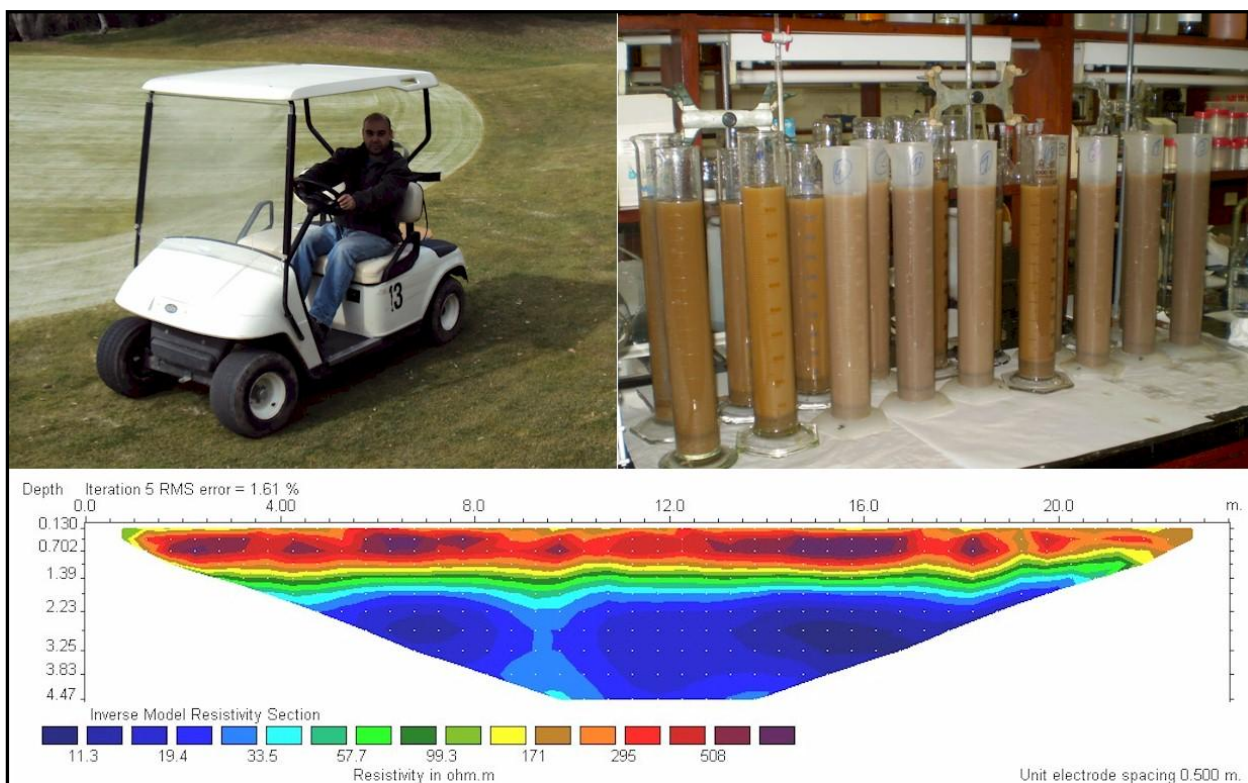




UNIVERSITAT DE BARCELONA



CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA DE LOS *GREENS* DE UN CAMPO DE GOLF REGADO CON AGUA REGENERADA. APROXIMACIÓN TEXTURAL E HIDROLÓGICA



AUTOR: Raúl Lovera Carrasco

MÁSTER OFICIAL

Agua. Análisis Interdisciplinar y Gestión Sostenible

TUTORES: Dra. Josefina C. Tapias y Dr. Mahjoub Himi

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	1
1. INTRODUCCIÓN	3
2. OBJETIVOS.....	6
3. METODOLOGÍA Y RESULTADOS	7
4. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	43
5. CONCLUSIONES	51
6. BIBLIOGRAFÍA	52

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Club de Golf Girona. (http://www.golfgirona.com)	7
Figura 2. Batería de tamices	9
Figura 3. Curvas granulométricas de las 18 muestras de <i>greens</i>	10
Figura 4. Agitador mecánico usado para la homogenización de las muestras para el método Bouyoucos.	11
Figura 5. Imagen de las probetas preparadas para la realización del método. La metodología se repitió para las 40 muestras recogidas..	12
Figura 6. Representación textural de las muestras recogidas en los 18 <i>greens</i>	15
Figura 7. Representación textural de las 11 muestras recogidas en el <i>green</i> 11	16
Figura 8. Representación textural de las 11 muestras recogidas en el <i>green</i> 16	17
Figura 9. Representación de los valores de conductividad medidos en el conjunto de los 18 <i>greens</i>	19
Figura 10. Representación los valores de conductividad medidos en las muestras del <i>green</i> 11	19
Figura 11. Representación los valores de conductividad medidos en las muestras del <i>green</i> 16	20
Figura 12. Porcentaje de carbono orgánico en las muestras de los 18 <i>greens</i>	23
Figura 13. Variación del contenido en carbono orgánico en las muestras del <i>green</i> 11	24
Figura 14. Variación del contenido en carbono orgánico en las muestras del <i>green</i> 16	24

Figura 15. Líneas equipotenciales y líneas del flujo. (a) en el plano vertical de los electrodos. (b) en el plano horizontal de la superficie del terreno.....	28
Figura 16. Disposición de las medidas en el método de tomografía eléctrica.....	30
Figura 17. Equipo SYSCAL PRO	30
Figura 18. Los 18 <i>greens</i> donde se realizaron tomografías	33
Figura 19. Perfil de tomografía.....	33
Figura 20. Perfiles de tomografía realizados	35
Figura 21. Disposición de las medidas obtenidas en las 3 direcciones del espacio mostradas en tres diferentes vistas.....	38
Figura 22. Disposición del cable de medida en la adquisición de un perfil 3D, los electrodos vienen representados con círculos negros	38
Figura 23. Perfil 3D en el <i>green</i> 11	39
Figura 24. Bloque diagrama 3D en los planos X-Z e Y-Z del <i>green</i> 11.....	39
Figura 25. Geometría de las arenas en el <i>green</i> 11	40
Figura 26. Perfil 3D en el <i>green</i> 16	41
Figura 27. Bloque diagrama 3D en los planos X-Z y Y-Z del <i>green</i> 16.....	41
Figura 28. Diferentes vistas de la geometría 3D de las arenas del <i>green</i> 16	42
Figura 29. Resultados de los ensayos edafológicos en las muestras de los <i>greens</i>	43
Figura 30. Relación entre el diámetro de partícula y la resistividad eléctrica.....	44
Figura 31. Permeabilidad obtenida a partir de la fórmula de Hazen	45
Figura 32. Medidas de conductividad eléctrica y porcentaje de carbono orgánico en las muestras de los <i>greens</i> 11 y 16	47

Figura 33. Clasificación textural de Bouyoucos para las muestras de los <i>greens</i> 11 y 16	47
Figura 34. Tomografías realizadas en el <i>green</i> 11 y 16	48
Figura 35. Diferentes vistas obtenidas con la tomografía 3D.....	49

AGRADECIMIENTOS

La realización de este estudio no habría sido posible sin el trabajo de personas e instituciones que han volcado sus energías y talento en este proyecto. Mi más sentido agradecimiento para:

La **Dra. Josefina C. Tapias** por su trabajo e implicación en este estudio, así como por todos los conocimientos que me ha transferido y su constante ayuda. También me ha enseñado qué es ser un buen profesor. Asimismo agradecer a la Dra. Tapias su trabajo como coordinadora del Máster en Agua. Análisis Interdisciplinar y Gestión Sostenible, consiguiendo ofrecer una titulación con un gran nivel.

Al **Dr. Mahjoub Himi** por el tiempo dedicado tanto en el gabinete como en el campo para realizar este trabajo, así como por su constante disponibilidad para transmitir todo lo que le ha proporcionado su experiencia. Gracias también por ser un gran compañero de trabajo.

Al **Dr. Albert Casas** agradecerle que propusiera involucrarme en este proyecto en el que se ha volcado totalmente. Gracias por toda la ayuda no solo para este trabajo sino también por toda la que he recibido en estos últimos años.

A los **Drs. Ignaci Queralt** y **Eva Marguí** que con su trabajo han complementado de manera brillante los resultados aquí expuestos. No hay que olvidar además, que sus gestiones con la dirección del Club de Golf Girona nos han permitido realizar todo el trabajo de campo sin ningún problema.

A la dirección del **Club de Golf Girona** por permitir la realización de este trabajo y agradecer su inestimable colaboración y disposición.

Al *greenkeeper* **Xavier Girol** del Club de Golf Girona.

A todo el personal del **Departament de Geoquímica, Petrologia i Prospecció Geològica**.

A todo el personal del **Laboratorio de Edafología** de la Facultad de Farmacia por la ayuda prestada, así como por la acogida y el trato recibido que ha sido excepcional.

Finalmente a todos los **docentes** que han impartido clases en el Máster en Agua. Análisis Interdisciplinar y Gestión Sostenible por el trabajo realizado y animarles a continuar con su estupenda labor.

Este estudio ha sido financiado por el **Ministerio de Ciencia e Innovación de España** con los proyectos CGL2009-07025 y CSD2006-00044.

1. INTRODUCCIÓN

La presente memoria se realiza para la obtención del título de Máster Oficial en Agua. Análisis Interdisciplinar y Gestión Sostenible ofertado por la *Universitat de Barcelona*.

Este estudio tiene la finalidad de caracterizar los *greens* de un campo de golf desde un punto de vista edáfico, así como geofísico. Si bien han habido diferentes trabajos que han estudiado los campos de golf a partir de datos edáficos, la utilización de un método geofísico como la tomografía eléctrica para caracterizar los campos de golf no ha sido muy común. La correlación de los análisis químicos, físicos y físico-químicos con la información extraída de la geofísica constituye el carácter innovador del presente trabajo; asimismo al utilizar diferentes técnicas se aborda el problema con la pluridisciplinaridad que da nombre al propio Máster.

Los campos de golf pueden considerarse como uno de los principales consumidores de agua por lo que es necesario buscar estrategias que proporcionen una optimización de consumo de agua para el riego de los campos y mejoren su imagen ambiental. Esto ha impulsado a los propios gestores de los campos de golf a intentar reducir el consumo, en parte para mejorar su imagen, pero también para mitigar el elevado coste que les representa poder disponer de los caudales suficientes con las metodologías que utilizan actualmente. Al mismo tiempo, las autoridades hidrológicas están forzando el uso de fuentes alternativas de agua de riego, sobre todo de aguas residuales regeneradas.

De este modo, los resultados de este estudio pretenden aportar nuevas informaciones que ayuden a gestionar la utilización de agua en los campos de golf; desde un punto de vista pluridisciplinar.

La industria de golf en España ha experimentado un crecimiento extraordinario desde 1950. En España hay ahora más de 300 campos de golf y casi un cuarto de millón de jugadores autorizados, mientras que hace 15 años, el número de jugadores de golf no alcanzaba 30.000. Hoy día, el golf no puede ser considerado simplemente como un deporte porque los intereses económicos son muy importantes. En Cataluña, el golf produce un impacto económico de casi 20 millones de euros al año y las Autoridades de

Turismo de Cataluña entendieron desde hace tiempo el golf como una política para promover turismo de interés especial (Priestley, 1987).

Desde este punto de vista, España es el segundo país más atractivo para el golf en Europa, con las Islas Baleares, la Costa del Sol, y Cataluña como los destinos principales. Convertida en una de las prácticas que más ha producido modificaciones en los tipos del uso de tierra, el desarrollo de campos de golf a menudo ha generado la controversia. En años recientes, ha habido una considerable demanda de campos de golf lo que ha impulsado el uso y desarrollo de estrategias de diseño, construcción y dirección para adoptar prácticas ambientalmente sostenibles en los campos de golf (Tapias y Salgot, 2006).

A pesar de que ya se han aplicado técnicas geofísicas en la industria de golf no es común que los métodos geofísicos sean utilizados por los *greenkeepers* para conseguir un mejor entendimiento de las propiedades del suelo que influyen en el césped. Estas propiedades no sólo afectan al césped sino también tienen influencia en otros parámetros del suelo, como nutrientes y lixiviación de plaguicida.

Desde el punto de vista social, una de las preocupaciones ambientales principales en cuanto a campos de golf es el consumo de agua para su mantenimiento. Hay argumentos que sostienen que la cantidad de agua usada para el riego de un campo de golf constituye un exceso, además hay una parte de la sociedad que considera el golf como una actividad suntuaria. Esto ha presionado a la dirección y *greenkeepers* a desarrollar modelos de gestión más sostenibles que tienen como objetivo reducir el consumo de agua, minimizando de esta forma el coste del consumo de agua, así como usos indebidos de la misma. El consumo de agua en un campo de golf depende de sus dimensiones, la meteorología local, la retención de agua propia del substrato, y las exigencias de consumo del césped. En general el consumo de agua de un campo de golf que conste de 18 hoyos está alrededor de $0,3 \text{ Mm}^3$ por año (Tapias, 1998).

En la actualidad, la legislación vigente (Real Decreto 1620/2007) obliga a regar los campos de golf con agua regenerada. En el caso de España los campos de golf usan de manera sistemática el agua regenerada como fuente de riego. Desde que se implantó el uso de agua regenerada ha sido necesaria la realización de estudios detallados sobre problemas técnicos y de viabilidad del uso de esta agua. El agua regenerada en comparación con el agua potable y/o de pozo se caracteriza por lo general por tener un

mayor aporte de sales, requiriendo el control cuidadoso de riesgos potenciales relacionados con las sales que se lixivian hacia abajo (Brauen y Stahnke, 1995).

La infiltración es generalmente más rápida en suelos arenosos debido a que tienen una mayor porosidad y por eso la irrigación debe ser aplicada con más frecuencia, es por tanto necesario un alto grado de conocimiento del estado general de *green* para poder conocer con mayor exactitud el consumo de agua.

Generalmente para realizar el estudio de un suelo se recogen muestras, las cuales una vez analizadas nos darán una información puntual. Para ello se emplean técnicas destructivas para la recolección de las muestras y técnicas analíticas para las determinaciones químicas, físicas y físico-químicas. Además de ser un trabajo largo y laborioso, la información obtenida será exclusivamente de la zona muestreada. Si se quiere hacer extensible a una zona más amplia, implica realizar un mayor número de muestreos, lo que conlleva realizar más análisis de laboratorio y a una mayor destrucción de la zona.

En el caso que nos ocupa, los *greens* de los campos de golf, resulta prácticamente imposible realizar muestreos mediante técnicas destructivas dado el impacto negativo que conlleva. Se ha de tener en cuenta que los *greens* son las zonas más delicadas de los campos de golf, construidas generalmente con un tipo de arena silíceo determinada, y con un tipo de césped que requiere cuidados específicos; mayor aporte de agua, de nutrientes, plaguicidas, etc. Otro estrés que sufren estas zonas, es el corte del césped, y el paso sucesivo de los jugadores, esto implica una mayor compactación del suelo y los problemas que ello conlleva. El conjunto de todos estos factores influyen en el estado de los *greens*, haciéndolos más susceptibles a plagas, enfermedades, problemas de infiltración, etc.

Dado que la construcción de un *green* es extremadamente costosa, realizar varios muestreos es prácticamente imposible, ya que quedaría inutilizado para el juego.

Este estudio pretende correlacionar la tomografía eléctrica, técnicas geofísicas no destructivas, realizada en el campo de golf con determinaciones analíticas realizadas en el laboratorio a partir de muestras obtenidas por técnicas destructivas con el fin de caracterizar los *greens* de los campos de golf, y de esta manera minimizar el impacto de los ensayos analíticos consiguiendo una optimización del uso del agua, así como para determinar problemas puntuales en distintas zonas del mismo *green*.

2. OBJETIVOS

Los objetivos principales de este estudio son:

- Demostrar la fiabilidad de los métodos geofísicos, en particular la tomografía, para la caracterización de *greens*.
- Proporcionar evidencias de que los métodos geofísicos pueden ser herramientas útiles para mejorar el mantenimiento y la remodelación de los *greens* de los campos.
- Correlacionar la información extraída de la realización de una campaña edafológica con una campaña de geofísica.
- Determinar si la prospección geofísica en campos de golf pueda dar información tal que sean necesarios menos muestreos y por tanto menos ensayos de laboratorio.
- Destacar las ventajas de la utilización de métodos no destructivos frente a métodos analíticos más invasivos que requieren la extracción de muestras alterando el medio.
- Determinación de la geometría de los *greens* a partir de tomografía eléctrica en 2D y 3D.
- Evaluar la permeabilidad hidráulica de los *greens* a partir de curvas granulométricas, y relacionar la resistividad proporcionada con la tomografía con la granulometría para obtener información hidrológica de las características de drenaje.

3. METODOLOGÍA Y RESULTADOS

El estudio que se presenta en esta memoria se basa en la realización de dos metodologías distintas: una campaña edafológica y otra de naturaleza geofísica.

Los trabajos de campo se realizaron en las instalaciones del Club de Golf Girona, a lo largo de aproximadamente 10 días entre febrero y junio de 2010; la elección de los días de trabajo se hizo conjuntamente con la dirección y los *greenkeepers* del Club de Golf Girona dependiendo de las condiciones meteorológicas y de la afluencia de socios.

El Club de Golf Girona (figura 1) se encuentra en Sant Julià de Ramis, es un municipio de la comarca del *Gironès*, que forma parte del área urbana de Girona. Se encuentra a aproximadamente 117 Km. de Barcelona y a unos 60 Km. de Francia.

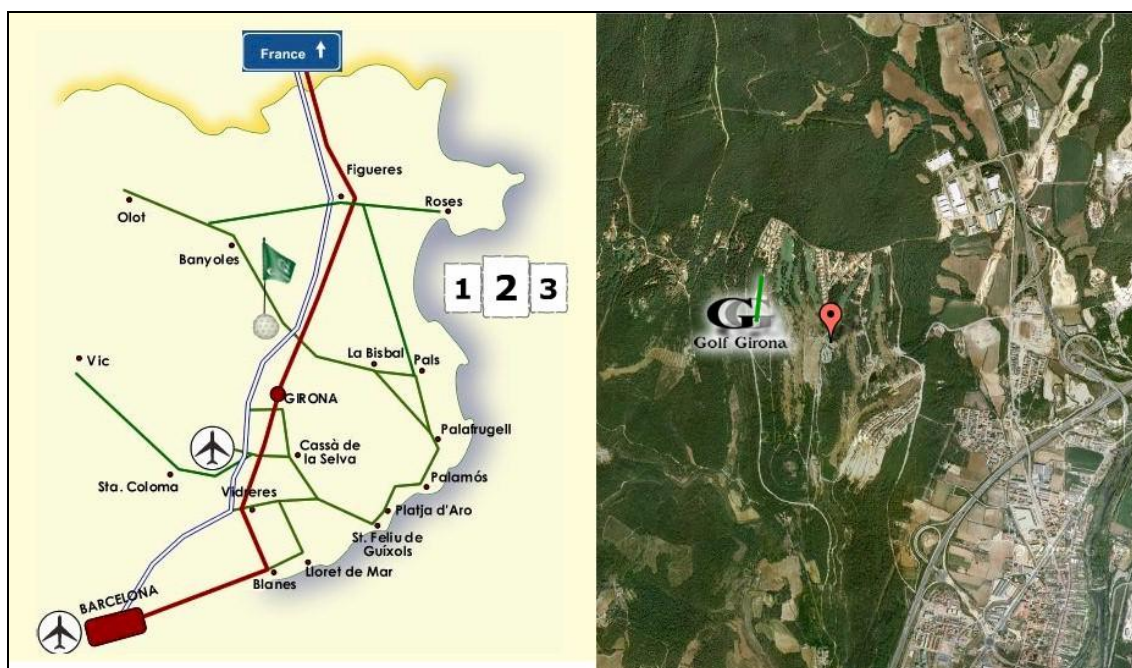


Figura 1. Club de Golf Girona. (<http://www.golfgirona.com>)

El trabajo de campo consistió en el caso de la campaña edafológica en la recogida de 18 muestras pertenecientes a todos los *greens* del Club de Golf. Estas muestras fueron tomadas en la zona colindante al hoyo del *green*, hasta una profundidad aproximada de 20 cm y una anchura de 15 cm.

Asimismo, se tuvo especial atención en dos *greens*, el número 11 por la baja eficiencia de riego según indicaciones del *greenkeeper* y el número 16 que *a priori* es un *green* que no presentaba problemas de infiltración; en ambos, además de las muestras tomadas en la zona colindante a los hoyos se realizaron catas donde se tomaron 11 muestras adicionales en cada una a diferentes profundidades (tabla 1). Se finalizó la cata en cada *green* cuando se llegó a una profundidad tal que no se podía continuar más debido a la dureza del material en esa zona.

Tabla 1: Profundidad de las muestras tomadas en los *greens* 11 y 16

GREEN 11	
MUESTRA	PROFUNDIDAD (cm)
1	0-8
2	8-16
3	16-22
4	22-28
5	28-32
6	32-36
7	36-45
8	52-62
9	65-70
10	78-86
11	86-90

GREEN 16	
MUESTRA	PROFUNDIDAD (cm)
1	0-10
2	10-18
3	26-34
4	44-57
5	57-64
6	64-70
7	81-88
8	96-106
9	114-122
10	141-150
11	158-164

Los trabajos de campo realizados para la campaña de geofísica consistieron en la realización de 18 tomografías eléctricas 2D, un perfil de tomografía en cada *green* del Club. También se realizaron dos perfiles de tomografía 3D, un perfil en el *green* 11 y otro en el *green* 16.

Posteriormente para el estudio edafológico se llevaron a cabo en el laboratorio las siguientes técnicas:

- Granulometría
- Clasificación textural. Método de Bouyoucos
- Medida de la conductividad eléctrica de las muestras
- Análisis del carbono orgánico oxidable. Método Walkley-Black

El trabajo de gabinete para la campaña de geofísica consistió en el procesado y la interpretación de los perfiles de tomografía; los perfiles 2D se procesaron con los programas PROSYS II y RES2DINV; los perfiles en 3D se procesaron con el programa de interpolación ERT Lab.

3.1. EDAFOLOGÍA

3.1.1 Granulometría

La granulometría de las 18 muestras recogidas en los *greens* se ha determinado en el laboratorio efectuando una clasificación de sus materiales sólidos, mediante tamices de distintas mallas dispuestos sucesivamente en un cilindro vertical (figura 2), de forma que cada uno retuviese las partículas de diámetro superior al de malla, y dejase pasar el resto de la muestra (USDA, 1975) y midiendo por pesada el porcentaje de material retenido en cada tamiz. Se han usado tamices de 2- 1- 0,5- 0,31-0,25- 0,2- 0,1 de malla (en milímetros).

Se han dibujado las curvas granulométricas obtenidas en dichos ensayos que representan el porcentaje acumulado de material que pasa por cierto tamiz.



Figura 2. Batería de tamices

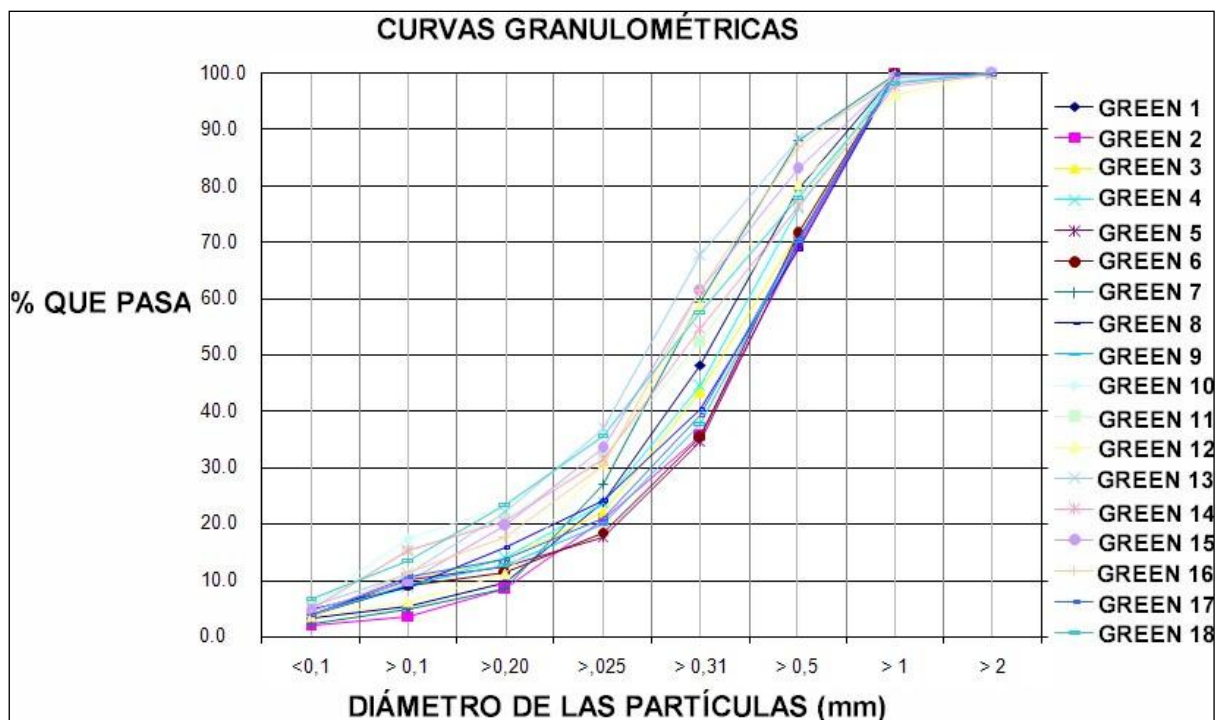


Figura 3. Curvas granulométricas de las 18 muestras de *greens*

Puede observarse en la figura 3 como las curvas granulométricas muestran diferencias texturales respecto al tamaño de partículas en las arenas de los diferentes *greens*. Estas diferencias en el tamaño de grano del particulado que conforma la arena pueden tener como consecuencia un mejor o peor drenaje del *green*. Los valores de resistividad aportados por la tomografía eléctrica se correlacionarán con el tamaño de las partículas extraído de las curvas granulométricas, así como con la permeabilidad hidráulica, permitiendo extraer conclusiones sobre el mejor o peor drenaje de los distintos *greens*.

3.1.2 Clasificación textural por el método de Bouyoucos

Para la clasificación textural se han separado arenas, limos y arcillas mediante el método de Bouyoucos.

Método de Bouyoucos: se pesaron 50 g de muestra de suelo seco y tamizado para los de textura media o pesada y 100 g para los arenosos (< 2 mm de diámetro). Después se introdujo la muestra en una botella de 1 litro, se añadieron 200 ml de agua destilada y 20 ml de NaO, en este caso 50 g de Calgón® en 1 L, y se dejaron 20 minutos en agitador mecánico.

El Calgón® es una preparación comercial de metafosfato sódico (PO_3Na) que contiene la cantidad apropiada de CO_3Na_2 como para dar un ph de 8,3 en solución acuosa al 10%.



Figura 4. Agitador mecánico usado para la homogenización de las muestras para el método Bouyoucos.

Después de la agitación (figura 4) se trasvasó a una probeta de litro y se enrasó con agua destilada. Finalmente, se dejó sedimentar seleccionando los tiempos, para efectuar la lectura mediante hidrómetro (Bouyoucos, 1951).



Figura 5. Imagen de las probetas preparadas para la realización del método. La metodología se repitió para las 40 muestras recogidas.

Para determinar el % de **LIMO+ARCILLA** se agita fuertemente el contenido de la probeta (figura 5), se deja reposar 5 minutos y se efectúa la lectura con el hidrómetro (se introduce en la suspensión y se deja 20 a 30 segundos antes de efectuar la lectura).

Para determinar el % de **ARCILLA** se procede de la misma forma efectuando la lectura a las 5 horas.

Así por tanto:

$$\% \text{ ARENA} = 100 - \% (\text{ARCILLA} + \text{LIMO})$$

$$\% \text{ LIMO} = \% (\text{ARCILLA} + \text{LIMO}) - \% \text{ ARCILLA}$$

El % de las fracciones **LIMO+ARCILLA** y **ARCILLA** se obtienen directamente de la lectura del hidrómetro cuando se han utilizado 100 g de suelo. En el caso de que sean 50 g se debe multiplicar la lectura por dos. En la tabla 2 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 2: Determinación textural de todas las muestras según el método de Bouyoucos

GREENS			
	% ARENA	%LIMO	% ARCILLA
GREEN 1	93	6.5	0.5
GREEN 2	94	6	0
GREEN 3	95	5	0
GREEN 4	94	5.5	0.5
GREEN 5	96	4	0
GREEN 6	96	3.5	0.5
GREEN 7	97	3	0
GREEN 8	93	6	1
GREEN 9	94	5.5	0.5
GREEN 10	93	7	0
GREEN 11	92	7.5	0.5
GREEN 12	94	6	0
GREEN 13	94	6	0
GREEN 14	94	6	0
GREEN 15	94	6	0
GREEN 16	97	2.5	0.5
GREEN 17	94	5.5	0.5
GREEN 18	92	7.5	0.5

GREEN 11				GREEN 16			
MUESTRA	% ARENA	%LIMO	% ARCILLA	MUESTRA	% ARENA	%LIMO	% ARCILLA
1	98	1.6	0.4	1	97	2.6	0.4
2	92	7.8	0.2	2	93	6	1
3	89	10.8	0.2	3	91	7	2
4	74	25.6	0.4	4	70	30	0
5	74	25.6	0.4	5	70	30	0
6	70	30	0	6	68	32	0
7	70	30	0	7	70	30	0
8	64	36	0	8	68	32	0
9	58	42	0	9	74	26	0
10	56	44	0	10	70	30	0
11	54	46	0	11	64	36	0

En los *greens* 11 y 16 para las muestras número 1, 2 y 3 se usan 100 g de muestra debido a su carácter arenoso, en el resto se usan 50 g.

Para clasificar la textura se utiliza un diagrama triangular o ternario llamado triángulo de textura, sobre el que se han definido las clases texturales.

En el presente estudio se ha usado la clasificación textural de la USDA (United States Department of Agriculture, 1975).

La figura 6 muestra como quedan dispuestas las muestras recogidas en la zona colindante al hoyo de los 18 *greens*. Se observa claramente como todas las muestras presentan claramente una textura arenosa.

Asimismo también se desprende de la figura 6 como el contenido de arena, limo y arcilla es muy similar en las 18 muestras recogidas de los diferentes *greens*, de tal manera que en la gráfica los puntos rojos usados para su representación se superponen en ocasiones unos a otros.

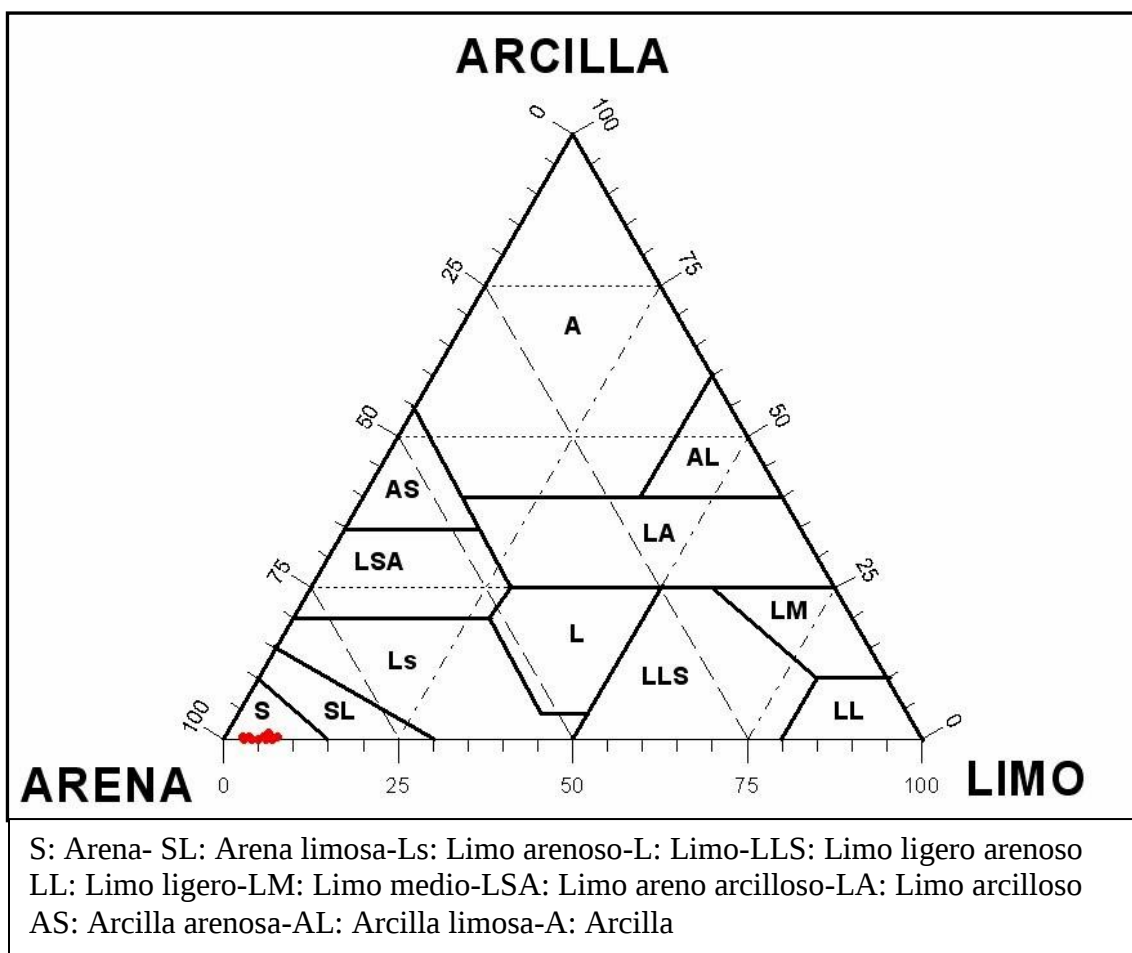


Figura 6. Representación textural de las muestras recogidas en los 18 *greens*

La figura 7 muestra la representación en el diagrama ternario de las 11 muestras recogidas en el *green* 11.

Se observa notoriamente como el porcentaje de arena disminuye con la profundidad a la que es recogida la muestra (tabla 1). Así las muestras 1, 2 y 3 presentan una textura claramente arenosa (figura 7), las muestras 4, 5, 6 y 7 que se encuentran a una profundidad de entre 22 y 45 cm corresponden a una arena limosa (SL) y finalmente las muestras más profundas 8, 9, 10 y 11 son limos arenosos (LS).

El diagrama ternario muestra de manera notoria la utilidad del método de Bouyoucos para la clasificación textural y permite visualizar la evolución del cambio textural de las diferentes partes del *green* en profundidad.

El tránsito de SL a LS se da aproximadamente a 50 cm de profundidad.

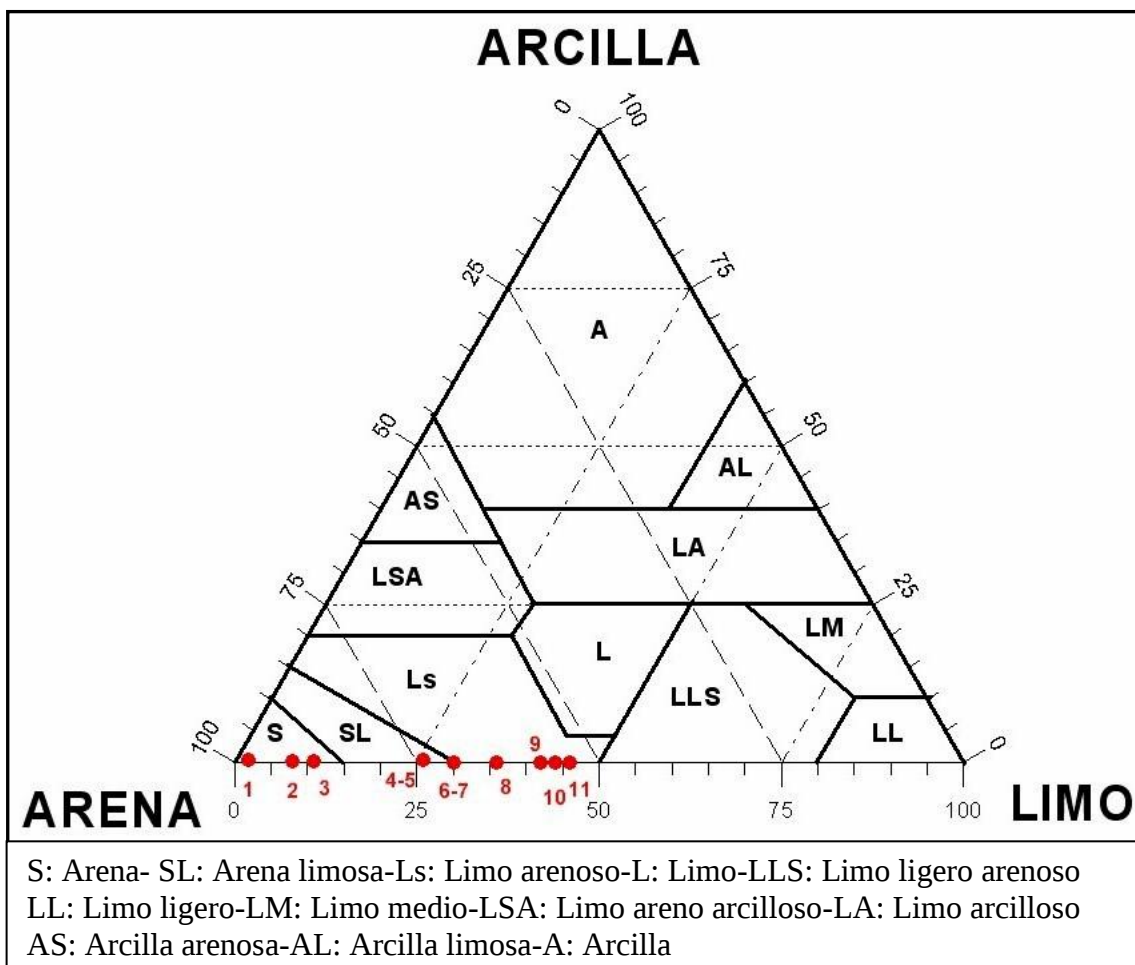


Figura 7. Representación textural de las 11 muestras recogidas en el *green* 11

La figura 8 muestra el diagrama ternario realizado para las muestras del *green* 16.

El *green* 16 presenta la misma tendencia que la encontrada en el *green* 11, pudiéndose observar como el porcentaje de arena en el suelo disminuye con la profundidad como era de esperar, la textura de las muestras evoluciona pasando de arenosa a arena limosa, y las más profundas son limo arenosas; así por tanto, las tres primeras muestras más superficiales que llegan a una profundidad máxima de 34 cm tienen textura arenosa (S), las muestras 4, 5, 7, 10 y 9 son arena limosas (SL) y finalmente las muestras 6, 8 y 11 son claramente limo arenosas (LS). El tránsito de textura SL a LS se da a unos 70 cm de profundidad.

El diagrama ternario del *green* 16 (figura 8) muestra claramente como el contenido de arena disminuye con la profundidad, si bien, también puede observarse

como la muestra 9 que se encuentra a 122 cm de profundidad presenta un porcentaje mayor de arena que las muestras 4-5 que se encuentran a unos 50 cm de la superficie. Esta zona más arenosa dentro de la parte limosa puede ser indicativa de una mala colocación de la arena del *green* sobre el substrato natural.

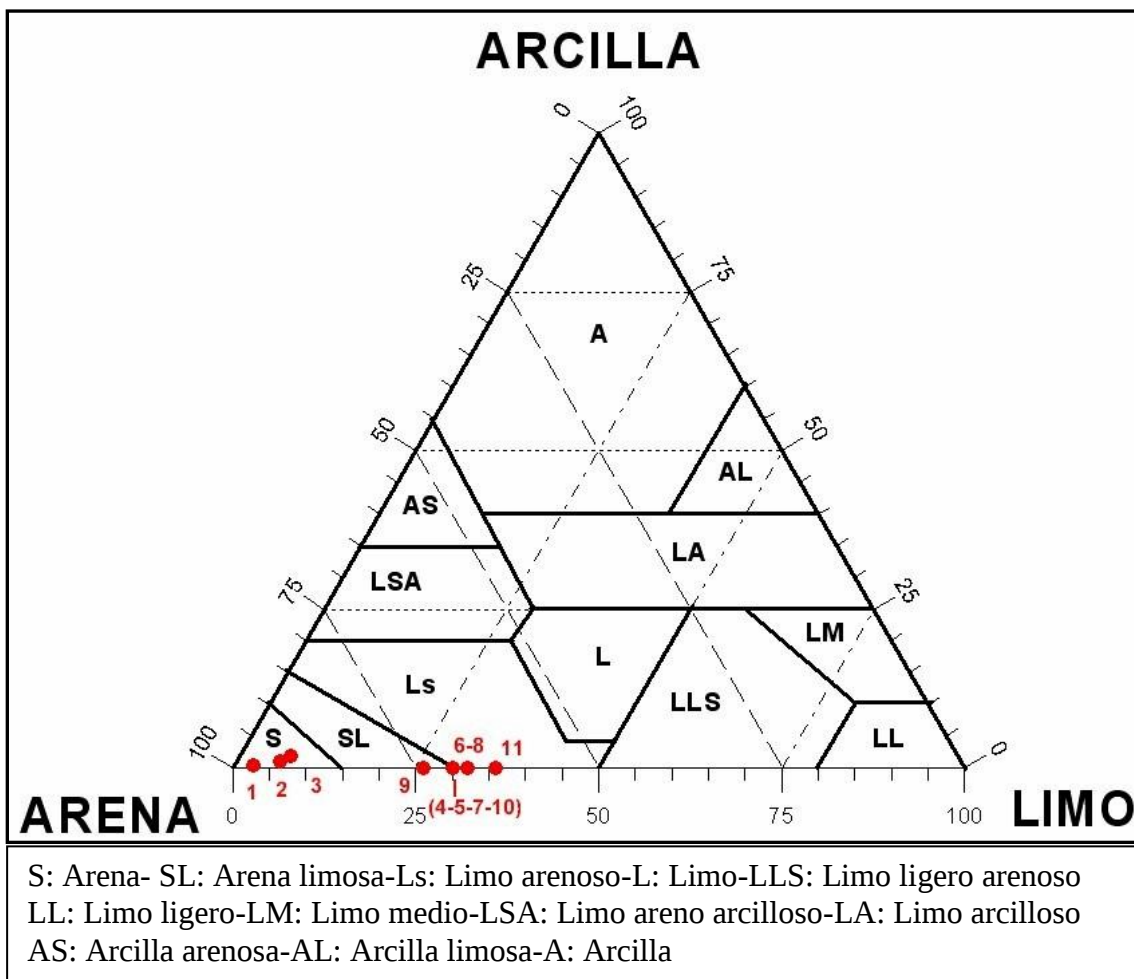


Figura 8. Representación textural de las 11 muestras recogidas en el *green* 16

3.1.3 Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica de los suelos se ha determinado por potenciometría en extracto 1:5, mediante el siguiente procedimiento de preparación del extracto:

Se pesaron 10 gr de muestra secada al aire, que se colocaron en un erlenmeyer de 100 ml. A continuación se añadieron 50 ml de agua destilada y se agitó fuertemente cada 10 minutos durante 1 hora. Después de reposar 10 minutos para que la muestra

sedimentase, se filtró sin perturbar la suspensión. A continuación se realizaron las medidas con el conductímetro (Porta et al., 1992).

Tabla 3: Medidas de conductividad eléctrica de las muestras de los 18 greens

GREENS	
MUESTRA	μs/cm
GREEN 1	177
GREEN 2	91.5
GREEN 3	84
GREEN 4	104.5
GREEN 5	125.1
GREEN 6	87.5
GREEN 7	186.7
GREEN 8	117.1
GREEN 9	108.8
GREEN 10	172.5
GREEN 11	144.5
GREEN 12	152.8
GREEN 13	129.3
GREEN 14	143.3
GREEN 15	175.8
GREEN 16	105
GREEN 17	100.8
GREEN 18	190.6

Tabla 4: Medidas de conductividad eléctrica de las muestras de los hoyos 11 y 16

HOYO 11		HOYO 16	
MUESTRA	μs/cm	MUESTRA	μs/cm
1	196.7	1	172.2
2	125.3	2	82.5
3	140	3	95.9
4	183.3	4	170
5	194.7	5	188.7
6	214	6	170.8
7	288	7	170
8	235	8	180
9	230	9	177
10	191.3	10	175
11	197	11	188.5

La clasificación textural así como las medidas del porcentaje de carbono orgánico realizadas nos ayudaran a establecer posibles relaciones con la conductividad eléctrica de los suelos.

Las figuras 9, 10 y 11 muestran la representación de los valores de conductividad obtenidas para el conjunto de los *greens* así como para los *greens* 11 y 16.

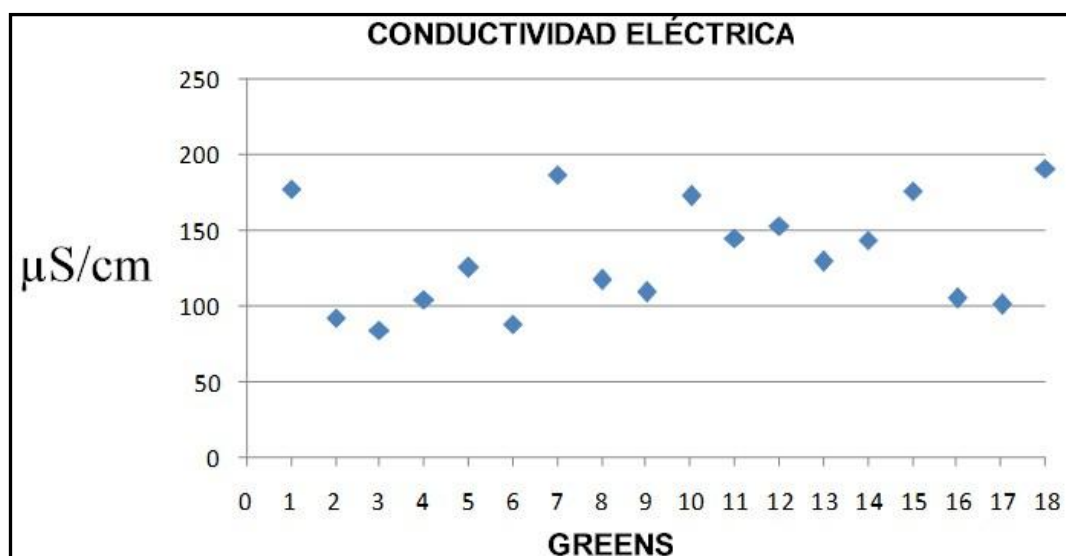


Figura 9. Representación de los valores de conductividad medidos en el conjunto de los 18 *greens*

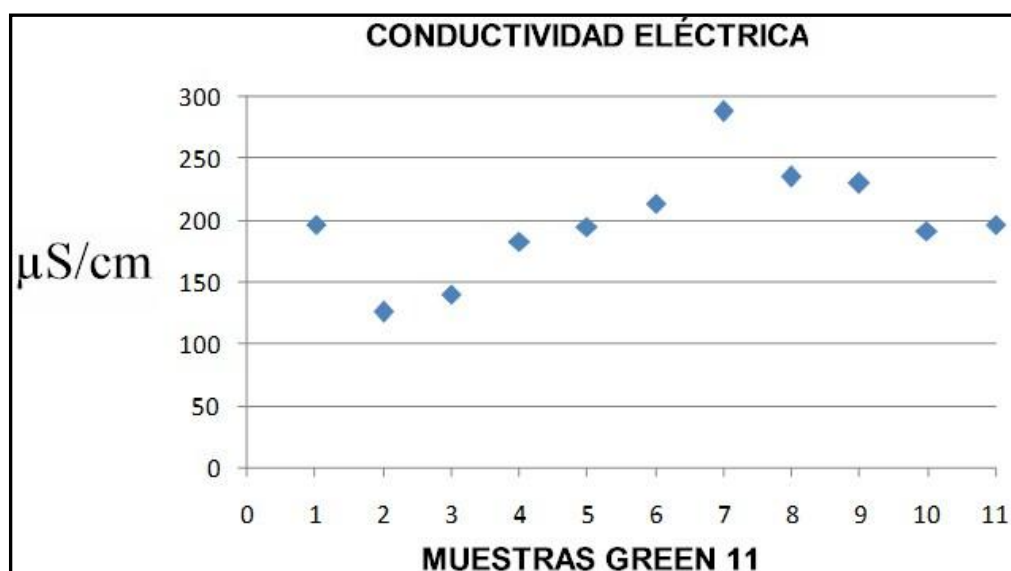


Figura 10. Representación los valores de conductividad medidos en las muestras del *green* 11

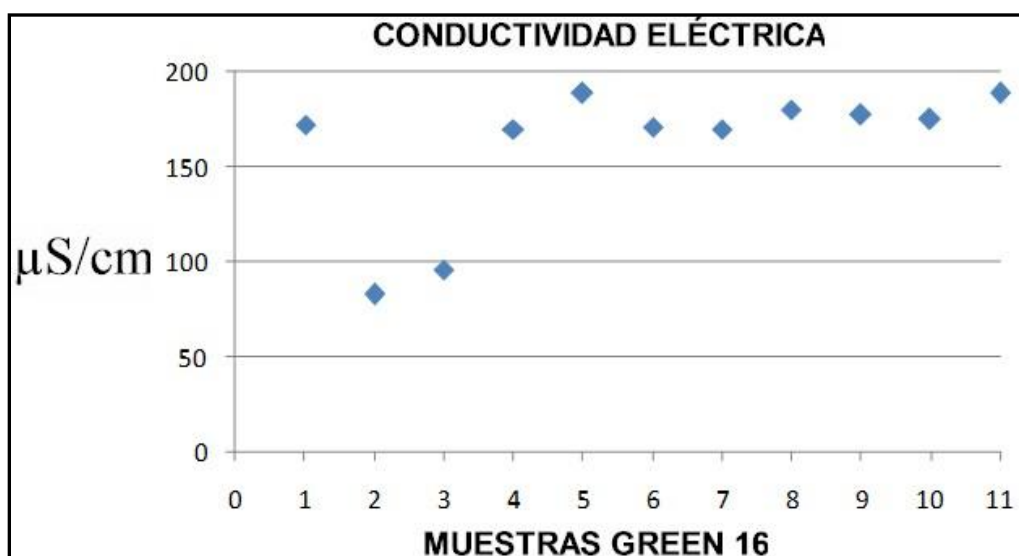


Figura 11. Representación los valores de conductividad medidos en las muestras del *green 16*

Como se observa en la figura 9 la conductividad medida en los diferentes *greens* es similar con unos valores comprendidos entre 84 y 190,6 $\mu\text{S/cm}$ ya que todas las muestras se tomaron a la misma profundidad (20 cm).

En las figuras 10 y 11 que representan los valores de conductividad en los *greens* 11 y 16 puede observarse como las muestras 2 y 3 (las más arenosas), presentan unos valores menores de conductividad y a partir de la muestra 4 que texturalmente es más limosa la conductividad aumenta siendo aproximadamente similar en las muestras siguientes. Se observan por tanto, tendencias similares en ambos *greens*.

Las muestras 1 tanto en el *green* 11 como el 16 a pesar de tener textura arenosa vienen caracterizadas por conductividades similares a las que presentan las muestras de la 4 a 11, más limosas, esto puede ser debido a que las muestras 1 contienen restos vegetales, raíces o materia orgánica que pueden hacer aumentar la conductividad.

3.1.4 Análisis del carbono orgánico oxidable. Método Walkley-Black

Para llevar a cabo la determinación de carbono orgánico la muestra de suelo ha de estar finamente triturada y secada. Se debe poner el peso exacto del material a analizar utilizando una balanza de precisión y ponerlo en un erlenmeyer de 250 mL.

A continuación se añade con exactitud (con pipeta) 10 mL de dicromato potásico 1 N. Se agita el erlenmeyer para que la muestra y el líquido queden bien mezclados.

Se añaden 20 mL de ácido sulfúrico concentrado con cuidado, ya que el ácido se debe añadir de golpe, y no poco a poco, ya que la reacción es violenta. Se agita bien para que se mezclen el ácido, el dicromato y la muestra. Este paso se debe realizar en la campana de extracción de gases.

Se deja en reposo una media hora, y a continuación se añaden 200 mL de agua destilada y se agita el erlenmeyer para homogeneizar el contenido. Debe dejarse enfriar.

Se añaden 4-5 gotas de solución indicadora de ortofenantrolina ferrosa y se valora con sal de Mohr.

A medida que se deja caer la sal de Mohr sobre el líquido, éste adquiere un color verde propio de la sal de Mohr. Se produce un cambio de color, de verde a marrón-rojizo, y se da por terminada la valoración cuando al añadir más sal de Mohr ya no se produce ningún cambio de color.

Se realiza el mismo proceso en un erlenmeyer sin muestra (el blanco) y se anotan los mL gastados en la valoración con la sal de Mohr (B) (Walkley y Black 1934).

Cálculos:

Los mL gastados en el blanco dan la normalidad exacta de la sal de Mohr:

$$N_{\text{Mohr}} = (10 \text{ mL} \cdot N_{\text{Dicr}}) / B$$

Como la normalidad del dicromato es exactamente 1, la normalidad de la sal de Mohr debería de ser de 0,5, aunque en la práctica será menor, debido a que el Fe^{2+} pasa a Fe^{3+} .

En el presente estudio los mL de blanco gastados fueron 20,78 mL. Por tanto

$$N_{\text{Mohr}} = 10 / 20.78 = 0.481$$

Conociendo la normalidad exacta de la sal de Mohr se calculan los miliequivalentes de dicromato que se gastan para oxidar el carbono de la muestra a CO₂:

$$\text{meq C} = (B - X) \cdot N_{\text{Mohr}}$$

Teniendo en cuenta que 1 miliequivalente de carbono son 3 mg C entonces:

$$\% \text{ carbono} = (\text{meq C} \cdot 0,003) \cdot (100/\text{g muestra}) \cdot f$$

El factor de corrección f se aplica porque se ha comprobado que el procedimiento, tal como se ha explicado no es suficiente para oxidar todo el carbono orgánico de la muestra. El valor más recomendado y el que se utiliza es $f = 100/77 = 1,30$.

Los resultados obtenidos para las muestras de los 18 *greens* puede observarse en la tabla 5.

Tabla 5: Resultados del cálculo de carbono orgánico obtenidos en las muestras de los greens

GREENS		
MUESTRA	meq C	% C
Green 1	0.71	0.40
Green 2	0.47	0.31
Green 3	0.38	0.22
Green 4	0.33	0.20
Green 5	0.76	0.43
Green 6	0.47	0.31
Green 7	0.81	0.49
Green 8	0.66	0.44
Green 9	0.62	0.34
Green 10	0.76	0.49
Green 11	0.62	0.41
Green 12	0.71	0.51
Green 13	0.95	0.49
Green 14	0.76	0.46
Green 15	1.00	0.70
Green 16	0.81	0.55
Green 17	0.81	0.40
Green 18	0.62	0.46

Puede observarse como el contenido de carbono en todos los *greens* es similar, asimismo el porcentaje de carbono orgánico es bajo en todas las muestras; esto puede ser debido a que son muy arenosas con un bajo contenido en materia orgánica.

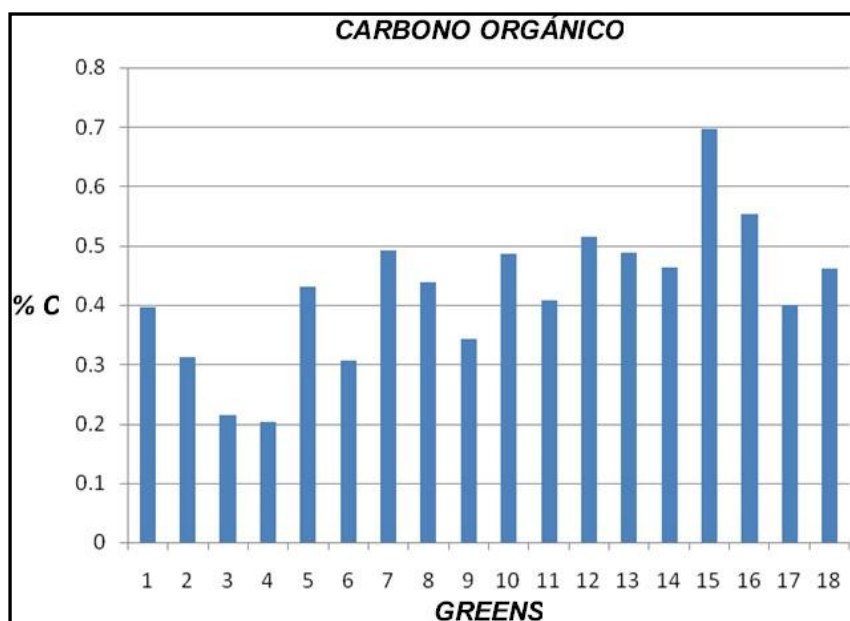


Figura 12. Porcentaje de carbono orgánico en las muestras de los 18 *greens*

El valor máximo es de 0,69 % para el *green* 15 y el valor mínimo de 0,2 % para el *green* 4 (figura 12).

La tabla 6 muestra los resultados obtenidos en las muestras recogidas en los *greens* 11 y 16.

Tabla 6: Resultados del contenido de carbono orgánico obtenidos en las muestras de los *greens* 11 y 16.

HOYO 11			HOYO 16		
MUESTRA	meq C	% C	MUESTRA	meq C	% C
1	5.33	1.81	1	6.25	1.44
2	2.78	0.53	2	1.58	0.41
3	2.78	0.53	3	1.82	0.38
4	3.21	0.61	4	1.82	0.44
5	3.12	0.59	5	2.59	0.61
6	3.26	0.62	6	2.49	0.57
7	3.26	0.62	7	2.73	0.60
8	3.07	0.58	8	2.69	0.65
9	2.83	0.54	9	2.97	0.65
10	2.93	0.56	10	2.93	0.64
11	2.93	0.56	11	2.44	0.62

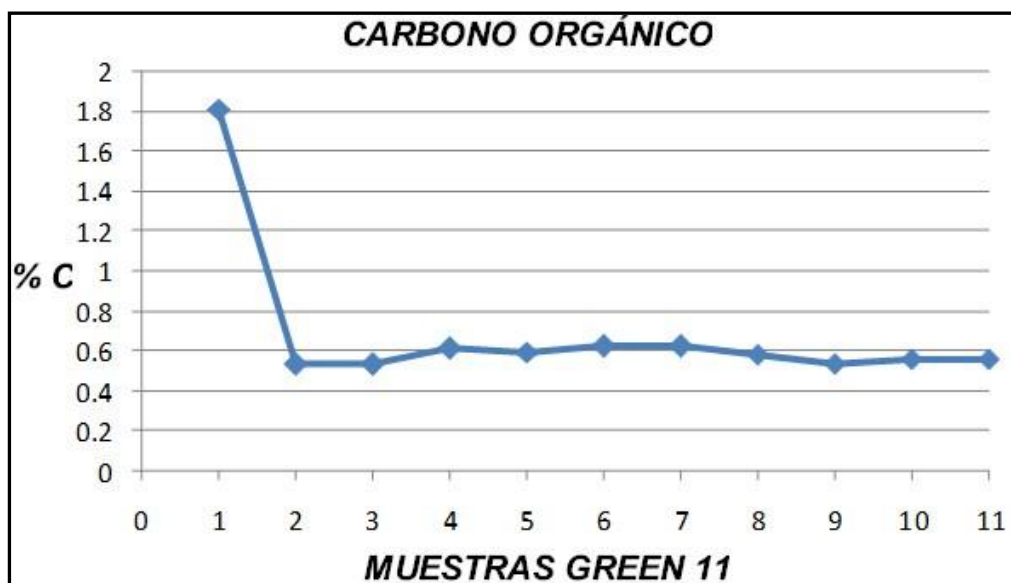


Figura 13. Variación del contenido en carbono orgánico en las muestras del *green* 11

En el *green* 11 la muestra 1 (figura 13) presenta un contenido en carbono orgánico mayor ya que al ser tan superficial (0-8 cm) son los restos de raíces y plantas los que le confieren este mayor aporte de carbono orgánico. La muestra 2 ya presenta un valor de porcentaje de carbono orgánico más similar a los encontrados en las muestras de los 18 *greens*. Se observa como la muestra 2 y la 3 presentan un contenido en carbono orgánico algo menor que el resto; a partir de la muestra 4, unos 30 cm de profundidad el valor de carbono orgánico es casi constante en todas las muestras con valor promedio de aproximadamente 0,58 %.

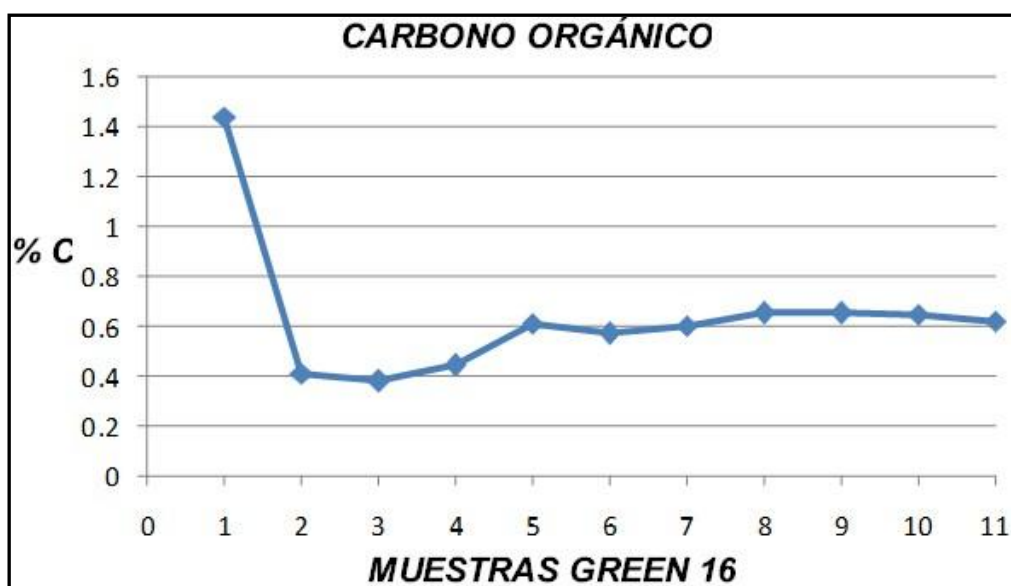


Figura 14. Variación del contenido en carbono orgánico en las muestras del *green* 16

Como se aprecia en la figura 14 la muestra 1 del *green* 16 es la que tiene un mayor contenido en carbono orgánico debido nuevamente a la presencia de pequeñas raíces y restos vegetales.

También puede observarse como las muestras más arenosas, las número 2, 3 y 4 presentan un menor contenido en carbono orgánico, a partir de la muestra 5 el contenido en carbono orgánico asciende y prácticamente se mantiene constante en el resto de las muestras.

Se aprecia como las muestras más arenosas presentan un menor contenido en carbono orgánico, y a medida que el contenido de limo aumenta, aumenta el contenido en carbono orgánico; esta misma tendencia se observa en las muestras del *green* 11.

3.2. PROSPECCIÓN GEOFÍSICA

3.2.1 Fundamento teórico de la prospección eléctrica

Para trabajar con el método de resistividad se crea un campo eléctrico mediante dos tomas de tierra (“electrodos”) puntuales A y B, denominados de emisión, a través de los cuales se inyecta en el terreno una corriente eléctrica continua de intensidad I . Entre otros dos puntos del terreno con ayuda de dos electrodos M y N de medida, situados en estos puntos y mediante el correspondiente instrumento de medida, se miden las diferencias de potencial, ΔU que se han generado. La disposición relativa de los electrodos A, B, M y N, que configuran el dispositivo tetraelectródico, está determinada por el tipo de problema geológico que se quiere resolver.

Los electrodos A y B crean en el punto M, que dista de ellos de una distancia r_{AM} y r_{BM} , un campo eléctrico con potenciales U_{MA} y U_{MB} , según las expresiones:

$$U_{MA} = \frac{\rho I}{2\pi} \frac{1}{r_{AM}} \quad U_{MB} = -\frac{\rho I}{2\pi} \frac{1}{r_{BM}} \quad (1)$$

El potencial total en el punto M es:

$$U_M = U_{MA} + U_{MB} = \frac{\rho I}{2\pi} \frac{1}{r_{AM}} - \frac{\rho I}{2\pi} \frac{1}{r_{BM}} = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{BM}} \right). \quad (2)$$

Análogamente, el potencial en el punto N es:

$$U_N = U_{NA} + U_{NB} = \frac{\rho I}{2\pi} \frac{1}{r_{AN}} - \frac{\rho I}{2\pi} \frac{1}{r_{BN}} = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_{AN}} - \frac{1}{r_{BN}} \right). \quad (3)$$

La diferencia de potencial entre los puntos M y N será:

$$\begin{aligned} \Delta U = U_M - U_N &= \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{BM}} \right) - \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_{AN}} - \frac{1}{r_{BN}} \right) \\ &= \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{BM}} - \frac{1}{r_{AN}} + \frac{1}{r_{BN}} \right). \end{aligned} \quad (4)$$

De aquí obtenemos la siguiente expresión para la resistividad ρ de un medio homogéneo, en cuya superficie se encuentra un dispositivo tetraelectródico:

$$\rho = K \frac{\Delta U}{I} \quad (5)$$

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{BM}} - \frac{1}{r_{AN}} + \frac{1}{r_{BN}}} \quad (6)$$

La magnitud K es solo función de la distribución de los cuatro electrodos sobre el terreno y se denomina coeficiente del dispositivo. Según la expresión (6), el coeficiente del dispositivo tiene dimensiones de longitud.

La expresión (5), obtenida para un medio homogéneo, se puede aplicar para la interpretación de los resultados de la medición con un dispositivo tetraelectródico situado en la superficie de un terreno heterogéneo. Sin embargo, en este caso el resultado de cálculo será una cierta magnitud arbitraria que tiene las dimensiones de una resistividad. A esta magnitud arbitraria se la denomina resistividad eléctrica aparente y se designa por ρ_a .

Por consiguiente, en el caso general:

$$\rho_a = K \frac{\Delta U}{I} \quad (7)$$

En el caso particular de un medio homogéneo, la resistividad aparente coincide con la resistividad verdadera, $\rho_a = \rho$. Las trayectorias del flujo de corriente en el terreno siguen el trazado mostrado en la figura 15.

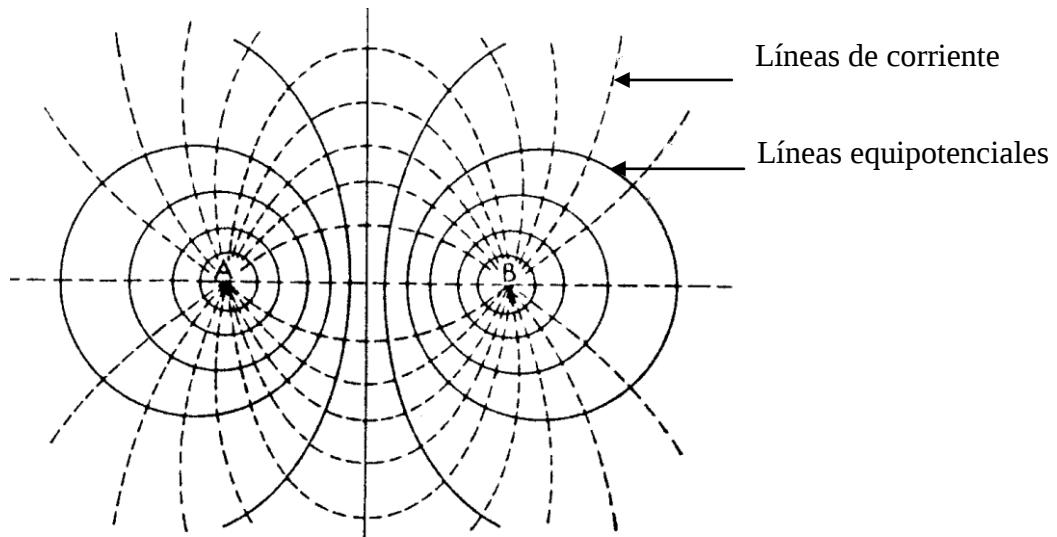


Figura 15. Líneas equipotenciales y líneas del flujo. (a) en el plano vertical de los electrodos. (b) en el plano horizontal de la superficie del terreno

3.2.2 Fundamento teórico de la tomografía eléctrica

El método de prospección mediante tomografía eléctrica, también denominado ‘*Automated array scanning*’, es una ampliación del método de sondeos eléctricos verticales (SEV), de forma que efectuamos de manera automatizada múltiples SEV’s para distintas configuraciones electródicas.

Para ello, disponemos un conjunto de electrodos unidos a un ordenador mediante un cable del tipo utilizado en sismica. A través de un programa de control, provocamos que la unidad central vaya realizando mediciones de resistividad aparente para pares de electrodos consecutivos, de manera que al finalizar la toma de datos, se hayan realizado todas las combinaciones de pares posibles.

las disposiciones posibles de electrodos son múltiples: *Wenner* (en la que se mantiene idéntica la distancia ‘a’ de separación inter-electródica), *Schlumberger* (en que se van separando los electrodos de corriente de los de potencial), Dipolo-dipolo (en que el par de electrodos de corriente se hallan separados de los de potencial una distancia mayor que su separación), y otros.

En este estudio se ha seleccionado el modo *Wenner-Schlumberger*. El modo de operación es el siguiente: se efectúa una medida de resistividad aparente entre los 48 electrodos 1-48-24-25, 1-46-23-24, ..., 1-4-2-3, luego la siguiente empezando con los electrodos 2-47-24-25, 2-45-23-24, ..., 2-5-3-4, y así hasta llegar al último que es el 45-48-46-47.

Al abrir la distancia entre electrodos de corriente y los de potencial, vamos alcanzando distintos niveles de profundidad, obteniendo su resistividad aparente en el punto medio de cada conjunto de electrodos. Uniendo los datos de los diferentes niveles, obtenemos la llamada ‘pseudosección eléctrica’, que nos indica las variaciones de resistividad tanto vertical como lateralmente (figura 16).

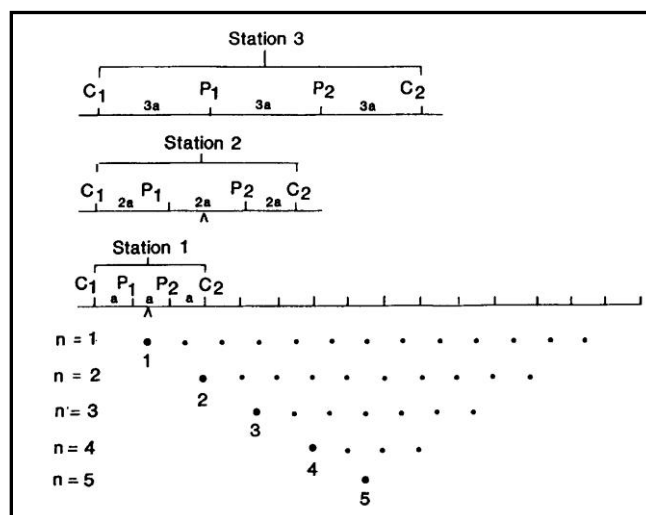


Figura 16. Disposición de las medidas en el método de tomografía eléctrica

El equipo de adquisición de datos es un Resistivímetro **SYSCAL PRO**, de la empresa IRIS INSTRUMENTS (Orleáns, Francia) compuesto de los siguientes componentes: unidad central, 48 electrodos, cable RS-232 de conexión a ordenador y cable de conexión a electrodos de tipo sísmico (figura 17). Los datos se obtienen mediante ordenador a través de los programas ELECTRE II, para la creación de la secuencia de toma de datos, y PROSYS II para la descarga de la información.



Figura 17. Equipo SYSCAL PRO

El parámetro medido mediante la tomografía eléctrica es la resistividad aparente del terreno. Dado que esta resistividad es función del espesor de las capas y de su resistividad real, es necesario efectuar un procesamiento de los datos de campo a fin de obtener la resistividad real. Esto se realiza a través de un procedimiento de inversión mediante el cual, de manera iterativa, ajustamos un modelo teórico y calculamos su resistividad aparente. Si este valor se aparta de la curva de campo por encima de un error estimado, calculamos el modelo con nuevos parámetros, hasta que el modelo teórico se ajusta, al nivel de error solicitado, a la curva de campo.

Este proceso ha sido efectuado mediante el programa RES2DINV, de la empresa *GEOTOMO SOFTWARE*, de Malasia, obteniendo las secciones geo-eléctricas presentadas en este ESTUDIO.

El programa RES2DINV producido por M.H. Loke es un programa de cálculo automatizado de modelos bidimensionales (2-D) de resistividad del terreno a partir de datos obtenidos por equipos de tomografía eléctrica.

Para calcular la resistividad aparente utiliza una subrutina de modelización directa. Para obtener modelos inversos de la resistividad real del terreno se utiliza una rutina no lineal de optimización por mínimos cuadrados (Loke y Barker, 1996). El programa utiliza para el modelo directo tanto la técnica de diferencias finitas (si no hay corrección topográfica) como la de elementos finitos (en caso de ser necesaria la corrección topográfica).

La rutina de inversión se basa en el método de mínimos cuadrados constreñidos por suavización, de los autores citados. Puede utilizar la técnica de optimización quasi-Newton así como la habitual de Gauss-Newton.

Para ello, divide el terreno en bloques rectangulares, que pueden ser de igual o diferente tamaño, pudiendo ampliar el número de bloques por encima del número de medidas. El propósito del programa es el de determinar la resistividad de los bloques rectangulares que produzca una pseudosección de resistividad aparente que se ajuste lo máximo posible a la obtenida en el campo. La diferencia entre ambas da el error cuadrático medio (RMS) obtenido.

Pueden utilizarse dispositivos electródicos de los tipos Wenner, Schlumberger, polo-polo, dipolo-dipolo y polo-dipolo, incluso con configuraciones no en línea (electrodos distribuidos sobre la superficie del terreno en dos dimensiones).

3.2.3 Tomografía 2D

Se han realizado tomografías eléctricas en cada uno de los 18 *greens* del Club de Golf Girona (figura 18).



Figura 18. Los 18 *greens* donde se realizaron tomografías



Figura 19. Perfil de tomografía

Todos los perfiles tienen una longitud de 23,5 m (figura 19) con una separación entre electrodos de 0,5 m alcanzando una profundidad aproximada de 4,5 m. El dispositivo utilizado ha sido un Wenner-Schlumberger recíproco.

Los perfiles de resistividad eléctrica se realizan mediante un modelo de inversión matemática que ajusta de manera iterativa un modelo teórico al perfil de resistividad aparente de campo, hasta que alcanza un error máximo de ajuste. A efectos de claridad expositiva, solo mostraremos el perfil de resistividad real (modelo de inversión) con su interpretación, eliminando las secciones de resistividad aparente, que no dan información de utilidad. Asimismo, para evitar equivocaciones en la interpretación, todos los perfiles han sido interpolados y coloreados con los mismos rangos de resistividades y colores.

En los perfiles obtenidos el ajuste presenta un error muy bajo (inferior al 2,5%) por lo que los resultados de la inversión se pueden dar por muy satisfactorios.

La figura 20 muestra las secciones de resistividad invertidas después del procesado en RES2DINV, observándose como todos los perfiles presentan la misma estructura, pudiéndose definir un nivel superior con valores altos de resistividad (colores rojos) y un nivel inferior que presenta resistividades bajas.

En los perfiles correspondientes a los *greens* 1-3-9-10-11-12-13-14-15-16-17-18 el segundo nivel viene caracterizado por resistividades muy bajas, entre 15 y 80 Ohm.m (colores azules) mientras que en los *greens* 2-4-5-6-7-8 los perfiles presentan un segundo nivel con resistividades más elevadas, entre 70 y 130 Ohm.m (colores verdes).

Por los valores de resistividad obtenidos se puede concluir que los materiales del primer nivel descrito con resistividades por encima de los 150 Ohm.m son arenas; los materiales que presentan los valores más bajos (colores azules) son arcillas, mientras que los materiales con valores de resistividad intermedios (colores verdes) son limos.

El contacto entre el primer y segundo nivel es sub-horizontal en todos los perfiles e informa de la profundidad de la capa de arena en cada *green*; en general la potencia de la capa de arenas es de aproximadamente 1,40 m aunque hay excepciones, como en el *green* 11 donde el grosor de la capa de arenas es menor, aproximadamente 1 m.

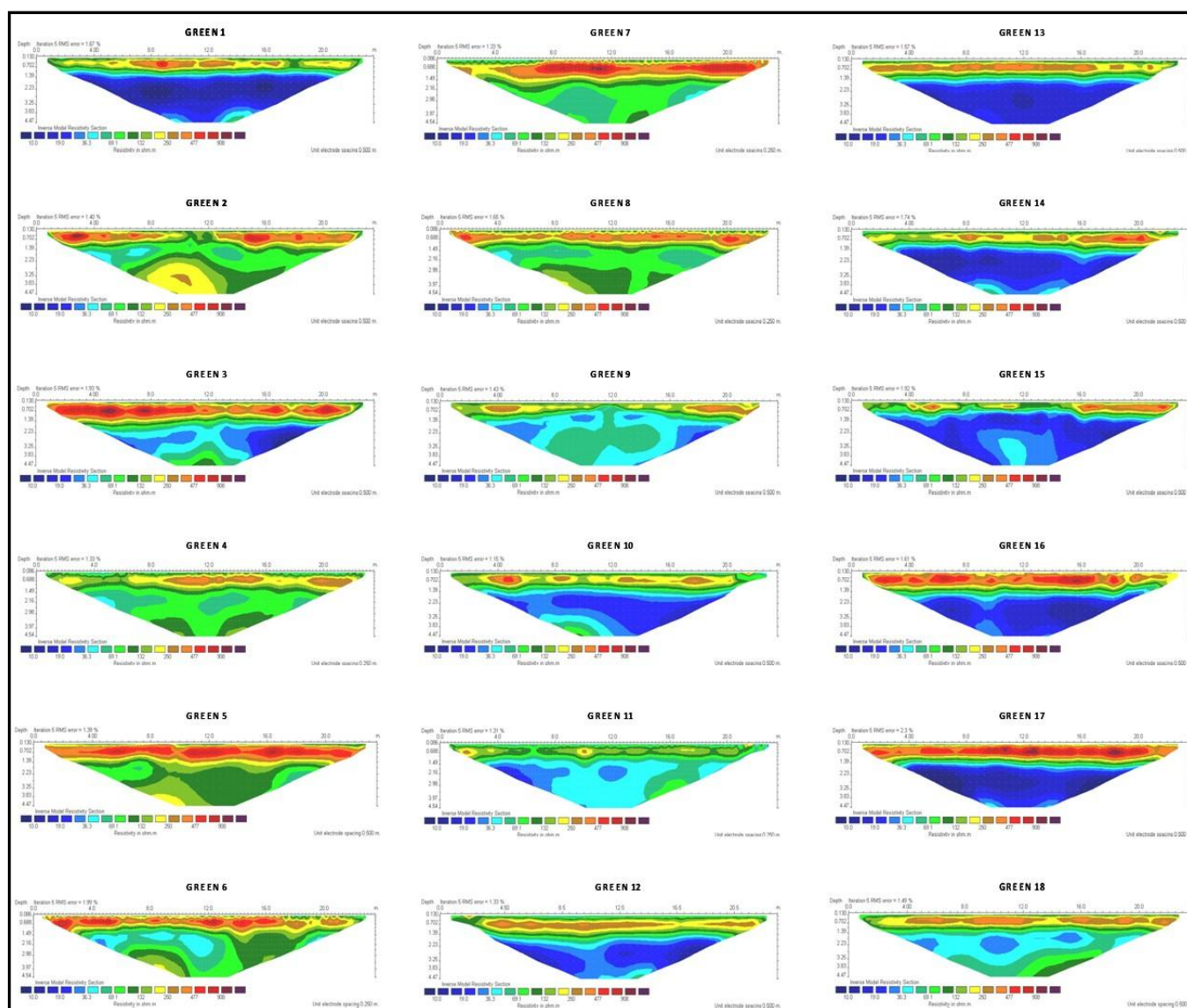


Figura 20. Perfiles de tomografía realizados

Puede observarse como las diferencias en grosor y en los valores de resistividad de la capa de arenas son totalmente evidentes; asimismo la tomografía ha sido capaz de proporcionar información sobre el sustrato bajo la capa de arenas.

La resistividad que caracteriza la capa de arenas en cada *green* es muy significativa, indicando de manera cualitativa la capacidad de drenaje de cada *green*; aquellos *greens* que presentan mayores resistividades en la capa de arenas como los *greens* 5-7-17 tendrán mayor capacidad de drenaje que aquellos con valores de resistividad más bajos en la capa de arenas, como los *greens* 9-11-15 (figura 20).

3.2.4 Tomografía 3D

Dentro de la campaña de geofísica se planteó la realización de dos perfiles de tomografía 3D y que se hicieron en los *greens* 11 y 16. El objetivo era que los perfiles de tomografía en 3D ayudaran a conocer la geometría del *green*, aportando información sobre el contacto entre la arena y el substrato, y que permitieran una visión en 3D del estado general de la arena desde el punto de vista de la resistividad. Asimismo, la información extraída del 3D puede correlacionarse y completar la información obtenida de los perfiles en 2D, ya que los datos de éstos últimos se encuentran únicamente en la vertical de la zona donde se realiza el perfil 2D.

La tomografía en 3D es un método novedoso y que nunca se había aplicado al estudio de *greens* de campo de golf. Básicamente existen dos metodologías para llevar a cabo una tomografía en 3D:

- a. La primera metodología consiste en la realización de perfiles en 2D y procesarlos por separado como si fueran perfiles independientes. Posteriormente se obtienen los valores de distancia en el eje X, profundidad en el eje Z y los valores de la variable dependiente Rho (resistividad), esta información se extrae a partir del *software* de interpolación Res2dinv. Una vez obtenidos estos valores se crea una malla (*grid*) añadiendo los valores de la distancia en el eje Y dependiendo de la geometría de los perfiles realizados en el campo y que puede venir representada en una hoja de cálculo. A continuación y mediante un *software* de interpolación en 3D como por ejemplo el Voxler se puede obtener un bloque diagrama en 3D de la zona estudiada. Una limitación de este método es que para obtener un buen modelo de 3D es necesario que la distancia a la que se realizan los perfiles 2D sea como máxima la distancia entre los electrodos; si no, Voxler realizará igualmente la interpolación de los datos 2D pero el modelo obtenido puede no ser coherente con la realidad. Además, situar los perfiles a la distancia igual a la de los electrodos supone la realización de muchos perfiles 2D, lo que significa una gran inversión de tiempo. Otra limitación de esta metodología es que los datos obtenidos se encuentran en la vertical de cada perfil, es decir, no hay datos reales en las zonas entre los perfiles, de ahí la necesidad de realizar una malla en la que los perfiles estén muy próximos.

Sin embargo, si se realiza correctamente esta técnica permite la obtención de modelos 3D muy fiables, capaces de aportar una gran cantidad de información.

b. La segunda metodología consiste en adquirir *in situ* los datos en 3D, es decir, se crea una secuencia de adquisición de datos en 3D que una vez cargada en el resistivímetro permite la adquisición de los datos de resistividad real no únicamente en la vertical sino en las tres direcciones del espacio, aumentando sensiblemente la calidad del modelo 3D obtenido. Una vez realizada la medida de los datos, éstos son procesados directamente en un *software* de inversión en 3D, lo que constituye una diferencia notable con el método anterior.

Para la realización de este estudio se ha usado la segunda metodología explicada, es decir, se ha realizado un perfil 3D en el *green* en el que las medidas de resistividad real se han tomado en las tres direcciones del espacio. Para crear la secuencia de obtención de datos en 3D se pueden usar dos *software*: el Electre pro y el Ert Lab. Se ha utilizado el Ert lab ya que a diferencia del Electre Pro, Ert lab puede crear una secuencia en la que los datos se obtienen a partir de tres dispositivos: *wenner*, *wenner-schlumberger* y dipolo-dipolo; de este modo no sólo se obtiene un mayor número de puntos de medida sino que se miden valores de resistividad en posiciones del espacio donde no se tomarían si sólo se usara un único dispositivo (figura 21). La inversión de los datos se ha realizado también con Ert Lab.

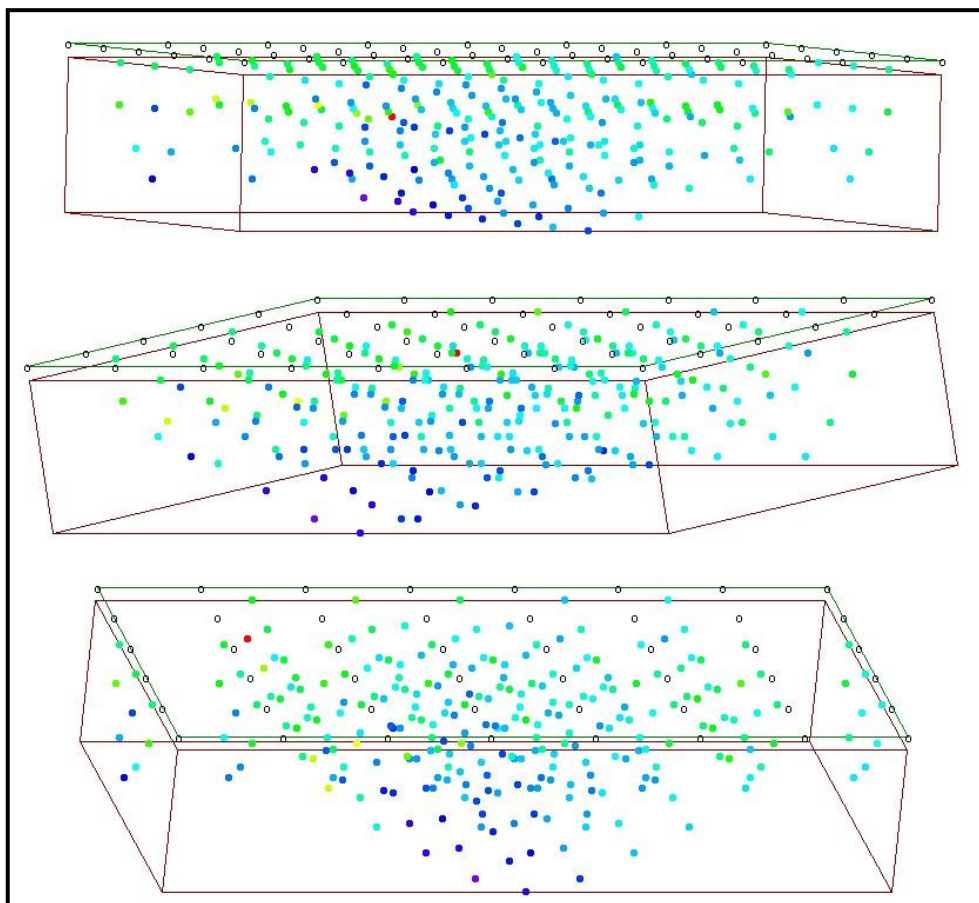


Figura 21. Disposición de las medidas obtenidas en las 3 direcciones del espacio mostradas en tres diferentes vistas

El perfil 3D se realiza disponiendo los cables de medida en forma de serpiente (*snake*) (figura 22), formando una malla de 8x6, es decir, 8 electrodos en el eje X y 6 electrodos en el eje Y. En el presente estudio la distancia entre los electrodos ha sido de 2 m con lo que la profundidad de investigación del perfil 3D es de aproximadamente 3,3 m.

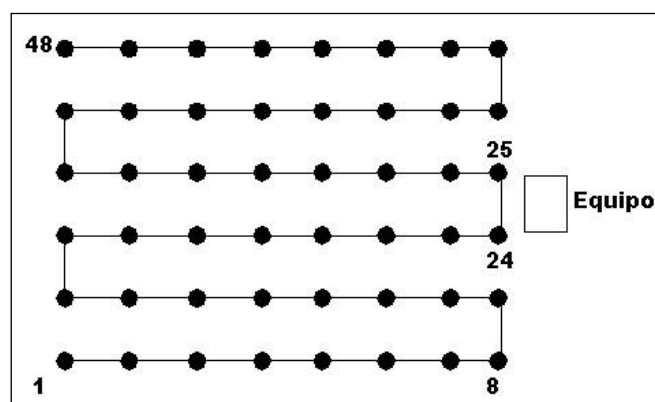


Figura 22. Disposición del cable de medida en la adquisición de un perfil 3D, los electrodos vienen representados con círculos negros

Green 11

La figura 23 muestra la disposición de los electrodos de medida en el *green* 11.



Figura 23. Perfil 3D en el *green* 11

En la figura 24 vienen representados dos bloques diagrama en 3D de la geometría del *green* 11 en los planos X-Z e Y-Z

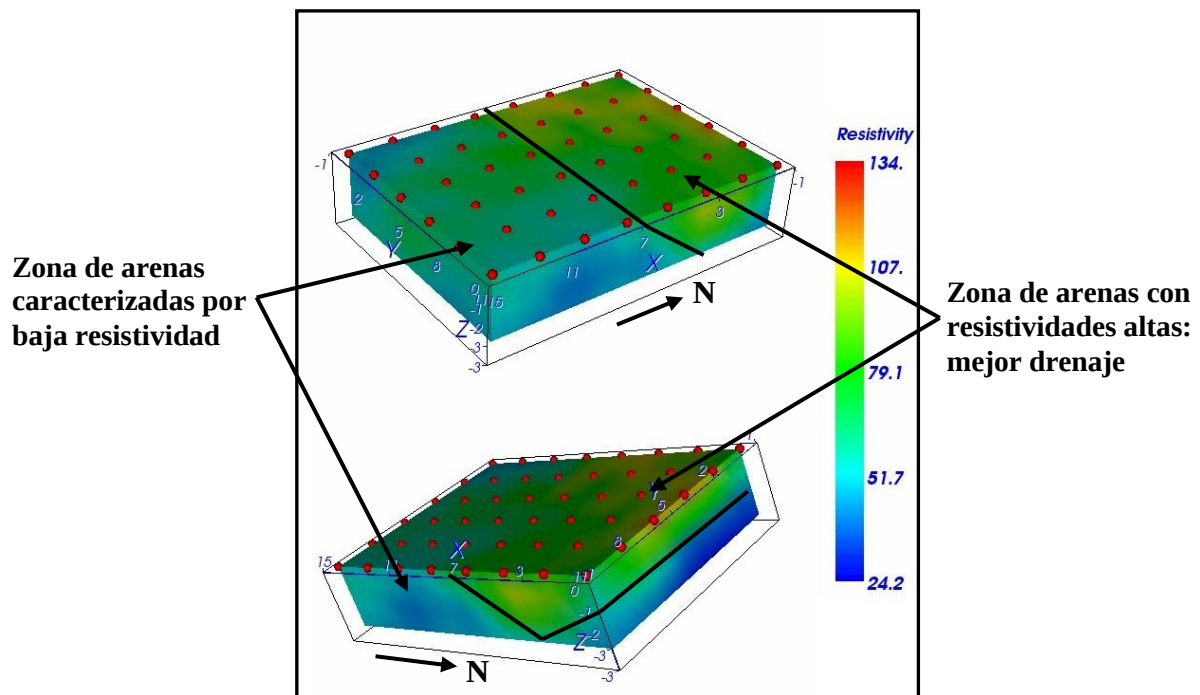


Figura 24. Bloque diagrama 3D en los planos X-Z e Y-Z del *green* 11

Se puede ver como la visualización de la geometría del *green* por medio de bloques diagrama obtenidos a partir de la tomografía 3D ha resultado ser una herramienta muy potente a la hora de realizar posibles diagnósticos de la calidad del *green* desde un punto de vista resistivo. Así en la figura 24 pueden observarse dos vistas del *green* 11 y como queda patente que las arenas (caracterizadas por una mayor resistividad) no son homogéneas, pudiéndose observar zonas donde la resistividad es menor y donde tendrán presumiblemente peor drenaje.

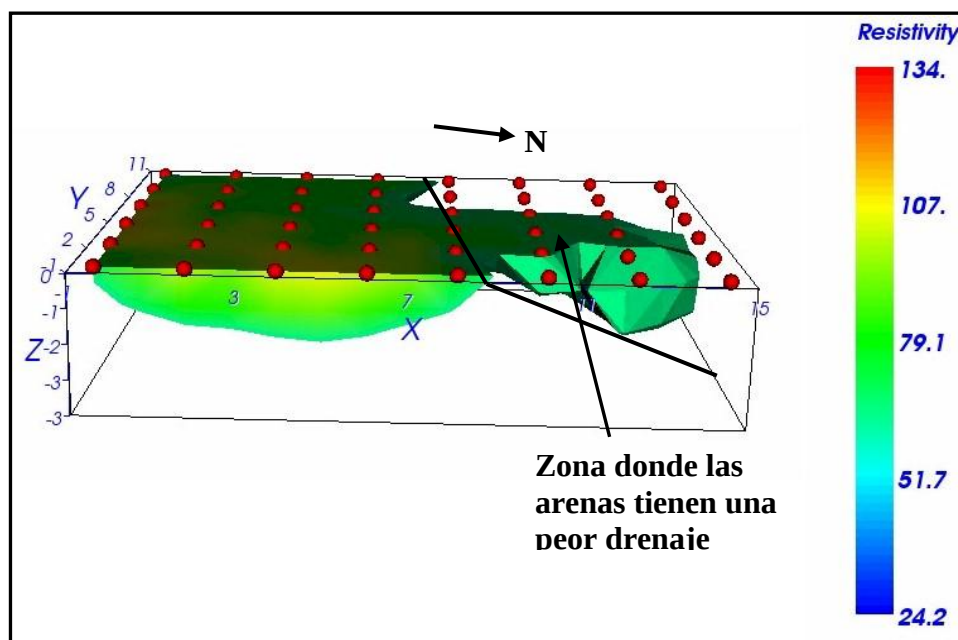


Figura 25. Geometría de las arenas en el *green* 11

En la figura 25 se puede observar la geometría de la capa de arenas del *green* 11. Se ve claramente como no es una capa continua desde el punto de vista resistivo, es decir, si bien composicionalmente las zonas en “blanco” o interrumpidas que se observan sí son arenas, sus valores de resistividad más bajos muestran que en estas zonas la arena está más alterada y por tanto su drenaje es mucho menor.

Green 16

Se realizó un nuevo perfil de tomografía 3D en el *green* 16 para conocer la geometría del mismo. La figura 26 muestra la disposición de los electrodos de medida en el *green* 16.



Figura 26. Perfil 3D en el *green* 16

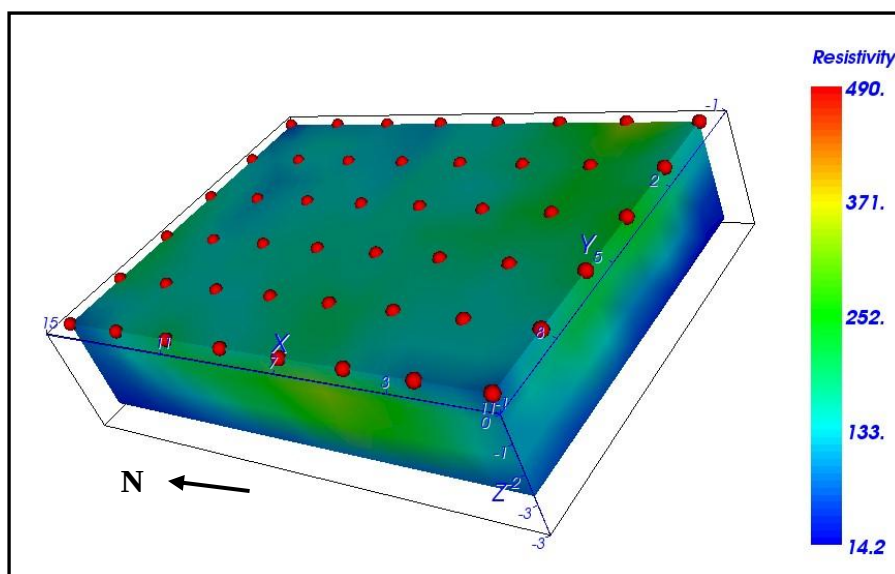


Figura 27. Bloque diagrama 3D en los planos X-Z y Y-Z del *green* 16

Se puede observar como la resistividad de las arenas en el *green* 16 es sensiblemente superior al *green* 11, alcanzado máximos de aproximadamente 400 Ohm.m. También queda patente como la capa de arenas es más continua y homogénea y de un mayor espesor en el *green* 16.

La figura 27 permite asimismo delimitar el contacto de las arenas con las arcillas que se produce a aproximadamente 1,4 m de profundidad. Las arenas son muy homogéneas, sin interrupciones y presentan resistividades altas, desde 130 Ohm.m (color azul turquesa), hasta valores que superan los 400 Ohm.m.

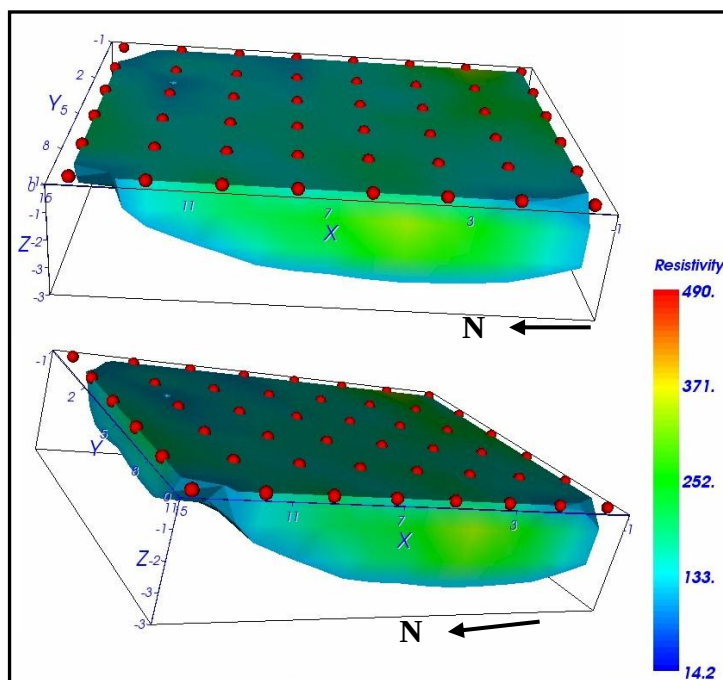


Figura 28. Diferentes vistas de la geometría 3D de las arenas del *green* 16

La figura 28 es muy interesante, en ella vienen representadas dos vistas que permiten estudiar la geometría del paquete de arenas, confirmando que es una capa de arenas homogénea, con valores resistividad altos. La forma del contacto con el substrato también queda muy bien representada.

4. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

En el apartado 3 se han descrito el conjunto de técnicas que se han utilizado y los resultados obtenidos para caracterizar los *greens* de un campo de golf; los ensayos edafológicos que son los más utilizados actualmente y la tomografía eléctrica, un método de prospección geofísica que tiene la ventaja de ser una técnica no destructiva, es decir, no altera en ningún modo las características de la zona a estudiar, a diferencia de otras técnicas de muestreo que sí requieren la realización de sondeos o perforaciones cuya marca se observa hasta mucho tiempo después de la realización del estudio.

Los ensayos edafológicos han puesto de manifiesto la similitud existente en las muestras procedentes de los 18 *greens* muestreados; siendo importante destacar que las muestras se recogieron siempre en la zona colindante del hoyo del *green* y a la misma profundidad.

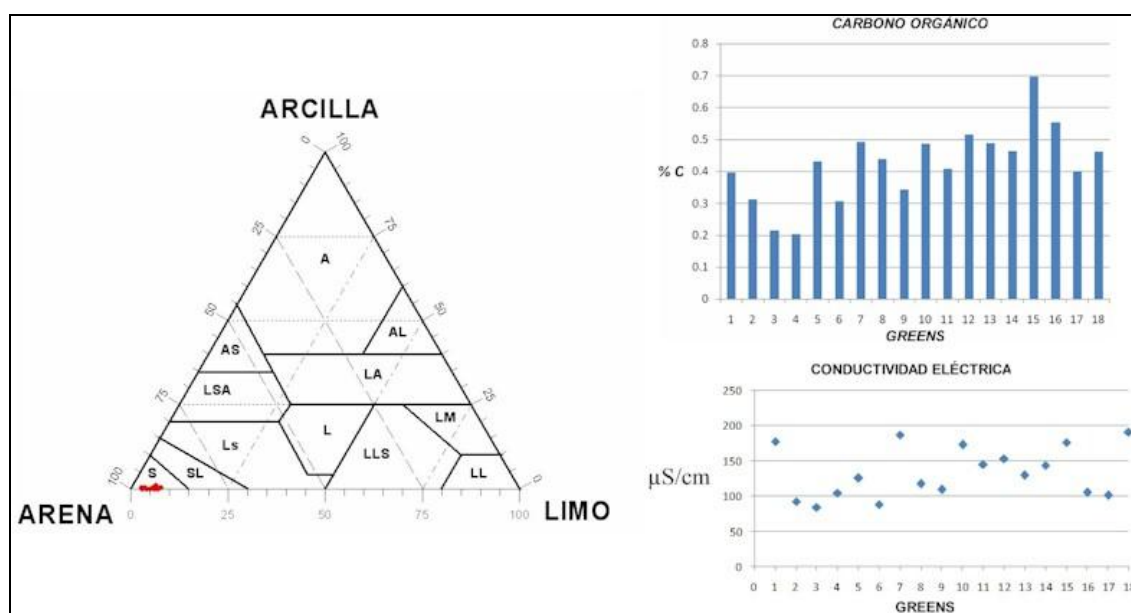


Figura 29. Resultados de los ensayos edafológicos en las muestras de los *greens*

La figura 29 muestra los resultados de la primera campaña edafológica, correspondiente a la toma de muestras de los 18 *greens* informando con claridad del tipo de textura de las muestras de los *greens* así como su conductividad y contenido en carbono orgánico oxidable, teniendo en cuenta que son muestras puntuales. La realización de una campaña de prospección geofísica con tomografías eléctricas permitiría conocer de manera generalizada el estado general de los *greens* aportando

mucha más información; pudiendo afirmar que al iniciar un estudio de caracterización de *greens* en un campo de golf es conveniente la realización de una campaña geofísica.

Se puede relacionar la información extraída a partir de las curvas granulométricas realizadas en las muestras de los 18 *greens* con los valores de resistividad obtenidos con la tomografía, pudiendo cuantificar cual de los *greens* estudiados presenta un mejor drenaje.

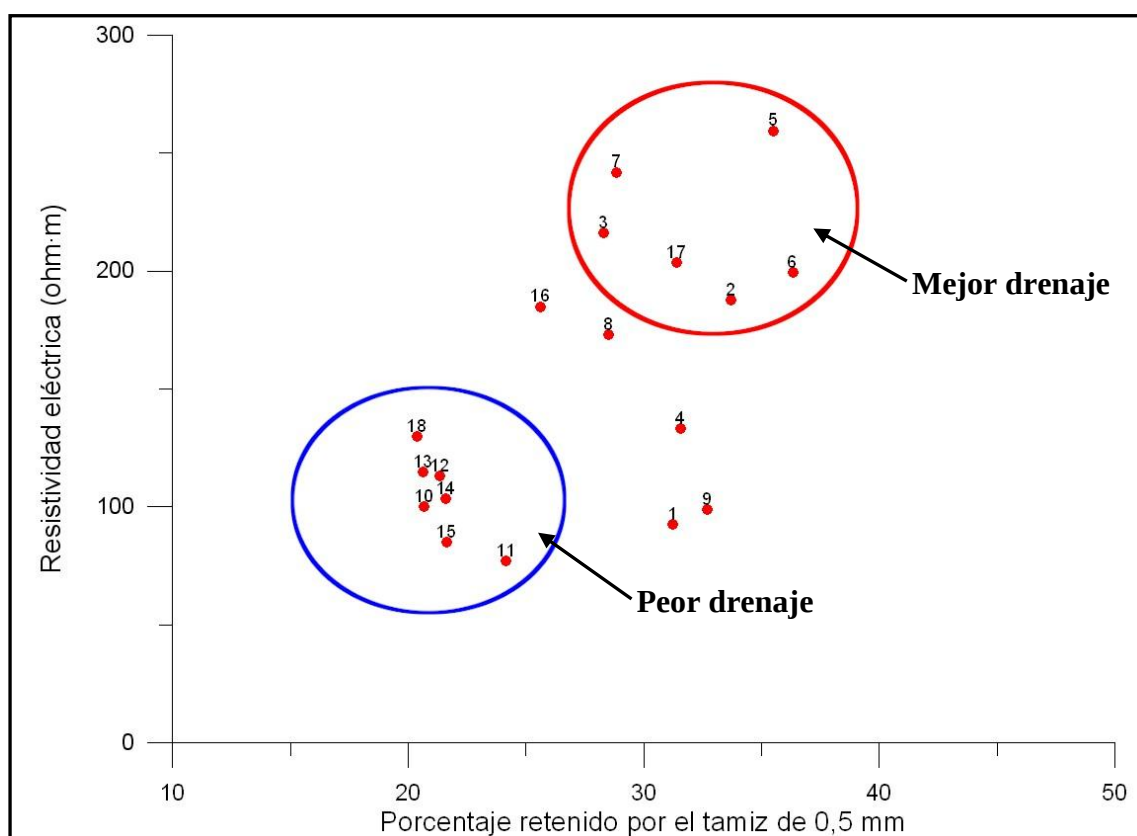


Figura 30. Relación entre el diámetro de partícula y la resistividad eléctrica

La figura 30 relaciona la resistividad eléctrica con el tamaño de las partículas de las muestras de los 18 *greens*.

Puede observarse como en general las muestras que presentan un mayor tamaño de grano vienen caracterizadas por una mayor resistividad, como en los *greens* 2-3-5-6-7-17; indicando que poseen una gran capacidad de drenaje. Las muestras con menor tamaño de grano vienen caracterizadas por resistividades más bajas (en la figura 30

rodeadas con un círculo azul) pudiéndose deducir que el drenaje en estos *greens* no es muy eficiente.

Las muestras 9 y 4 presentan un diámetro de partículas similares a las muestras 2 y 17, sin embargo puede observarse como presentan unos valores de resistividad sensiblemente menor, esto es debido a que su porosidad es menor debido a la presencia de material colmatando los poros, el drenaje en estas muestras será menor por dicha razón.

Los valores de resistividad eléctrica varían en cada *green* y se pueden correlacionar con la textura de suelo obtenida por el análisis granulométrico y la clasificación textural (Adams et al, 1971). Además puede proporcionar información sobre la formación geológica natural que está bajo el substrato de la capa de arena añadida para construir el *green*.

A partir del análisis granulométrico de las arenas que constituyen cada *green* se puede calcular la permeabilidad (K_o) a partir de la formula de Hazen (Custodio y Llamas, 1984):

$$K_o = C \cdot d_e^2$$

donde d_e es el diámetro equivalente que Hazen identifica con el valor d_{10} de la curva granulométrica. Para K en cm/s a 20° C y d_{10} en cm se ha tomado $C=100$, ya que es frecuente tal consideración siendo el margen de variabilidad más usual entre 90 y 120 (Riera, 2009)

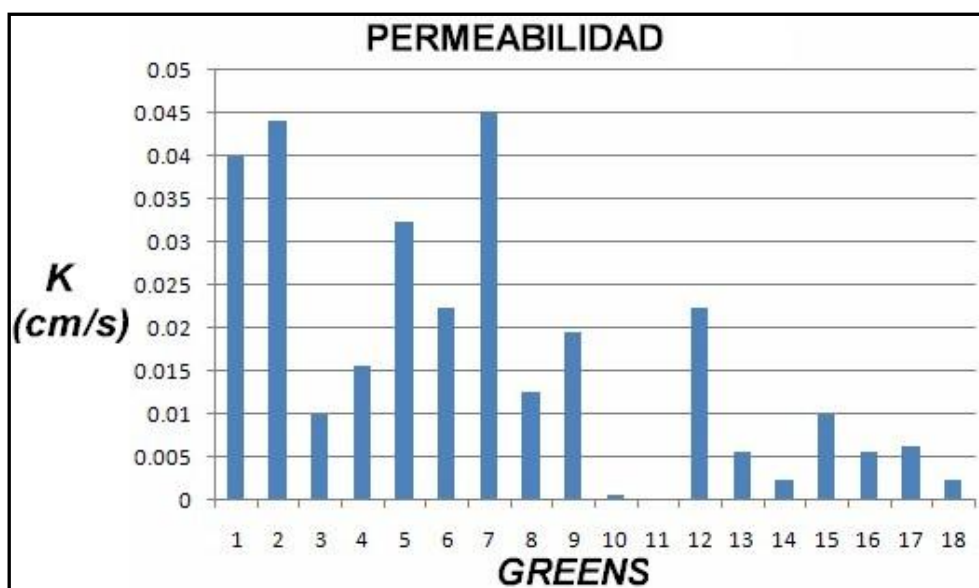


Figura 31. Permeabilidad obtenida a partir de la fórmula de Hazen

Correlacionando los valores de resistividad eléctrica con los valores de permeabilidad hidráulica se puede extraer información que puede ser útilmente aplicada para la gestión hidrológica y ambiental del campo de golf.

Nótese como en la figura 30 el *green* 11 tenía la relación resistividad/tamaño de partícula menor y como la figura 31 indica como la muestras del *green* 11 tiene la más baja permeabilidad.

Como la tomografía eléctrica caracteriza el terreno a partir de la resistividad eléctrica se puede rápidamente observar la problemática de cada *green*, ya que valores bajos de resistividad es decir, conductividades más altas, indican una posible colmatación de la porosidad de la arena.

Se ha mostrado como la tomografía eléctrica puede aportar una gran cantidad de información que amplía nuestro conocimiento sobre el estado general de los *greens*. Una vez obtenida dicha información después del procesado e interpretación de las tomografías también es conveniente la toma de muestras en un mismo *green* pero a diferentes profundidades y correlacionar los datos obtenidos de los ensayos edafológicos con la información obtenida de la tomografía con el fin de conseguir una óptima caracterización.

Dicha experiencia se llevó a cabo en los *greens* 11 y 16, tomando 11 muestras en cada uno a diferentes profundidades (tabla 1). La realización de ensayos edafológicos en todas las muestras de dichos *greens* permite establecer diferentes correlaciones.

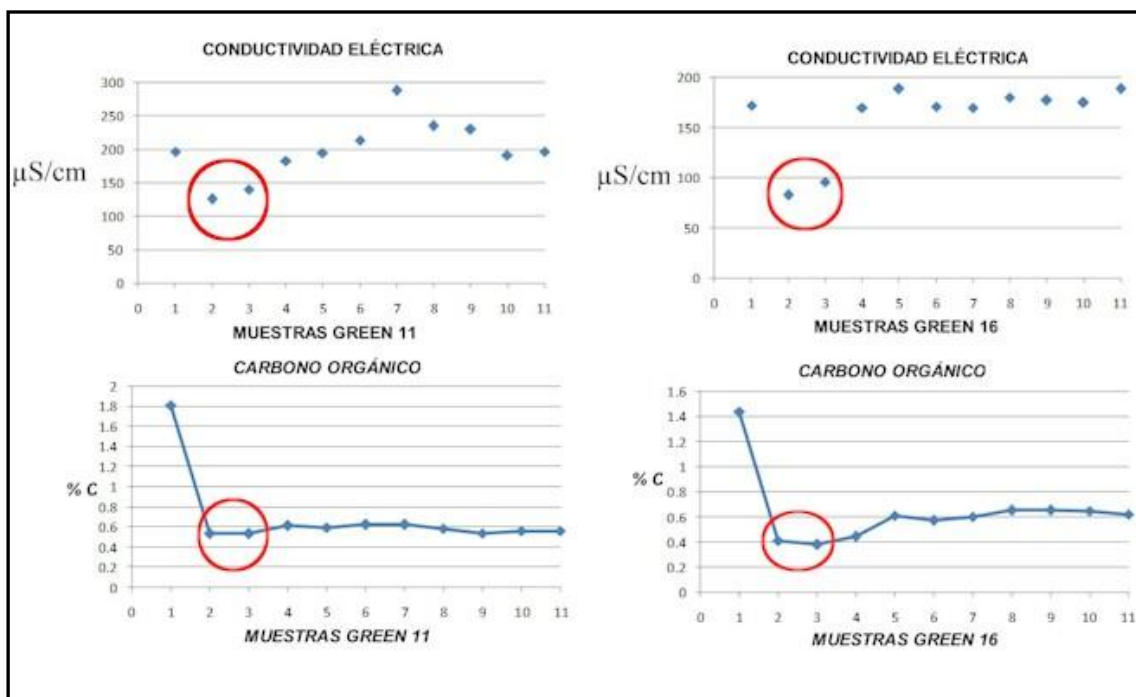


Figura 32. Medidas de conductividad eléctrica y porcentaje de carbono orgánico en las muestras de los *greens* 11 y 16

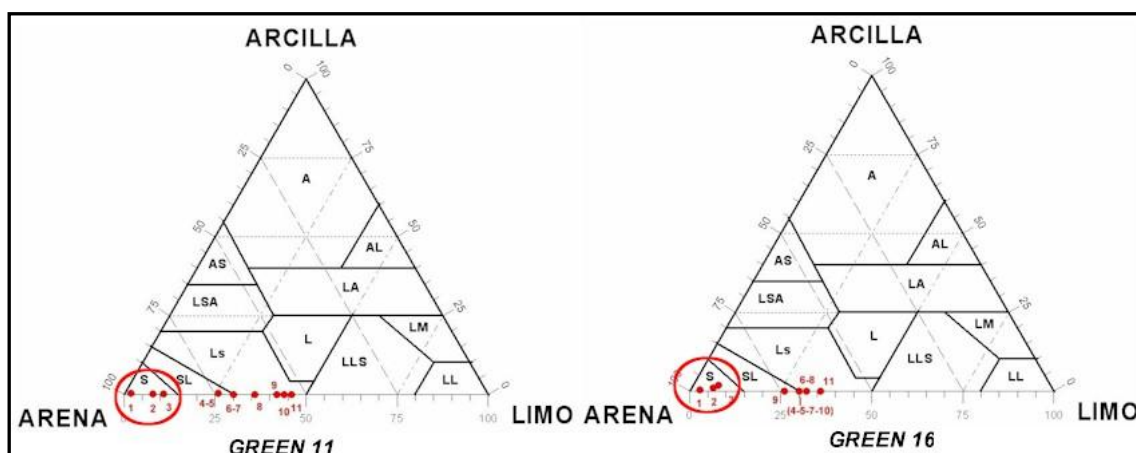


Figura 33. Clasificación textural de Bouyoucos para las muestras de los *greens* 11 y 16

En la figura 32 se puede observar como las muestras 2 y 3 de ambos *greens* son las que presentan los valores de conductividad más bajos, asimismo también presentan los porcentajes de carbono orgánico más bajos. En la figura 33 se observa como las muestras 1 2 y 3, de ambos *greens* presentan textura arenosa, siendo a partir de la muestra número 4, en ambos *greens*, cuando se observa textura arena limosa hasta

llegar a muestras con textura limo arenosa, es decir, a partir de la muestra 4 aumenta el contenido de limo.

La correlación de ambas figuras (32 y 33) permite afirmar que las muestras más arenosas presentan una menor conductividad y un menor contenido en carbono orgánico; con lo que hay una relación clara entre la textura de las muestras y la conductividad del suelo, así como del contenido en carbono orgánico. Cabe puntualizar que la muestra 1 en ambos *greens* es muy superficial y su mayor contenido en carbono orgánico y mayor conductividad se debe no a sus características texturales sino al contenido de pequeñas raíces y restos vegetales.

La tomografía consigue delimitar con mayor exactitud el cambio de material que viene marcado por las diferencias texturales mostrando el contacto entre la arena y el sustrato consiguiendo correlacionar todas las técnicas (figura 34).

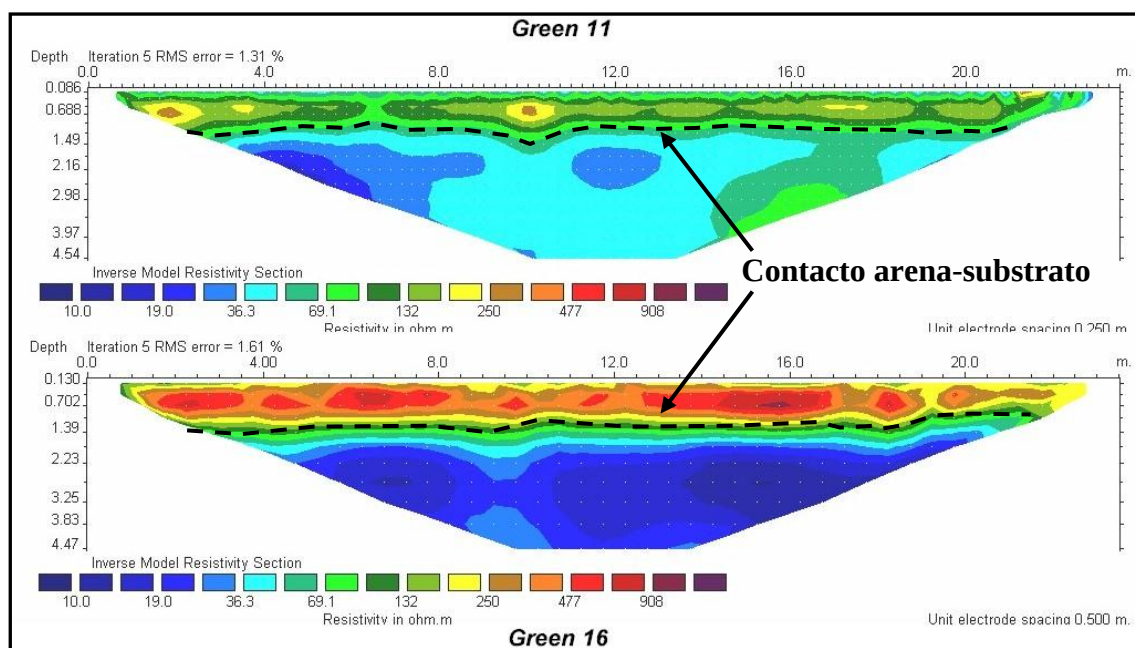


Figura 34. Tomografías realizadas en el *green* 11 y 16

Se observa claramente como la capa de arena en el *green* 11 es menos potente llegando a escasamente 1 m de profundidad y los valores de resistividad son menores (colores verdes) lo que indica que la conductividad de la arena es mayor. La tomografía realizada en el *green* 11 confirma los resultados obtenidos a partir de las figuras 30 y 31.

Esta disminución de la resistividad en la capa de arenas del *green* 11 que muestra la tomografía puede tener tres causas: presencia de materia orgánica, presencia de sales o presencia de material de menor granulometría ocupando los espacios intergranulares que conforman la porosidad de la arena.

Debido a que la determinación de carbono orgánico indica que los porcentajes de carbono son muy bajos la primera posibilidad se descarta; la presencia de sales es también descartada porque si existieran, los valores de resistividad tendrían que ser todavía más bajos; por tanto se puede suponer que la causa de la colmatación puede ser debida a sólidos en suspensión procedentes del agua regenerada o bien a las características químicas de dicha agua que pueden alterar mediante reacciones químicas los granos de arena descomponiéndolos. La colmatación de la porosidad puede ser la causante de la poca eficiencia de riego que presenta el *green* 11. La realización de la tomografía 3D en este *green* confirma el estado del mismo.

La tomografía 3D realizada en los *greens* 11 y 16 ha resultado muy útil para su caracterización, ya que permite conocer su geometría; así como la identificación de zonas con mayor probabilidad de comportarse como hidrófobas.

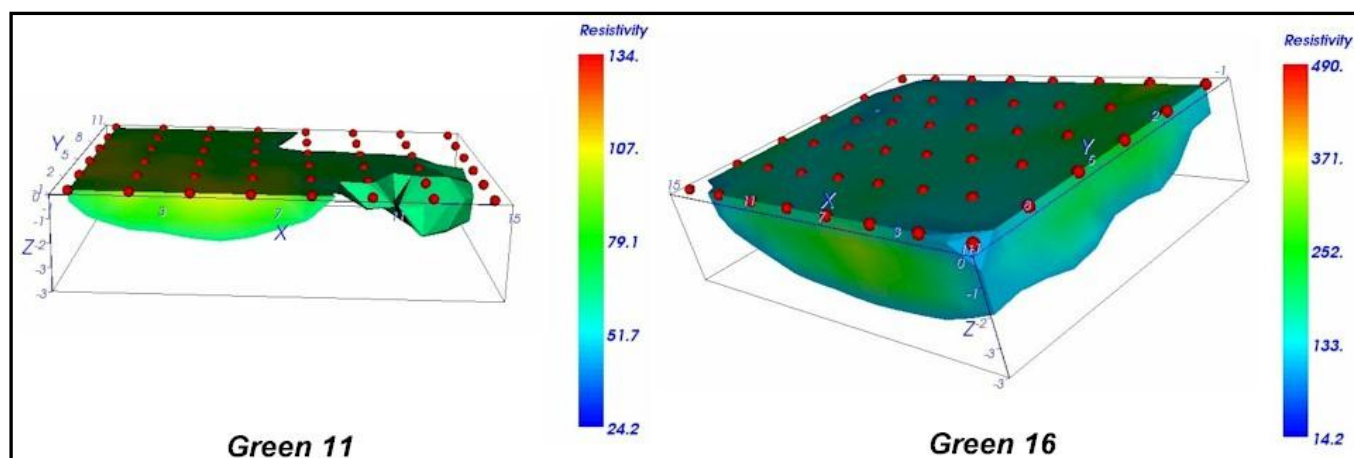


Figura 35. Diferentes vistas obtenidas con la tomografía 3D

La figura 35 muestra la eficacia de la tomografía 3D en el estudio de los *greens* ya que permite visualizar su geometría, permitiendo diagnosticar su estado.

La tomografía 3D así como también en 2D permitiría estudiar la evolución del *green*, realizando tomografías espaciadas en el tiempo que permitirían hacer un seguimiento del estado del *green*, además de constatar que las actuaciones de

remediación están teniendo éxito. Sería interesante proponer a la dirección de aquellos campos de golf interesados la utilización de esta técnica para conocer en cada momento el estado de un determinado *green*, así como su evolución en el tiempo.

5. CONCLUSIONES

A partir de las metodologías y ensayos realizados y de los resultados obtenidos se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- El estudio ha cumplido el objetivo de desarrollar una nueva metodología para la caracterización de los *greens* de campo de golf combinando técnicas edafológicas con técnicas geofísicas.
- Los resultados de nuestro estudio indican que la técnica geofísica de la tomografía eléctrica es muy eficiente para determinar la variabilidad lateral y vertical de la capa de arenas del *green* y la composición del sustrato.
- El estudio ha demostrado que aunque la resistividad eléctrica dependa simultáneamente de muchas propiedades del suelo como la humedad y salinidad, la medida de resistividad aparente en un *green* puede ser fácilmente correlacionada con la composición textural del suelo, ya sea la capa de arenas o el sustrato.
- El uso de una técnica no destructiva como la tomografía eléctrica puede aportar información muy útil en la gestión de un campo de golf disminuyendo el número de ensayos más agresivos que puedan afectar las condiciones naturales de los *greens*.
- La realización de tomografías en 3D se ha revelado como una herramienta muy potente sobretodo para conocer y representar la geometría de los *greens* en un campo de golf.
- Es recomendable que la caracterización de los *greens* en un campo de golf se inicie con una campaña de geofísica que permitirá identificar las zonas más problemáticas para proceder posteriormente a realizar campañas de muestreos.
- El uso de la tomografía en 2D y 3D permite realizar una monitorización de la evolución del estado de un *green*, así como para valorar los resultados de las técnicas de remediación realizadas.
- La correlación de la resistividad eléctrica con la composición textural extraída del análisis granulométrico juntamente con los valores de permeabilidad permiten caracterizar hidrológicamente un *green* aportando información sobre las causas de las bajas eficiencias de los riegos.

6. BIBLIOGRAFÍA

Adams W.A., Stewart V.I. y Thornton D.J. (1971) The assessment of sands suitable for use in sportsfields. *Journal of the Sports Turf Research Institute*, 47: 77-85.

Allred B.J., Redman J.D., McCoy E.L. y Taylor R.S. (2005) Golf Course Applications of Near-Surface Geophysical Methods: A Case Study. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 10: 1-19.

Bouyoucos G.J. (1951) A recalibration of the hydrometer: Method of making mechanical analysis of soils, *Agron. Journal*, 43: 434-438.

Brauen S.E. y Stahnke G. (1995) Leaching of nitrate from sand putting greens. *USGA Green Section Record*, 33(1): 29-32.

Brown K.W. y Duple R.L. (1975) Physical characteristics of soil mixtures used for golf green construction. *Agronomy Journal*, 67: 647-652.

Custodio E. y Llamas M. (1984) *Hidrología Subterránea*. Ed. Omega

Loke M.H. y Barker R.D. (1996) Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections using a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, 44, 131-152.

Porta J., López-Acevedo M. y Rodríguez R. (1992) *Laboratori d'Edafologia*. UPC. 193 pág.

Priestley G.K. (1987) The role of golf as a tourist attraction: the case of Catalonia, Spain. Acts of the meeting of the Commission of Geography of Tourism, Leisure and Recreation of the International Geographical Union. Sousse, Office National de Tourisme, Tunis, pp. 288-302.

Real Decreto 1620/2007: de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas.

Riera J. (2009) *Avaluació de les fórmules empíriques que determinen la conductivitat hidràulica i que es basen en l'anàlisi de la granulometria*. Trabajo Final de Carrera. 100 pág. Universitat Politècnica de Catalunya

Tapias J.C., Salgot M. y Casas A. (1995) Using shallow geophysical methods for golf courses management. *Environmental and Engineering Geophysics*, 298-301. Torino

Tapias J.C (1998) *Estrategias de gestión de los recursos hídricos en los campos de golf*. Tesis Doctoral. *Universitat de Barcelona*. 431 páginas

Tapias J.C. y Salgot M. (2006) Management of soil – water resources in golf courses. *Tourism and Hospitality Research*, 6(3): 197-203.

Tapias J.C., Himi. M, Masachs.A, Nieto C, Brissaud F., Salgot M, Casas A. (2006) Using electrical imaging for assessing suitability of reclaimed water recharge at Begur, Spain. *Desalination*, Volume 188, Issues 1-3, 5 February 2006, Pages 69-77.

USDA (1975) Soil Taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpretation of soil surveys. Handbook 436, 754 págs.

Walkley A. y Black I.A. (1934) An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37: 29-38.

Xia J. y Miller R.D. (2007) integrated geophysical survey in defining subsidence features on a golf course. 6: 197-203.

REFERENCIAS DE INTERNET

<http://www.golfgirona.com>