

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

RAFAEL J. LÓPEZ-BELLIDO^a, LUIS LÓPEZ-BELLIDO^a, VERÓNICA MUÑOZ-ROMERO^a, PURIFICACIÓN FERNÁNDEZ-GARCÍA^a, JUAN M. LÓPEZ-BELLIDO^b, PEDRO J. LÓPEZ-BELLIDO^a, SARA CALVACHE^a

^a*Departamento de Ciencias y Recursos Agrícolas y Forestales, Universidad de Córdoba, Córdoba*

^b*Real Golf de Pedreña, Pedreña, Cantabria*

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; ayudando a reducir el estrés al que se somete por un manejo y uso intensivo.

Bajo óptimas condiciones de crecimiento y adecuada disponibilidad de otros nutrientes, el N promueve una cobertura de calidad, tanto en densidad como en color, vigor, adecuada proporción entre el sistema radicular y parte aérea, mayor capacidad de recuperación de daños y un buen estado sanitario general. Sin embargo, de la misma forma que una pobre fertilización nitrogenada impide conseguir un green de calidad, una excesiva fertilización nitrogenada puede producir efectos indeseados sobre la calidad. Los greenkeepers buscan una superficie de buena calidad; sin embargo, no es necesaria una

elevada producción de biomasa de corte o clipping, ya que incrementa los costes de mantenimiento por el aumento del clipping y el thatch (Pease et al., 2011). No obstante, aunque un elevado clipping no es una característica deseable en sí, 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. Según Callahan et al. (1998), McCarty et al. (2007) y Carley et al. (2011) un excesivo espesor de thatch limitan la permeabilidad del green, representando uno de los problemas más complejos del manejo del mismo. Además, un green con exceso de N puede ser más susceptible a sufrir daños por enfermedades o estrés durante el verano. 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). Finalmente, la baja capacidad de retener nutrientes y agua de los greens

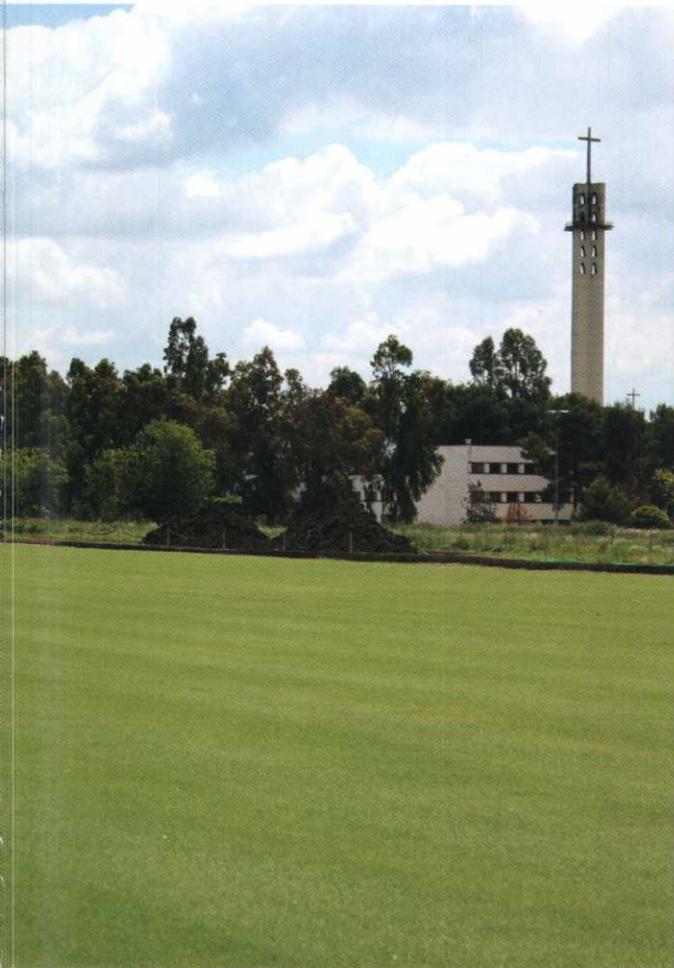


Vista del green experimental de la Universidad de Córdoba ubicado en el Campus de Rabanales

puede llevar al lavado de nitratos y los consiguientes efectos negativos sobre las aguas superficiales y subterráneas (Brown, 1982; Keskin et al., 2004; Paré et al., 2008).

TÉCNICAS PARA DETERMINAR LAS NECESIDADES DE NITRÓGENO

En la mayor parte de los casos, la fertilización nitrogenada está basada en un plan de aplicaciones predeterminado, en dosis fijas, y/o en una esperada mejora visual del green (Mangiafico y Guillard, 2007). Los métodos clásicos para determinar la dosis de N a aplicar han sido análisis de suelos o tejidos de la planta. Sin embargo, estas técnicas requieren muchas muestras, un gran trabajo, tiempo y coste. Otras desventajas de estos métodos es que son necesarios va-



rios días para obtener los resultados del laboratorio (Keskin et al., 2004) y los datos obtenidos nunca han sido convertidos en recomendaciones de aplicación de N fertilizante. Estas desventajas han hecho que muchos greenkeepers se decidan por un programa de fertilización nitrogenada más o menos predeterminado, que ajustan basándose en su experiencia previa y en la intuición, mediante el reconocimiento visual y la medida de la velocidad del green. Este tipo de manejo, por lo general, lleva a un exceso de fertilización nitrogenada (Mangiafico y Guillard, 2007), y como consecuencia, pueden aparecer los efectos negativos mencionados anteriormente. El color del césped es el principal componente de la calidad estética y un buen indicador del estatus de N. Aunque la evaluación del color visual-

RAPIDEZ
Los sensores remotos permiten determinar de forma rápida y barata el N disponible por medio de medidas relacionadas con el contenido de N del césped

Los métodos clásicos para determinar el contenido de N en suelos o tejidos nunca han sido del todo útiles, porque no han permitido obtener recomendaciones de aplicación de N fertilizante

mente es un sistema rápido que no requiere de ningún equipo, las medidas obtenidas son subjetivas y no se puede evitar el sesgo humano (Karcher y Richardson, 2003; Mangiafico y Guillard, 2007).

En los últimos años han aparecido nuevas técnicas para determinar el estatus de N del césped, tales como 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). Estas nuevas tecnologías pueden determinar de forma rápida y barata el N disponible por medio de medidas relacionadas con el contenido de N (Keskin et al., 2004) en comparación con los métodos clásicos.

Sin embargo, algunas tecnologías son más rápidas y precisas que otras. El colorímetro requiere algo más de tiempo ya que es necesario tomar muestras de clipping e introducirlo en el medidor (Mangiafico y Guillard, 2005). Además, Karcher y Richardson (2003) demostraron que las medidas de los colorímetros se ven afectadas por variaciones de color debidas a cambios estacionales, diferencias entre cultivares y área de medida relativamente pequeña. La fotografía digital permite cuantificar la cobertura y el color con más precisión que los métodos

tradicionales en una superficie de muestra relativamente mayor (Karcher y Richardson, 2003). Sin embargo, la cámara digital requiere más tiempo que los medidores de reflectancia, ya que después de obtener las fotografías éstas deben ser analizadas en un ordenador con software de fotografía del tipo Adobe Photoshop, Corel Photo-Paint, etc., para calcular el *dark green color index* (DGCI) (Karcher y Richardson, 2003). Mangiafico y Guillard (2005, 2007) señalaron que los medidores de reflectancia podrían ser la mejor herramienta para guiar la fertilización nitrogenada en céspedes, realizándolo en un tiempo de muestreo reducido (Kruse et al., 2006).

Las propiedades físicas de la hoja, tales como estructura celular, contenido de agua y concentración de pigmento afectan a las medidas de reflectancia de una cubierta vegetal. Valores más altos de reflectancia están asociados con mayor densidad y verdor, mientras que los valores menores representan lo contrario (Xiong et al., 2007). Se han obtenido correlaciones entre las medidas de reflectancia y calidad visual, color, contenido de N de los tejidos, cantidad de clipping o concentración de clorofila en distintas especies de césped (Bell et al., 2002; Keskin et al., 2004; Kruse et al., 2006; Mangiafico y Guillard, 2005 y 2007), lo que ha puesto de manifiesto el gran potencial de uso que tienen estos dispositivos para el manejo del N fertilizante. Sin embargo, la información proporcionada por estos sensores está

A pesar de los numerosos trabajos que hay sobre la predicción del estatus de N con sensores remotos, ningún estudio ha respondido realmente a la pregunta ¿qué cantidad de N debe aplicarse?

desafortunadamente sesgada por otros factores además del N, tales como especie, cultivar, suelo, disponibilidad de agua, altura de corte, enfermedades, desgaste, tráfico, etc. (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). Algunos estudios han utilizados los sensores de reflectancia para detectar el estrés hídrico y mejorar el riego. Keskin et al. (2004) y Xiong et al. (2007) señalaron que las diferencias en la dosis de riego no impiden 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.

A pesar de la gran cantidad de trabajos que hay sobre la predicción del estatus de N en greens con sensores remotos, ningún estudio ha respondido realmente a la pregunta ¿qué cantidad de N debe aplicarse? El problema reside en que, aparentemente, no hay definido un objetivo como en cualquier cultivo, donde se busca un rendimiento y calidad. Recientemente, Carrow et al. (2010) apuntaron que en céspedes el objetivo no es el rendimiento de clipping, sino que deben ser la uniformidad, color y calidad con el riego, la aplicación de fertilizantes, estrés ambiental, plagas, enfermedades, etc.; y por tanto, el estado del césped cambiará con las estaciones.

En un green también hay varios objetivos, principalmente

cobertura y color (ambos relacionados), crecimiento (relacionado con la cobertura) y velocidad. Por lo tanto el problema es cómo convertir o traducir las lecturas de los sensores en kg N ha⁻¹ que son necesarios aplicar en un lugar y en un momento determinado al green. El mismo procedimiento empleado con cultivos podría ser aplicado a un green de golf para desarrollar un algoritmo que responda a este interrogante.

EL GREEN USGA DE LA UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

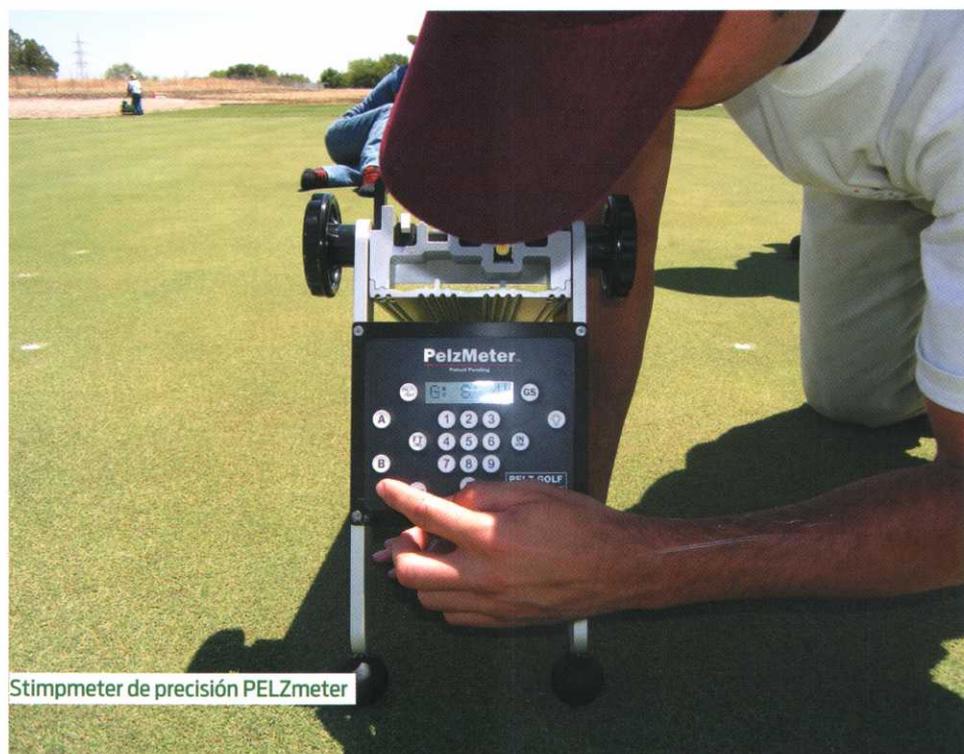
Por este motivo, en el green USGA de la Universidad de Córdoba, el único construido expresamente

SISTEMA
Los sensores remotos que se utilizaron fueron una cámara digital Olympus Camedia y el medidor de clorofila por reflectancia FieldScout CM1000

para investigar en toda Europa, se planteó un experimento de 3 años para estudiar la posibilidad de obtener modelos estacionales de fertilización nitrogenada que optimizaran la calidad de juego y estética de un green de *Agrostis stolonifera* L. (cv. L-93).

En el experimento se estudió el efecto de la dosis de N sobre la producción de clipping, calidad de juego y calidad estética. Las dosis de N, aplicadas cada 10 días, en función de las estaciones del año fueron: 0, 5, 10 y 15 kg N ha⁻¹ en primavera y otoño; y 0, 3, 6 y 9 kg N ha⁻¹ en verano e invierno. La dosis de riego diaria durante el verano fue del 80% de la ETc, con una Kc de 0.85, ya que previamente se había probado que su drenaje era cero y que no afectaba a la calidad estética del green. El N que se aplicó fue nitrato amónico de forma líquida. El corte se realizó 6 días por semana a la altura de 4 mm. El resto de prácticas de manejo fueron las habituales en la zona.

Los sensores remotos que se utilizaron fueron la cámara digital



Stimpmeter de precisión PELZmeter

Olympus Camedia C-5060WZ y el medidor de clorofila por reflectancia FieldScout CM1000. Como se ha mencionado con anterioridad, de las fotografías se determinó el DGCI de acuerdo con *Karcher y Richardson (2003)*. Para el clipping se utilizó la cortadora Greensmaster 1000 y para la velocidad del green el *stimpmeter PELZmeter™*. Todas las medidas se realizaron con una temporalidad que osciló entre una vez por semana o una vez cada dos. Finalizado el estudio se realizó un análisis de regresión tanto en los valores directamente obtenidos como en los normalizados. La normalización de los datos consistió en dividir todos los datos de un día de los parámetros estudiados por el máximo valor en cada repetición, realizándose posteriormente la media de las repeticiones. Los datos normalizados se les denomina también índice de suficiencia de N cuando nos permiten obtener valores reales de dosis de N según *Peterson et al. (1993)*.

GESTIÓN
Los valores óptimos estacionales de N fertilizante se obtuvieron mediante la intersección de la curva de respuesta al N fertilizante de los sensores y la recta de respuesta de la velocidad del green

CÁMARA DIGITAL VS. FIELDSCOUT CM1000

El análisis de regresión mostró que el mejor ajuste se produjo para ambos sensores y en todas las estaciones con una ecuación polinómica de tercer orden (Tabla 1). El ejemplo de la figura 1 muestra la curva de respuesta a la dosis de N fertilizante de los datos normalizados (índice de suficiencia) del *FieldScout* CM1000 y la lineal decreciente de la velocidad del green en primavera. Aunque la hipótesis inicial fue que habría sólo dos modelos, como reflejan los tratamientos, puede observarse que existen pequeñas variaciones tanto en la cantidad óptima como máxima entre las estaciones que se habían emparejado (Tabla 1).

Los valores máximos para los dos sensores fueron los siguientes: *FieldScout* CM1000 10.7, 13.3, 15.8 y 16.1 kg N ha⁻¹ en invierno, verano, primavera y otoño; cámara fotográfica 8.5,

9.6, 13.9 y 13.9 kg N ha⁻¹, para las mismas estaciones. Estos valores maximizan la calidad estética del green, pero como se ha comentado la calidad de juego también debe ser optimizada. Por lo tanto se determinó la intersección de la recta de velocidad del green con las curvas de respuesta de los sensores, de las que se obtuvieron los valores óptimos de N fertilizante (Fig. 1). También se determinó la misma intersección pero con la recta de respuesta del clipping, aunque de los puntos de intersección resultaron dosis óptimas más altas de N que perjudicaban a la velocidad del green.

Por esta razón se eligió la velocidad como factor más relevante, sin que esto tuviera un efecto significativamente negativo sobre la producción de clipping. En definitiva, de los puntos de intersección se obtienen los valores óptimos de N fertilizante y el índice de suficiencia (Tabla 1 y fig. 1) que optimiza la calidad de

Tabla 1

Modelos estacionales para la determinación la cantidad de N fertilizante necesaria para optimizar la calidad de juego y estética en un green de *Agrostis stolonifera* (cv. L-93) mediante sensores remotos. Los modelos están basados en el concepto de índice de suficiencia (SI). Los sensores remotos utilizados fueron la cámara digital Olympus Camedia C-5060WZ y el medidor de clorofila FieldScout CM1000, mostrándose también la correlación entre las lecturas reales de ambos. Para el análisis de las fotografías digitales se calculo el Dark Green Color Index [DGCI].

Estación	Sensores y correlaciones	Modelos	SI ajustado	Dosis óptima N [kg ha ⁻¹]	Dosis máxima N [kg ha ⁻¹]
Primavera	CM1000	SI = $-5 \times 10^{-5} N^3 - 3 \times 10^{-4} N^2 + 0.047N + 0.52$	0.88	11.1	15.8
	Cámara	SI = $-1 \times 10^{-4} N^3 + 1.8 \times 10^{-3} N^2 + 0.008N + 0.81$	0.90	8.6	13.9
	Correlación	CM1000 = 1310 × DGCI - 252	-	-	-
Verano	CM1000	SI = $-2 \times 10^{-4} N^3 + 1.6 \times 10^{-3} N^2 + 0.064N + 0.48$	0.89	7.2	13.3
	Cámara	SI = $-4 \times 10^{-4} N^3 + 5.1 \times 10^{-3} N^2 + 0.011N + 0.76$	0.90	6.7	9.6
	Correlación	CM1000 = 1314 × DGCI - 266	-	-	-
Otoño	CM1000	SI = $-6 \times 10^{-5} N^3 + 3 \times 10^{-4} N^2 + 0.037N + 0.58$	0.90	11.6	16.1
	Cámara	SI = $-7 \times 10^{-5} N^3 + 0.001N^2 + 0.013N + 0.81$	0.91	9.6	13.9
	Correlación	CM1000 = 1369 × DGCI - 266	-	-	-
Invierno	CM1000	SI = $-7 \times 10^{-5} N^3 - 0.0031N^2 + 0.091N + 0.48$	0.88	6.7	10.7
	Cámara	SI = $-4 \times 10^{-4} N^3 + 0.0045N^2 + 0.001N + 0.81$	0.89	5.8	8.5
	Correlación	CM1000 = 1631 × DGCI - 352	-	-	-

Índice de suficiencia [SI]

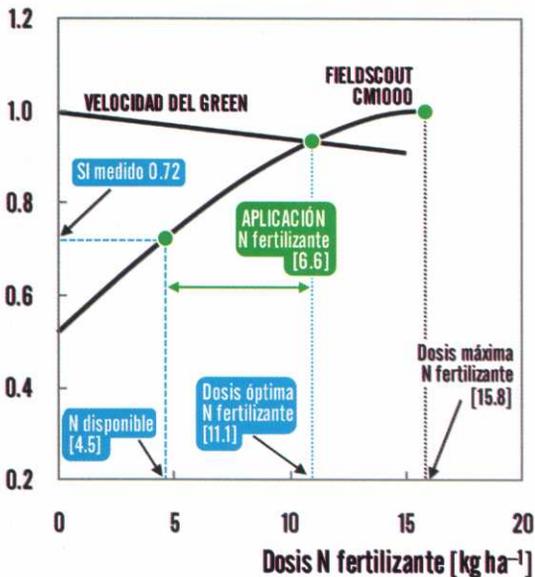


Figura 1
Modelos de respuesta de la calidad de juego (velocidad del green) y estética (FieldScout CM1000) a la dosis de N fertilizante en un green de *Agrostis stolonifera* en primavera. Los valores aparecen normalizados representando el índice de suficiencia [SI]. Ejemplo de cálculo del N que es necesario aplicar.

juego y estética. El índice de suficiencia ajustado que aparece en la tabla no es si no la resta de 0.05 al índice de suficiencia obtenido en cada intersección; esto se realiza para dar un margen de error, tal como propuso Peterson et al. (1993).

La cámara digital produce una subestimación de los valores de dosis óptima y máxima respecto al FieldScout CM1000, pero dado que existe relación entre los valores reales de ambos dispositivos, los valores de DGCI pueden

MODELOS
Para aplicar los modelos en un campo de golf hay que establecer de 3 a 5 tipos de greens o unidades de igual manejo y sus parcelas de referencia

convertirse a FieldScout CM1000 y utilizar los modelos de este, corrigiéndose la diferencia (Tabla 1).

Una de las dudas que le puede surgir a un greenkeeper que quiera utilizar estos modelos es que si aplica otra fuente de N quizás el modelo no pueda ser empleado. Sin embargo, este hecho es indiferente, la planta mediante el sensor 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). Otra cuestión que puede plantearse es qué sucede si el cultivar de agrostis es diferente. Obviamente los valores reales tomados con el sensor serán algo diferentes, pero para los valores normalizados lo más importante es el diferencial entre la parcela con el máximo valor y cualquier otra parcela. En la mayor parte de los casos, este diferencial tiende a ser constante, tal y como han demostrado Samborski et al. (2009) en diferentes cultivos. No obstante, las potenciales fuentes de error, tales como el genotipo, la disponibilidad de agua, radiación, enfermedades y plagas, deberían ser investigadas específicamente para los greens para salir de dudas. 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.

PAUTAS PARA APLICAR LOS MODELOS

Para aplicar los modelos del FieldScout CM1000 en un campo de golf, la forma de proceder es la siguiente: (I) tomar medidas en cada uno de los greens para determinar la variabilidad dentro del green y entre greens; (II) establecer un número razonable de unidades que recibirán el mismo manejo por mostrar valores similares del sensor, por ejemplo, en un campo de 18 hoyos debe haber de 3 a 5 tipos de greens o unidades de igual manejo; (III) establecer la parcela de referencia o parcela sobre-fertilizada en un green que represente a cada una de las unidades de igual manejo. El tamaño de la parcela de referencia debe ser de 1×1 m o un poco más pequeña. Estas parcelas recibirán cada 10 días las cantidades de N fertilizante máximo que aparecen en la tabla 1 para el FieldScout CM1000.

Las parcelas de referencia deben ser cambiadas dentro del green o a otro green de la misma unidad de manejo en cada estación para evitar efectos negativos por exceso de N. Antes de utilizar una nueva parcela de referencia, esta debe ser sobre-fertilizada durante unos 20–30 días antes para garantizar que se alcanzan las lecturas máximas; (IV) el greenkeeper debe tomar siempre las lecturas 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 obtenemos el valor normalizado, que es el índice de suficiencia (SI). Si el SI obtenido es mayor que el SI ajustado, no se aplica N, mientras que si es menor sí. En el ejemplo de la figura 1 se ve que el SI obtenido es de 0.72, utilizando el modelo correspondiente de la tabla 1 nos dice que el N del que dispone el green

La cámara digital produce una subestimación de los valores de dosis de N óptima respecto al FieldScout CM1000, pero esto puede corregirse dado que existe relación entre los valores reales de ambos dispositivos

equivale a 4.5 kg N ha^{-1} , por tanto para optimizar el green debemos restar esta cantidad a la cantidad óptima, en este ejemplo 11.1, siendo necesario aplicar 6.6 kg N ha^{-1} . Si lo que se utiliza es 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, convertir estos valores a los del FieldScout CM1000 (Tabla 1) y proceder de igual forma que antes.

Utilizando los datos del mismo día pero de la cámara digital el SI que se obtiene es de 0.85 y la cantidad a aplicar 5.4 kg N ha^{-1} , mientras que si se convierten los valores de DGCI el SI es de 0.73 y la aplicación de 6.4 kg N ha^{-1} , la cual es prácticamente la misma. No obstante, creemos que basándose sólo en la cámara digital, la velocidad aumentaría y la calidad estética sería suficiente para satisfacer la percepción del color que

NOVEDAD
Es la primera vez que se ha desarrollado un modelo de recomendación de N fertilizante en un green basado en sensores remotos, lo que permite abandonar la dosis rígidas

tiene el jugador de golf, siendo además menor el riesgo de pérdida de N por lavado. Nuestra experiencia nos ha mostrado que el green demanda N entre los 8 y 13 días dependiendo de la estación, lluvia, riego, etc. En algunos casos puede ser que el modelo después de 8 días nos diga que deba aplicarse 1 kg N ha^{-1} . En estos casos recomendamos que la aplicación sea retrasada, volviendo a medir 3 días más tarde para rentabilizar económicamente las aplicaciones.

CONCLUSIONES

Todos los estudios realizados en césped en general y en greens en particular, jamás han dado unas recomendaciones reales de la cantidad de N que hay que aplicar. Esta es la primera vez que se ha desarrollado un modelo de diagnóstico rápido de la necesidad de N basado en sensores remotos, lo que permite abandonar las dosis más o menos predeterminadas. El FieldScout CM1000 puede ser utilizado para determinar la cantidad de N que necesita el green optimizando la calidad de juego y estética en un green USGA de *Agrostis stolonifera* L. (cv. L-93) en condiciones mediterráneas. Una cámara digital también puede utilizarse por medio del cálculo del DGCI, pero es menos precisa; no obstante convirtiendo los valores de DGCI a valores de FieldScout CM1000 y utilizando los modelos de este último sensor los resultados son prácticamente los mismos, aunque se requiere un poco más de tiempo. Estos resultados tienen beneficios ambientales y económicos para los campos de golf.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio ha sido financiado por el Programa de Proyectos de Investigación de Excelencia, Consejería de Innovación, Ciencia y Empresa, Junta de Andalucía (Proyectos P06-AGR-01566 y P09-AGR-4806). ■

BIBLIOGRAFÍA

- Bell et al. 2002. *Crop Sci.* 42, 648–651.
- Brown. 1982. *Agron. J.* 74, 947–950.
- Callahan et al. 1998. *Crop Sci.* 38, 181–187.
- Carley et al. 2011. *Agron. J.* 103, 604–610.
- Carrow et al. 2010. *Precision Agric.* 11, 115–134.
- Davis y Dernoeden. 2002. *Crop Sci.* 42, 480–488.
- Fu et al. 2009. *Crop Sci.* 49, 1079–1087.
- Johnsen et al. 2009. *Crop Sci.* 49, 2261–2274.
- Karcher y Richardson. 2003. *Crop Sci.* 43, 943–951.
- Keskin et al. 2004. *Appl. Eng. Agric.* 20, 851–860.
- Kruse et al. 2006. *Agron. J.* 98, 1640–1645.
- Landschoot y Mancino. 2000. *HortScience* 35, 914–916.
- López-Bellido et al. 2010. *Plant Soil* 332, 247–255.
- Mangiafico y Guillard. 2005. *Crop Sci.* 45, 259–265.
- Mangiafico y Guillard. 2007. *Crop Sci.* 47, 1217–1224.
- McCarty et al. 2007. *Agron. J.* 99, 1530–1537.
- Paré et al. 2008. *Crop Sci.* 48, 2010–2016.
- Pease et al. 2011. *Crop Sci.* 51, 342–352.
- Peterson et al. 1993. *Nebguide G93-1171A. Coop. Ext. Ser., Univ. of Nebraska, Lincoln.*
- Samborski et al. 2009. *Agron. J.* 101, 800–816.
- Schlossberg y Schmidt. 2007. *Agron. J.* 99, 99–106.
- Streich et al. 2005. *Int. Turfgrass Soc. Res. J.* 10, 446–454.
- Xiong et al. 2007. *Crop Sci.* 47, 1603–1610.



Sensor remoto de medición de la clorofila por reflectancia FieldScout CM1000