

**UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA**

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS AGRÓNOMOS Y MONTES**

**TESIS DOCTORAL**



**UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA**

**DETERMINACIÓN DE LAS NECESIDADES DE  
NITRÓGENO DE UN GREEN MEDIANTE  
SENSORES REMOTOS**

**Director: D. Rafael J. López-Bellido Garrido**

**Doctorando: Sara Calvache Gil**

TITULO: *Determinación de las necesidades de nitrógeno de un green mediante sensores remotos*

AUTOR: *Sara Calvache Gil*

---

© Edita: Servicio de Publicaciones de la Universidad de Córdoba. 2014  
Campus de Rabanales  
Ctra. Nacional IV, Km. 396 A  
14071 Córdoba

[www.uco.es/publicaciones](http://www.uco.es/publicaciones)  
[publicaciones@uco.es](mailto:publicaciones@uco.es)

---



**TÍTULO DE LA TESIS: "DETERMINACIÓN DE LAS NECESIDADES DE NITRÓGENO DE UN GREEN MEDIANTE SENSORES REMOTOS"**

**DOCTORANDO:** Sara Calvache Gil

**INFORME RAZONADO DEL/DE LOS DIRECTOR/ES DE LA TESIS**

La doctorando realizó su Tesis Doctoral desde 2008 a 2013, período en el que se llevó a cabo una labor de investigación en la temática de los céspedes de campos de golf, concretamente en el estudio de la calidad de los greens. La tesis se ha basado, en la determinación de las necesidades de N de un green mediante dos sensores remotos: una cámara digital y un medidor de reflectancia, y la relación de éstos con la producción de clipping y de la velocidad de la bola. Se evaluó la calidad estética y las condiciones de juego del green en respuesta a la aplicación de diferentes dosis de N. El objetivo fue desarrollar modelos para la determinación de las necesidades de N del green. Los resultados permitieron determinar la cantidad de N a aplicar en función de la calidad estética y la jugabilidad del green en las distintas estaciones de crecimiento. Estos modelos suponen una contribución muy significativa para la minimización de la cantidad de nitrógeno fertilizante a aplicar y ventajas económicas y ambientales asociadas al mantenimiento del campo de golf. Derivado de su tesis doctoral y de los trabajos realizados en el seno del grupo de investigación (AGR-140) y de su estancia en un centro de investigación extranjero, ha participado en las siguientes publicaciones:

- "Nitrogen remote diagnosis in a creeping bentgrass golf green". 2012. López-Bellido, R.J., López-Bellido, L., Fernández-García, P., López-Bellido, JM., Muñoz-Romero, V., López-Bellido, P.J., **Calvache, S.** European Journal of Agronomy. 37, 23-30.
- "Soil carbon measurement in clods and sieved samples in a Mediterranean Vertisol by Visible and Near-Infrared Reflectance Spectroscopy". 2010. Fontán, J.M., **Calvache, S.**, López-Bellido R.J., López-Bellido, L. Geoderma (Elsevier Editorial System). 156, 93-98.
- "Rooting Depth, Soil Type, and Application Rate Effects on Creeping Bentgrass Injury with Amicarbazone and Methiozolin". 2013. Brosnan, J.T.; **Calvache, S.**; Breeden, G. K.; et al. Crop Sci. 53, 655-659.

Por todo ello, se autoriza la presentación de la tesis doctoral.

Córdoba, \_\_30\_\_ de \_\_Septiembre\_\_ de \_\_2013\_\_

Firma del director

Fdo.: \_\_Rafael J. López-Bellido Garrido

## AGRADECIMIENTOS

La consecución de esta tesis no habría sido posible sin tantas personas que de una u otra manera me han ayudado, a las que desde aquí les quiero dar mi más sincero agradecimiento, especialmente:

Al prof. Rafael López-Bellido Garrido, por su orientación y su transmisión de conocimiento científico, por su paciencia y guía en el desarrollo de la tesis.

Al prof. D.Luís López Bellido, por abrirme las puertas y brindarme la oportunidad de conocer el camino del doctorado. Por su inestimable apoyo y sus sabios consejos.

Al los Drs. José M. Fontán del Junco y Jorge Benítez Vega por sus ánimos y su apoyo incondicional, profesional y personal.

A la Dra.Verónica Muñoz Romero, a Dña. Purificación Fernández García y a D. Luís Filipe Ponte Peças, por su inestimable ayuda diaria y su infinita paciencia.

A D. Pedro López-Bellido, a D. Joaquín Muñoz y a D. José Muñoz, por ser insustituibles compañeros en el trabajo de campo.

A Dña.Pilar Porcel y Dña. Auxiliadora López- Bellido, por su ayuda en la ardua labor burocrática que acompaña a la investigación.

A los profesores de la Universidad de Tennessee, especialmente al Dr. Stier, Dr. Sorochan, Dr. Samples y Dr. Brosnan por su ayuda científica y su apoyo.

Al Ministerio de Educación, Cultura y Deporte, a la Universidad de Córdoba y a la Universidad de Tennessee por su financiación para desarrollar este trabajo.

Mención especial para mi familia, concretamente para mis padres, por mostrarme ese apoyo incondicional, por alegrarse con mis triunfos y sufrir con mis fracasos; para mis hermanas, por su ayuda cercana y su disponibilidad desinteresada, y a toda mi familia por siempre estar ahí. Asimismo, no puedo olvidarme de mis amigos, mi segunda familia, por saber escuchar, aconsejar y ayudar cuando más les necesito.

# RESUMEN

## RESUMEN

El N es el macronutriente que más influye en la calidad de los greens de los campos de golf, tanto en el aspecto estético como en las condiciones de juego. Actualmente, la mayor parte de fertilización nitrogenada se basa en una programación más o menos predeterminada de aplicaciones que conduzcan a una esperada mejora de la calidad estética y de juego. Sin embargo, esta forma de actuar genera, en la mayoría de los casos, una sobre-fertilización. El objetivo de este estudio fue buscar modelos predictivos de las necesidades de N fertilizante estacionales para optimizar la calidad del green, basándose en medidas realizadas con sensores remotos. Para ello se llevó a cabo un experimento de 3 años de duración en un green USGA de *Agrostis stolonifera* L. bajo condiciones mediterráneas. Los tratamientos de N aplicados cada 10 días fueron 0, 3, 6, 9 kg N ha<sup>-1</sup> en verano e invierno, y 0, 5, 10, 15 kg N ha<sup>-1</sup> en primavera y otoño. En el estudio se midió la calidad estética (mediante sensor remoto), clipping y distancia de rodadura. Los sensores remotos utilizados fueron un medidor de clorofila por reflectancia (FieldScout CM1000) y una cámara digital. A partir de las fotografías digitales se obtuvo el Dark Green Color Index (DGCI). Todos los datos fueron normalizados. Se evaluaron los diferentes modelos de respuesta al N fertilizante de las medidas mencionadas. Para ambos sensores, el más adecuado para todas las estaciones fue el polinómico de tercer orden. Mientras que para la producción de clipping y distancia de rodadura de la bola fueron lineales. La calidad estética obtenida por ambos sensores y el clipping aumentaron con la dosis de N fertilizante, mientras que la distancia de rodadura disminuyó al incrementarse ésta. Los valores obtenidos por los dos sensores estuvieron correlacionados con los valores de clipping y de distancia de rodadura. Se calculó la intersección de los modelos obtenidos del CM1000 y de la cámara digital con la distancia de rodadura de la bola y el clipping, para obtener los algoritmos como una función de los sensores remotos y los otros parámetros medidos. A partir de los algoritmos se determinaron las dosis óptimas de N fertilizante para cada estación. El modelo se adaptó mejor al factor distancia de rodadura de la bola que al clipping. El modelo obtenido para el CM1000 fue más preciso que el de la cámara digital. Ésta última subestimaba los valores de dosis óptima de N. Para solventar esta falta de precisión de la cámara se correlacionaron los valores del CM1000 y de la cámara digital, desarrollando un algoritmo que permitió la transformación de los valores DGCI en CM1000, y así, se pudieron aplicar los modelos de CM1000. Gracias a este paso, fue posible la obtención de prácticamente las mismas aplicaciones de N fertilizante con

ambos sensores. Este estudio permite realizar recomendaciones de aplicaciones reales de N con un rápido diagnóstico con un sensor remoto, Field Scout CM1000 o cámara digital, para un green de *A. stolonifera* de un campo de golf en condiciones mediterráneas basándose en el concepto de índice de suficiencia.

# SUMMARY



## SUMMARY

Nitrogen is the macronutrient that most influences in golf greens quality, both in terms of aesthetics as well as playability. At present, the greater part of the nitrogen fertilization is based on a more or less predetermined scheduled applications that lead to an expected improvement of aesthetic quality and playability. Nevertheless, such action generates over-fertilization in most cases. The objective of this study was to obtain predictive models of the seasonal needs of N fertilizers to optimize the green quality, based on measurements obtained with remote sensors. In order to achieve this, a 3-yr field study was carried out on *Agrostis Stolonifera* L. on a USGA green under Mediterranean conditions. Treatments of 0, 3, 6, 9 kg N ha<sup>-1</sup> were applied every ten days in summer and winter, and 0, 5, 10 and 15 kg N ha<sup>-1</sup> in spring and autumn. In the study, aesthetic quality (remote sensing), clipping yield and ball roll distance (green speed) were measured. The remote sensors used were a reflectance chlorophyll meter (FieldScout CM1000) and a digital camera. From the digital photographs, a dark green color index (DGCI) was calculated. All data were normalized. Different response models to N fertilizer in the measurements named above were evaluated. For both sensors, the third-order polynomial response model for all seasons was the best fitted, while for clipping yields and ball roll regressions were linear regressions. The aesthetic quality calculated by both sensors and clipping yield both increased with N fertilizer rate, while ball roll diminished when it was increased. The values calculated by the both sensors were correlated with the values of clipping yields and ball roll distance. The intersection of the models obtained from CM1000 and the digital camera with ball roll distance and clipping yield was calculated to obtain the algorithms as a function of the remote sensing and the other measured parameters. The N optimum fertilizer rate for each season was determined from the algorithms. The model was adapted better to the factor of ball roll distance than to clipping yield. The model of the CM1000 was more accurate than that of the digital camera. The latter underestimated the N optimum rate. In order to solve this lack of accuracy in the camera, the values of CM1000 and the digital camera were correlated developing an algorithm that permitted the conversion of the DGCI values in CM1000, thus the models of CM1000 could be applied. Thanks to this step, the obtaining of practically the same applications of N fertilizer with both sensors was possible. With this study, actual N recommendation applications by rapid diagnosis with remote sensors, FieldScout CM1000

and digital camera are feasible for *A. stolonifera* golf green under Mediterranean conditions based on the sufficiency index.

# ÍNDICE GENERAL

# ÍNDICE GENERAL

RESUMEN .....	3
SUMMARY .....	7
ÍNDICE GENERAL .....	11
1. INTRODUCCIÓN.....	15
1.1- Agrostis stolonifera y greens.....	15
1.2- Fertilización nitrogenada .....	17
1.1.1- La importancia de una correcta fertilización .....	17
1.1.2- Efectos de una sobre-fertilización .....	19
1.1.2.1- Lixiviación de N .....	19
1.1.2.2. Incremento del espesor del thatch .....	22
1.1.2.3. Incremento de la producción de clipping .....	24
1.1.2.4. La velocidad del green .....	25
1.2 Métodos de determinación de las necesidades de N .....	26
1.2.1. Clásicos.....	26
1.2.1.1. Análisis de muestras de suelo .....	27
1.2.1.2. Test rápido de tejidos de las plantas (sap).....	27
1.2.1.3. Estimación visual del color .....	28
1.2.2. Nuevos .....	29
1.2.2.1. Colorímetros .....	29
1.2.2.2. Membranas de intercambio de aniones .....	30
1.2.2.3. Cámara digital .....	30
1.2.2.4. Medidores de la clorofila por la reflectancia .....	32
1.3. Necesidad de un modelo con aplicación práctica.....	33
2. OBJETIVOS .....	37
3. MATERIAL Y MÉTODOS.....	40
3.1. Localización y diseño experimental .....	40
3.2. Manejo .....	40
3.3. Instrumentación y medidas .....	41
3.4. El análisis estadístico.....	44
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	48
4.1. Medidor de reflectancia.....	48
4.2. Cámara digital .....	51

4.3. Distancia de rodadura de la bola y clipping .....	55
4.4. Modelos de fertilización .....	58
4.5. Aplicación del modelo en un campo de golf.....	64
5. CONCLUSIONES .....	70
6. CONCLUSIONS.....	73
7. REFERENCIAS.....	76

# **1. INTRODUCCIÓN**

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1- *Agrostis stolonifera* y greens

Una de las especies primordiales y más requeridas en la industria del golf en cuanto a la calidad del césped y a las condiciones del juego es *Agrostis stolonifera*. El nombre *Agrostis* procede del griego y significa "hierba", de ahí que la ciencia de las hierbas gramíneas se denomine Agrostología. Actualmente este género contiene más de 220 especies, sin embargo, sólo unas pocas se pueden englobar entre las cespitosas. Entre ellas podemos destacar *Agrostis stolonifera* (creeping bentgrass), *A. canina* L. (velvet bentgrass), *A. tenuis* o *capillaris* Sibth. (colonial bentgrass), *A. castellana* (dryland bentgrass) y *A. alba* (redtop) (Christians, 1998).

*Agrostis stolonifera* o más conocida como creeping bentgrass, es un césped perenne de estación fría. Debe su nombre a la forma de reproducirse mediante vigorosos estolones que desarrollan en la superficie del suelo, de cuyos nudos nacen nuevas raíces y tallos. Es una especie de césped procedente de Eurasia, pero extendida mundialmente gracias a su adaptación en su uso a diferentes áreas (Beard, 1973). Presenta una vernación circular y hojas en punta, aparte de una lígula membranosa y prominente que la hace fácilmente reconocible. Es capaz de proveer un firme denso y uniforme, de alta calidad, gracias a ser un césped agresivo, de textura fina y formador de tepes con facilidad. Puede tolerar una baja altura de corte y con mayor frecuencia que otros céspedes. En los greens se suele cortar a 3 mm y puede crear una buena cubierta de césped incluso a 2.5 mm aproximadamente. En fairways, provee un excelente césped si se corta aproximadamente a 12.5 mm, lo que hizo que se extendiese su uso en la década de los 90, sobre todo en zonas más frías donde la bermuda no daba buen resultado (Christians, 1998). Por todas estas razones, *Agrostis stolonifera* ha sido la elección por excelencia en la mayoría de greens de campos de golf a lo largo de Estados Unidos y resto del mundo.

*Agrostis stolonifera* se adapta mejor a temperaturas más bajas que las especies de estación cálida, sobrevive bien entre los 18 y 24 °C, sin embargo, es capaz de soportar altas temperaturas durante los meses de verano, pero el crecimiento radicular y el de los tallos se

ve seriamente afectado, reduciendo la calidad del césped durante la época estival (Sprague, 1933). Las especies de estación fría emergen de la dormancia y crecen muy rápidamente en la primavera, ralentizándose el crecimiento en verano, para luego aumentar de nuevo en otoño pero no al ritmo que lo hacen en primavera. Los céspedes de estación fría mantienen bien el color verde en el otoño, y puede permanecer verde en el invierno (Christians, 1998).

Las especies de estación fría se conocen como céspedes  $C_3$ , debido a que su sistema fotosintético comienza el proceso de producción de carbohidratos con un compuesto de tres carbonos (Jones, 1985). Las especies  $C_3$  presentan raíces menos profundas que las  $C_4$ . Ésta es la razón, por la que *A. stolonifera*, que se adapta mejor a climas fríos, tenga dificultad para crecer a una altura de corte mayor en verano (Christians, 1998).

*A. stolonifera* tiene un sistema radicular relativamente superficial, denso, fibroso, que requiere un reemplazamiento anual de raíces, especialmente bajo altas temperaturas del suelo. Una altura de corte muy baja y altas temperaturas conducen a un sistema radicular pobremente desarrollado y a limitadas posibilidades de absorción de agua (Christians, 1998). Posiblemente la causa de su disminución en el crecimiento durante la época estival se deba a los efectos del estrés en algunas actividades de la planta como la fotorrespiración (Lui y Huang, 2003).

*Agrostis stolonifera* no es una especie que se adapte bien como césped de jardín, pues requiere una maquinaria específica y un mantenimiento muy delicado y constante (Christians, 1998). El desarrollo de *Agrostis stolonifera* como semilla germinada y la adaptación de prácticas de manejo que favorecieron su uso en los campos de golf, la convirtieron en una de las especies más usadas en los putting greens (Skogley, 1975; Brilman, 2003; Warnke, 2003).

El green es la parte que requiere un cuidado más intensivo y a la vez es la más valorada por los jugadores de golf. A pesar de presentar una extensión aproximada menor al 2% del total del campo de golf, necesita un mantenimiento desproporcionado en relación con su área. Precisa una alta cantidad de recursos para un óptimo mantenimiento (Schlossberg y Smith, 2007). El auge de este deporte en los últimos años ha llevado a los greenkeepers a buscar prácticas de mantenimiento del césped que reduzcan los inputs (agua, nutrientes, insecticida, etc.) debido a la presión social y al coste económico. Uno de los más importantes es la aplicación de N.



## **1.2- Fertilización nitrogenada**

De los nutrientes esenciales, el N es el que se requiere en mayor cantidad y, por lo general, el que influye más significativamente en el crecimiento y calidad de un green (Schlossberg y Schmidt, 2007), ayudando a reducir el estrés al que se somete el césped por un manejo e intensivo uso (Trenholm *et al.*, 2000).

La fertilización nitrogenada es un componente muy importante en la gestión de mantenimiento de un green. Por ello se ha llevado a cabo una buena investigación sobre este aspecto, sin embargo, la interpretación y aplicación práctica de los resultados se ve influida por muchos factores como la frecuencia y altura de corte, los tipos de cultivares, la variación de la calidad del agua de riego y los tipos de fertilizantes orgánicos (Schlossberg y Schmidt, 2007).

Los fertilizantes nitrogenados se consideran actualmente una de las fuentes principales de contaminación por nitrato de las aguas subterráneas. La mejora de la eficiencia en el uso de estos fertilizantes reduce la cantidad de N que potencialmente puede contaminar los recursos hídricos (Peterson *et al.*, 1993). La contaminación de las aguas subterráneas a causa de la mala gestión de los campos de golf, es objeto de las críticas de los ecologistas en cuanto a la práctica de este deporte cada vez más emergente. La gestión eficaz de los fertilizantes nitrogenados es un gran desafío para los greenkeepers de los campos de golf. Los factores que pueden afectar a una adecuada gestión pueden no depender del gestor como son las condiciones climáticas, las limitaciones del instrumental de medida o del equipo de aplicación, la mano de obra o el tipo de fertilizantes usados. Sin embargo, a pesar de la cada vez mayor concienciación de los greenkeepers, muchos de ellos se inclinan por una gestión de los fertilizantes nitrogenados que tienda a minimizar los riesgos de deficiencia, lo que les lleva a una aplicación excesiva de fertilizantes.

### **1.1.1- La importancia de una correcta fertilización**

En la actualidad se tiende a realizar una fertilización nitrogenada mediante una programación predeterminada, que conduce a una aplicación excesiva de fertilizantes. Sin embargo, se ha comprobado que aplicaciones óptimas de este macronutriente, en situaciones

idóneas de crecimiento de la planta sin carencia de otros nutrientes, el N genera una superficie de césped de alta calidad en densidad de tallos, color y uniformidad, así como vigor (Waddington *et al.*, 1978), equilibrio entre la biomasa aérea y radicular (Schlossberg y Karnok, 2001), una mayor capacidad regenerativa y un buen estado fisiológico de la planta (Davis y Dernoeden, 2002).

De acuerdo con las investigaciones que realizaron Schlossberg y Karnok (2001), el N influye en la obtención de una adecuada proporción entre el sistema radicular y la parte aérea del césped. Ellos estudiaron el efecto de tres dosis de N (195, 390, and 586 kg N ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>) en la calidad de un césped de *Agrostis stolonifera* cv. L-93, obteniendo una mayor calidad y densidad de tallos en el tratamiento con mayor dosis de N, sin embargo, para la dosis media observaron una mejor significación estadística para la longitud radicular. Por ello, afirmaron que la dosis óptima de N para L-93 dependerá de cuanta longitud radicular se esté dispuesto a sacrificar a favor de la producción de biomasa aérea y de su calidad.

La fertilización nitrogenada está intrínsecamente relacionada con la calidad del césped de *Agrostis stolonifera* en cuanto a crecimiento, color y densidad de tallos (Green y Beard, 1969; Powell, Blaser y Schmidt, 1967a,b; Schmidt y Blaser, 1967). Cuando se aumenta la dosis de N también lo hace el número de tallos de *Agrostis stolonifera*. Sin embargo, el efecto de las dosis de N sobre el crecimiento de tallos y su recuperación, se ve afectado por la interacción con la temperatura. Hawes y Decker (1977) evaluaron el potencial de recuperación de esta especie relacionando diferentes dosis de N y temperaturas, concluyendo que a temperaturas más bajas una mayor dosis produce una mejor recuperación, mientras que a temperaturas superiores son más efectivas las dosis bajas y medias de N (Schlossberg y Karnok, 2001).

La forma nitrogenada es uno de los factores que influye en una óptima fertilización nitrogenada. Schlossberg y Smith (2007) afirmaron que la adicción al green de N amoniacal soluble N-NH<sub>4</sub>, teniendo unos niveles de pH neutros y suelos de textura fina, es más eficaz en comparación con la aplicación de N únicamente en forma nítrica N-NO<sub>3</sub>. Los tratamientos que contienen más N amoniacal incrementan significativamente el crecimiento, el color, la absorción de N y los niveles de nutrientes en hojas, comparado con los tratamientos que tienen más N en forma de nitrato.

La mayor parte de la investigación en fertilización en césped ha sido conducida con distintas fuentes y niveles de N. Con tratamientos de Agrinita y Milorganita, fuentes de N, se observa menos marchitez en verano. La fertilización con urea, reduce la infección por dollar spot (*Sclerotinia homeocarpa* F.T.Bennett). La disminución de dollar spot se asocia más con la disponibilidad de N que con la actividad microbiana en *Agrostis stolonifera*, estudiada en fairway. Por otro lado, los fertilizantes orgánicos comparados con los fertilizantes nitrogenados sintéticos, no reducen el thatch o las densidades de población de nematodos parásitos de las plantas. Fertilizantes nitrogenados, como el Sustane, incrementan los niveles de materia orgánica en los primeros 2.5 cm de suelo, pero no los incrementa de los 2.6 a los 5 cm de profundidad (Davis y Dernoeden, 2002).

### **1.1.2- Efectos de una sobre-fertilización**

Actualmente la sociedad es más consciente de los efectos dañinos sobre el medio ambiente debido a un uso impropio de los fertilizantes nitrogenados (Barton y Colmer, 2006). Una deficiente fertilización de N conlleva entre otras consecuencias la pérdida de color, de vigor, de biomasa aérea y radicular..., en general, una mala calidad del césped. De la misma forma, una excesiva fertilización nitrogenada puede producir efectos indeseados sobre la misma.

#### **1.1.2.1- Lixiviación de N**

No sólo sobre el césped, sino que una fertilización nitrogenada inadecuada puede afectar al sistema medioambiental en general, como a la capa de ozono al incrementar las emisiones de gases de efecto invernadero  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  y  $\text{NH}_3$ , o como los lixiviados de N que son tan problemáticos que pueden dañar las aguas tanto superficiales como subterráneas, dando lugar a una posible eutrofización y convirtiendo las aguas en no potables (Barton y Colmer, 2006).

Limitar el lixiviado de N de terrenos cultivados y establecer y mejorar las prácticas de gestión de los mismos, es una prioridad internacional. La baja capacidad de retener nutrientes y agua de los greens, puede llevar al lavado de nitratos y los consiguientes efectos negativos

sobre las aguas superficiales y subterráneas (Brown, 1982; Petrovic, 1990; Quiroga-Garza *et al.*, 2001; Keskin *et al.*, 2004; Paré *et al.*, 2008).

Un mantenimiento adecuado del césped debe evitar el movimiento del N desde la superficie hasta las aguas subterráneas, ya que puede llevar a la alteración de acuíferos y del agua destinada al consumo humano. Una gestión eficiente del riego es crítica en este contexto, enfocada a una mayor eficiencia del uso del N. El objetivo es que la profundidad de alcance del agua no supere la zona activa radicular, así disminuye el riesgo de lixiviado de los céspedes, e incluso mejora el crecimiento y calidad del césped (Barton y Colmer, 2006).

Controlar los lixiviados es complicado, pues frecuentemente van asociados a actividades estacionales de mantenimiento del césped y/o a lluvias y a alteraciones del suelo. Sin embargo, si se aplican fertilizantes en dosis y frecuencias que cubran las necesidades del césped, disminuye el lixiviado de N de céspedes establecidos (Barton y Colmer, 2006). Paré *et al.* (2008) desarrollaron modelos de fertilización “spoon-feeding”, basados en aplicaciones de N ligeras y frecuentes, y a ser posible varias veces por semana o quincena. Un diseño de manejo con aplicaciones de fertilizantes frecuentes y ligeras, optimiza la salud de las plantas y la recuperación de nutrientes (Bowman, 2003).

Petrovic (1990a) y Qian *et al.* (2003) afirmaron que las necesidades de N del césped disminuyen con el tiempo, deduciéndose que los mayores incrementos de lixiviado de N se pueden producir durante el establecimiento del césped, cuando las alteraciones de suelo aumentan. Para las especies de estación fría marcan un antes y un después a los 10 años tras su establecimiento, disminuyendo sus necesidades de N desde los 10 a los 60 años (Barton y Colmer, 2006). Petrovic (1990a) propuso ajustar las cantidades estándar de los céspedes establecidos para minimizar los lixiviados de N. Para determinar las cantidades de N a añadir a un césped, también se debe tener en cuenta si los clippings se devuelven al mismo una vez cortado el césped, pues eso incrementa el reservorio de N (Starr y DeRoo, 1981; Heckman *et al.*, 2000; Kopp y Guillard, 2002).

La cantidad lixiviada de N también depende del tipo de fertilizante aplicado. Si se usan fertilizantes solubles en agua, se deben aplicar dosis más pequeñas y más frecuentes para minimizar el lixiviado de N. Sin embargo, fertilizantes menos solubles en agua como fertilizantes de liberación lenta o controlada pueden aplicarse en mayores dosis y menos

frecuentes sin aumentar el lixiviado (Snyder *et al.*, 1984; Engelsjord y Singh, 1997). También, Schlossberg y Smith (2007) recomendaron el uso de dichos fertilizantes, ya que suministran nutrientes de una manera adecuada, evitando la deshidratación de tejidos y minimizando los riesgos de lixiviado.

Las pérdidas de N por lixiviado deberían ser bajas para cualquier tipo de fertilizante, si las cantidades añadidas de fertilizantes nitrogenados son coherentes con las necesidades estacionales del césped y la cantidad de riego no produce que los nutrientes se pierdan en zonas más profundas, por debajo de la zona radicular (Schlossberg y Smith, 2007).

El momento de aplicación de los fertilizantes se debe hacer cuando el césped se encuentra en fase de crecimiento, para minimizar el lixiviado de N. En el caso de las especies de estación fría, sucede en su rango óptimo de temperatura, de 16 a 24°C (Hartley, 1950; Beard, 1973; Hull, 1992). Para las especies de estación fría, Turner y Hummel (1992) recomendaron las aplicaciones en primavera y otoño. Cuando se aplica en otoño tardío se mejora la calidad estética en cuanto a color y crecimiento del césped en primavera, pero se puede incrementar el riesgo de lixiviado de N durante el invierno.

Amberger (1989) propuso disminuir el lixiviado de N y aumentar la eficiencia de uso de los fertilizantes nitrogenados, añadiendo inhibidores para la nitrificación. Al disminuir la nitrificación, el N, procedente de los fertilizantes y el presente en el suelo, se mantiene en forma de amonio por más tiempo, reduciendo el riesgo de lixiviado de nitratos. El N en forma de nitratos y amonios, puede ser absorbido por las raíces, así que el N mantenido en forma de amonio es tomado por la planta. Para céspedes Amberger (1989) usó la dicyandiamida, que mejoró el crecimiento y el color al ser añadido con los fertilizantes de urea o de amonio (Mosdell *et al.*, 1986).

La longitud radicular más que la eficiencia de uso de N también influyen en las pérdidas de N por lixiviado en creeping bentgrass. Según Bowman et al. (1998) fue mayor el lixiviado de N en el genotipo de *Agrostis stolonifera* que presentaba raíces superficiales que en el que presentaba raíces más profundas.

Los lixiviados disminuyen cuando se mejore la eficiencia del uso del N cambiando la forma de gestionarlo (Barton y Colmer, 2006). También se reducirán cuando la dosis de N

aplicada sea aquella que el cultivo pueda asimilar o utilizar (Carpenter *et al.*, 1998). La asimilación del N depende de los requisitos de N del cultivo, pero también de las características biológicas, químicas y físicas del suelo. El N de los fertilizantes puede ser asimilado por el césped, denitrificado, o transformado en gas N por los microorganismos del suelo o inmovilizado en la materia orgánica del suelo (Petrovic, 1990a). Al devolver el clipping al césped, se puede incrementar consecuentemente la cantidad de N añadida al césped, lo que habrá que tener en cuenta para calcular las dosis de fertilizante (Starr y DeRoo, 1981; Qian *et al.*, 2003).

La absorción de N por la planta, y los procesos biológicos del suelo ocurren en mayor medida en la parte superficial del suelo, en comparación con las partes profundas, por lo que las prácticas culturales que aumenten el tiempo de contacto entre los nutrientes aplicados y la parte superficial del suelo, deberían incrementar la absorción por la planta y la retención en el suelo y disminuir el lixiviado de N (Barton y Colmer, 2006).

Idealmente el N debería ser aplicado a unas dosis y frecuencias coherentes con la demanda del césped y si es posible no antes de fuertes precipitaciones (Brown *et al.*, 1977; Snyder *et al.*, 1984; Morton *et al.*, 1988; Miltner *et al.*, 1996; Engelsjord y Singh, 1997).

Otro elemento que puede ayudar a la reducción de lixiviados es la turba. Aumentar la proporción de turba en la relación turba/arena disminuye el lixiviado de N del césped fertilizado mensualmente, más que si se fertiliza bisemanalmente con un fertilizante nitrogenado soluble (Engelsjord y Singh, 1997). En la carencia de césped, la efectividad de las enmiendas depende de su capacidad de intercambio catiónico, del ratio y de la profundidad de incorporación (Adriano y Weber, 2001; Pathan *et al.*, 2004).

#### **1.1.2.2. Incremento del espesor del thatch**

El thatch es una capa compuesta de restos orgánicos y de raíces y tallos vivos (Hurto y Turgeon, 1978). Se sitúa sobre el suelo y bajo la cubierta vegetal. Según Callahan *et al.* (1998), McCarty *et al.* (2007) y Carley *et al.* (2011) un excesivo espesor de thatch, limita la

permeabilidad del green, representando uno de los problemas más complejos del manejo del césped.

Por tanto, es lógico esperar una acumulación de materia orgánica en cualquier césped. El crecimiento de los céspedes es una continua progresión de muerte y nuevo crecimiento. Estos restos orgánicos se descomponen gracias a la actividad biológica de microorganismos, dando lugar a un humus que ayuda a la construcción del suelo. Los tallos y raíces de *Agrostis stolonifera* llegan a ser elevados en las capas orgánicas, y las plantas pueden ser más susceptibles a sufrir daños por enfermedades o estrés durante el verano (Turgeon, 2008).

Una mala gestión del césped, probablemente demasiado intensiva, produce un thatch excesivo. Esto es como consecuencia de que nuevo tejido se produce más rápido de lo que la actividad microbiana tarda en descomponerlo (Christians, 1998). Baja actividad microbiana, suelos con un alto pH y sobre todo una excesiva fertilización de N, contribuyen a la acumulación de thatch. Ésta última, somete el césped a un crecimiento exagerado, que no puede ser degradado por la población microbiana. Algunos autores como Davis y Dernoeden (2002) demostraron en su estudio que todas las parcelas que fueron fertilizadas incrementaron su thatch comparadas con las que no lo fueron.

Los beneficios de un buen thatch (12 mm o menos) es que es un buen medio para el desarrollo de los macro y microorganismos. Un thatch moderado provee una buena amortiguación en superficie, necesaria para las áreas de juego (Turgeon, 1979). Es una capa orgánica que sirve como filtro natural para reducir la incorporación de pesticidas a las aguas subterráneas (Horst *et al.*, 1996). Esto ayuda a moderar el estrés debido a las altas temperaturas estivales y ayuda a prevenir la infestación de malas hierbas.

Sin embargo, un thatch excesivo tiene efectos negativos, puede provocar que el sistema de raíces se quede en el thatch y el enraizamiento en las capas inferiores puede ser limitado (Hurto *et al.*, 1980), como el thatch es un medio relativamente pobre en nutrientes, daría lugar a deficiencias en nutrición para el césped y por otro lado, un thatch grueso es presa fácil de patógenos del césped. En este caso el *Pythium* podría darse fácilmente. Un thatch grueso puede actuar también como una capa aislante que separe las coronas de césped del suelo, evitando que éste último actúe como amortiguador en caso de cambios bruscos de temperatura. Las sequías estivales y los fríos del invierno dañaran más al césped. Otra

consecuencia de un thatch grueso es la elevación de las coronas por el aumento de capas del thatch, dando un efecto “puffy” (hinchado), y el consecuente riesgo de que mucha biomasa sea arrastradas en el corte de césped, lo que se conoce como scalping. Esto ocurre cuando el corte se lleva una cantidad elevada de biomasa aérea, tanta que al césped no le dé tiempo a equilibrar la densidad y no pueda adaptarse al cambio. Esto puede producir fuertes daños e incluso la muerte del césped (Christians, 1998).

El thatch en un green de *Agrostis stolonifera* debe ser controlado para evitar todos los efectos negativos mediante el pinchado, el corte vertical, la aplicación de agentes humectantes y otros medios (Callahan *et al.*, 1997).

### **1.1.2.3. Incremento de la producción de clipping**

Un aumento de la dosis de fertilización nitrogenada conlleva una mayor producción de clipping (materia seca o biomasa aérea obtenida tras el corte), así como una mayor concentración de N foliar, por lo que también un mayor color, y un incremento en la concentración de nutrientes en la hoja como N, K, Ca, Mn, Cu y Zn sobre todo si la fertilización se basa en la forma amoniacal (Schlossberg y Smith, 2007). Tratamientos de N, P, y K afectan al crecimiento, calidad y composición elemental de los clipping (Waddington, 1978).

El thatch, los clippings y la materia orgánica del suelo son conocidos sumideros de N en los sistemas de césped (Petrovic, 1990). El clipping, si se devuelve al sistema de césped, proveería una adicional fuente de N, que se debería tener en cuenta en el diseño de dosis predeterminadas de fertilizantes nitrogenados.

Un elevado clipping no es una característica deseable en sí, sin embargo, debe ser considerado como una medida global de la vitalidad del green (Mangiafico y Guillard, 2005). Davis y Dernoeden (2002), Fu *et al.* (2009) y López-Bellido *et al.* (2010) demostraron como al aumentar la dosis de N se incrementa la materia orgánica del suelo en los primeros 2.5 cm.

Los greenkeepers buscan una superficie de buena calidad (cobertura, color y fuerza); sin embargo, no es necesaria una elevada producción de biomasa aérea o clipping, ya que



incrementa los costes de mantenimiento por el aumento del clipping y del thatch (Barton y Colmer, 2006; Pease *et al.*, 2011).

El clipping se usa en ocasiones, como indicador de la salud general de la planta y respuesta típicamente positiva al incremento de de dosis de N (Carrow *et al.*, 2001). Pease *et al.* (2011) encontraron respuesta positiva en la producción de clipping de velvet bentgrass cuando aumentaron las dosis de N.

#### **1.1.2.4. La velocidad del green**

Otro efecto negativo de una excesiva fertilización nitrogenada está relacionado con la calidad de juego, es decir, la velocidad del green, la cual decrece al aumentar la dosis de N fertilizante (Streich *et al.*, 2005; Pease *et al.*, 2011). Schlossberg y Smith (2007) afirmaron que la sobre-fertilización nitrogenada conlleva dos efectos negativos: el aumento de producción de materia seca (clipping) y, consecuentemente, la reducción de la velocidad de rodadura de la bola, que depende del crecimiento de los tallos.

La velocidad de los greens se mide con el stimpmeter, que es un dispositivo muy sencillo, inventado en 1936 por Edward Stimpson. El stimpmeter estándar es una rampa diseñada para dejar rodar la bola a una velocidad constante en una zona plana del green. Mide casi 1 metro de largo y tiene una pequeña ranura en la cual reposa la bola. Al elevar el stimpmeter hasta una determinada inclinación, la bola rueda hasta el green. La distancia recorrida por la bola se suele medir en pies y pulgadas y nos indica la velocidad del green. Según la USGA, un green se puede clasificar a nivel competición como: rápido, medio-rápido, medio, medio-lento o lento si los valores de la distancia de rodadura de bola registrada con el stimpmeter son 3.20 m, 2.89 m, 2.59 m, 2.28 m y 1.98 m respectivamente (USGA, 1990).

La velocidad de rodadura de la bola es un factor para los jugadores de golf muy importante. Karcher *et al.* (2001) publicaron que los jugadores de golf notaban diferencias en la distancia de rodadura de la bola (velocidad del green) empezando en 15 cm cuando se uso el Stimpmeter standard de 76cm. Sin embargo, Gassoïn *et al.* (1995) usaron un Stimpmeter modificado, donde la bola se encontraba a 57, 38 o 19 cm del bisel, en vez de a 76 cm como

se encuentra en el estándar, lo que supuso un 2.4 cm de variación en los datos tomados, suficiente para que la mayoría de los jugadores notasen la diferencia. Cada incremento de la dosis de N llevó asociada una reducción de más de 2.4 cm en la distancia de rodadura de la bola. No sólo hay que tener en cuenta el modelo de stimpmeter usado, sino también el momento del día en que se mide, porque la velocidad varía a lo largo del día. A primera hora de la mañana, al haber mayor humedad, la velocidad de la bola es menor. Sin embargo, en épocas de mucho crecimiento, a lo largo del día el green se ralentiza, la bola pierde velocidad porque el césped va creciendo.

## **1.2 Métodos de determinación de las necesidades de N**

Generalmente, la fertilización nitrogenada se realiza por un lado, mediante un plan de aplicaciones predeterminado, en dosis fijas, por otro, mediante un examen visual del green que cuantifica la mejora o no mejora de la cubierta y por último en la medición de la distancia de rodadura de la bola usando un stimpmeter (Mangiafico y Guillard, 2007).

### **1.2.1. Clásicos**

Los métodos clásicos para determinar la dosis de N a aplicar, requieren muchas muestras, un gran trabajo, coste y tiempo, pues se tarda varios días en obtener los resultados del laboratorio. Entre estas técnicas se encuentran el análisis de muestras de suelo o de tejidos de la planta (Keskin *et al.*, 2004). Otro problema de estos métodos, es que los datos obtenidos no conducen a la determinación de la cantidad de fertilizante nitrogenado a aplicar. No se extraen recomendaciones claras a partir de estos análisis, simplemente orientaciones.

Estos inconvenientes han hecho que los greenkeepers prefieran un programa de fertilización nitrogenada más o menos predeterminado, ajustándolo mediante el reconocimiento visual y la medida de la velocidad del green, así como la experiencia previa y la intuición. Estos programas pueden conducir a un exceso de fertilización nitrogenada, con los problemas que esto conlleva (Mangiafico y Guillard, 2007), o a una subóptima fertilización nitrogenada, que podría conducir a una reducción de la densidad de tallos, relacionada con una menor resistencia al pisoteo y se vería afectado el color (Johnson *et al.*,

2003; Samaranyake *et al.*, 2008). Afortunadamente, el green puede tolerar alteraciones entre aplicaciones excesivas y subóptimas dentro de un margen que debe controlar el greenkeeper.

#### **1.2.1.1. Análisis de muestras de suelo**

Los tests de muestras de suelo, determinan el status de los nutrientes del suelo disponibles para la planta. Existen tests que determinan con precisión el status de N en el suelo, pero los niveles pueden variar tan rápidamente que los tests sirven de poco en la mayoría de las plantas. Más complicado aún es la realización de estos análisis en muestras de césped de campos de golf, donde el status varía mucho en 24 horas. No hay buenos tests de suelo en los que basar la determinación de necesidades de N para el césped (Christians, 1998). Sin embargo, se han desarrollado modificaciones de los métodos tradicionales de análisis de suelo, que permiten alcanzar gran precisión, como es el caso del método colorimétrico Griess Ilosvay modificado por Barnes y Folkard (1951) y Bremner (1965).

Las muestras de suelo se toman mediante sonda manual normalmente de diferentes horizontes. Se dejan secar a temperatura ambiente, y son molidas y tamizadas (López-Bellido *et al.*, 2013). Se deben tomar bastantes muestras de suelo de un área representativa y después mezclarlas. De esa mezcla se envía una submuestra al laboratorio. En el caso de un campo de golf, se pueden combinar muestras de greens con tipos de suelos similares (Christians, 1998). Posteriormente son analizadas para la determinación de N. Este método implica la extracción cuantitativa de nitratos de las muestras de suelo usando 2.0 KCl. El nitrato es determinado por reducción a nitrito por un reactor de cadmio. Se puede utilizar para ello un colorímetro de flujo continuo, donde la muestra líquida de KCl se mezcla con diversos reactivos químicos, lo cual da lugar a una solución coloreada cuya intensidad de color es función del contenido de nitratos y amonios presentes en la muestra. Actualmente se usan autoanalizadores que se fundamentan en la espectroscopía para analizar el contenido de N mineral presente en una muestra. Dicha técnica está basada en la ley de Lambert Beer (López-Bellido *et al.*, 2013).

#### **1.2.1.2. Test rápido de tejidos de las plantas (sap)**

El concepto de usar el test de tejidos para realizar una evaluación del status de N en la planta no es nuevo. Tradicionalmente, la concentración total de N en la planta se ha usado

para determinar si una planta contiene cantidades adecuadas o deficientes para su crecimiento. Los sap fueron desarrollados para dar un diagnóstico rápido del estatus de N de la planta (Handson y Shelley, 1993; Lewis *et al.*, 1993; Smith y Loneragan, 1997). Un requisito fundamental para el uso y la interpretación de esta técnica es poseer valores críticos fidedignos de la planta, que se obtienen de la realización de investigaciones experimentales que comparen la concentración total de N en los tejidos de plantas seleccionadas con parámetros de producción (Lewis *et al.*, 1993; Reuter y Robinson, 1997; Smith y Loneragan, 1997). Pero esos valores críticos, pueden verse afectados por factores como la parte de la planta analizada, la edad de la planta, su comportamiento estacional, las interacciones de nutrientes y el genotipo (Lewis *et al.*, 1993).

Estos tests pueden mejorar la sincronización entre las aplicaciones de fertilizantes de N y la capacidad de absorción de las plantas (Sanchez y Doerge, 1999). Aunque es una técnica poco aplicada en césped, Turner y Hummel (1992) y Reuter y Robinson (1997) desarrollaron valores críticos para las concentraciones totales de N en tallos de especies de césped. La incógnita radica en que detecta la deficiencia pero la cantidad a aplicar se realiza por aproximaciones sucesivas hasta alcanzar los valores adecuados. Los tejidos de plantas son mejores pero tampoco son el factor determinante en el que basar el programa de fertilización de N (Christians, 1998).

#### **1.2.1.3. Estimación visual del color**

El color es un componente clave de la calidad estética y un buen indicador del estado del N y de los nutrientes del césped (Beard, 1973). Uno de los métodos más usados en campo para medir la cobertura y el color se basa en índices de medida visuales del césped. Aunque la información obtenida puede ser relevante e incluso de gran ayuda, las conclusiones pueden ser de dudosa fidelidad (Horst *et al.*, 1984) y carecen de precisión.

El nivel de color se ha evaluado tradicionalmente por clasificación visual de las parcelas del césped en una escala de 1 a 9, siendo 1 el color amarillo o marrón y 9 el verde oscuro. Se considera el valor 9 el óptimo. Aunque la clasificación visual permite una rápida toma de datos sin la necesidad de un equipo especializado, es una medida subjetiva con un error humano difícil de eliminar (Karcher y Richardson, 2003; Mangiafico y Guillard, 2007).

Las correlaciones obtenidas de este tipo de medida para la densidad, color y manchas foliares han sido muy bajas (Skogley y Sawyer, 1992; Horst *et al.*, 1984).

Otras formas de medir el color son: análisis de clorofila o aminoácidos (Johnson, 1973; Nelson y Sosulski, 1984) y comparación con colores estandarizados (Beard, 1973). Aunque sean más objetivas, estas medidas suponen un coste mayor, las dos primeras requieren un análisis de laboratorio y las dos últimas dependen de las especies o cultivares (Karcher y Richardson, 2003).

### **1.2.2. Nuevos**

En las últimas décadas han aparecido nuevas técnicas que a diferencia de los métodos clásicos, permiten determinar el N disponible en el césped de una forma rápida y barata basándose en medidas relacionadas con el contenido de N (Keskin *et al.*, 2004). Sin embargo, algunas tecnologías son más rápidas y precisas que otras. Entre ellas caben destacar los colorímetros (Landschoot y Mancino, 2000), medida de los nitratos del suelo con membranas de intercambio de aniones (Mangiafico y Guillard, 2007), fotografía digital (Karcher y Richardson, 2003) y estimación del color con medidores de reflectancia (Keskin *et al.*, 2004; Bell *et al.*, 2002; Kruse *et al.*, 2006; Xiong *et al.*, 2007; Mangiafico y Guillard, 2007; Pease *et al.*, 2011).

#### **1.2.2.1. Colorímetros**

Se han usado para evaluar las variaciones de color debido a cambios estacionales (Kimura *et al.*, 1989), o para evaluar las diferencias entre cultivares y líneas genéticas (Thorogood *et al.*, 1993), concretamente, Landschoot y Mancino (2000) cuantificaron diferencias de color en cultivares de *Agrostis stolonifera*. Obtuvieron correlaciones significativas entre los valores del colorímetro y los obtenidos de la determinación visual.

Las limitaciones de los colorímetros son por un lado que requieren más tiempo ya que se debe tomar la muestra de clipping e introducirlas en el medidor (Mangiafico y Guillard, 2005) y por otro lado, que el área de medición sea menor de 20 cm<sup>2</sup>, muy pequeña, lo que conllevaría realizar muchas medidas en áreas de estudio grandes para obtener una representatividad adecuada en los valores de color (Karcher y Richardson, 2003). Otro

inconveniente de esta técnica, es que se ve afectada por factores como cambios estacionales y diferencias entre cultivares, que producen variaciones de color, y afectan a la precisión del sensor para determinar el color del césped (Karcher y Richardson, 2003).

#### **1.2.2.2. Membranas de intercambio de aniones**

Se utilizan para determinar los nitratos del suelo. Generalmente, se utilizan en forma de tiras de copolímeros (Ionics, Inc. Watertown, MA) que son enterradas en el suelo casi por completo, durante un período aproximado de dos semanas. Después se introducen en agua desoinizada, para pasar posteriormente a un agitador donde se extraen los nitratos de las membranas. Tras ello se filtran y los extractos obtenidos son analizados en un analizador de flujo.

Mangiafico y Guillard (2006), predijeron valores críticos del N-NO<sub>3</sub> del suelo. Obtuvieron modelos predictivos comparando los valores obtenidos de la utilización de las membranas con los obtenidos de los medidores de reflectancia. Gracias a ellos, determinaron el color del césped en especies de estación fría, como respuesta a la aplicación estacional de diferentes dosis de N. Las membranas de intercambio de aniones presentan una mayor sensibilidad que las extracciones tradicionales de suelo. Estudios previos (Mangiafico y Guillard, 2005), evaluaron el enorme potencial de las membranas para determinar el color, la calidad y la producción de clipping y permiten la determinación de N in situ. Sin embargo, Kopp y Guillard (2002) obtuvieron una alta variación entre los datos obtenidos y entre estudios al utilizar las membranas de intercambio de aniones. Otra desventaja es que no pueden predecir la cantidad de N a añadir tras determinar la cantidad de N-NO<sub>3</sub> disponible en el suelo.

#### **1.2.2.3. Cámara digital**

En los últimos años el uso de la cámara digital comercial se ha extendido entre la comunidad científica gracias a su valor asequible. Su aplicación como elementos de monitorización está actualmente en auge en el sector medioambiental. Sin embargo, los sistemas de procesamiento de imágenes no evolucionan al mismo ritmo y son bastante limitados (Lebourgeois *et al.*, 2008).

Las cámaras digitales y los programas informáticos de análisis para la imagen se han venido usando para otros cultivos distintos del césped, como han sido en el trigo (Adamsen *et al.*, 1999; Lukina *et al.*, 1999) y en la soja (Purcell, 2000). Posteriormente, el análisis de imágenes digitales fue usado para cuantificar la cubierta y el color del césped con mucha más precisión y en una superficie mayor que la evaluación de los métodos tradicionales (Richardson *et al.*, 2001).

La imagen da la información de la cantidad de luz emitida en rojo, verde y azul por cada pixel (RGB). Es difícil cuantificar el color verde directamente de los valores de estos tres colores. Para facilitar la interpretación se transforman en las características del color: matiz, saturación y brillo (HSB), que se basan en una percepción humana del color. El matiz define la tonalidad, la escala pasaría por todos los colores desde el rojo al magenta. La saturación, es la intensidad del color, y se clasifica desde el gris al porcentaje de color saturado y el brillo es la luz que emite ese pixel y la escala se mueve desde el negro hasta el blanco (Adobe Systems, 2002). Mediante la cámara digital, un programa informático específico, la escala de color HSB y teniendo en cuenta la escala de color de Munsell (chips de color de los tejidos de las plantas de Munsell), Karcher y Richardson (2003), pudieron cuantificar con precisión el color del césped en parcelas tratadas con diferentes dosis de N. Encontraron diferencias significativas entre los valores DGCI obtenidos de la cámara digital y los valores obtenidos mediante la medición visual. Esta técnica podría facilitar comparaciones objetivas sobre el color del césped entre diferentes investigadores, áreas y años siempre y cuando las condiciones de luz sean las mismas, bien solares o bien artificiales.

Lebourgeois *et al.*, (2008) trataron de realizar correcciones radiométricas para corregir las desviaciones radiométricas asociadas a las ópticas de la cámara y a las condiciones ambientales, y para cuantificar los efectos de estas correcciones en nuestra capacidad de controlar las variables de cultivo. Realizaron un experimento usando valores RGB originales y modificados de imágenes con perspectiva aérea sobre el cultivo. Eliminaron el efecto viñeta de las imágenes y calcularon, a partir de estas imágenes corregidas, el índice de vegetación normalizado, ambos pasos corrigieron las condiciones de iluminación. Esto mejoró el uso de las cámaras como sensores remotos.

Las imágenes se realizan generalmente con ajustes automáticos y se guardan en formatos JPEG o TIFF. En estas condiciones, el análisis de imágenes puede ser

cualitativamente satisfactorio, pero la exactitud de la radiometría de la imagen es generalmente demasiado baja para permitir la estimación cuantitativa de parámetros de la superficie.

Se puede aumentar la capacidad de medición radiométrica mediante correcciones simples, usando imágenes no procesadas y realizando la corrección de viñeta y la normalización radiométrica. Usando imágenes no procesadas se obtienen valores más cercanos a la verdadera luminosidad.

Para la normalización se dividen los valores del brillo para los canales RGB entre sus valores máximos (Lebourgeois *et al.*, 2008, Karcher y Richardson, 2003). Los índices de vegetación normalizados calculados a partir de las correcciones son indicadores aceptables para la caracterización de cultivos. El uso de cámaras modificadas permite la adquisición de imágenes en bandas espectrales que no se utilizan actualmente en la fotografía tradicional, como las de infrarrojo cercano, pero que son importantes para la caracterización exacta de la superficie. Esta amplitud de la capacidad multispectral aumenta el uso de la monitorización remota mediante cámaras (Lebourgeois *et al.*, 2008).

Aunque este método es más rápido que los tradicionales, sin embargo, requiere más tiempo que los medidores de reflectancia, ya que después de obtener las fotografías éstas deben ser analizadas en un ordenador con software específico de edición de fotografía del tipo Adobe Photoshop, Corel Photo-Paint, etc., para calcular el DGCI (Karcher y Richardson, 2003). Ese proceso fue acelerado por Karcher y Richardson (2005) al desarrollar un software de análisis de imágenes digitales en tanda.

#### **1.2.2.4. Medidores de la clorofila por la reflectancia**

Usar el medidor de clorofila para diseñar un programa de fertilización determinado, permite realizar ajustes estacionales basados en la cantidad de N suministrado por la mineralización de la materia orgánica y el abono aplicado, por agua de riego residual, o cuando las raíces de las plantas entren en contacto con N adicional (Peterson *et al.*, 1993).



Los medidores de reflectancia pueden ser la mejor técnica para la predicción y la determinación de la fertilización nitrogenada en céspedes (Mangiafico y Guillard 2005, 2007), dado el poco tiempo empleado en el muestreo (Kruse *et al.*, 2006).

El contenido de agua, la estructura celular, y la concentración de pigmento, así como otras propiedades físicas de la hoja afectan a las medidas de reflectancia de una cubierta vegetal. Se han obtenido correlaciones entre las medidas de reflectancia y de color, calidad visual, cantidad de clipping, contenido de N de los tejidos y concentración de clorofila en distintas especies de césped (Trenholm, 1999; Rodriguez and Miller, 2000; Bell *et al.*, 2002; Keskin *et al.*, 2004; Kruse *et al.*, 2006; Mangiafico y Guillard, 2005 y 2007). Los valores más altos de reflectancia están asociados con mayor densidad y verdor, mientras que los valores menores representan lo contrario (Xiong *et al.*, 2007).

Autores como Keskin *et al.* (2004) y Xiong *et al.* (2007), afirman que los sensores de reflectancia pueden detectar el estrés hídrico y mejorar el riego, y esto no impide utilizar estos sensores como indicadores del estatus de N, ya que el efecto del N sobre las medidas de reflectancia es mayor que el del contenido de agua del suelo.

Estos sensores remotos al poder correlacionarse con otras medidas fácilmente, tienen un gran potencial de uso para la determinación de la dosis de N fertilizante a aplicar. Sin embargo, el valor obtenido por estos dispositivos se ve afectado por factores tales como especie, cultivar, suelo, disponibilidad de agua, altura de corte, enfermedades, desgaste, tráfico, etc. que pueden alterar el valor correspondiente al estatus del N (Johnsen *et al.*, 2009). Estos factores de distorsión pueden ser eliminados si se recurre a un proceso de normalización de los datos que se obtengan de los sensores remotos (Samborski *et al.*, 2009). Los valores obtenidos del medidor de reflectancia se normalizan obteniendo el Índice de Suficiencia (SI) (Peterson *et al.*, 1993)

### **1.3. Necesidad de un modelo con aplicación práctica**

La medición del estatus del N en un green ha sido muy investigada como se ve en lo anteriormente expuesto. Al contrario que en otros cultivos, el rendimiento y la calidad no son lo prioritario en un césped. Carrow *et al.* (2010) señalaron que en céspedes el objetivo no es

la producción de clipping, sino que más bien son la uniformidad, el color y la calidad unidos al riego, la aplicación de fertilizantes, el estrés ambiental, las plagas y las enfermedades entre otros. Todos ellos se pueden resumir en cobertura y color (relacionados entre sí), crecimiento (relacionado con la cobertura) y velocidad del green, medida mediante la distancia de rodadura de la bola. Todos estos elementos dependerán del estado de césped, que varía según las estaciones.

El problema es que no existe una agricultura de precisión propiamente dicha para los greens (Carrow *et al.*, 2010). No se puede conocer a través de la lectura de los sensores la cantidad en  $\text{kg N ha}^{-1}$  que se debe a aplicar a un green en un momento determinado, calculado en función del N disponible en ese instante. Richardson *et al.* (2004) afirmaron que en céspedes no podemos hacer conversiones cualitativas o cuantitativas de datos de reflectancia sin calibrar primero algún modelo empírico. El mismo procedimiento empleado con cultivos podría ser aplicado a un green de golf para desarrollar un algoritmo que responda a este interrogante.

## **2. OBJETIVOS**

## 2. OBJETIVOS

En un green USGA de *Agrostis stolonifera* bajo condiciones mediterráneas se pretende:

1. Determinar qué sensor remoto es más apropiado para evaluar el efecto del N fertilizante: cámara digital vs. medidor de clorofila.
2. Determinar qué medidas tienen mayor importancia sobre el green como respuesta a la aplicación de N fertilizante: color, clipping o distancia de rodadura de la bola.
3. Desarrollar modelos estacionales de determinación de las necesidades de N mediante la utilización de las lecturas obtenidas de los dos sensores remotos y su relación con el clipping y la distancia de rodadura.
4. Realizar una propuesta de aplicación de los modelos desarrollados a la escala de un campo de golf.

# **3. MATERIAL Y MÉTODOS**

### 3. MATERIAL Y MÉTODOS

#### 3.1. Localización y diseño experimental

El estudio se llevó a cabo en una parcela de césped experimental de la Universidad de Córdoba, Córdoba, España (37° 54' N, 4°, 43'O, a 135 m sobre el nivel del mar), bajo condiciones climáticas mediterráneas. Éstas se caracterizan por una precipitación media anual de 584 mm, una evapotranspiración media anual de 1000 mm, un período seco de 4 a 6 meses y una temperatura media anual de 17.5 °C (siendo la temperatura media del mes más frío de 9.5 °C, mientras la temperatura media del mes más cálido fue de 27.5 °C). Este estudio se realizó durante los años 2008, 2009 y 2010 sobre un césped establecido de dos años. Se utilizó la especie de césped *Agrostis stolonifera* L., cv. L-93. El green fue construido de acuerdo a las especificaciones USGA (USGA Green Section Staff, 2004). El diseño experimental fue en bloques completamente al azar con tres repeticiones. En el experimento se estudió el efecto de la dosis de N sobre la producción de clipping, calidad de las condiciones de juego y calidad estética. Las dosis de N aplicadas cada diez días fueron 0, 5, 10 y 15 kg N ha<sup>-1</sup> en primavera y otoño, y 0, 3, 6 y 9 kg N ha<sup>-1</sup> en verano e invierno. El tamaño de la parcela fue de 1.5 por 3.3 m.

#### 3.2. Manejo

El N se aplicó en forma de nitrato amónico líquido, con un pulverizador de mochila a presión calibrado a 750 L ha<sup>-1</sup>. El green se regó diariamente durante el verano a la dosis del 80% de la ETc. El coeficiente de cultivo, Kc, utilizado fue del 0,85 como sugirió Allen *et al.* (1998) para los céspedes, ya que se comprobó que su drenaje era cero y que no afectaba a la calidad estética del green. La evapotranspiración de referencia se calculó mediante la ecuación Penman-Monteith. El riego se aplicaba a las 06:00h para reducir el efecto del viento. Los tiempos de riego se calcularon multiplicando el volumen necesario por la tasa de precipitación del sistema de riego. Se realizaron pruebas de la uniformidad del riego con vasos colectores, dos veces por año (al final de la primavera y a mediados del verano) con el fin de garantizar la precisión del riego.

El manejo del experimento se llevó a cabo de acuerdo con las prácticas estándar de manejo de greens de la región. El green fue cortado a una altura de 4.0 mm, 6 días por semana, con una cortadora de césped Greensmaster 1000 (Toro Co., Bloomington, MN), y la materia seca (clipping) fue retirada.

El pinchado se realizó empleando una pinchadora de cilindros (John Deere Aercore 800, Deere and Co., Moline, IL), procediendo a eliminar los cilindros una vez fueron extraídos del suelo. Este proceso se llevó a cabo dos veces por año, al igual que el arenado posterior, a principios del otoño y a mediados de la primavera. Durante los 15 ó 20 días posteriores al pinchado no se tomó ninguna medida y se añadió N fertilizante a la parcelas 0 kg N ha<sup>-1</sup> para facilitar su recuperación. Antes de reanudar el experimento, las parcelas se regaron en exceso para reducir el contenido de nitratos del suelo por lavado.

Asimismo, se testaron y complementaron los niveles de P y K disponibles para las plantas. Se emplearon anualmente un total de 80 a 110 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> y 180 a 220 kg K<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup>. Los fungicidas aplicados fueron iprodiona [3 - (3,5-diclorofenil)-N-(1-metiletil) 2,4-dioxo-1-imadazolidine-carboximida], clorotalonil (2,4,5,6-tetracloroisofaltonitrilo) y azoxistrobina [metil (E)-2-(2-(6-(2-cianofenoxi) pirimidin-4-iloxi) fenil)-3-metoxiacrilato de metilo]. El insecticida fue clorpirifos [O, O-dietil O-(3,5,6-tricloro-2-piridinil) fosforotioato]. Por último, también se utilizaron micronutrientes, agentes humectantes y recebados (o enarenados) en el mantenimiento habitual del césped.

### 3.3. Instrumentación y medidas

Para determinar la calidad estética se utilizaron dos sensores remotos: una cámara digital Olympus Camedia C-5060WZ (Olympus Optical Co., London, Reino Unido) y un medidor de clorofila por reflectancia FieldScout CM1000 (Spectrum Technologies, Plainfield, IL). El uso que se realizó de la cámara fotográfica es el normal de una cámara comercial, pero con ajustes automáticos, para simplificar el trabajo. El medidor de clorofila FieldScout CM1000 mide la luz en longitudes de onda de 700 nm y 840 nm para estimar la cantidad de clorofila en las hojas. Se mide la luz ambiente y reflejada para cada longitud de onda. La clorofila absorbe la luz a 700 nm y, como resultado, la reflexión de esta longitud de

onda desde la hoja es menor comparada a la luz reflejada a 840nm. La luz que tiene una longitud de onda de 840 nm no se ve afectada por el contenido de clorofila de la hoja y sirve como indicador de la cantidad de luz reflejada debido a las características físicas de las hojas tales como la presencia de cera o pelos en la superficie foliar.

El CM1000 calcula un índice de contenido de clorofila relativo que toma valores entre 0 y 999, a partir de los datos de luz reflejada y ambiente. El valor del índice es una medida del verdor relativo de la hoja. El sensor da la información sobre el número de datos tomados y la media de los mismos. El nivel de luz ambiente se muestra en una escala de 0 a 9. El sensor muestra datos del número de muestras, medida individual del índice de clorofila y el valor asignado a la luz ambiente. Los datos se descargan al ordenador gracias al software específico.

Las mediciones de ambos dispositivos se tomaron en 272 fechas a lo largo de la duración del experimento, siendo realizadas las mismas aproximadamente cada 4 días. Tomándose cinco lecturas por parcela con el CM1000 (promedio por parcela) y, con la cámara digital una imagen por parcela. Todas las mediciones se realizaron a pleno sol entre las 12:00 y las 14:00 horas cuando las superficies de las hojas de césped estaban secas. Las lecturas de CM1000 se realizaron en contra del sol y a una altura aproximada de 1,5 m sobre la cubierta del césped (Mangiafico y Guillard, 2007). Mientras que para la toma de imágenes digitales se utilizó el modo de configuración automática, y se llevaron a cabo por un investigador situado de pie junto a la parcela enfocando el objetivo de la cámara directamente sobre el centro de la parcela a una altura aproximada de 1,5 m sobre la cubierta del césped, tomadas sin flash y con máximo zoom. Se prestó especial atención a no proyectar sombras sobre la parcela durante la toma de datos (Karcher y Richardson, 2003). Las imágenes digitales fueron transferidas a un ordenador y analizadas con Corel Photo-Paint (v. 9, Corel Corp., Fremont, CA) para determinar el DGCI (Karcher y Richardson, 2003). Los valores de CM1000 y de DGCI se normalizaron para ajustar la variación no asociada al nitrógeno. Se dividieron cada uno de los valores de todos los tratamientos por el valor máximo de todas las dosis de N dentro de cada repetición, para obtener índices relativos expresados como un decimal (Peterson *et al.*, 1993). Se calculó el SI para el CM1000 y el DGCI relativo para la cámara.



### • Cálculo del índice de suficiencia

El SI se calcula a partir de los datos obtenidos del medidor de clorofila para facilitar la interpretación y precisión de los mismos (Peterson *et al.*, 1993). Después de obtener la media de un gran número de lecturas del área de estudio y del área de referencia, un índice de suficiencia de N puede ser calculado mediante esta fórmula:

$$SI = (\text{Media de los datos del campo} / \text{Media de los datos del área de referencia}) * 100$$

Un SI de N por debajo del 95% indica deficiencia de N que debe ser corregida para evitar una reducción en los rendimientos del cultivo.

### • Cálculo del índice de color DGCI

Las fotos digitales se analizan con un software específico para las mismas: Corel Photo-Paint 9.0. Del conjunto de píxeles que contiene una imagen digital (evitando siempre aquellas partes de la foto no representativas: manchas, insectos, hojas...), se obtienen unos valores de RGB (red, green, blue); sin embargo, los colores rojo y azul pueden llevar a confusión en la medida de la intensidad del color verde de la imagen, por ello se recurre a la transformación de los valores medios de RGB en valores medios de HSB (hue, saturation, brightness) pertenecientes a la escala de color de Munsell (Munsell Color, 2000).

Los valores absolutos de RGB se miden en una escala de 0 a 255, para transformarlos en porcentaje se dividen entre 255. La transformación de RGB en HSB viene dada según los siguientes algoritmos:

Hue (Matiz)

El algoritmo de H depende de cuál es el valor máximo entre R, G y B.

- Si es R,  $H = 60 \left\{ \frac{(G-B)}{[\max(R, G, B) - \min(R, G, B)]} \right\}$
- Si es G,  $H = 60 \left( 2 + \frac{(B-R)}{[\max(R, G, B) - \min(R, G, B)]} \right)$
- Si es B,  $H = 60 \left( 2 + \frac{(B-R)}{[\max(R, G, B) - \min(R, G, B)]} \right)$

Saturation (Saturación)

$$[\max (R, G, B)-\min (R, G, B)] / \max (R, G, B)$$

Brightness (Brillo)

$$\max (R, G, B).$$

Los valores de H, S y B nos sirven para calcular el índice DGCI mediante la siguiente ecuación:

$$DGCI= [(H-60)/60 + (1-S) + (1- B)] /3$$

Se obtienen valores de DGCI entre 0 y 1.

Para determinar la velocidad del green se utilizó el stimpmeter PELZmeter™ (PelzGolf, Independent Golf Research, Inc., Spicewood, TX), cada 9 días aproximadamente (promedio total). El proceso consistió en medir la distancia de rodadura de bola tres veces en una misma dirección y tres veces en la opuesta y realizar la media de ambas. La velocidad del green se midió siempre a mediodía, cuando la cubierta del césped estaba seca. La tasa de producción de biomasa aérea o clipping se midió cada 13 días aproximadamente (promedio total) con la cortadora de césped anteriormente mencionada. El área de muestreo fue de 1.44 m<sup>2</sup>. Los clippings se dejaron secar a 80 °C durante 48 horas antes de pesarlos.

### **3.4. El análisis estadístico**

Se usaron contrastes polinómicos ortogonales (lineal, cuadrático y cúbico) para comprobar el tipo de respuesta de las medidas realizadas a la fertilización nitrogenada.

Los pasos seguidos para obtener un algoritmo fueron:

1. La determinación de los modelos de respuesta al nitrógeno fertilizante para los parámetros medidos (valores reales y relativos).

2. La determinación de la tasa de fertilizante de N óptima o máxima cuando los modelos obtenidos a partir de los valores relativos no fueron lineales.
3. Comprobación de la existencia de una relación entre las medidas del sensor remoto y otros parámetros medidos (distancia de rodadura de la bola y la producción de clipping),
4. Modelos de optimización para ambos sensores remotos, determinando los puntos de intersección entre sus modelos y los modelos de la distancia de rodadura de la bola y la tasa de producción del clipping obtenidos de los valores relativos, y
5. Establecer las relaciones entre los valores de los dos sensores remotos: DGCI y CM1000.

Los análisis estadísticos se realizaron con la versión 9.1 de SAS (Análisis Estadísticos Sistema, SAS Institute, 2003).

## **4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de regresión mostró para todos los casos que el modelo de respuesta de una ecuación polinómica de tercer orden fue el que mejor se adaptó a las medidas realizadas con ambos sensores remotos, mientras que fueron lineales para la velocidad del green y el clipping.

### 4.1. Medidor de reflectancia

Se obtuvieron modelos de respuesta significativos para el medidor de reflectancia CM1000. Tras la realización de diferentes modelos estadísticos, se seleccionaron los modelos de respuesta polinómicos de tercer orden debido a que las tasas máximas de N fueron ligeramente inferiores en comparación con el modelo polinómicos de segundo orden y el objetivo del estudio era optimizar la dosis de N.

Los valores de CM1000 mostraron una buena respuesta a la fertilización nitrogenada, gran magnitud en los valores y alta significación. A pesar de que la hipótesis inicial se basó en dos modelos de fertilización nitrogenada, primavera-otoño y verano-invierno, siguiendo los patrones habituales de gestión de campos de golf del sur de España, los resultados mostraron que se podía obtener un modelo significativo diferente para cada estación, ya que existían pequeñas variaciones tanto en la cantidad óptima como máxima entre las estaciones que se habían emparejado (Fig. 1 y 2).

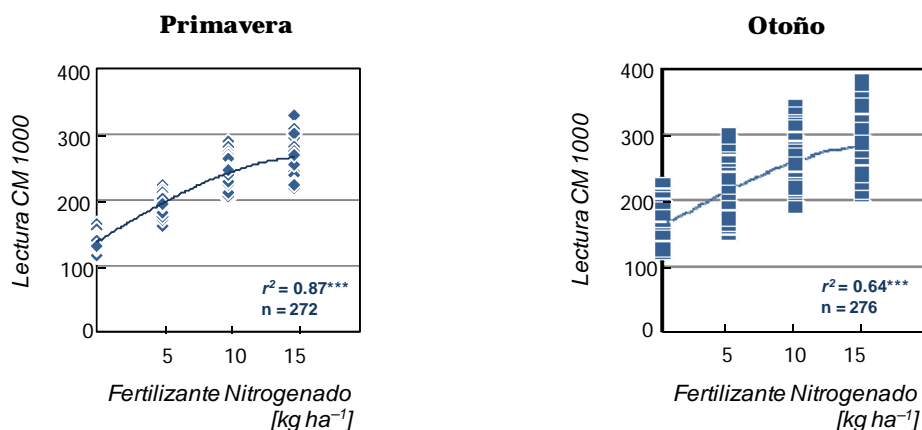


Figura 1. Modelos de respuesta de la calidad estética a las aplicaciones de fertilizante nitrogenado en las estaciones de mayor crecimiento del césped (primavera y otoño). Valores reales tomados con el medidor de clorofila FieldScout CM1000 en un green de *Agrostis stolonifera*. \*\*\* Significativo al nivel de probabilidad 0.001.

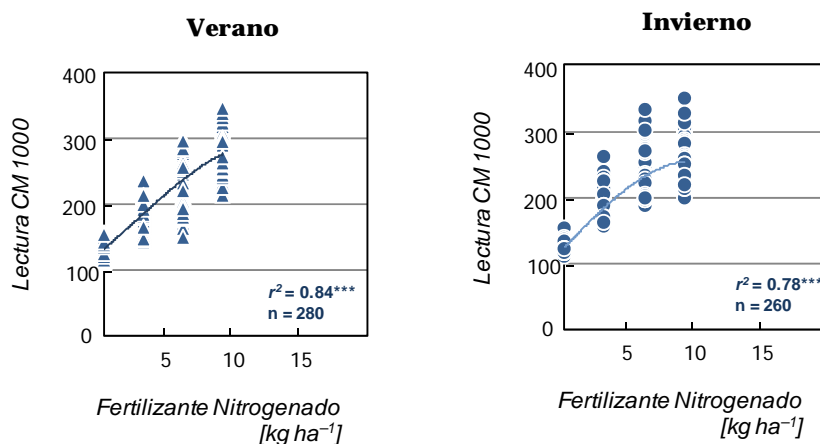


Figura 2. Modelos de respuesta de la calidad estética a las aplicaciones de fertilizante nitrogenado, en las estaciones de menor crecimiento del césped (verano e invierno). Valores reales tomados con el medidor de clorofila FieldScout CM1000 en un green de *Agrostis stolonifera*. \*\*\* Significativo al nivel de probabilidad 0.001.

En el caso de los valores relativos, se calcularon los valores relativos máximos que variaron de una estación a otra. En primavera y otoño se obtuvieron los valores relativos máximos de mayor magnitud, 16.8 y 16.1 kg N ha<sup>-1</sup> respectivamente (Fig. 3), comparados con verano e invierno que fueron menores, 13.3 y 10.7 kg N ha<sup>-1</sup> respectivamente (Fig. 4). El modelo de menor precisión fue el del otoño, pues mostró un coeficiente de regresión inferior al del resto de las estaciones. Para el CM1000, el rango varió desde 1 hasta 0,52, 0,48, 0,58 y 0,48 en primavera, verano, otoño e invierno, respectivamente (Fig. 3 y 4).

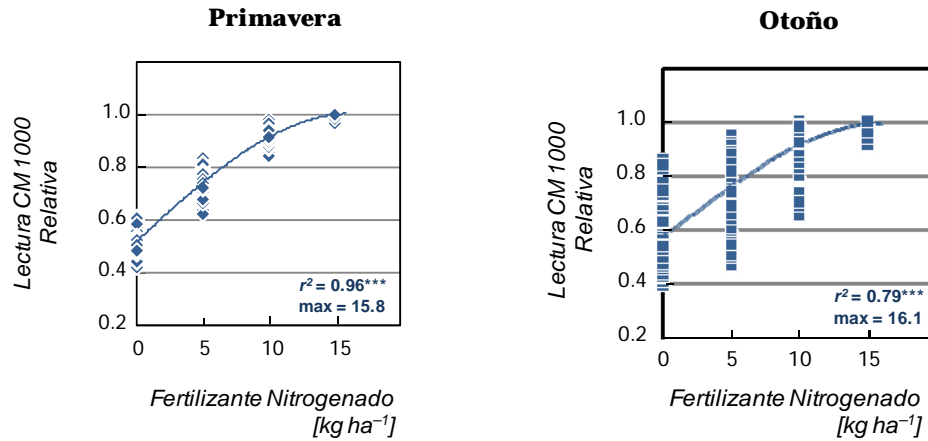


Figura 3. Modelos de respuesta de la calidad estética a las aplicaciones de fertilizante nitrogenado, en las estaciones de mayor crecimiento del césped (primavera y otoño). Valores relativos tomados con el medidor de clorofila FieldScout CM1000 en un green de *Agrostis stolonifera*. \*\*\* Significativo al nivel de probabilidad 0.001.

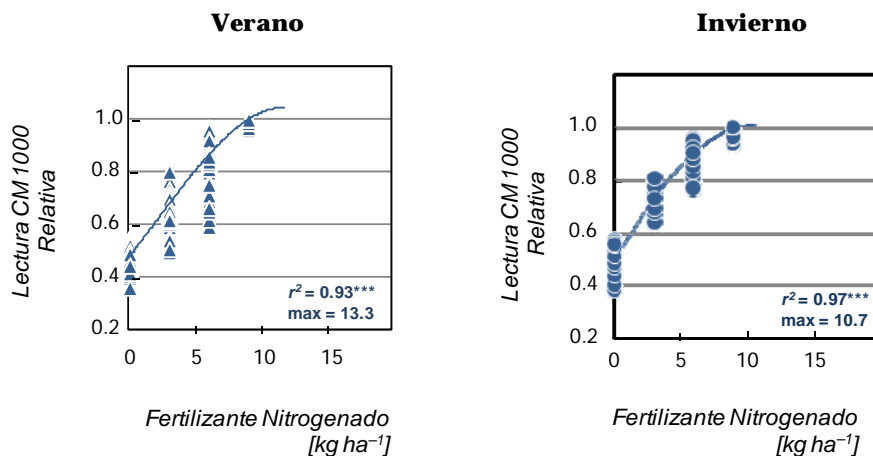


Figura 4. Modelos de respuesta de la calidad estética a las aplicaciones de fertilizante nitrogenado, en las estaciones de menor crecimiento del césped (verano e invierno). Valores relativos tomados con el medidor de clorofila Field Scout CM1000 en un green de *Agrostis stolonifera*. \*\*\* Significativo al nivel de probabilidad 0.001.

La mayoría de los estudios previos mostraron, al igual que este experimento, cómo al variar la dosis de N variaban los valores de los diferentes medidores de reflectancia. Keskin *et al.* (2004) mostraron que los valores de reflectancia en la banda del verde (520-580 nm) y en la banda del infrarrojo cercano, NIR, (770-1050 nm) aumentaron a medida que el contenido de N aumentó. Utilizaron en su experimento un espectrorradiómetro de tipo doble (FieldSpec Dual UV/VNIR, 350 a 1050 nm, Analytical Spectral Devices, Inc.), que requiere clipping y la posterior medición en un laboratorio, por lo que es un proceso más lento que el llevado a cabo con otros medidores de reflectancia. Ellos demostraron las relaciones

empíricas existentes entre el contenido de N y los valores de reflectancia en muestras de clipping procedentes de putting greens de campos de golf, utilizando el método de regresión lineal múltiple. La mejor respuesta se obtuvo en la banda del NIR. A parte de realizarlo con un método más lento, se llevó a cabo ex situ y con luz artificial.

Kruse *et al.* (2006) observaron variación en los valores de la concentración de N de la cubierta vegetal, la concentración de clorofila, índices de calidad visual y en la producción de biomasa de un putting green de *Agrostis stolonifera*, tomados con un espectrómetro remoto portátil de fibra óptica (Modelo S2000, Ocean Optics, Winter Park, FL), como respuesta a la fertilización nitrogenada. Aplicaron una regresión de mínimos cuadrados parciales con el objetivo de aumentar la precisión, al obtener una variabilidad entre años en el NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Sin embargo, afirmaron que se alcanzaría una mayor adaptación del índice a los valores normalizados que a los reales. Sugirieron obtener los valores relativos de las medidas. Posteriormente, Samborski *et al.* (2009), afirmaron que la medición de la reflectancia de la longitud de onda de la clorofila como resultado del estado del N en la planta podía ser medida específicamente mediante los medidores de clorofila.

Es necesario realizar modelos según las condiciones climatológicas estacionales como se ha visto en los resultados. Mangiafico y Guillard (2006) afirmaron que los valores críticos de cada fecha pueden servir para determinar los valores críticos debidos a efectos ambientales y estacionales, desarrollando para cada estación del año, un modelo específico de fertilización nitrogenada.

## **4.2. Cámara digital**

Los únicos modelos de respuesta significativos que permitieron obtener una dosis máxima de nitrógeno para la cámara digital fueron los polinómicos de tercer orden. Al igual que con el CM1000, inicialmente la hipótesis se basó en dos modelos de fertilización nitrogenada, primavera-otoño y verano-invierno, pero los resultados mostraron que se podía obtener un modelo significativo diferente para cada estación, puesto que había diferencias en las cantidades óptimas y máximas entre los dúos estacionales (Fig. 5 y 6).



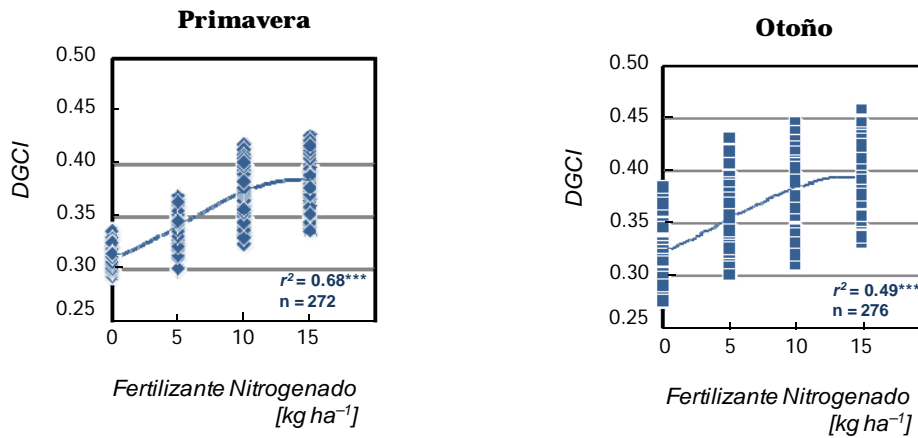


Figura 5. Modelos de respuesta de la calidad estética a las aplicaciones de fertilizante nitrogenado, en las estaciones de mayor crecimiento del césped (primavera y otoño). Valores reales tomados con la cámara digital en un green de *Agrostis stolonifera*. \*\*\* Significativo al nivel de probabilidad 0.001.

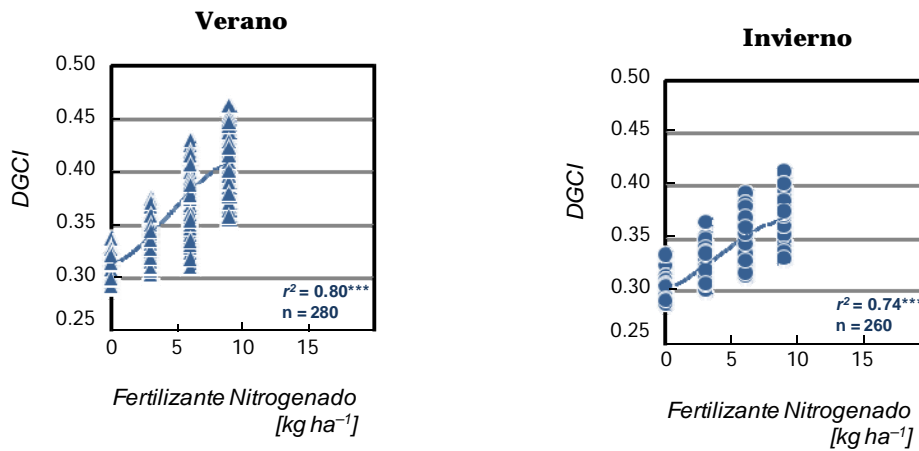


Figura 6. Modelos de respuesta de la calidad estética a las aplicaciones de fertilizante nitrogenado, en las estaciones de menor crecimiento del césped (verano e invierno). Valores reales tomados con la cámara digital en un green de *Agrostis stolonifera*. \*\*\* Significativo al nivel de probabilidad 0.001.

Los valores relativos máximos para la cámara digital, DGCI relativos, variaron de una estación a otra, excepto para primavera y otoño que se obtuvieron el mismo (Fig.7). Éstos fueron 13.9, 9.6, 13.9 y 8.5 kg N ha<sup>-1</sup>, para primavera, verano, otoño e invierno (Fig. 7 y 8). Los valores DGCI, procedentes de la cámara digital, respondieron de forma similar a los

valores del CM1000, pero la respuesta a la fertilización nitrogenada fue mucho mayor en magnitud en los valores de CM1000 que en los valores DGCI.

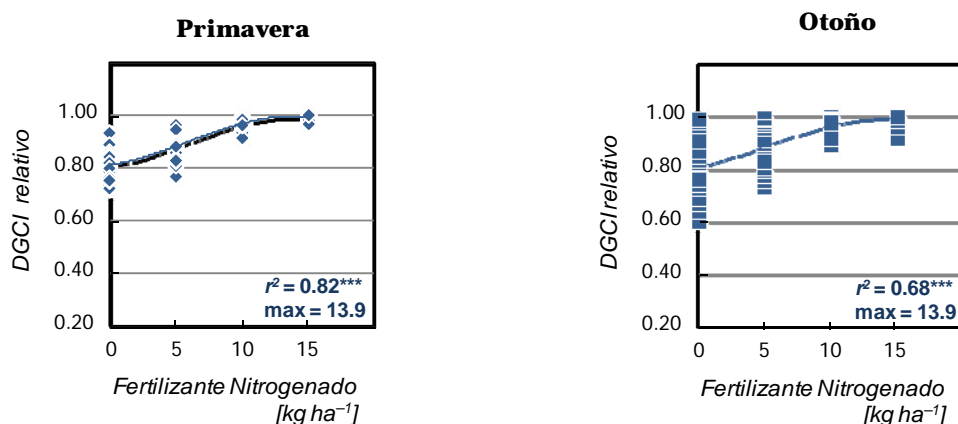


Figura 7. Modelos de respuesta de la calidad estética a las aplicaciones de fertilizante nitrogenado, en las estaciones de mayor crecimiento del césped (primavera y otoño). Valores relativos tomados con la cámara digital en un green de *Agrostis stolonifera*. \*\*\* Significativo al nivel de probabilidad 0.001.

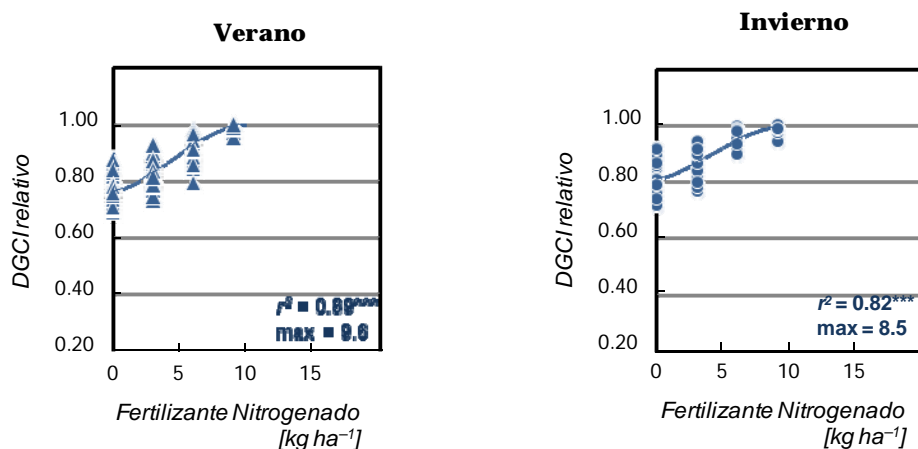


Figura 8. Modelos de respuesta de la calidad estética a las aplicaciones de fertilizante nitrogenado, en las estaciones de menor crecimiento del césped (verano e invierno). Valores relativos tomados con la cámara digital en un green de *Agrostis stolonifera*. \*\*\* Significativo al nivel de probabilidad 0.001.

El modelo con menor precisión fue el del otoño, al igual que en el caso del CM1000, pues mostró un coeficiente de regresión inferior al del resto de las estaciones (Fig. 7). Los modelos de la cámara digital mostraron un rango peor de valores relativos que los del

CM1000. Para la cámara digital, el rango varió de 1 a 0.81, 0.76, 0.81, y 0.81 kg N ha<sup>-1</sup> en primavera, verano, otoño e invierno, respectivamente (Fig. 7 y 8).

Los valores reales de la cámara digital y CM1000 fueron correlacionados para cada estación (Fig. 9). Se observó una correlación positiva para todas las estaciones, es decir, al aumentar los valores de un dispositivo aumentaron los del otro. Teniendo en cuenta esta respuesta, se consideró la posibilidad de obtener un modelo que permitiese la correlación de los valores de ambos métodos. El mejor coeficiente de regresión se obtuvo en verano y el peor en primavera, 0.86 y 0.72 respectivamente.

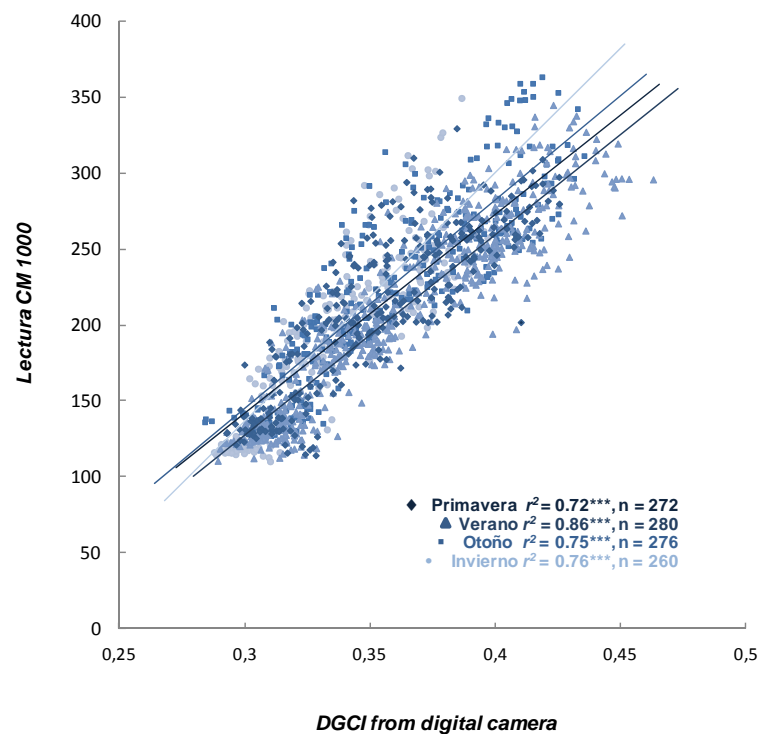


Figura 9. Correlación estacional entre los valores de FieldScout CM1000 y los valores del índice DGCI obtenidos con la cámara digital. \*\*\* Significativo al nivel de probabilidad 0.001.

Karcher y Richardson (2003, 2005) desarrollaron un método utilizando una cámara digital para determinar la calidad del césped, sin embargo, a pesar del avance que supuso, no ha tenido una aplicación práctica a los greens de los campos de golf.

### 4.3. Distancia de rodadura de la bola y clipping

La velocidad del green depende en gran medida de la distancia de rodadura de la bola, para el análisis de los datos obtenidos, se representó gráficamente la dosis de fertilizante nitrogenado con los valores de la distancia de rodadura de la bola, tanto los reales como los relativos. En todos los casos, el que mostró el mejor ajuste fue el modelo de respuesta lineal. En todas las estaciones, se obtuvo una correlación negativa o inversa, es decir, la distancia de la bola disminuyó cuando la dosis de N se incrementó (Fig. 10 y 11). La mejor significación se obtuvo en los valores relativos en primavera (Fig. 10). Se observó una pendiente de la recta mayor en invierno (Fig. 11), estación en la que también se obtuvo una variación más estrecha entre los datos y en la que el grado de significación fue menor. En otoño se obtuvo una pendiente de la recta menor comparada con el resto de estaciones (Fig. 10).

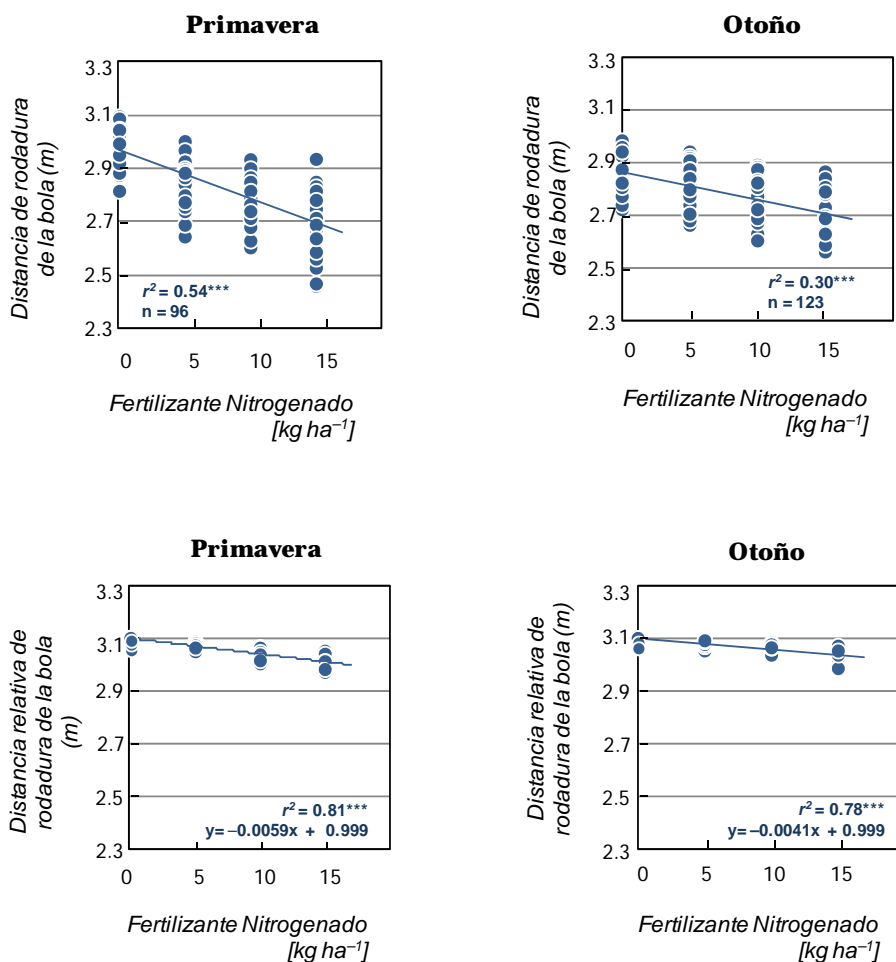


Figura 10. Modelos de respuesta de la calidad de las condiciones de juego (distancia de rodadura de la bola) a las aplicaciones de fertilizante nitrogenado, en las estaciones de mayor crecimiento del césped. Valores reales y relativos tomados con el medidor Stimpmeter en un green de *Agrostis stolonifera*. \*\*\* Significativo al nivel de probabilidad 0.001.

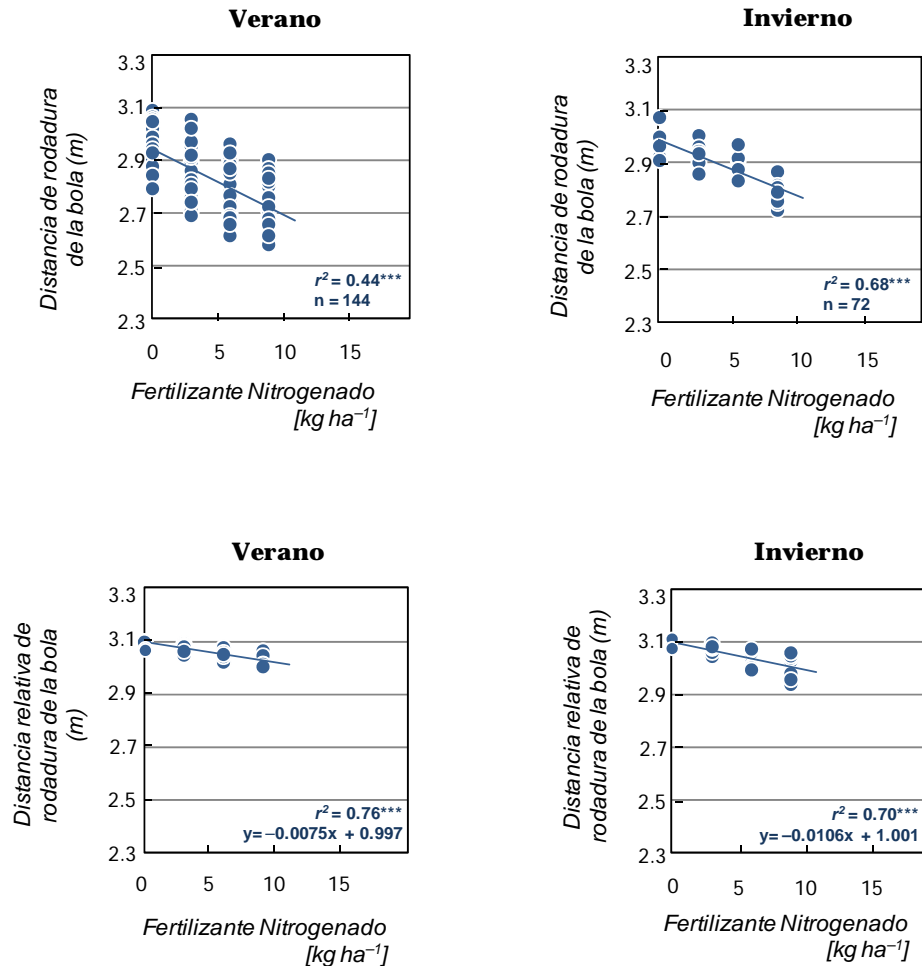


Figura 11. Modelos de respuesta de la calidad de las condiciones de juego (distancia de rodadura de la bola) a las aplicaciones de fertilizante nitrogenado, en las estaciones de menor crecimiento del césped. Valores reales y relativos tomados con el medidor Stimpmeter en un green de *Agrostis stolonifera*. \*\*\* Significativo al nivel de probabilidad 0.001.

Según la clasificación USGA (1990) para greens de competición, el green de este experimento se podría catalogar como medio-rápido, ya que los valores obtenidos de distancia de rodadura de la bola medida con el stimpmeter, se encuentran aproximadamente entre 2.6 m y 3.2 m.

La producción de clipping es otro de los factores más importantes para evaluar la calidad estética de un césped y la calidad de juego. En este caso para el análisis de los resultados se prefirió representar en una única gráfica las dosis de fertilizante nitrogenado frente a la producción de biomasa aérea. Se observó una correlación positiva, en la que la producción de clipping incrementó con el aumento de la dosis de N (Fig. 12).

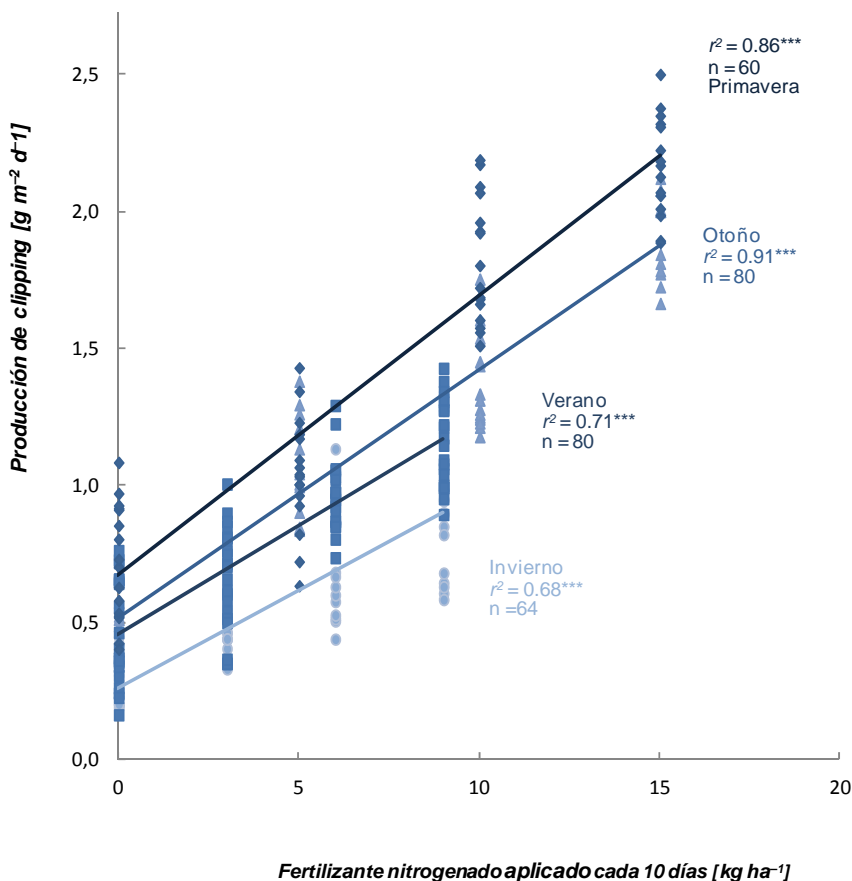


Figura 12. Modelos de respuesta de la producción de clipping a las aplicaciones de fertilizante nitrogenado en un green de golf de *Agrostis stolonifera*. \*\*\*Significativo al nivel de probabilidad 0.001.

El modelo de respuesta que se ajustó mejor para todas las estaciones fue el lineal. La producción de clipping fue mayor en la primavera, seguida del otoño, lo que confirma que en las estaciones en las que más N se añadió, más producción de biomasa aérea se obtuvo. Lo

contrario ocurre en el verano y en el invierno, donde se añadió menos N. Se observó una mayor significación en el modelo de respuesta del otoño y una peor significación en el del invierno.

Revisando la bibliografía, estas conclusiones concuerdan con otros estudios anteriores. Schlossberg y Karnok (2001), estudiando diferentes dosis de N en cultivares de *Agrostis stolonifera*, también encontraron que a mayor cantidad de N, mayor densidad y calidad de tallos. Esta respuesta está íntimamente relacionada con la temperatura. Según Hawes y Decker (1977), para una alta dosis de N y temperaturas cercanas a los 21 °C, *Agrostis stolonifera* tiene un alto grado de recuperación, sin embargo a temperaturas cercanas a los 32 °C el grado de recuperación es significativamente mucho más bajo. Esta afirmación podría dar explicación a la variación en la producción de biomasa aérea en las diferentes estaciones del año.

El aumento de la producción de clipping y calidad estética y su relación con la disminución de la distancia de rodadura de la bola en los greens, como respuesta al tratamiento diferentes dosis de nitrógeno resultante en este estudio, confirma lo mostrado en otros trabajos por Keskin *et al.* (2004), Streich *et al.* (2005), Kruse *et al.* (2006), Koeritz y Stier (2009) y Pease *et al.* (2011). Según Schlossberg y Schmidt (2007), un aumento de fertilización nitrogenada en los greens, conlleva como efecto negativo, el incremento de la producción de clipping, y como consecuencia intrínsecamente relacionada, la disminución de la distancia de rodadura de la bola que depende del crecimiento de los tallos.

#### **4.4. Modelos de fertilización**

Una vez realizado el análisis de cada método por separado y de cada factor determinante de la calidad de juego y estética, se correlacionaron los valores relativos de la distancia de rodadura de la bola y la producción de clipping con ambos sensores en todas las estaciones (Tabla 1). La correlación fue altamente significativa en todos los casos, requisito indispensable para la construcción de los algoritmos.

**Tabla 1.** Coeficiente de correlación lineal (r) estacional de la distancia de rodadura de la bola y la producción de clipping con valores relativos del FieldScout CM1000 y valores relativos del DGCI procedentes de la cámara digital.

Parámetro y sensor	Estación <sup>a</sup>			
	Primavera	Verano	Otoño	Invierno
<b><u>Distancia rodadura</u></b>				
<b>FS CM1000</b>	0.87	0.87	0.79	0.81
<b>Cámara Digital</b>	0.81	0.83	0.72	0.79
<b><u>Producción clipping</u></b>				
<b>FS CM1000</b>	0.87	0.85	0.75	0.88
<b>Cámara Digital</b>	0.87	0.72	0.89	0.83

<sup>a</sup> Todas las correlaciones fueron significativas a un nivel de probabilidad de 0.001. El número de datos usado (n) es el mismo que el mostrado en la figura 12 para cada estación.

En el caso de la rodadura de la bola, se obtuvieron unos coeficientes de regresión de 0.87, 0.87, 0.79 y 0.81 para primavera, verano, otoño e invierno respectivamente; mientras que para la cámara digital fueron 0.81, 0.83, 0.72 y 0.79 para las mismas estaciones. Luego, para este factor, se obtuvo una mayor precisión con el CM1000 que con la cámara.

En el caso de la producción de biomasa aérea, se obtuvieron para el CM1000 los siguientes coeficientes de regresión: 0.87, 0.85, 0.75 y 0.88 para cada una de las estaciones y para la cámara digital: 0.87, 0.72, 0.89 y 0.83. Excepto en otoño, en el resto de estaciones, el sensor que dio una mejor respuesta fue nuevamente el CM1000.

Pease *et al.* (2011), usando un CM1000 midieron los efectos de la dosis de N en la producción de clipping, distancia de rodadura de la bola y en la calidad, pero ningún estudio en greens de campo de golf ha relacionado valores reales o relativos de medidores de reflectancia con clipping, color o distancia de rodadura de la bola.

Estos valores maximizan la calidad estética del green, pero como se ha comentado anteriormente la calidad de juego también debe ser optimizada. Se buscó un equilibrio entre



la calidad estética y de juego, y la dosis de fertilizante nitrogenado empleado. Para ello se ajustó el modelo estacional como una función de los sensores remotos y el otro parámetro medido, determinando la intersección de los modelos obtenidos de los valores relativos de la cámara digital y del CM1000 con la distancia de rodadura de la bola y el clipping.

En términos de fertilización nitrogenada, para ambos sensores, se obtuvieron mayores puntos de intersección con los modelos de los valores relativos de producción de clipping (datos no mostrados) que para la distancia de rodadura de la bola. En el caso del clipping los puntos de intersección resultaron dosis óptimas más altas de N que perjudicaban a la velocidad del green. Por esta razón y porque si aumentaba la dosis de N, la velocidad del green disminuía, se eligió la velocidad de la bola como parámetro más importante para la calidad del juego y para construir el modelo, sin que esto tuviera un efecto significativamente negativo sobre la producción de clipping. Resultados sobre la velocidad del green mostrados por Pease *et al.* (2011) también refuerzan la idea de basar el desarrollo del modelo preferiblemente en el factor distancia de rodadura de la bola más que en el clipping. Señalaron que la variación en las distancias de la rodadura de la bola debido a las diferentes dosis de N tiene una implicación práctica para los jugadores de golf, quienes exigen una buena velocidad del green.

Los resultados muestran diferente precisión entre el FieldScout CM1000 y la cámara digital. Una posible explicación podría venir dada por los resultados expuestos por Lebourgeois *et al.* (2008), quienes afirmaron que la utilización de los ajustes automáticos en la realización de las fotografías distorsionaba la señal y reducía la precisión del proceso. Apuntaron que los ajustes de la cámara deben estar perfectamente configurados, es decir, con una mayor especificidad. En este estudio, la diferencia de precisión entre ambos sensores, podría haberse acentuado debido a que uno de los objetivos fue la simplificación, de tal manera que el greenkeeper no requiriese un elevado conocimiento sobre fotografía. Sin embargo, con el fin de corregir la diferencia entre ambos sensores, se desarrollaron las correlaciones anteriormente mencionadas, que permitiesen convertir los valores de DGCI a valores de CM1000 y así poder aplicarse los modelos de CM1000 (Tabla 2).

Tabla 2. Modelos estacionales para diagnosticar la cantidad de fertilizante nitrogenado necesario para optimizar la calidad estética y las condiciones de juego en un green de *Agrostis stolonifera*. Los modelos se han desarrollado a partir de la media de los valores obtenidos de 2 sensores remotos (FieldScout CM1000 y la cámara digital) y del Stimpmeter. Los modelos se basan en el concepto de Índice de Suficiencia (SI) (Peterson et al., 2003). También se muestran las correlaciones estacionales entre los sensores remotos mencionados.

<i>Estación</i>	<i>Sensor y correlación</i>	<i>Modelo</i>	<i>Ajustado SI<sup>a</sup></i>	<i>Dosis óptima de N (kg ha<sup>-1</sup>)</i>
Primavera	<b>CM1000</b>	$SI = -5 \times 10^{-5}N^3 - 3 \times 10^{-4}N^2 + 0.047N + 0.52$	0.88	11.1
	<b>Cámara</b>	$SI = -1 \times 10^{-4}N^3 + 1.8 \times 10^{-3}N^2 + 0.008N + 0.81$	0.90	8.6
	<b>Correlación</b>	CM1000 = 1310×DGCI – 252	–	–
Verano	<b>CM1000</b>	$SI = -2 \times 10^{-4}N^3 + 1.6 \times 10^{-3}N^2 + 0.064N + 0.48$	0.89	7.2
	<b>Cámara</b>	$SI = -4 \times 10^{-4}N^3 + 5.1 \times 10^{-3}N^2 + 0.011N + 0.76$	0.90	6.7
	<b>Correlación</b>	CM1000 = 1314×DGCI – 266	–	–
Otoño	<b>CM1000</b>	$SI = -6 \times 10^{-5}N^3 + 3 \times 10^{-4}N^2 + 0.037N + 0.58$	0.90	11.6
	<b>Cámara</b>	$SI = -7 \times 10^{-5}N^3 + 0.001N^2 + 0.013N + 0.81$	0.91	9.6
	<b>Correlación</b>	CM1000 = 1369×DGCI – 266	–	–
Invierno	<b>CM1000</b>	$SI = -7 \times 10^{-5}N^3 - 0.0031N^2 + 0.091N + 0.48$	0.88	6.7
	<b>Cámara</b>	$SI = -4 \times 10^{-4}N^3 + 0.0045N^2 + 0.001N + 0.81$	0.89	5.8
	<b>Correlación</b>	CM1000 = 1631×DGCI – 352	–	–

<sup>a</sup> SI ajustado es la intersección entre los valores relativos de los modelos de respuesta al N de los sensores y de la distancia de rodadura de la bola menos 0.05 de acuerdo con la teoría del SI de Peterson *et al.* (2003).

En este estudio se comprobó, tras la comparación de ambos sensores, que la sensibilidad de los modelos (rango de SI) de CM1000 y de la cámara digital fue diferente. El CM1000 fue más preciso que la cámara digital ya que exhibió un mayor rango de SI, y por lo tanto una mayor posibilidad de aplicación (Tabla 2).

A pesar de que requieren un mayor tiempo de procesamiento de datos y que el CM1000 es más preciso, las cámaras digitales no se pueden anular como dispositivos para la determinación de N en césped, dado que por un lado, los valores reales de DGCI se pueden convertir a un índice de CM1000 y obtener resultados similares a los que saldrían utilizando

los modelos de CM1000 y, por otro, son unos sensores menos costosos. La precisión de las cámaras digitales es limitada ya que el rango del SI es menor (Tabla 2).

La forma de aplicación de estos modelos estacionales es el siguiente:

1. Establecer una parcela sobre-fertilizada en el green donde se tomen los valores máximos. Como se ve en la figura 1, los valores máximos del CM1000 medidos cada 10 días fueron 10.7, 13.3, 15.8, y 16.1 kg N ha<sup>-1</sup> en el invierno, verano, primavera, y otoño, respectivamente.
2. Se deben tomar lecturas con el FieldScout CM1000 en la parcela sobre-fertilizada y un muestreo representativo en el resto del green, para posteriormente realizar el promedio de las lecturas de las dos áreas por separado.
3. Se divide la lectura del green por la de la parcela sobre-fertilizada para obtener el SI. Utilizando los algoritmos obtenidos en este estudio, si el SI obtenido es superior a los valores que se muestran en la Tabla 2, no es necesaria ninguna aplicación de fertilizante nitrogenado. Si el SI es inferior, como se ve en el ejemplo en el que se ha utilizado una fecha al azar en la primavera con un SI de 0.72 (Fig. 13), se utiliza la ecuación de la Tabla 2 para determinar el N disponible en el green en kg ha<sup>-1</sup> de la fertilización nitrogenada aplicada. Por último, para cada estación, se resta la cantidad de la dosis óptima de N fertilizante (Tabla 2), obteniendo la cantidad a aplicar. Así que en el ejemplo, utilizando el modelo correspondiente de la tabla 2 nos dice que el N del que dispone el green equivale a 4.5 kg N ha<sup>-1</sup>, por tanto para optimizar el green debemos restar esta cantidad a la cantidad óptima, en este caso 11.1, siendo necesario aplicar 6.6 kg N ha<sup>-1</sup> (Fig. 13).

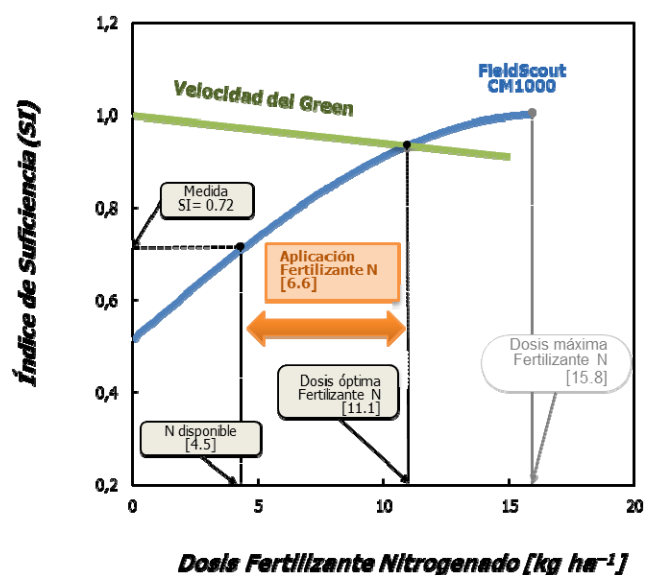


Figura 13. Modelo de respuesta (SI o valores relativos) de la calidad estética y de las condiciones de juego (distancia de rodadura de la bola) a las aplicaciones de fertilizante nitrogenado, medidas por el stimpmeter y el FieldScout CM1000 en un green de golf de *Agrostis stolonifera*. Ejemplo de un cálculo del N óptimo para una cantidad de N determinada.

De los puntos de intersección se obtienen los valores óptimos de N fertilizante y el índice de suficiencia que optimiza la calidad de juego y estética. Al considerar los óptimos, las dosis de N se redujeron (Tabla 2 y fig. 13). Para el CM 1000 las dosis óptimas de N fueron 11.1, 7.2, 11.6 y 6.7 kg N ha<sup>-1</sup> en la primavera, verano, otoño e invierno, respectivamente. Para la cámara digital, fueron 8.6, 6.7, 9.6 y 5.8 kg N ha<sup>-1</sup> para las mismas estaciones, respectivamente (Tabla 2).

En el caso de utilizarse el otro sensor, la cámara digital, primero hay que hacer 1 ó 2 fotografías de la parcela de referencia y entre 5 y 10 del green, calcular el DGCI, de acuerdo con Karcher y Richardson (2003), convertir estos valores a los del FieldScout CM1000 utilizando el algoritmo obtenido para este sensor y proceder de igual forma que antes (Tabla 2). Utilizando los datos de la misma fecha con el modelo de la cámara digital, si por ejemplo el SI es de 0.85, según el modelo, son necesarios 5.4 kg N ha<sup>-1</sup> (Tabla 2), mientras que si se

convierten los valores de DGCI el SI es de 0.73 y la aplicación de 6.4 kg N ha<sup>-1</sup>, la cual es prácticamente la misma.

Confrontando los dos sensores y los resultados obtenidos para una misma fecha, se puede afirmar que se podría determinar el N del green usando sólo la cámara digital, pues la velocidad de la bola aumentaría y la calidad estética teniendo en cuenta el color y la percepción visual sería buena, incluso económicamente y ecológicamente sería mejor pues se gastaría menos N y se ahorraría en costes; sin embargo, la cámara digital es menos precisa y lleva más tiempo.

#### **4.5. Aplicación del modelo en un campo de golf**

Los modelos obtenidos en este estudio, no sólo se pueden aplicar en un green, sino también a un campo de golf en su conjunto. Para ello, las pautas a seguir son las siguientes:

1. Tomar medidas con el sensor remoto en un green y entre greens.
2. Establecer un número razonable de unidades con las mismas condiciones de mantenimiento, por ejemplo, 3-5 en un campo de golf de 18 hoyos.
3. Establecer parcelas de referencia o sobre-fertilizadas en un green por cada unidad de igual manejo del green.
4. El área de la parcela de referencia puede ser de aproximadamente 1 m<sup>2</sup> o ligeramente más pequeña. Estas parcelas recibirán cada 10 días las cantidades de N fertilizante máximo que aparecen en la tabla 2 para el FieldScout CM1000.
5. El área de la parcela de referencia debe ser movido cada estación dentro de un green o a otro green, para evitar los efectos negativos del exceso de fertilización nitrogenada. Antes de utilizar una nueva parcela de referencia, ésta debe ser previamente sobre-fertilizada durante al menos 20 días para alcanzar los valores máximos con el sensor remoto.

6. El greenkeeper debería tomar medidas cada 5-10 días, entre las 12:00 y 14:00 horas con el green seco, tomando unas 5 medidas en la parcela de referencia, y entre 20 y 30 en el green, obteniendo en ambos casos la media. Dividiendo la media de cada unidad de manejo por el valor medio de su parcela de referencia correspondiente para obtener el valor normalizado, que es el SI. Si el SI obtenido es mayor que el SI ajustado, no se aplicará N, mientras que si es menor, sí.

Los modelos algorítmicos de fertilización nitrogenada derivados de este estudio, basados en la detección de N mediante sensores remotos, contribuyen a la labor iniciada por Carrow *et al.* (2010) en este ámbito, encaminando la práctica del golf mediante una gestión adecuada, a una agricultura de precisión. Es decir, estos modelos mejoran la eficiencia, la sostenibilidad y los beneficios económicos de una apropiada fertilización nitrogenada en los greens de los campos de golf a la vez que mejoran su calidad.

A pesar de que el experimento de Carrow *et al.* (2010) se desarrolló en un fairway de un campo de golf, las pautas recomendadas en cuanto al número de unidades de igual manejo se acercan a las sugeridas a raíz de este estudio. Ellos propusieron que en un campo de golf debía haber de 4 a 6 unidades, habiendo 2 ó 3 en un solo fairway.

En el caso de un green, al ser el área más pequeña y al presentar unas condiciones de suelo muy homogéneas, no requiere la división en parcelas que necesiten un mismo mantenimiento. Para alcanzar la máxima eficiencia y la mayor rentabilidad económica, se debe establecer un equilibrio coherente entre el número de unidades de igual manejo y el tiempo dedicado a las mismas.

En este estudio los resultados, dependiendo de la estación del año y de las precipitaciones, han mostrado que el espacio de tiempo entre aplicaciones debe de ser de 8 a 13 días. Una disminución o ampliación de ese período de tiempo o de la frecuencia de las aplicaciones, podría afectar a la calidad, tanto estética como en lo referente a las condiciones de juego. La tasa de aplicación podría ser demasiado alta, disminuyendo la NUE (eficiencia de uso del N) por parte de la planta y aumentaría el riesgo de lixiviación de nitrato (Petrovic, 1990).

En ocasiones, el modelo puede recomendar una aplicación ligera cercana a 1 kg N ha<sup>-1</sup>, aproximadamente 8 días después de la última fertilización del césped, pero buscando la máxima rentabilidad económica y el menor daño ecológico se debe esperar hasta los 10 días. Ésta se considera la frecuencia de aplicación adecuada, 10 días.

Con respecto a las posibles fuentes de distorsión de la correcta aplicación del modelo, uno de los factores que se plantea pudiese afectar sería la utilización de una fuente diferente de fertilizante nitrogenado. Si bien es verdad que productos como el sulfato de amonio, el nitrato de amonio y la urea pueden dar valores más altos de reflectancia, este hecho no afecta al sensor que mostrará el N que está disponible. Que la fuente de N sea diferente no tiene un efecto importante en los resultados como han demostrado Davis y Dernoeden (2002), Schlossberg y Schmidt (2007) y Pease *et al.* (2011). Davis y Dernoeden (2002) demostraron que tras investigar con diferentes fuentes de N con 9 tipos de fertilizantes, ninguno incrementó directamente el estado de la actividad microbiana del suelo. La fuente de N no modificó el N disponible para la planta, por lo que podemos deducir que la fuente de N no modifica el N disponible para la planta, por lo tanto el sensor midió el N correcto.

Sin embargo, Schlossberg y Schmidt (2007) puntualizaron que aunque la forma nitrogenada no tuvo mucha influencia en los niveles moderados de producción de clipping, sí que podía influir en otros factores. Demostraron que los tratamientos que contenían más de un 50% de N amoniacal incrementaron significativamente el crecimiento, el color, la absorción de N y los niveles de nutrientes en hojas, comparado con los tratamientos que tenían más de un 50% de N en forma de nitrato.

No obstante, Pease *et al.* (2011) encontraron que la fuente de N, en tratamientos de urea, tuvo un efecto significativo sobre la distancia de rodadura de la bola, produciendo una distancia de rodadura de la bola inferior a la alcanzada con todas las otras fuentes de nitrógeno. En cualquier caso, la fuente de fertilizante nitrogenado no parece tener un efecto importante.

Sí pueden tener un efecto importante, el genotipo, las enfermedades y las plagas, la radiación y la disponibilidad de agua, entre otros factores, deberían ser estudiados específicamente para los greens, para evitar posibles fuentes de error. Hay que resaltar, que una gestión adecuada del riego es requisito indispensable para utilizar los modelos, puesto

que un exceso de riego podría afectar al N disponible y, como consecuencia, a las lecturas de los sensores.

Otro elemento que hay que tener en cuenta, es que el modelo se ha obtenido para *Agrostis stolonifera*. Se puede plantear la duda de si el modelo se podrá aplicar a otros cultivares. Efectivamente se puede, porque a pesar de que en los valores reales habrá diferencias, en los valores normalizados lo más importante será el diferencial entre la parcela con el máximo valor y cualquier otra parcela. Este diferencial tiende a ser constante en la mayoría de los casos, como ha sido demostrado por Samborski *et al.* (2009) en diferentes cultivos agronómicos. En el caso de que las diferencias entre cultivares fueran importantes deberían obtenerse modelos específicos para dicho cultivar o determinar la relación entre las lecturas del nuevo cultivar y el L-93 para convertir los datos.



## **5. CONCLUSIONES**

## 5. CONCLUSIONES

Los estudios realizados anteriormente sobre sensores remotos y su utilización en el césped se han focalizado en su mayoría en los aspectos de medición más que en la aplicación de dosis de N predeterminadas según las necesidades reales del césped. Sin embargo, la investigación llevada a cabo en este experimento ha permitido desarrollar un método de determinación de la necesidad de N, remoto y rápido, para el green de un campo de golf. Este avance reemplaza los programas de fertilización nitrogenada usados hasta el momento, asociados a unos patrones perjudicialmente estrictos establecidos según aproximaciones subjetivas e intuitivas basadas en medidas de calidad visual y en mediciones de la velocidad de rodadura de la bola.

La velocidad de la bola es un factor más influyente que la producción de biomasa aérea en la aplicación de los modelos obtenidos tanto para el medidor de clorofila CM1000 como para la cámara digital, ya que el clipping determina dosis óptimas más altas de N que perjudican a la velocidad de la bola.

El medidor de clorofila FieldScout CM1000 se puede utilizar para determinar la cantidad real de N necesaria para optimizar la calidad de juego, que depende sobre todo de la velocidad de rodadura de la bola, y la calidad estética de un green USGA de *Agrostis stolonífera* (cv. L-93), bajo prácticas de gestión similares a las llevadas a cabo en ambientes mediterráneos.

Una cámara digital puede utilizarse también para determinar la cantidad de N óptima, obteniendo primero el DGCI. El inconveniente es que es menos precisa que el CM1000, probablemente debido al uso de ajustes automáticos en la misma (para facilitar el trabajo del greenkeeper entre otros factores). El procedimiento más adecuado y aconsejable es convertir los valores reales de DGCI a valores reales de CM1000 y aplicar los modelos derivados de este sensor.

## **6. CONCLUSIONS**

## 6. CONCLUSIONS

The previous studies on remote sensor use in turfgrass has focused more on measurement considerations rather than N predetermined application rates according to the real needs of the turfgrass. However, the research carried out in this experiment has permitted us to develop a quick and remote method of N determination for a golf green. This approach replaces N fertilization programs used up to now which are associated with detrimentally strict models established according to subjective and intuitive approaches based on visual quality and ball roll distance measurements.

Ball speed is a more influential factor than the aerial biomass yield in the application of the obtained models as much from the CM1000 chlorophyll meter as from the digital camera, since the clipping yield determines higher optimal N rates that are prejudicial to ball speed.

Chlorophyll meter FieldScout CM1000 can be used to determine the actual amount of N needed to optimize the playability, which depends on green speed and the aesthetic quality of an *Agrostis stolonifera* USGA (cv. L-93) green, under similar management practices in Mediterranean environments.

A digital camera can also be used to determine the optimum N quantity, obtaining first the DGCI. The disadvantage is that it is less accurate than the CM1000, probably due to the use of automatic settings of the same (to facilitate the work of the greenkeeper among other factors). The most appropriate and advisable procedure is to convert actual DGCI values to actual CM1000 values and apply the models derived from this sensor.

## **7. REFERENCIAS**

## 7. REFERENCIAS

- Adamsen, F.J., P.J. Pinter, Jr., E.M. Barnes, R.L. LaMorte, G.W. Wall, S.W. Leavitt, and B.A. Kimball. 1999. Measuring wheat senescence with a digital camera. *Crop Sci.* 39:719–724.
- Adobe Systems. 2002. Adobe Photoshop v. 7.0. Adobe Systems, San Jose, CA.
- Adriano, D.C., Weber, J.T., 2001. Influence of fly ash on soil physical properties and turfgrass establishment. *J. Environ. Quality* 30, 596–601.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration. In: Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. FAO-Food and Agriculture Organization of the United Nations, Roma.
- Amberger, A., 1989. Research on dicyandiamide as a nitrification inhibitor and future outlook. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 20, 1933–1955.
- Barnes, H., Folkard, A.R., 1951. The determination of nitrates. *Analyst* 76, 599-603.
- Barton, L., Colmer, T.D., 2006. Irrigation and fertiliser strategies for minimizing nitrogen leaching from turfgrass. *Agric. Water Manage.* 80, 160–175.
- Beard, J.B. 1973. *Turfgrass: Science and culture*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Beard, J.B., 1973. *Turfgrass: Science and Culture*. Prentice Hall, New York, NY.
- Bell, G.E., Martin, D.L., Stone, M.L., Solie, J.B., Johnson, G.V., 2002. Turf area mapping using vehicle-mounted optical sensors. *Crop Sci.* 42, 648–651.
- Bowman, D.C., 2003. Daily vs. periodic nitrogen addition affects growth and tissue nitrogen in perennial ryegrass turf. *Crop Sci.* 43, 631–638.
- Bowman, D.C., Devitt, D.A., Engelke, M.C. and Ruffey, T.W. 1998. Root architecture affects nitrate leaching from bentgrass turf. *Crop Sci.* 38. 1633-1639.

- Bremner, J.M., 1965. Inorganic forms of nitrogen. In: Black, C.A., Evans D.D., Ensminger, L.E., White, J.L., Clark, F.E. (Eds.). *Methods of soil analysis, Part 2. Agron. Monogr. 9*, ASA and SSSA, Madison, WI, p. 1179-1237.
- Brilman, L.A. 2003. Velvet bentgrass (*Agrostis canina* L.). p. 201–205. In M.D. Casler and R.R. Duncan (ed.) *Turfgrass biology, genetics, and breeding*. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ.
- Brown, K.W., 1982. Nitrogen source effect on nitrate and ammonium leaching and runoff from greens. *Agron. J.* 74, 947–950.
- Brown, K.W., Duple, R.L., Thomas, J.C., 1977. Influence of management and season on fate of N applied to golf greens. *Agron. J.* 69, 667–671.
- Callahan, L.M., Sanders, W.L., Parham, J.M., Harper, C.A., Lester, L.D., McDonald, E.R., 1997. Comparative Methods of measuring thatch on a creeping bentgrass green. *Crop Sci.* 37:230-234.
- Callahan, L.M., Sanders, W.L., Parham, J.M., Harper, C.A., Lester, L.D., McDonald, E.R., 1998. Cultural and chemical controls of thatch and their influence on rootzone nutrients in a bentgrass green. *Crop Sci.* 38, 181–187.
- Carley, D.S., Goodman, D., Sermons, S., Shi, W., Bowman, D., Miller, G., Rufty, T., 2011. Soil organic matter accumulation in creeping bentgrass greens: a chronose-quence with implications for management and carbon sequestration. *Agron. J.* 103, 604–610.
- Carpenter, S.R., Caraco, N.F., Correll, D.L., Howarth, R.W., Sharpley, A.N., Smith, V.H., 1998. Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen. *Ecol. Appl.* 8, 559–568.
- Carrow, R.N., D.V. Waddington, and P.E. Rieke. 2001. *Turfgrass soil fertility and chemical problems: Assessment and management*. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ.
- Carrow, R.N., Krum, J.M., Flitcroft, I., Cline, V., 2010. Precision turfgrass management: challenges and field applications for mapping turfgrass soil and stress. *Precis. Agric.* 11, 115–134.
- Christians, N.E. 1998. *Fundamentals of turfgrass management*, Ann Arbor Press, Chelsea, MI. pp. 169-172.

- Davis, J.G., Dernoeden, P.H., 2002. Dollar spot severity, tissue nitrogen, and soil microbial activity in bentgrass as influenced by nitrogen source. *Crop Sci.* 42, 480–488.
- Engelsjord M.E., Singh, B.R. 1997. Effects of slow-release fertilizers on growth and on uptake and leaching of nutrients in Kentucky bluegrass turfs established on sand-based root zones. *Can. J. Plant Sci.* 77, 433-444.
- Fu, J., Dernoeden, P.H., Murphy, J.A., 2009. Creeping bentgrass color and quality, chlorophyll content, and thatch–mat accumulation responses to summer coring. *Crop Sci.* 49, 1079–1087.
- Gaussoin, R., J. Nus, and L. Leuthold. 1995. A modified stimpmeter for small-plot turfgrass research. *HortScience* 30:547–548.
- Green, D.G.; Beard, J.B. Seasonal Relationships Between Nitrogen Nutrition and Soluble Carbohydrates in the Leaves of *Agrostis palustris*. Huds., and *Poa pratensis* L. *Agron. J.* 1969, 61, 107-111.
- Handson, P.D., Shelley, B.C., 1993. A review of plant analysis in Australia. *Aust. J. Exp. Agric.* 33, 1029–1038.
- Hartley, W., 1950. The global distribution of tribes of the gramineae in relation to historical and environmental factors. *Aust. J. Agric. Res.* 1, 355–373.
- Hawes, D.T.; Decker, A.M. Healing Potential of Creeping Bentgrass as Affected by Nitrogen and Soil Temperature. *Agron J.* 1977, 69, 212-214.
- Heckman, J.R., Liu, H., Hill, W., Demilia, M., Anastasia, W.L., 2000. Kentucky bluegrass responses to mowing practice and nitrogen fertility management. *J. Sustain. Agric.* 15, 25–33.
- Horst, G.L., M.C. Engelke, and W. Meyers. 1984. Assessment of visual evaluation techniques. *Agron. J.* 76:619–622.
- Horst, G.L., P.J. Shea, N.E. Christians, D.R. Miller, C. Stuffer-Powell, and S.K. Starrett. 1996. Pesticide dissipation under golf course fairway conditions. *Crop. Sci.* 36:362-370.



- Hull, R.J., 1992. Energy relations and carbohydrate partitioning in turfgrasses. In: Waddington, D.V., Carrow, R.N., Shearman, R.C. (Eds.), *Turfgrass*. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, Madison, WI, pp. 175–206.
- Hurto, K.A., A.J. Turgeon, 1978. Optimizing the suitability of thatch. *The Golf Supt.* 46(6):28-30.
- Hurto, K.A., A.J. Turgeon, and L.A. Spomer. 1980. Physical characteristics of thatch as a turfgrass growing medium. *Agron. J.* 72:165-167.
- Johnsen, A.R., Horgan, B.P., Hulke, B.S., Cline, V., 2009. Evaluation of remote sensing to measure plant stress in creeping bentgrass (*Agrostis stolonifera* L.) fairways. *Crop Sci.* 49, 2261–2274.
- Johnson, G.V. 1973. Simple procedure for quantitative analysis of turfgrass color. *Agron. J.* 66:457–459.
- Johnson, P.G., Koenig, R.T., Kopp, K.L., 2003. Nitrogen, phosphorus, and potassium responses and requirements in calcareous sand greens. *Agron. J.* 95, 697–702.
- Jones, C.A. 1985. *C<sub>4</sub> Grasses and cereals: Growth, development, and stress response*. John Wiley & Sons, New York, pp.22-33.
- Karcher, D., T. Nikolai, and R. Calhoun. 2001. Golfer's perceptions of greens speeds vary: Over typical Stimpmeter distances, golfers are only guessing when ball-roll differences are less than 6 inches. *Golf Course Manage.* 69:57–60.
- Karcher, D.E., Richardson, M.D., 2005. Batch analysis of digital images to evaluate turfgrass characteristics. *Crop Sci.* 45, 1536–1539.
- Karcher, D.E., Richardson, M.D., 2003. Quantifying turfgrass color using digital image analysis. *Crop Sci.* 43, 943–951.
- Keskin, M., Dodd, R.B., Han, Y.J., Khalilian, A., 2004. Assessing nitrogen content of golf course turfgrass clippings using spectral reflectance. *Appl. Eng. Agric.* 20, 851–860.
- Kimura, T., A. Misawa, and T. Ochiai. 1989. Measuring seasonal changes in the leaf color of cool season turfgrass using a chroma meter.

- Koeritz, E.J., Stier, J.C., 2009. Nitrogen rate and mowing height effects on velvet and creeping bentgrasses for low-input putting greens. *Crop Sci.* 49, 1463–1472.
- Kopp, K.I., Guillard, K., 2002. Clipping management and nitrogen fertilization of turfgrass: Growth, nitrogen utilization, and quality. *Crop Sci.* 42, 1225–1231.
- Kruse, J.K., Christians, N.E., Chaplin, M.H., 2006. Remote sensing of nitrogen stress in creeping bentgrass. *Agron. J.* 98, 1640–1645.
- Landschoot, P.J., Mancino, C.F., 2000. A comparison of visual vs. instrumental measurement of color differences in bentgrass turf. *HortScience* 35, 914–916.
- Lebourgeois, V., Bégué, A., Labbé, S., Mallavan, B., Prévot, L., Roux, B. AT Can commercial digital cameras be used as multispectral sensors? A crop monitoring test, 2008. *Sensors* 8, 7300–7322.
- Lewis, D.C., Grant, I.L., Maier, N.A., 1993. Factors affecting the interpretation and adoption of plant analysis services. *Aust. J. Exp. Agric.* 33, 1053–1066.
- López-Bellido, L., Muñoz-Romero, V., López-Bellido, R.J., 2013. Nitrate accumulation in the soil profile: Long-term effects of tillage, rotation and N rate in the mediterranean vertisol. *Soil & Tillage Research.* 130, 18-23.
- López-Bellido, R.J., Lal, R., Danneberger, T.K., Street, J.R., 2010. Plant growth regulator and nitrogen fertilizer effects on soil organic carbon sequestration in creeping bentgrass fairway turf. *Plant Soil* 332, 247–255.
- Lui, X., and B. Huang. 2003. Mowing height effects on summer turf growth and physiological activities for two creeping bentgrass cultivars. *HortScience* 38:444–448.
- Lukina, E.V., M.L. Stone, and W.R. Raun. 1999. Estimating vegetation coverage in wheat using digital images. *J. Plant Nutr.* 22:341–350.
- Mangiafico, S.S., Guillard, K., 2005. Turfgrass reflectance measurements, chlorophyll, and soil nitrate desorbed from anion exchange membranes. *Crop Sci.* 45, 259–265.
- Mangiafico, S.S., Guillard, K., 2006. Anion exchange membrane soil nitrate predicts turfgrass color and yield. *Crop Sci.* 46, 569–577.

- Mangiafico, S.S., Guillard, K., 2007. Cool-season turfgrass color and growth calibrated to leaf nitrogen. *Crop Sci.* 47, 1217–1224.
- McCarty, L.B., Gregg, M.F., Toler, J.E., 2007. Thatch and mat management in an established creeping bentgrass golf green. *Agron. J.* 99, 1530–1537.
- Microsoft Corporation. 1999. MS Excel 2000. Microsoft Corp., Redmond, WA.
- Miltner, E.D., Branham, B.E., Paul, E.A., Rieke, P.E., 1996. Leaching and mass balance of <sup>15</sup>N-labeled urea applied to Kentucky Bluegrass turf. *Crop Sci.* 36, 1427–1433.
- Morton, T.G., Gold, A.J., Sullivan, W.M., 1988. Influence of overwatering and fertilization on nitrogen losses from home lawns. *J. Environ. Quality* 17, 124–130.
- Mosdell, D.K., Daniel, W.H., Freeborg, R.P., 1986. Evaluation of dicyandiamide-amended fertilizers on Kentucky bluegrass. *Agron. J.* 78, 801–806.
- Munsell Color. 2000. Conversion program overview [Online]. [1 p.] Disponible en: <http://www.munsell.com/Color%20Conversion.htm> [cited 26 March 2002; verified 1 Dec. 2002]. GretagMacbeth, New Windsor, NY.
- Nelson, S.H., and F.W. Sosulski. 1984. Amino acid and protein content of *Poa pratensis* as related to nitrogen application and color. *Can. J. Plant Sci.* 64:691–697.
- Paré, K., Chantigny, M.H., Carey, K., Dionne, J., 2008. Leaching of mineral and organic nitrogen from putting green profiles supporting various turfgrasses. *Crop Sci.* 48, 2010–2016.
- Pathan, S.M., Alymore, L.A.G., Colmer, T.D., 2004. Turf culture under declining volume and frequency of irrigation on a sandy soil with fly ash. *Plant Soil* 266, 355–369.
- Pease, B.W., Koeritz, E.J., Soldat, D.J., Stier, J.C., 2011. Nitrogen source and rate effects on velvet bentgrass putting green turf. *Crop Sci.* 51, 342–352.
- Peterson, T.A., Blackmer, T.M., Francis, D.D., Schepers, J.S., 1993. Using a chlorophyll meter to improve N management. Nebguide G93-1171A. Coop. Ext. Ser., Univ. of Nebraska, Lincoln.
- Petrovic, A.M., 1990 a. The fate of nitrogenous fertilizers applied to turfgrass. *J. Environ. Quality* 19, 1–14.

- Petrovic, A.M., 1990 b. The fate of nitrogenous fertilizers applied to turfgrass. *J. Environ. Quality*. 19, 124–130.
- Powell, A.J.; Blaser, R.E.; Schmidt, R.E. Effect of Nitrogen on Winter Root Growth of Bentgrass. *Agron. J.* 1967a, 59, 529-530.
- Powell, A.J.; Blaser, R.E.; Schmidt, R.E. Physiological and Color Aspects of Turfgrasses with Fall and Winter Nitrogen. *Agron. J.* 1967b, 59, 303-307.
- Purcell, L.C. 2000. Soybean canopy coverage and light interception measurements using digital imagery. *Crop Sci.* 40:834–837.
- Qian, Y.L., Bandaranayake, W., Parton, W.J., Mecham, B., Harivandi, M.A., Mosier, A.R., 2003. Long-term effects of clipping and nitrogen management in turfgrass on soil organic carbon and nitrogen dynamics: The CENTURY model simulation. *J. Environ. Quality* 32, 1694–1700.
- Quiroga-Garza, H.M., Picchioni, G.A., Remmenga, M.D., 2001. Bermudagrass fer-tilized with slow-release nitrogen sources. I. Nitrogen uptake and potential leaching losses. *J. Environ. Qual.* 30, 440–448.
- Reuter, D.J., Robinson, J.B., 1997. *Plant Analysis: An Interpretation Manual*. CSIRO, Australia, Collingwood, Vic.
- Richardson, A.D., Reeves, J.B., Gregoire, T.G., 2004. Multivariate analyses of visible/near infrared (VIS/NIR) absorbance spectra reveal underlying spectral differences among dried, ground conifer needle samples from different growth environments. *New Phytol.* 161, 291–301.
- Richardson, M.D., 2001. Quantifying turfgrass cover using digital image analysis. *Crop Sci.* 41, 1884–1888.
- Richardson, M.D., D.E. Karcher, and L.C. Purcell. 2001. Quantifying turfgrass cover using digital image analysis. *Crop Sci.* 41:1884–1888.
- Rodriguez, I.R., Miller, G.L., 2000. Using a chlorophyll meter to determine the chlorophyll concentration, nitrogen concentration, and visual quality of St. Augustinegrass. *HortScience* 35, 751–754.

- Samaranayake, H., Lawson, T.J., Murphy, J.A., 2008. Traffic stress effects on bentgrass putting green and fairway turf. *Crop Sci.* 48, 1193–1202.
- Samborski, S.M., Tremblay, N., Fallon, E., 2009. Strategies to make use of plant sensor-based diagnostic information for nitrogen recommendations. *Agron. J.* 101, 800–816.
- Sanchez, C.A., Doerge, T.A., 1999. Using nutrient uptake patterns to develop efficient nitrogen management strategies for vegetables. *HortTechnology* 9, 601–606.
- SAS Institute. 2003. SAS/STAT user's guide. Release 9.1 ed. SAS Inst., Cary, NC.
- Schlossberg, M.J., Karnok, K.J., 2001. Root and shoot performance of three creeping bentgrass cultivars as affected by nitrogen fertility. *J. Plant Nutr.* 24, 535–548.
- Schlossberg, M.J., Schmidt, J.P., 2007. Influence of nitrogen rate and form on quality of putting greens cohabited by creeping bentgrass and annual bluegrass. *Agron. J.* 99, 99–106.
- Schmidt, R.E.; Blaser, R.E. 1967. Effect of Temperature, Light and Nitrogen on Growth and Metabolism of 'Cohansey' Creeping Bentgrass. *Crop Sci.* 7:447-451.
- Skogley, C.R. 1975. Velvet bentgrass putting greens: Fertilizer and topdressing management. *USGA Green Sect. Rec.* 13:7–9.
- Skogley, C.R., and C.D. Sawyer. 1992. Field research. p. 589–614. In D.V. Waddington et al. (ed.) *Turfgrass*. Agron. Monogr. 32. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI.
- Smith, F.W., Loneragan, J.F., 1997. Interpretation of plant analysis: concepts and principles. In: Reuter, D.J., Robinson, J.B. (Eds.), *Plant Analysis: An Interpretation Manual*. CSIRO, Australia, Collingwood, Vic., pp. 1–34.
- Snyder, G.H., Augustin, B.J., Davidson, J.M., 1984. Moisture sensor-controlled irrigation for reducing N leaching in Bermudagrass turf. *Agron. J.* 76, 964–969.
- Sprague, H.B. Root Development of Perennial Grasses and Its Relation to Soil Conditions. *Soil Sci.* 1933, 36, 189-209.
- SPSS Inc. 1998. Sigma Scan Pro 5.0. SPSS Science Marketing Department, Chicago, IL.

- Starr, J.L., DeRoos, H.C., 1981. The fate of nitrogen fertilizer applied to turfgrass. *Crop Sci.* 21, 531–536.
- Streich, A.M., Gaussoin, R.E., Stroup, W.W., Shearman, R.C., 2005. Survey of management and environmental influences on golf ball roll distance. *Int. Turfgrass Soc. Res. J.* 10, 446–454.
- Trenholm, L.E., 1999. Relationship of multispectral radiometry data to qualitative data in turfgrass research. *Crop Sci.* 39, 763–769.
- Trenholm, L.E., Schlossberg, M.J., Lee, G., Parks, W., 2000. An evaluation of multispectral responses on selected turfgrass species. *Int. J. Remote Sens.* 21, 709–721.
- Thorogood, D., P.J. Bowling, and R.M. Jones. 1993. Assessment of turf colour change in *Lolium perenne* L. cultivars and lines. *Int. Turfgrass Soc. Res. J.* 7:729–735.
- Turgeon, A.J. 1979. Influence of thatch on soil is both positive and negative. *Weeds trees and turf* 18(4):48-50.
- Turgeon, A.J., 2008. *Turfgrass management*, 8th ed. Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Turner, T.R., Hummel, N.W., 1992. Nutritional requirements and fertilization. In: Waddington, D.V., Carrow, R.N., Shearman, R.C. (Eds.), *Turfgrass*. American Society of Agronomy. Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, Madison, WI, pp. 385–440.
- USGA Green Section Staff, 2004. USGA recommendations for a method of putting green construction. *USGA Green Sect. Rec.* 31 (2), 1–3.
- USGA, 1990. It's Time We Put the Green Back in Green Speed. *United States Golf Association Green Section Record* 28: 1-6.
- Waddington, D.V., Turner, T.R., Duich, J.M., Moberg, E.L., 1978. Effect of fertilization on Penncross creeping bentgrass. *Agron. J.* 70, 713–718.
- Warnke, S. 2003. Creeping bentgrass (*Agrostis stolonifera* L.). p. 175–185. In M.D. Casler and R.R. Duncan (ed.) *Turfgrass biology, genetics, and breeding*. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ.

Xiong, X., Bell, G.E., Solie, J.B., Smith, M.W., Martin, B., 2007. Bermudagrass seasonal responses to nitrogen fertilization and irrigation detected using optical sensing. *Crop Sci.* 47, 1603–1610.