himelrick, D.G., Dozier, Jr. W.A., Wood, C.W., Sharpe, R.R. (1993). Determination of strawberry nitrogen status with SPAD chlorophyll meter. *Advances in Strawberry Research*, 12, 49-53.
- Hochmuth, G.J. (1994). Efficiency ranges for nitrate-nitrogen and potassium for vegetable petiole sap quick tests. *HortTechnology*, 4, 218-222.
- Hochmuth, G.J. (2003). Fertilization of pepper in Florida. Univ. Fla. Hort. Sci. Dept. Circ. 1168. 10 pp. <http://edis.ifas.ufl.edu>
- Hochmuth, G.J. (2009). Plant petiole sap-testing for vegetable crops. Univ. Fla. Hort. Sci. Dept. Circ. 1144. <http://edis.ifas.ufl.edu/cv004>
- Hochmuth, G.J. (2015). Plant petiole sap testing for vegetable crops. Univ. Fla. Hort. Sci. Dept.. IFAS Extension CIR 1144.
- Hoel, B.O., Solhaug, K.A. (1998). Effect of irradiance on chlorophyll estimation with the Minolta SPAD-502 leaf chlorophyll meter. *Annals of Botany* 82, 389-392.
- Hoffer, A.M., (1978). Biological and physical considerations in applying computer-aided analysis techniques to remote sensor data, in *Remote Sensing: The Quantitative Approach*, P.H. Swain and S.M. Davis (Eds), McGraw-Hill Book Company, 227-289.
- Hoque, E., Remus, G. (1996). Reflective light properties of tissue layers in Beech (*Fagus sylvatica* L.) leaves. *Photochem. Photobiol.* 63: 498-506.
- Houlès, V. (2004). Mise au point d'un outil de modulation intraparcellaire de la fertilisation azotée du blé d'hiver basé sur la télédétection et un modèle de culture. Saint-Mandé (France). Université de Marne la Vallée. 142 pp.

Huett, D.O., White, E. (1992). Determination of critical nitrogen concentrations of lettuce (*Lactuca sativa* L cv. Montello) grown in sand culture. Australian Journal of Experimental Agriculture, 32, 759-764.

IPCC (2007). Climate Change (2007): The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor H.L. Miller (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp. disponible en: <http://www.ipcc.ch/ipccreports/ar4-wg1.htm>

Jeuffroy, M.H., Recous, S. (1999). AZODYN: a simple model simulating the date of nitrogen deficiency for decision support in wheat fertilization, Eur. J. Agron., 10, 129-144.

Jones, J.B., Case, V.W. (1990). Sampling, handling and analyzing plant tissue samples. pp. 389 – 427. En: Westerman, R.L. (Ed.). Soil Testing and Plant Analysis. Third Edition. Soil Science Society of America BookSeries, Number 3. Madison, Wisconsin, USA.

Jones, J.W., Hoogenboom, G., Porter, C.H., Boote, K.J., Batchelor, W.D., Hunt, L.A., Wilkens, P.W., Singh, W., Gijsman, A.J., Ritchie, J.T. (2003). The DSSAT cropping system model. Eur. J. Agron., 18, 235-265.

Jongschaap, R.E.E. (2006). Run-time calibration of simulation models by integrating remote sensing estimates of leaf area index and canopy nitrogen. Eur. J. Agron., 24, 316.

Justes, E., Mary, B., Meynard, J.M., Machet, J.M., Thelier-Huche, L. (1994). Determination of a Critical Nitrogen Dilution Curve for Winter Wheat Crops. Ann. Bot. 74, 397-407.

Justes, E., Jeuffroy, M.H., Mary, B., (1997). The nitrogen requirement of major agricultural crops: Wheat, barley and durum wheat. In: Lemaire G. ed. Diagnosis of the nitrogen status in crops. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, (73-89).

Kage, H., Alt, C., Stützel, H. (2002). Nitrogen concentration of cauliflower organs as determined by organ size, N supply, and radiation environment. Plant and Soil. 246, 201-209.

- Keating, B.A., Carberry, P.S., Hammer, G.L., Probert, M.E. (2003). An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *Eur. J. Agron.* 18, 267-288.
- Kersebaum, K.C., Hecker, J.M., Mirschel, W., Wegehenkel, M. (eds.) (2007). *Modelling water and nutrient dynamics in soil-crop systems*. Springer, The Netherlands. 272 pp.
- Kiraly, Z. (1964). Effect of nitrogen fertilization on phenol metabolism and stem rust susceptibility of wheat. *Journal of Phytopathology*, 51, 252-261.
- Krusekopf, H.H., Mitchell, J.P., Hartz, T.K., May, D.M., Miyao, E.M., Cahn, M.D. (2002). Pre-sidedress soil nitrate testing identifies processing tomato fields not requiring sidedress fertilizer N. *HortScience*, 37, 520-524.
- Kubota, A., Thompson, T. L., Doerge, T.A., Godin, R.E. (1996). A petiole sap nitrate test for cauliflower. *HortScience*, 31, 934-937.
- Kubota, A., Thompson, T. L., Doerge, T.A., Godin, R.E. (1997). A petiole sap nitrate test for broccoli. *Journal of Plant Nutrition*, 20, 669-682.
- Kumar, L., Schmidt, K., Dury, S. y Skidmore, A. (2001). *Imaging spectrometry and vegetation science. Imaging spectrometry: Basic principles and prospective applications*. Springer. Dordrecht. pp. 111-155.
- Lee, D., Graham, R. (1986). Leaf optical properties of rainforest sun and shade extreme shade plants. *Am. J. Bot.* 73: 1100-1108.
- Lemaire, G., Salette, J. (1984). Relation entre dynamique de croissance et dynamique de prélèvement d'azote pour un peuplement de graminées fourragères. I.-Etude de l'effet du milieu.. *Agronomie* 4: 423-430.
- Lemaire, G., Gastal, F., Salette, J. (1989). Analysis of the effect of N nutrition on dry matter yield of a sward by reference to potential yield and optimum N content. *Proceedings XVI International Grassland Congress, Nice, France* (179-180).
- Lemaire, G., F. Gastal. (1997). N uptake and distribution in plant canopies. *Diagnosis of the nitrogen status in crops*. Springer Berlin Heidelberg, 1997. 3-43.
- Lemaire, G., Meynard, J. M. (1997). Use of the nitrogen nutrition index for the analysis of agronomical data. In *Diagnosis of the nitrogen status in crops* (pp. 45-55). Springer Berlin Heidelberg.

- Lemaire, G., Jeuffroy, M.H., Gastal, F. (2008). Diagnosis tool for plant and crop N status in vegetative stage. Theory and practices for crop N management. *Eur. J. Agron.*, 28, 614-624.
- Lidón, A., Bautista, I., de la Iglesia, F., Oliver, J., Llorca, R., Cruz Romero, G. (2005). Furrow and ridge soil nitrogen mineralization in a surface irrigated artichoke field. *Acta Horticulturae*, 700, 71-74.
- Lisiewska, Z., Kmiecik, W. (1996). Effects of level of nitrogen fertilizer, processing conditions and period of storage of frozen broccoli and cauliflower on vitamin C retention. *Food Chemistry*, 57, 267-270.
- López-Granados, F., Jurado-Expósito, M., Atenciano, S., García-Ferrer, A., Sánchez de la Orden, M., García Torres, L. (2002). Spatial variability of agricultural soil parameters in southern Spain. *Plant and Soil*, 246, 97-105.
- Lorenz, H.P., Schlaghecken, J., Engl, G. (1989). Ordnungsgemäße Stickstoffversorgung im Freiland-Gemüsebau nach dem "Kulturbegleitenden Nmin-Sollwerte (KNS) - System". Ministerium Landwirtschaft Weinbau Forsten Rheinland. Citado en: Everaarts, A. P. (2000).
- MacKerron, D.K.L., Young, M.W. Davies, H.V. (1995). A critical assessment of the value of petiole sap analysis in optimizing the nitrogen nutrition of the potato crop. *Plant and Soil*, 172, 247-260.
- Magdoff, F. (1991). Understanding the Magdoff pre-sidedress nitrate test for corn. *Journal of Production Agriculture*, 4, 297-305.
- Magnifico, V., Lattanzio, V., Sarli, G. (1979). Growth and nutrient removal by broccoli [fertilizer application, uptake]. *Journal American Society for Horticultural Science*.
- MAGRAMA, (2015). Anuario de Estadística Agraria. <http://www.magrama.gob.es/>
- Maroto, J.V. (2002). *Horticultura herbácea especial*. Ed. Mundi-Prensa, 5ª edición, Madrid. pp. 702.
- Martínez, D.E. Guamet, J.J. (2004). Distortion of the SPAD 502 chlorophyll meter readings by changes in irradiance and leaf water status. *Agronomie*, 24, 41-46.
- McClure, J.W. (1977). The physiology of phenolic compounds in plants. In T. Swain, J.B. Harbourne C.F. Van Sumere, eds. *Biochemistry of plant phenolics*, Vol. 12. Plenum Press, New York, pp. 525-556.

Meisinger, J.J., Randall, G.W. (1991). Estimating nitrogen budgets for soil-crop systems. En: R.F. Follet, D.R. Keeney and R.M. Cruse (eds.) Managing nitrogen for groundwater quality and farm profitability. SSSA Madison, WI. pp. 85-124.

Miller, R.O. (1998). Extractable nitrate in plant tissue; ion-selective electrode method. p. 85-88. En Kalra, Y.P. (Ed). Handbook of reference methods for plant analysis. 287 pp. Soil and plant analysis council, Inc. Philadelphia.

Mithchell, J., May, D.M., Hartz, T., Miyao, G., Cahn, M., Krusekopf, H.H. (2000). Soil testing to optimize nitrogen management for processing potatoes. Dpt. Of Vegetable Crops and Weed Science. University of California. Davis. <http://www.cdffa.ca.gov/is/frep/2000PROC2.doc>. 13-01-2003.

Moll, R.H., Kamprath, E.J., Jackson, W.A. (1982). Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency of nitrogen utilization. Agronomy J., 74, 562-564.

Neeteson, J.J. (1995). Nitrogen management for intensively grown arable crops and field vegetables. En: P. Bacon (ed.) Nitrogen Fertilization and the Environment. Pp. 295-325. Marcel Dekker, Inc., New York.

Olasolo, L. (2013). Ajuste, validación y aplicación del modelo EU-Rotate_N en una zona vulnerable a la contaminación por nitratos. Optimización de la fertilización nitrogenada (Tesis Doctoral, Universidad de La Rioja).

Olsen, J.K., Lyons, D.J. (1994). Petiole sap nitrate is better than total nitrogen in dried leaf for indicating nitrogen status and yield responsiveness of *capsicum* in subtropical Australia. Aust. J. Experimental Agriculture, 34, 835-843.

Padilla, F. M., Teresa Peña-Fleitas, M., Gallardo, M., Thompson, R. B. (2014). Evaluation of optical sensor measurements of canopy reflectance and of leaf flavonols and chlorophyll contents to assess crop nitrogen status of muskmelon. Eur. J. Agron., 58, 39-52.

Peña, M.T., Thompson, R.B., Martínez-Gaitán, C., Gallardo, M. Giménez, C. (2012). Sistemas ópticos de monitorización del estado de nitrógeno en melón. Actas de Horticultura (SECH), 60, 820-824.

Peterson, T.A., Blackmer, T.M., Francis, D.D., Scheppers, J.S., (1993). Using a chlorophyll meter to improve N management. A Webguide in Soil Resource Management: D-13 Fertility. Cooperative Extension, Institute of Agriculture and Natural Resources, University of Nebraska, Lincoln, NE, USA.

Plenet, D. (1995). Fonctionnement des cultures de maïs sous contrainte azotée. Détermination et application d'un indice de nutrition. Nancy: Thèse de Docteur de l'Institut National Polytechnique de Lorraine.

Prasad, M. Spiers, T.M. (1984). Evaluation of a rapid method for plant sap nitrate analysis. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, 15, 673-679.

Prasad, M. Spiers, T.M. (1985). A rapid nitrate sap test for outdoor tomatoes. *Scientia Horticulturae*, 25, 211-215.

Prévot, L., Chauki, H., Troufleau, D., Weiss, M., Baret, F. (2003). Assimilating optical and radar data into the STICS model for wheat crops. *Agronomie*, 23, 297-303.

Pritchard, K.H., Doerge, T.A., Thompson, T.L. (1995). Evaluation of in-season nitrogen tissue tests for drip irrigated leaf and romaine lettuce. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 26, 237-257.

Rahn, C.R., Vaidyanathan, L.V., Paterson, C.D. (1992). Nitrogen residues from *brassica* crops. *Aspect App. Bio.*, 30, 263-270.

Rahn, C.R., Paterson, C.D., Vaidyanathan, L.V.V. (1998). The use of measurements of soil mineral N in understanding the response of crops to fertilizer nitrogen in intensive cropping rotations. *J. Agr. Sci.*, 130, 345-356.

Rahn, C., Zhang, K., Lillywhite, R., Ramos, C., Doltra, J., de Paz, J.M., Riley, H., Fink, M., Nendel, C., Thorup-Kristensen, K., Pedersen, A., Piro, F., Venezia, A., Firth, C., Schmutz, U., Rayns, F., Strohmeyer, K. (2010 a). The development of the EU-Rotate N model and its use to test strategies for N use across Europe. *Acta Hort. (ISHS)*, 852, 73-76.

Rahn, C.R., Zhang, K., Lillywhite, R., Ramos, C., Doltra, J., de Paz, J.M., Riley, H., Fink, M., Nendel, C., Thorup Kristensen, K. Pedersen, A., Piro, F., Venezia, A., Firth, C., Schmutz, U., Rayns, F., Strohmeyer, K. (2010 b). EU-Rotate_N – a European Decision Support System – to Predict Environmental and Economic Consequences of the Management of Nitrogen Fertiliser in Crop Rotations. *Europ. J. Hort. Sci.*, 75, 20-32.

Ramos, C. (2005). El análisis del nitrógeno mineral del suelo como guía para la fertilización nitrogenada de los cultivos hortícolas. *Actas de Horticultura* 44, 95-102.

Ramos, C., Agut, A., Lidón, A. L. (2002). Nitrate leaching in important crops of the Valencian Community region (Spain). *Environ. Pollut.*, 118, 215-223.

Ramos, C., Úbeda, S. (2009). El abonado nitrogenado de los cultivos hortícolas en los Programas de Actuación para la reducción de la contaminación por nitrato de las diferentes Comunidades Autónomas. *Actas de Horticultura (SECH)*, 56, 87-92.

Rather, K., Schenk, M.K., Everaarts, A.P., Vethman, S. (1999). Response of yield and quality of cauliflower varieties (*Brassica oleracea* var. *botrytis*) to nitrogen supply. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 74, 658-664.

Rather, K., Manfred, K., Schenk, M.K., Everaarts, A.P., Vethman, S. (2000). Rooting pattern and nitrogen uptake of three cauliflower (*Brassica oleracea* var. *botrytis*) F1-hybrids. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 163, 467-474.

Riley, H., Vågen, I. (2003). Critical N-concentration in broccoli and cauliflower, evaluated in field trials with varying levels and timing of fertilizer. *Acta Horticulturae*, 627, 241-249.

Rincón, L., Sáez, J., Perez, J. A., Gomez, M. D., Pellicer, C. (1999). Crecimiento y absorción de nutrientes del brócoli. *Invest. Agr.: Prod. Prot. Veg.*, 14, 225-236.

Rincón, L., Pellicer, C., Sáez, J., Abadía, A., Pérez, A., Marín, C. (2001). Crecimiento vegetativo y absorción de nutrientes de la coliflor. *Invest. Agr. Prod. Prot. Veg.*, 16, 119-130.

Roberts, D.F., Kitchen, N.R., Sudduth, K.A., Drummond, S.T., Scharf, P.C. (2010). Economic and environmental implications of sensor-based nitrogen management. *Better Crops*, 94, 4-6.

Rodrigo, M.C. (2006). El análisis rápido de nitrato en savia como herramienta para la mejora del abonado nitrogenado de alcachofa y romanesco. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.

Rodrigo, M.C., Ramos, C. (2007a). La medida de la clorofila como herramienta para el manejo de la fertilización nitrogenada en los cultivos hortícolas. *Actas de Horticultura (SECH)*, 49, 229-234.

Rodrigo, M.C., Ramos, C. (2007b). Nitrate sap analysis as a tool to assess nitrogen nutrition in artichoke. VI International Symposium on Artichoke, Cardoon and its Wild Relatives. Lorca (Murcia) 28-31 de Marzo de 2006. *Acta Horticulturae*, 730, 251-256.

Rodrigo, M.C., Ramos, C. (2007c). Sap Analysis and Leaf Chlorophyll Measurements for Nitrogen Management in Artichoke and Romanesco. 15th Nitrogen Workshop: Towards a better efficiency in N use - Lleida (Spain). A. D. Bosch, M.R. Teira & J.M. Villar (eds.), Editorial Milenio, Lleida (Spain), pp. 57-59.

Rodrigo, M.C., Vañó, T., Ramos, C. (2005). Quick sap tests to assess nitrogen status in romanesco (*Brassica oleracea* var *botrytis* L.) plants. En: Proc. 14th N-Workshop on "N management in agrosystems in relation to the Water Framework Directive. 24-26 Oct., Maastricht, J.J. Schröder & J.J. Neeteson (eds). Plant Res. Intntl., Report 116, 272-275.

Ros, G.H., Temminghoff, E.J.M., Hoffland, E. (2011). Nitrogen mineralization: a review and meta-analysis of the predictive value of soil tests. European J. Soil Sci., 62, 162-173.

Roujean, J. L., & Breon, F. M. (1995). Estimating PAR absorbed by vegetation from bidirectional reflectance measurements. Remote Sensing of Environment, 51(3), 375-384.

Rouse, Jr. J.W., Haas, R.H., Deering, D.W., Schell, J.A., Harlan, J.C. (1973). Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation. Prog. Rep. RSC 1978-1, Remote Sensing Center, Texas AandM Univ., College Station, 93 pp.

Samborski, S. M., Tremblay, N., Fallon, E. (2009). Strategies to make use of plant sensors-based diagnostic information for nitrogen recommendations. Agron. J., 101, 800-816.

Sánchez, C. (1999). Diagnostic tools for efficient nitrogen management of vegetables produced in the low desert. University of Arizona.

Sánchez, C.A. (1998). Diagnostic tools for efficient N management of vegetables produced in the low desert. Ann. Report, California Department of Food and Agriculture Fertilizer Research and Education Program, Sacramento.

Scaife, M.A., Stevens, K.L. (1983). Monitoring sap nitrate in vegetable crops: Comparison of test strips with electrode methods, and effects of time of day and leaf position. Communications in Soil Science and Plant Analysis 14, 761-771.

Scharf, P.C., Lory, J.A. (2009). Calibrating reflectance measurements to predict optimal sidedress nitrogen rate for corn. Agron. J., 101, 615-625.

Scharpf, H.C. (1991). Stickstoffdüngung im Gemüsebau, AID-Heft Nr. 1223, Bonn-Bad Godesberg. Citado en Feller y Fink (2002).

Scharpf, H.C., Weier, U. (1996). Investigations on the nitrogen dynamic as a basis for the N fertilizer recommendations in vegetable production. *Acta Horticulturae* 428, 73-83.

Schepers, J.S., Francis, D.D., Vigil, M.F., Below, F.E. (1992). Comparison of corn leaf nitrogen concentration and chlorophyll meter readings. *Commun. Soil Sci. Plant. Anal.*, 23, 2173-2187.

Schröder, J. J., Neeteson, J. J., Oenema, O. Struik, P. C. (2000). Does the crop or the soil indicate how to save nitrogen in maize production?. Reviewing the state of the art. *Field Crops Research*, 66, 151-164.

Sepúlveda, J., Garrós, V. Ramos, C. (2003). El análisis rápido de nitrato en suelos y aguas. *Agrícola Vergel*, mayo 2003, 273-278.

Shaffer M.J., Halvorson A.D., Pierce F.J. (1991). Nitrate Leaching and Economic Analysis Package (NLEAP): Model Description and Application. In: *Managing Nitrogen for Groundwater Quality and Farm Profitability*. R.F. Follett, D.R.Keeney, and R.M. Cruse (eds.). Soil Sci. Soci. of America, Inc. Madison, Wisconsin, USA. 285-322.

Shaffer, M.J., Delgado, J.A., Gross, C.M., Follett, R.F., Gagliard, P. (2010). Simulation Processes for the Nitrogen Loss and Environmental Assessment Package. *Advances in Nitrogen Management for Water Quality*. Delgado, J.A., R.F. Follett, eds., Ankeny, IA: Soil and Water Conservation Society.

Shaver, T.M., Westfall, D. G., Khosla, R. (2007). Remote sensing of corn N status with active sensors. *Western Nutrient Management Conference*. 2007. Vol. 7. Salt Lake City, UT. USA.

Skoog, D. A., Holler, F. J., Crouch, S. R. (2007). *Instrumental analysis* (pp. 477-8). Cengage Learning India.

Smeal, D., Zhang, H., (1994). Chlorophyll meter evaluation for nitrogen management in corn. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 25, 1495–1503.

Soil Survey Staff. (2006). *Keys to Soil Taxonomy*. 10th ed. U.S. Department of Agriculture. Natural Resources Conservation Service. 332 pp.

- Sripada, R. P., Heiniger, R. W., White, J. G., Meijer, A. D. (2006). Aerial color infrared photography for determining early in-season nitrogen requirements in corn. *Agronomy Journal*, 98, 968–977. doi: 10.2134/agronj2005.0200.
- Stehfest, E., Bouwman, L. (2006). N₂O and NO emission from agricultural fields and soils under natural vegetation: summarizing available measurement data and modeling of global annual emissions. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 74, 207-228.
- Studstill, D.W., Simonne, E.H., Hutchinson, C.M., Hochmuth, R.C., Dukes, M.D., Davis, W.E. (2003). Petiole sap testing sampling procedures for monitoring pumpkin nutritional status. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, 34, 2355-2362.
- Thompson, R.B., Gallardo, M., Joya, M., Segovia, C., Martínez-Gaitán, C., Granados, M.R. (2009). Evaluation of rapid analysis systems for on-farm nitrate analysis in vegetable cropping. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 7, 200-211.
- Tremblay, N (2013). Sensing technologies in horticulture: options and challenges. *Chron. Hortic.* , 53, 10–14.
- Tremblay, N., Wang, Z., Cerovic, Z. G. (2012). Sensing crop nitrogen status with fluorescence indicators. A review. *Agron. Sustainable Dev.*, 32, 451–464.
- Tremblay, N., Scharpf, H.C., Weier, U., Laurence, H., Owen, J. (2001). Nitrogen management in field vegetables: A guide to efficient fertilization. Agriculture and Agri-Food Canada. 65 pp.
- Tremblay, N., Dextraze, L., Roy, G., Belec, C., Charbonneau, F. (2002). Quick nitrogen test for use on bean and sweet corn crops in Quebec (Canada). *Acta Horticulturae*, 506, 141-146.
- Tucker, C.J., (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sens. Environ.* 8, 127–150
- Ulrich, A. (1952). Physiological bases for assessing the nutritional requirements of plants. *Ann. Rev. Plant Physiol.*, 3, 207-228.
- Van Den Boogaard, R., Thorup-Kristensen, K. (1997). Effects of nitrogen fertilization on growth and soil nitrogen depletion in cauliflower. *Acta Agriculturae Scandinavica B, Plant Soil Sciences*, 47, 149-155.

- Van der Burgt, G.J.H.M., Oomen, G.J.M., Habets, A.S.J. Rossing, W.A.H. (2006). The NDICEA model, a tool to improve nitrogen use efficiency in cropping systems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 74, 275-294.
- Van Groenigen, J.W., Velthof, G.L., Oenema, O., Van Groenigen, K.J., Van Kessel, C. (2010). Towards an agronomic assessment of N₂O emissions: a case study for arable crops. *European J. Soil Sci.*, 61, 903-913.
- Vázquez, N., Pardo, A., Suso M.L., Quemada, M. (2006). Drainage and nitrate leaching under processing tomato growth with drip irrigation and plastic mulching. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 112, 313-323.
- Vázquez, N., Pardo, A., Suso, M.L. (2010). Effect of plastic mulch and quantity of N fertilizer on yield and N uptake of cauliflower with drip irrigation. *Acta Horticulturae*, 852, 325-332.
- Villeneuve, S., Coulombe, J., Bélec, C., Tremblay, N. (2002). A comparison of sap nitrate test and chlorophyll meter for nitrogen status diagnosis in broccoli (*Brassica oleracea* L. spp *Italica*). *Acta Horticulturae*, 571, 171-177.
- Willstätter, R., Stoll, A. (1918). Untersuchungen über die Assimilation der Kohlensäure. Verlag von Julius Springer. Berlin. Citado por Hoque y Remus (1996).
- Wehrmann, J., Scharpf, H.C. (1986). The Nmin method an aid to integrating various objectives of nitrogen fertilization. *Pflanzenernaehr. Bodenk* 149, 428-440.
- Wendlandt, W., Hecht, H. (1966). Reflectance spectroscopy. Interscience Publishers. New York.
- Westcott, M. P., Wraith, J. M. (1995). Correlation of leaf chlorophyll readings and stem nitrate concentrations in peppermint. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, 26, 1481-1490.
- Westerveld, S. M., McKeown, A. W., Scott-Dupree, C. D., McDonald, M. R. (2003). How well do critical nitrogen concentrations work for cabbage, carrot, and onion crops?. *Hortscience*, 38, 1122-1128.
- Westerveld, S. M., McKeown, A. W., Scott-Dupree, C. D., McDonald, M. R. (2004). Assessment of chlorophyll and nitrate meters as field-tissue nitrogen tests for cabbage, onions, and carrots. *HortTechnology*, 14, 179-188.
- Wiebe, H.J. (1975). The morphological development of cauliflower and broccoli cultivars depending on temperature. *Scientia Horticulturae*, 3, 95-101.

Woolley, J. (1971). Reflectance and transmittance of light by leaves. *Plant Physiol.* 47: 656-662.

Wurr, D.C.E., Akehurst, J.M., Thomas, T.H. (1981). A hipótesis to explain the relationship between low-temperature treatment, gibberellin activity, curd initiation and maturity in cauliflower. *Scientia Horticulturae*, 15, 321-330.

Youden, W.J. (1950). Index for rating diagnostic tests. *Cancer* 3, 32-35.

Zhang, K., Greenwood, D.J., Spracklen, W.P., Rahn, C.R., Hammond, J.P., White, P.J., Burns I.G. (2010). A universal agro-hydrological model for water and nitrogen cycles in the soil–crop system SMCR_N: Critical update and further validation. *Agric. Water Manage.*, 97, 1411-1422.

Zhang, Y., Tremblay, N., Zhu, J. (2012). A First Comparison of Multiplex® for the Assessment of Corn Nitrogen Status. *Journal of Food, Agriculture and Environment*, 10, 1008-1016.

8. ANEJOS

8. ANEJOS

8. Anejos

ANEJO 1. Resultados variedad Barcelona, año 2012.

Producción (kg/ha)			Pellas	Hojas	Total	
	T1		11.984a	31.903a	43.887a	
	T2		22.142b	46.697b	68.839b	
	T3		23.806b	47.188b	70.994b	
	T4		22.259b	44.954b	67.213b	
			***	***	***	
Ntotal (%)			10-9	1-10	15-10	22-10
	T1		5,11	3,92a	2,29a	2,54a
	T2		5,50	4,65b	3,75b	3,40b
	T3		5,50	4,78b	3,87b	4,02c
	T4		5,66	4,80b	3,75b	4,15c
			ns	***	***	***
N-NO ₃ ⁻ savia (ppm)			10-9	1-10	11-10	24-10
	T1		2.615a	690a	13a	6a
	T2		2.145b	2.345b	1.260b	85a
	T3		2.335ab	2.535b	1.660c	695b
	T4		2.275ab	2.515b	2.260d	2.225c
			*	***	***	***
SPAD			10-09	1-10	10-10	23-10
	T1		63,3	58,7	57,4	53,8a
	T2		63,0	56,6	62,6	61,0b
	T3		60,5	60,1	59,3	60,0b
	T4		62,5	59,7	59,7	61,5b
			ns	ns	ns	**
DUALEX (Chl)	T1		10-09	4-10	10-10	23-10
	T2		46,55	43,91a	40,71a	44,74a
	T3		47,64	48,73b	47,21b	51,17b
	T4		46,47	49,63b	47,71b	52,42b
			48,34	51,33b	48,05b	53,53b
			ns	**	***	***
DUALEX (NBI)			10-09	4-10	10-10	23-10
	T1		38,14	27,74a	25,36a	27,15a
	T2		37,80	36,59b	33,59b	36,64b
	T3		39,17	36,97b	34,38b	37,52b
	T4		40,00	40,95b	34,91b	39,02b
			ns	**	***	***

8. ANEJOS

MULTIPLEX (SFR)			10-09	4-10	10-10	23-10
	T1		5,93ab	5,53a	5,15a	5,17a
	T2		5,78a	5,63a	5,36ab	5,54b
	T3		5,91ab	5,74a	5,54bc	5,65b
	T4		6,00b	6,16b	5,69c	5,63b
			**	**	***	***
MULTIPLEX (NBI)			10-09	4-10	10-10	23-10
	T1		1,89ab	1,06a	0,98a	0,86a
	T2		1,81a	1,60bc	1,75b	1,66b
	T3		2,08b	1,48b	1,91b	1,77b
	T4		2,01ab	1,79c	2,01b	1,86b
			**	**	***	***
Crop-Circle (NDRE)				1-10		24-10
	T1			0,329a		0,243a
	T2			0,352b		0,282b
	T3			0,353b		0,312c
	T4			0,350b		0,310c
				***		***
Crop-Circle (NDVI)				1-10		24-10
	T1			0,768a		0,64a
	T2			0,788b		0,68b
	T3			0,789b		0,71b
	T4			0,772b		0,72b
				***		***

8. ANEJOS

ANEJO 2. Resultados variedad Barcelona, año 2013.

Producción (kg/ha)			Pellas	Hojas	Total	
	T1		8.084a	19.105a	27.189a	
	T2		13.316b	27.114ab	40.430b	
	T3		17.116bc	31.422bc	48.538bc	
	T4		20.748c	36.935c	57.683c	
			***	***	***	
Ntotal (%)			26-8	16-9	30-9	21-10
	T1		4,58	3,97a	4,37a	2,64a
	T2		4,34	4,42ab	4,59ab	3,57b
	T3		4,58	4,77b	5,14b	4,20bc
	T4		4,52	5,08b	4,98b	4,72c
			ns	**	**	***
N-NO ₃ ⁻ savia (ppm)			28-8	18-9	1-10	21-10
	T1		1.210	483a	228a	2a
	T2		1.231	583ab	798b	16a
	T3		1.287	682b	1.113b	224b
	T4		1.289	659b	1.034b	549c
			ns	***	***	***
SPAD		28-8	4-9	18-9	30-9	21-10
	T1	56,0	61,5	55,1	59,6a	55,3a
	T2	56,4	62,0	55,8	61,0ab	54,8a
	T3	56,6	64,1	54,3	62,6ab	62,0b
	T4	55,6	63,7	55,7	63,8b	64,8b
		ns	ns	ns	*	***
DUALEX (Chl)		28-8	4-9	18-9	30-9	21-10
	T1	40,82	43,39a	39,13	46,68a	40,70a
	T2	40,16	42,37a	38,72	47,88a	44,62a
	T3	41,60	43,77a	38,68	49,98b	48,62b
	T4	40,22	46,16b	41,66	51,67b	53,01c
		ns	***	ns	***	***
DUALEX (NBI)		28-8	4-9	18-9	30-9	21-10
	T1	28,22a	30,41a	26,43a	33,82a	23,62a
	T2	29,12a	30,54a	26,86a	38,68bc	27,07a
	T3	31,04ab	30,64ab	26,47a	42,66bc	31,39b
	T4	29,52b	32,85b	30,08b	44,11c	36,71c
		***	**	**	***	***

8. ANEJOS

MULTIPLEX (SFR)		28-8	4-9	18-9	30-9	21-10
	T1	4,10ab	4,34	4,45ab	4,38a	4,10a
	T2	3,97a	4,31	4,71a	4,53ab	4,23ab
	T3	4,30ab	4,42	4,44ab	4,49a	4,35b
	T4	4,35b	4,37	4,39b	4,65b	4,46b
		*	ns	*	**	**
MULTIPLEX (NBI)		28-8	4-9	18-9	30-9	21-10
	T1	0,98a	1,15a	1,27	1,33a	0,81a
	T2	1,17ab	1,31b	1,45	1,92b	1,02ab
	T3	1,25b	1,29 b	1,41	2,09b	1,31b
	T4	1,31b	1,22a	1,44	2,06b	1,73c
		**	**	ns	***	***
Crop-Circle (NDRE)		30-8		18-9	30-9	
	T1	0,089b		0,181a	0,271a	
	T2	0,102c		0,205b	0,301b	
	T3	0,059 ^a		0,214c	0,339c	
	T4	0,109d		0,245d	0,349d	
		***		***	***	
Crop-Circle (NDVI)		30-8		18-9	30-9	
	T1	0,214b		0,447a	0,639a	
	T2	0,255c		0,502b	0,686b	
	T3	0,147a		0,513c	0,758c	
	T4	0,260d		0,582d	0,768d	
		***		***	***	

8. ANEJOS

ANEJO 3. Resultados variedad Barcelona, año 2014.

Producción (kg/ha)			Pellas	Hojas	Total	
	T1		7.328a	24.201a	31.529a	
	T2		11.068ab	30.553b	41.621ab	
	T3		14.517bc	34.952bc	49.470bc	
	T4		17.318c	38.965c	56.283c	
			***	***	***	
Ntotal (%)			10-9	26-9	15-10	3-11
	T1		4,96	3,27a	2,84a	2,27a
	T2		5,18	3,94b	3,91b	2,59a
	T3		5,13	4,32b	4,12bc	3,41b
	T4		4,94	4,11b	4,70c	3,46b
			ns	***	***	***
N-NO ₃ ⁻ savia (ppm)			10-9	29-9	17-10	
	T1		1.402	181a	4a	
	T2		1.436	499b	145ab	
	T3		1.375	686b	307b	
	T4		1.465	727b	813c	
			ns	***	***	
SPAD			10-9	29-9	17-10	
	T1		57,4	57,2	54,8a	
	T2		55,5	57,3	57,9b	
	T3		56,3	55,6	59,0bc	
	T4		57,2	55,4	62,5c	
			ns	ns	***	
DUALEX (Chl)			10-9	29-9	17-10	
	T1		45,38	44,09	39,44a	
	T2		44,65	44,01	43,11b	
	T3		45,18	42,11	45,13c	
	T4		44,43	43,44	48,19d	
			ns	ns	***	
DUALEX (NBI)			10-9	29-9	17-10	
	T1		34,73	28,35	24,42a	
	T2		34,84	28,50	28,63b	
	T3		34,79	28,24	32,17c	
	T4		34,90	29,75	36,60d	
			ns	ns	***	

8. ANEJOS

MULTIPLEX (SFR)			10-9	29-9	17-10	
	T1		4,91	4,62ab	4,46a	
	T2		4,93	4,75b	4,71b	
	T3		4,98	4,61a	4,79b	
	T4		5,02	4,92c	4,87b	
			ns	***	***	
MULTIPLEX (NBI)			10-9	29-9	17-10	
	T1		1,47a	0,92a	0,90a	
	T2		1,57ab	1,10b	1,17b	
	T3		1,49ab	1,29bc	1,46c	
	T4		1,65b	1,34c	1,78c	
			*	***	***	
Crop-Circle (NDRE)			10-9	29-9	14-10	
	T1		0,051c	0,198a	0,186a	
	T2		0,045b	0,223b	0,218b	
	T3		0,043a	0,241c	0,251c	
	T4		0,047b	0,243c	0,260d	
			***	***	***	
Crop-Circle (NDVI)			10-9	29-9	14-10	
	T1		0,149c	0,551a	0,593a	
	T2		0,142b	0,585b	0,635b	
	T3		0,138a	0,618c	0,687c	
	T4		0,144b	0,606c	0,673d	
			***	***	***	

8. ANEJOS

ANEJO 4. Resultados variedad Typical, año 2013.

Producción (kg/ha)			Pellas	Hojas	Total	
	T1		10.035a	32.066a	42.101a	
	T2		14.113ab	37.135ab	51.248a	
	T3		18.910bc	45.635ab	64.545a	
	T4		22.392c	50.811b	73.203b	
			**	**	**	
Ntotal (%)			26-8	16-9	7-10	21-11
	T1		4,47	4,44	3,61a	2,24
	T2		4,65	4,44	4,06ab	2,20
	T3		4,53	4,69	4,56b	2,67
	T4		4,75	4,65	4,60b	3,05
			ns	ns	*	ns
N-NO ₃ ⁻ savia (ppm)			29-8	19-9	8-10	4-11
	T1		1.265	413a	57a	2a
	T2		1.350	555b	368a	3a
	T3		1.389	601b	831b	67a
	T4		1.380	840b	962b	230b
			ns	***	***	***
SPAD			29-8	19-9	7-10	6-11
	T1		56,4a	55,9	59,7	58,2a
	T2		59,3ab	57,3	62,2	62,9b
	T3		58,6ab	55,9	61,8	63,4b
	T4		60,9b	57,7	62,8	64,8b
			*	ns	ns	***
DUALEX(Chl)			29-8	19-9	7-10	6-11
	T1		45,81a	47,17a	44,53a	44,09a
	T2		48,22a	50,02b	47,06ab	45,62a
	T3		48,97a	48,54a	48,31bc	48,61bc
	T4		51,23b	52,20b	49,18c	50,18c
			***	***	***	***
DUALEX (NBI)			29-8	19-9	7-10	6-11
	T1		34,37a	33,62	28,29a	26,28a
	T2		35,37a	35,27	32,54b	28,55a
	T3		35,84a	34,82	36,02c	33,54b
	T4		37,80b	37,37	38,32d	38,40c
			**	ns	***	***

8. ANEJOS

MULTIPLEX (SFR)			29-8	19-9	7-10	6-11
	T1		4,49	4,70a	4,39a	4,04a
	T2		4,77	4,80ab	4,67ab	4,14a
	T3		4,41	4,78ab	4,78bc	4,53a
	T4		4,53	4,87b	4,83c	4,57b
			ns	*	***	***
MULTIPLEX (NBI)			29-8	19-9	7-10	6-11
	T1		1,23	1,20a	0,97a	0,90a
	T2		1,28	1,28a	1,40b	0,93a
	T3		1,25	1,35ab	1,53b	1,74b
	T4		1,23	1,40b	1,78c	1,94b
			ns	*	***	***
Crop-Circle (NDRE)			29-8	19-9	7-10	6-11
	T1		0,031a	0,160b	0,312a	0,246a
	T2		0,030a	0,158b	0,334b	0,273b
	T3		0,031a	0,127a	0,347c	0,320c
	T4		0,035b	0,152b	0,355d	0,339d
			***	***	***	***
Crop-Circle (NDVI)			29-8	19-9	7-10	6-11
	T1		0,099a	0,371b	0,732a	0,696a
	T2		0,100a	0,364b	0,757b	0,721b
	T3		0,094a	0,294a	0,769c	0,759c
	T4		0,104b	0,337b	0,773d	0,766d
			***	***	***	***

8. ANEJOS

ANEJO 5. Resultados variedad Typical, año 2014.

Ntotal (%)			1-9	15-9	1-10	23-10
	T1		4,55	2,99a	1,67a	1,97a
	T2		4,25	3,84b	2,57b	2,65a
	T3		4,21	3,92b	3,37bc	3,57b
	T4		4,58	3,97b	3,76c	3,85b
			ns	*	***	***
N-NO ₃ ⁻ savia (ppm)			1-9	16-9	1-10	23-10
	T1		1.556	497a	8a	1
	T2		1.522	858b	138a	2
	T3		1.533	1.183c	483b	12
	T4		1.576	1.298c	729b	75
			ns	***	***	ns
SPAD			1-9	16-9	1-10	23-10
	T1		54,5	56,6a	56,1a	57,1a
	T2		55,5	57,7a	55,5a	61,0ab
	T3		56,1	60,9ab	58,2ab	62,8b
	T4		55,7	62,6b	60,5b	64,9b
			ns	**	**	***
DUALEX (Chl)			1-9	16-9	1-10	23-10
			45,48a	45,14a	40,47a	42,36a
			47,22ab	47,92b	42,16ab	48,35b
			47,67bc	49,48bc	44,50b	52,09c
			49,23c	52,17c	48,54c	53,34c
			***	***	***	***
DUALEX (NBI)			1-9	16-9	1-10	23-10
	T1		33,44a	29,41a	22,47a	22,67a
	T2		33,64a	34,32b	26,46b	28,00b
	T3		35,68ab	38,50b	31,94c	32,97c
	T4		37,28b	43,61c	35,32d	34,56c
			***	***	***	***
MULTIPLEX (SFR)			1-9	16-9	1-10	23-10
	T1		5,37	5,10a	4,52a	4,15a
	T2		5,45	5,33b	4,95b	4,46b
	T3		5,30	5,37bc	5,04b	4,73c
	T4		5,13	5,53c	5,43c	5,00d
			ns	***	***	***

8. ANEJOS

MULTIPLEX (NBI)			1-9	16-9	1-10	23-10
	T1		1,48b	1,04a	0,60a	0,41a
	T2		1,39b	1,43b	1,10b	0,94b
	T3		1,49b	1,60b	1,64c	1,51c
	T4		0,94a	1,90c	1,83c	1,48c
			***	***	***	***
Crop-Circle (NDRE)		3-9	16-9	1-10	14-10	23-10
	T1	0,034a	0,154a	0,207a	0,197a	0,156a
	T2	0,049c	0,207b	0,284b	0,262b	0,211b
	T3	0,047c	0,231c	0,342c	0,314c	0,267c
	T4	0,029b	0,209b	0,342c	0,331d	0,273d
		***	***	***	***	***
Crop-Circle (NDVI)		3-9	16-9	1-10	14-10	23-10
	T1	0,118a	0,417a	0,569a	0,608a	0,528a
	T2	0,150b	0,525b	0,710b	0,715b	0,652b
	T3	0,147b	0,571c	0,768c	0,758c	0,722c
	T4	0,116a	0,514b	0,763c	0,764d	0,709c
		***	***	***	***	***

8. ANEJOS

ANEJO 6. Resultados variedad Casper, año 2012.

Producción (kg/ha)			Pellas	Hojas	Total	
	T1		34.263	64.497	98.760	
	T2		33.287	61.073	94.360	
	T3		34.949	64.683	99.632	
	T4		33.855	62.165	96.019	
			ns	ns	ns	
Ntotal (%)		7-8	22-8	5-9	4-10	8-11
	T1	1,29	5,79	5,49	3,98	3,98
	T2	1,29	5,77	5,48	4,43	4,20
	T3	1,29	5,70	5,85	4,63	3,98
	T4	1,29			4,81	4,18
		ns	ns	ns	ns	ns
N-NO ₃ ⁻ savia (ppm)			22-8	4-9	3-10	5-11
	T1		5.363	6.013	1.463	925
	T2		4.850	6.225	2.688	1.413
	T3		4.963	5.588	2.150	1.150
	T4					
			ns	ns	ns	ns

8. ANEJOS

ANEJO 7. Resultados variedad Casper, año 2014.

Producción (kg/ha)			Pellas	Hojas	Total	
	T1		26.107a	55.535a	81.642a	
	T2		26.780a	59.660ab	86.440ab	
	T3		30.524b	64.130ab	94.654bc	
	T4		32.253b	66.780b	99.033c	
			**	***	*	
Ntotal (%)			9-9	2-10	20-10	20-10
	T1		5,50	2,85a	2,60	2,23
	T2		5,28	2,78a	2,76	2,46
	T3		5,03	4,02b	3,37	2,82
	T4		5,08	4,30b	3,24	2,99
			ns	***	ns	ns
N-NO ₃ ⁻ savia (ppm)			9-9	2-10	20-10	
	T1		1.147	13a	4a	
	T2		1.140	167a	16ab	
	T3		1.091	553b	58ab	
	T4		1.154	714b	159b	
			ns	***	*	
SPAD			9-9	2-10	20-10	
	T1		58,05b	51,10	56,64	
	T2		55,40ab	50,94	59,90	
	T3		53,91a	52,71	55,47	
	T4		55,13ab	52,78	59,45	
			*	ns	ns	
DUALEX(Chl)			9-9	2-10	20-10	
	T1		44,07	38,89a	44,82a	
	T2		43,55	40,85ab	46,55ab	
	T3		43,58	41,81b	45,42a	
	T4		44,31	41,22b	47,81b	
			ns	**	**	
DUALEX (NBI)			9-9	2-10	20-10	
	T1		34,25	24,44a	31,10a	
	T2		34,61	25,34a	33,20ab	
	T3		32,95	30,94b	30,11b	
	T4		35,14	33,34b	39,57ab	
			ns	***	***	

8. ANEJOS

MULTIPLEX (SFR)			9-9	2-10	20-10	
	T1		1,94	1,66a	1,69a	
	T2		1,92	1,64a	1,69a	
	T3		1,93	1,73ab	1,74ab	
	T4		1,98	1,80b	1,79b	
			ns	**	*	
MULTIPLEX (NBI)			9-9	2-10	20-10	
	T1		0,38	0,30ab	0,37a	
	T2		0,40	0,26a	0,45a	
	T3		0,36	0,44b	0,37a	
	T4		0,41	0,53b	0,60b	
			ns	***	***	
Crop-Circle (NDRE)			9-9	2-10	20-10	
	T1		0,132d	0,266b	0,251a	
	T2		0,108b	0,239a	0,248a	
	T3		0,085a	0,280c	0,270b	
	T4		0,124c	0,297d	0,290c	
			***	***	***	
Crop-Circle (NDVI)			9-9	2-10	20-10	
	T1		0,391d	0,686b	0,663a	
	T2		0,342b	0,641a	0,660a	
	T3		0,304a	0,696c	0,681b	
	T4		0,375c	0,711d	0,701c	
			***	***	***	