



**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR
UNIVERSIDAD DE BURGOS**

**ESTUDIO PARAMÉTRICO DE
SUPERFICIES ARTIFICIALES PARA LA
PRÁCTICA DE GOLF**



INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL MECÁNICA

AUTORES:

**Daniel Lozano Martínez
Víctor Santamaría Pardo**

TUTORES:

**Jesús Manuel Alegre Calderón
Isidoro Iván Cuesta Segura**

JULIO 2012



ÍNDICE

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Objetivos.....	2
CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE.....	3
2.1. Introducción.....	3
2.2. Parámetros de control.....	5
2.3. Comportamiento de un campo de golf de hierba natural.....	9
2.4. Soluciones disponibles en el mercado.....	13
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA.....	34
3.1. Introducción.....	34
3.2. Definición del modelo numérico.....	34
3.3. Definición del plan de experimentación para la superficie artificial con huecos cilíndricos.....	45
3.4. Definición del plan de experimentación para la superficie artificial con huecos prismáticos.....	50



CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS	54
4.1. Introducción.....	54
4.2. Superficie artificial con huecos cilíndricos	54
4.3. Superficie artificial con huecos prismáticos	73
4.4. Análisis de los resultados.....	89
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO.....	96
5.1. Conclusiones.....	96
5.2. Trabajo futuro	97
CAPÍTULO 6. BIBLIOGRAFÍA	98
ANEXO 1	100
ANEXO 2.....	110
ANEXO 3	120
ANEXO 4.....	130
ANEXO 5.....	140
ANEXO 6.....	150



CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la práctica del golf está en alza y consecuencia de ello, la construcción de campos para su práctica está aumentando considerablemente. Uno de los aspectos importantes que está favoreciendo esta práctica es la utilización de superficies artificiales como sustitutas de la hierba natural en aquellos casos en los que no se dispone de reservas de agua suficientes o de un presupuesto elevado. La principal ventaja de las superficies artificiales es el reducido mantenimiento que requieren, por el contrario muchas de ellas no presentan un comportamiento frente al bote de la pelota de golf similar al de la hierba natural lo que hace que parte del colectivo que practica este deporte sea reacio a jugar en este tipo de campos artificiales.

En particular, los parámetros asociados con el bote angulado más importantes y que será necesario tener en cuenta a la hora de diseñar una superficie artificial son los siguientes:

- *Coefficiente de restitución absoluto (CRA)*: que representa el cociente entre la velocidad absoluta de salida y la velocidad absoluta de entrada. Es un parámetro asociado a la cantidad de energía absorbida en el impacto, y en consecuencia al grado de amortiguamiento de la superficie.
- *Coefficiente de restitución horizontal (CRX)*: que representa el cociente entre la velocidad horizontal de salida y la velocidad horizontal de entrada.
- *Coefficiente de restitución vertical (CRY)*: que representa el cociente entre la velocidad vertical de salida y la velocidad vertical de entrada.



El esquema de la Figura 1.1 ilustra las componentes de velocidad que se presentan durante el impacto de la bola, y que sirven de base para el establecimiento de los coeficientes de restitución presentados.

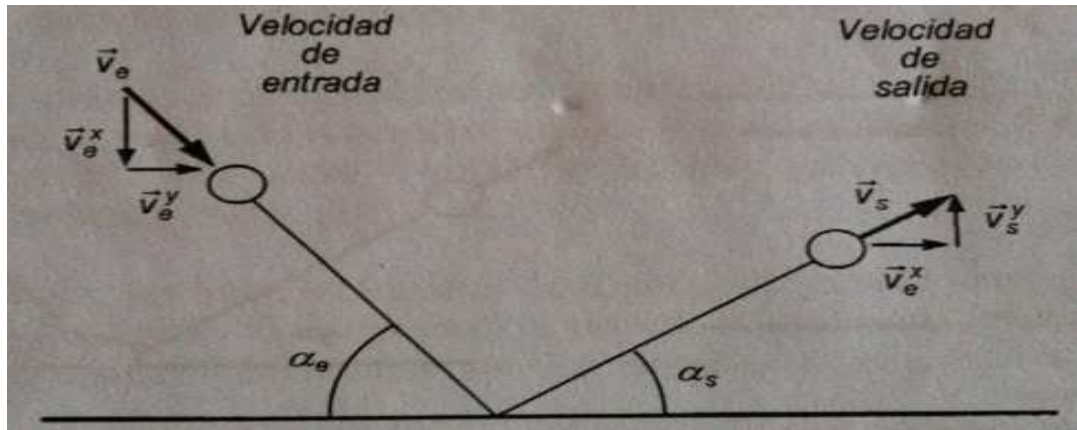


Figura 1.1. Impacto de bola sobre una superficie.

1.2. OBJETIVOS

El objetivo del presente estudio es desarrollar una superficie artificial cuyo comportamiento frente al bote de la pelota sea semejante al de la hierba natural. Dicho estudio estará basado en la simulación numérica y en el diseño de experimentos. Ambas técnicas permitirán analizar el comportamiento en diferentes configuraciones de parámetros geométricos y de material de la superficie artificial, con lo que se podrá establecer un rango óptimo de variación de los parámetros que reproduciría el bote en la hierba artificial.



CAPÍTULO 2

ESTADO DEL ARTE

2.1. INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se presentan los resultados obtenidos en un proyecto anterior solicitado por la empresa Prointec S.A. al Instituto Biomecánico de Valencia (IBV) con título “*Colaboración en el estudio de viabilidad para la implantación de la hierba artificial como superficie de juego en campos de golf*”. La colaboración del IBV se centró en el asesoramiento para el desarrollo de esta superficie de hierba artificial, atendiendo a aspectos biomecánicos y emocionales. Para ello, se partió de considerar que existen campos de hierba natural que pueden ser considerados la referencia a seguir.

La implantación de hierba artificial como superficie de juego de golf nace de la necesidad de ahorrar costes de mantenimiento que requiere un campo de golf, pero con la premisa de conservar la calidad de juego que puede presentar la hierba natural.

Además, lo que se persigue es la satisfacción de los posibles usuarios de esta superficie de juego. En ese sentido, la satisfacción total del usuario requiere que se cubran sus demandas tanto funcionales como emocionales, referidas estas últimas a la percepción y lo que el usuario espera del campo, desde su experiencia y valores.

El trabajo desarrollado durante ese proyecto se planteó según las siguientes fases y tareas:

Fase 1. Identificación de especificaciones.

Fase 2. Asesoramiento en el desarrollo de productos.

Fase 3. Evaluación de la instalación piloto de Burgos.



**“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES
ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”**

La fase 1 tuvo como objetivo la identificación de requisitos necesarios para el desarrollo de una superficie para la práctica del golf, teniendo en cuenta aspectos de calidad, aspectos funcionales y aspectos emocionales.

Tareas realizadas en la fase 1:

- Realización de los grupo de discusión,
- Realización de las encuestas,
- Realización de la adecuación de las máquinas de ensayo,
- Realización de los ensayos de campo.

Esta fase finalizó con la obtención del modelo de referencia del comportamiento de los campos de golf de hierba natural considerados como óptimos.

La fase 2 tuvo como objetivo la evaluación de diversos productos de césped artificial para estudiar su grado de adecuación de acuerdo con los requisitos identificados en la fase 1 y determinar aquellos más adecuados.

Para ello, se realizaron dos baterías de ensayos, la primera con el objetivo de comparar diversas moquetas de césped y diferentes combinaciones de sub-bases. La segunda batería de ensayos se realizó con el objetivo de estudiar la influencia de la sub-base en el comportamiento de la superficie en cuanto a la recepción de la bola se refiere.

Finalmente, en la fase 3 se procedió a evaluar la instalación piloto de Burgos, tanto desde el punto de vista mecánico como biomecánico.



2.2. PARÁMETROS DE CONTROL

A continuación se presentan los parámetros típicos de control de los campos de golf.

2.2.1. Bote angulado de la bola

Objeto y campo de aplicación: Este ensayo tiene por objeto determinar el rebote angulado de la bola en superficies deportivas de hierba. Se ha llevado a cabo sobre la CALLE y el GREEN.

Descripción: El equipo de ensayo consiste en un cañón neumático que da el impulso suficiente a la bola y ésta entra en un campo de visión que capta la cámara de alta velocidad. La cámara está dotada de un software que graba el momento de entrada y salida de la bola. Después las imágenes son analizadas y se obtiene los ángulos y velocidades respectivas.



Figura 2. 1. *Cañón utilizado para medir bote angulado sobre pavimentos de golf.*

**“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES
ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”**

Mediante técnicas de fotogrametría se analiza el bote de la bola obtenido de manera directa la posición de la bola en X e Y en cada instante del tiempo.

De las diferentes posiciones y tiempos se obtienen:

- Velocidades absoluta, horizontal y vertical de entrada.
- Velocidades absoluta, horizontal y vertical de salida.
- Ángulo de entrada.
- Ángulo de salida.

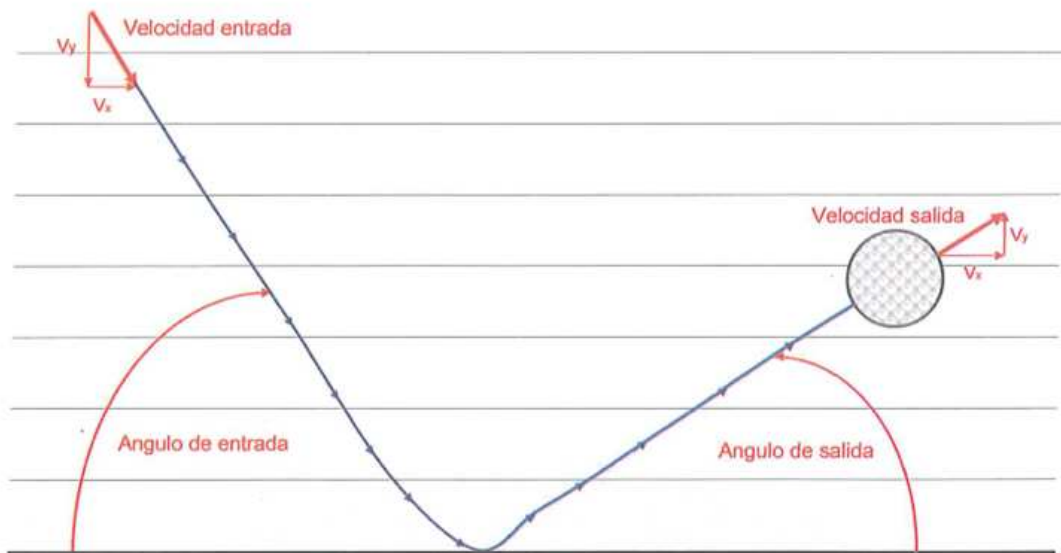


Figura 2. 2. Variables estudiadas en el bote angulado.

Finalmente, de las velocidades calculadas se obtienen las variables:

- Coeficiente de restitución absoluto (CRA), calculado como cociente entre la velocidad absoluta de salida y la velocidad absoluta de entrada.
- Coeficiente de restitución horizontal (CRX), calculado como cociente entre la velocidad horizontal de salida y la velocidad horizontal de entrada.
- Coeficiente de restitución vertical (CRY), calculado como cociente entre la velocidad vertical de salida y la velocidad vertical de entrada.

Las variables que nos sirven para evaluar el comportamiento de la bola son los tres coeficientes de restitución, los cuales expresan la energía absorbida por la superficie y por tanto, el comportamiento de la bola en cada dirección después del bote.



Se efectúan 5 repeticiones de cada zona.

Tabla 2.1. *Resultados del ensayo de bote angulado en césped natural.*

		GREEN		
		CRX	CRY	CRA
Media		0,435	0,375	0,427
Mediana		0,421	0,415	0,422
Desv. típ.		0,096	0,172	0,060
Coef variación		0,221	0,458	0,141
Percentiles	5	0,254	0,001	0,287
	25	0,369	0,388	0,393
	75	0,527	0,442	0,473
	95	0,57	0,486	0,514

2.2.2 Pique

Descripción: Determinar la distancia que recorre la bola después de votar al ser disparada por el cañón. Se ha realizado sobre la CALLE y sobre el GREEN.

Objeto y campo de aplicación: Se dispara el cañón y se mide la distancia entre el lugar donde cae la bola y el lugar donde para de rodar. El ángulo de disparo del cañón para la zona del green y de calle son diferentes. En la siguiente tabla podemos ver los diferentes parámetros del ensayo.

Tabla 2.2. *Ensayo distancia al pique.*

Zona	Angulo de lanzamiento	Presión salida	Velocidad de salida	Distancia Recorrida Estimada	Simula golpe
Tee -calle	24 grados	4 bar	132Km/h	140-170 m	3- Wood
Calle- green	38 grados	3.5 bar	103Km/h	120-140 m	8 - Iron

2.2.3 Spin



**“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES
ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”**

El spin es el efecto que le damos a la bola cuando le golpeamos, este giro sobre su propio eje hace que la bola se vaya frenando o avance dependiendo del lugar donde se golpee a la bola. Cuando la bola gira hacia atrás respecto de la trayectoria que lleva se conoce como Back Spin mientras que si el giro es hacia adelante se conoce como Roll Spin, cuando el efecto gira hacia un lado se conoce como Slice.



2.3. COMPORTAMIENTO DE UN CAMPO DE GOLF DE HIERBA NATURAL

Las tablas que se presentan a continuación recogen los parámetros característicos de un campo de golf de hierba natural.

2.3.1 Tracción rotacional.

Tabla 2.3. Resultados del ensayo de Tracción rotacional en césped natural.

		TEE		CALLE	
		Pie delantero (26Kg)	Pie trasero (8Kg)	Pie delantero (26Kg)	Pie trasero (8Kg)
Media		20,7	10,3	21,6	10,2
Mediana		21	10,0	21,0	10,0
Desv. típ.		2,9	2,2	2,5	1,7
Coef de variación		0,1	0,2	0,1	0,2
Percentiles	5	16,2	7,0	17,0	7,0
	25	18,0	8,0	20,0	9,0
	75	23,0	12,0	23,0	12
	95	25,8	14,8	25,9	13

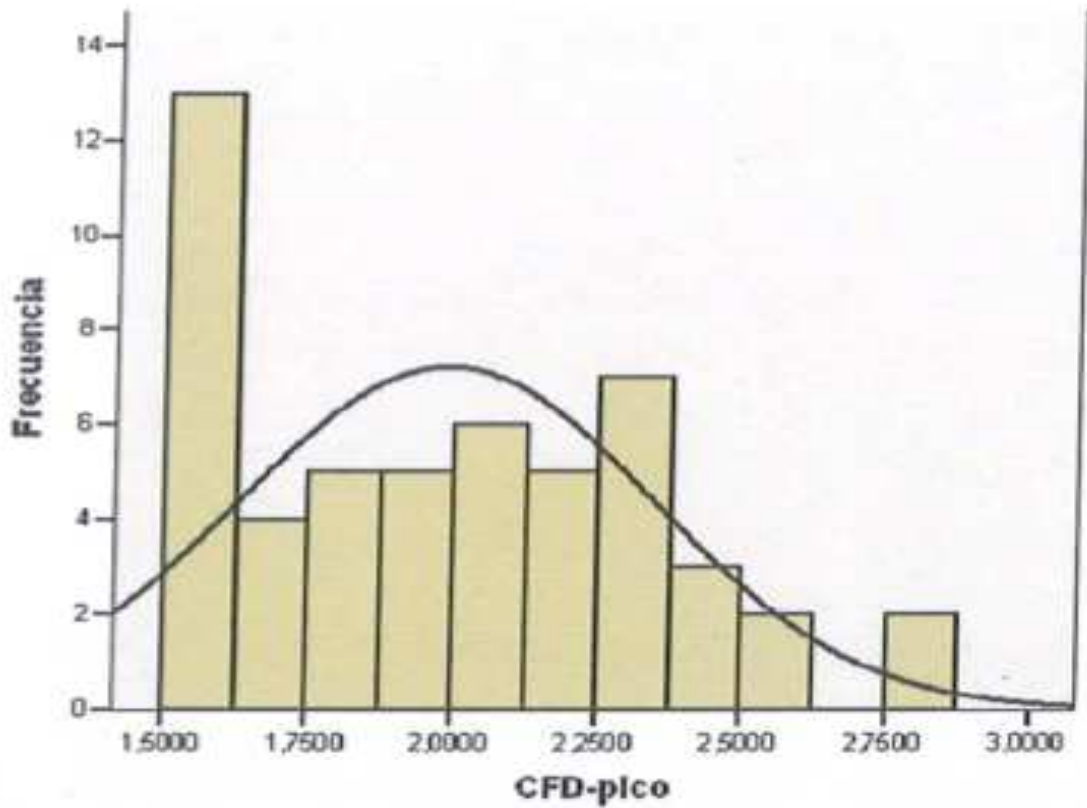
2.3.2. Arrancado de chuleta.

Tabla 2.4. Resultados del ensayo de arrancado de Chuleta en césped natural.

	CALLE	
	CFD-pico	
Media		1,987
Mediana		1,937
Desv. típ.		0,359
Coef variación		0,181
Percentiles	5	1,523
	25	1,637
	75	2,283
	95	2,636



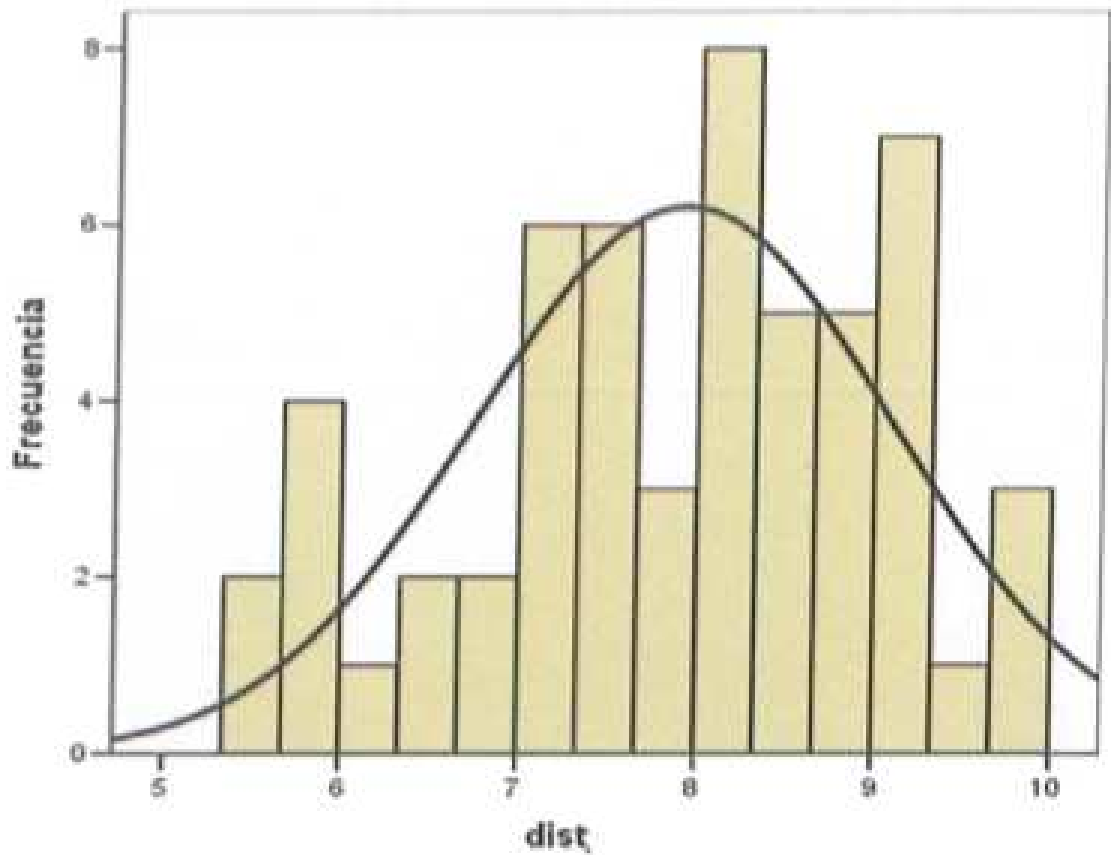
“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”



2.3.3. Velocidad de green.

Tabla 2.5. Resultados del ensayo de velocidad de Green en césped natural.

		GREEN
		Distancia (metros)
Media		2,233
Mediana		2,250
Desv. típ.		0,439
Coef variación		0,197
Percentiles	5	1,574
	25	1,800
	75	2,590
	95	2,920



2.3.4. Distancia al pique.

Tabla 2.6. Resultados del ensayo de distancia al pique en césped natural.

		CALLE	GREEN
		Distancia (m)	Distancia (m)
Medía		19,268	7,932
Mediana		19,600	7,240
Desv. típ.		5,563	3,136
Coef variación		0,289	0,395
Percentiles	5	10,040	3,941
	25	15,300	5,685
	75	22,880	9,525
	95	30,380	13,800



2.3.5 Bote angulado.

Tabla 2.7. Resultados del ensayo de bote angulado en césped natural.

		GREEN		
		CRX	CRY	CRA
Media		0,435	0,375	0,427
Mediana		0,421	0,415	0,422
Desv. típ.		0,096	0,172	0,060
Coef variación		0,221	0,458	0,141
Percentiles	5	0,254	0,001	0,287
	25	0,369	0,388	0,393
	75	0,527	0,442	0,473
	95	0,57	0,486	0,514

2.3.6 Modelo de referencia.

Tabla 2.8. Modelo de referencia del comportamiento del césped natural.

ZONA CAMPO GOLF	TESTS		NIVEL DE CALIDAD	
			*	**
TEE	Tracción rotacional	Pie delantero (N-m)	16.2 -25.8	18.0 - 23.0
		Pie trasero (N-m)	7.0 -14,8	8,0-12.0
CALLE	Tracción rotacional	Pie delantero (N-m)	17.0- 25.9	20.0 -23.0
		Pie trasero (N-m)	7.0 - 13.0	9.0-12.0
	Arrancado de chuleta	CFD-pico	1.523 - 2.636	1,637-2,283
	Bote angulado	CRX	0.254 - 0.570	0.369- 0.527
		CRY	0.001 -0.486	0.388 -0.442
		CRA	0.287- 0.514	0.393- 0.473
Distancia al pique	(metros)	10.04-30.38	15.3 -22.88	
GREEN	Velocidad de Green	(metros)	1.574 - 2.92	1.8 - 2.59
	Bote angulado	CRX	0.271 - 0.528	0.382 -0.470
		CRY	0.291 - 0.417	0.311 -0.366
		CRA	0.330 - 0.438	0.373-0.416
Distancia al pique	(metros)	3.941 - 13.8	5.685 -9.525	



2.4. SOLUCIONES DISPONIBLES EN EL MERCADO.

El green o verde

La zona en la que nos hemos centrado para realizar nuestro estudio es el green o verde, zona en la que se encuentra en hoyo, donde debe finalizar la bola en cada una de las jugadas. Es una zona delimitada de unos 550 m² en promedio, en la que el terreno está muy bien alisado y la hierba es fina y muy corta, de 2,5 a 3,2 mm de altura. Las ondulaciones de la superficie introducidas premeditadamente dificultan considerablemente la "lectura" del *green* para descubrir dónde están las caídas (en inglés *breaks*) o pendientes, a veces apenas perceptibles, que influyen notablemente en la rodadura de la bola.

La posición del *agujero* (que tiene un diámetro de 108 mm y por lo menos 100 mm de profundidad) puede variar dentro del green. Para que los jugadores puedan saber desde lejos dónde está situado el hoyo, éste tiene colocado en su interior una bandera con el asta fina, que mide aproximadamente 2 m de altura. Los *greens* tienen dos áreas principales: el área para bandera y el área sin bandera. Las áreas sin bandera son aquellas en donde el hoyo no se puede situar por reparaciones o porque las pendientes de juego exceden el 3%, además, no se puede situar el hoyo a una distancia de la orilla del green que sea menor a la distancia del asta de la bandera.

Dado que el green es una de las partes más sensibles y caras del campo de golf, debido a que el césped debe ser corto y de una altura uniforme, los golfistas han de reparar con un instrumento especial (arreglapiques) los daños causados por el impacto de la bola sobre el verde para no interferir en la rodadura de las bolas.



Figura 2. 3. *El green de un campo de golf*



Tipos de fibras:

Para ver los diferentes tipos de fibras y césped que podemos colocar en nuestro campo (en la zona del green) hemos buscado diferentes empresas que ofrecían la instalación de este y hemos destacado los siguientes modelos adjuntando las características de cada uno de ellos:

Encontramos dos tipos;

-De nylon (Nylon Turf): Los Turfs sintéticos de Nylon, así como los Turfs sintéticos de Nylon con relleno de arena disponen de una “memoria”. Durante el proceso de fabricación, las fibras son expuestas a una temperatura de 230 grados centígrados y se resisten al embrollamiento, en cuanto regresan a su posicionamiento original. Los Turfs sintéticos de Nylon son mucho más comprimidos que los Turfs de Polipropileno con relleno de arena. Esto es debido a que los productos de Nylon no precisan nada o, en todo caso, solamente una pequeña cantidad de arena. Aparte de esto, la fibra de Nylon resulta ser mucho más resistente que la fibra de Polipropileno, y resiste a la decoloración así como al desgaste bajo cualquier condición de intemperie imaginable.

Los productos de Nylon previstos para ser utilizados con un relleno de arena han sido diseñados de un modo especial y representan Turfs excelentes aptos para todo tipo de juego. Estos hacen posible ambas cosas, tanto una excelente recepción de la bola, como un comportamiento excelente para el putting. Adicionalmente se podrá, mediante la adición de una pequeña cantidad de arena, incrementar la velocidad.

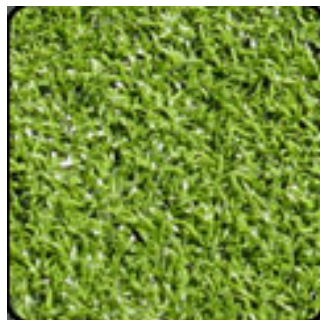
Los Turfs sintéticos de Nylon no precisan ningún tipo de mantenimiento, una vez hayan sido instalados, salvo en los momentos que se añada arena durante la fase de instalación.

La superficie del Green podrá ser liberada de objetos extraños de manera muy fácil, mediante la aplicación bien de aire comprimido o de un sistema de aspiración.

Encontramos diferentes modelos:

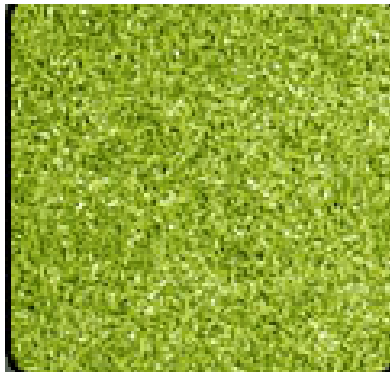
**“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES
ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”****Tipo 1.**

PRODUCTO	TURF PG 01
PROCESO DE PRODUCCIÓN	Tufting
CAMPO DE APLICACIÓN	Putting Green
ESPECIFICACIONES DE LA FIBRA	
HILADO	Nylon 6.6
DTEX	550/8 Dtex
ESTRUCTURA	Nylon monofilament twisted
GRUESO (µm)	
ALTURA DEL CÉSPED (mm)	12
PUNTADAS (no/m²)	36.540
PESO DEL CÉSPED (gms./m²)	1360
GAUGE	1/6”
ESPECIFICACIONES DE LA CAPA INFERIOR	
CAPA PRIMARIA	Polypropylene/Fibreglass, estabilizado para UV
PESO (gms./m²)	277
CAPA SECUNDARIA	3-5mm Polyurethane/Polyester
ESPECIFICACIONES DEL CÉSPED ARTIFICIAL	
PESO TOTAL (gms./m²)	3.700
ANCHURA DEL ROLLO (m)	4.65
LONGITUD DEL ROLLO(m)	30 – 35
CUARZO (kg/m²)	-
GRANULADO DE CAUCHO (kg/m²)	-
PERMEABILIDAD	

**Figura 2. 4.** *Modelo de césped del primer producto.*

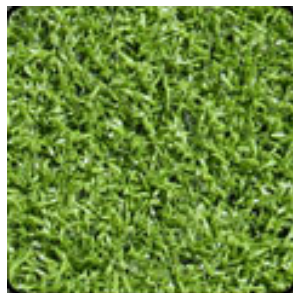
**Tipo 2.**

PRODUCTO	TURF PG 02
PROCESO DE PRODUCCIÓN	Tufting
CAMPO DE APLICACIÓN	Putting Green
ESPECIFICACIONES DE LA FIBRA	
HILADO	Nylon
DTEX	2.640 Dtex
ESTRUCTURA	Fibrillated
GRUESO (µm)	
ALTURA DEL CÉSPED (mm)	10
PUNTADAS (no/m2)	94.500
PESO DEL CÉSPED (gms./m2)	
GAUGE	1/8”
ESPECIFICACIONES DE LA CAPA INFERIOR	
CAPA PRIMARIA	Polypropylene, estabilizado para UV
PESO (gms./m2)	
CAPA SECUNDARIA	Latex
ESPECIFICACIONES DEL CÉSPED ARTIFICIAL	
PESO TOTAL (gms./m2)	1.600
ANCHURA DEL ROLLO (m)	3,30
LONGITUD DEL ROLLO (m)	30 – 35
CUARZO (kg/m2)	-
GRANULADO DE CAUCHO (kg/m2)	-
PERMEABILIDAD	+/- 45ltr./m2

**Figura 2. 5.** *Modelo de césped del segundo producto.*

**“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES
ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”****Tipo 3.**

PRODUCTO	TURF PG 04 / Green
PROCESO DE PRODUCCIÓN	Tufting
CAMPO DE APLICACIÓN	Putting Green / Chipping
ESPECIFICACIONES DE LA FIBRA	
HILADO	Nylon
DTEX	4.800/8 Dtex
ESTRUCTURA	Nylon monofilament twisted
GRUESO (µm)	
ALTURA DEL CÉSPED (mm)	13
PUNTADAS (no/m2)	36.540
PESO DEL CÉSPED (gms./m2)	960
GAUGE	5/16”
ESPECIFICACIONES DE LA CAPA INFERIOR	
CAPA PRIMARIA	Polypropylene Thiobac con Fibre Locked Fleece, estabilizado para UV
PESO (gms./m2)	277
CAPA SECUNDARIA	Latex
ESPECIFICACIONES DEL CÉSPED ARTIFICIAL	
PESO TOTAL (gms./m2)	2.050
ANCHURA DEL ROLLO (m)	4.10
LONGITUD DEL ROLLO(m)	30– 35
CUARZO (kg/m2)	14
GRANULADO DE CAUCHO (kg/m2)	-
PERMEABILIDAD	-

**Figura 2. 6.** Modelo de césped del tercer producto.



Tipo 4.

PRODUCTO	TURF PG 05 / Oliv-Green
PROCESO DE PRODUCCIÓN	Tufting
CAMPO DE APLICACIÓN	Putting Green / Chipping
ESPECIFICACIONES DE LA FIBRA	
HILADO	Nylon
DTEX	4.800/8 Dtex
ESTRUCTURA	Nylon monofilament twisted
GRUESO (µm)	
ALTURA DEL CÉSPED (mm)	13
PUNTADAS (no/m2)	36.540
PESO DEL CÉSPED (gms./m2)	960
GAUGE	5/16”
ESPECIFICACIONES DE LA CAPA INFERIOR	
CAPA PRIMARIA	Polypropylene Thiobac con Fibre Locked Fleece, estabilizado para UV
PESO (gms./m2)	277
CAPA SECUNDARIA	Latex
ESPECIFICACIONES DEL CÉSPED ARTIFICIAL	
PESO TOTAL (gms./m2)	2.050
ANCHURA DEL ROLLO (m)	4.10
LONGITUD DEL ROLLO(m)	30 – 35
CUARZO (kg/m2)	14
GRANULADO DE CAUCHO (kg/m2)	-
PERMEABILIDAD	-

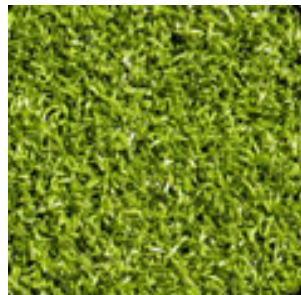


Figura 2. 7. Modelo de césped del cuarto producto.

**“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES
ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”****Tipo 5.**

PRODUCTO	TURF TG 01
PROCESO DE PRODUCCIÓN	Tufting
CAMPO DE APLICACIÓN	Tee-Grass/Driving Range
ESPECIFICACIONES DE LA FIBRA	
HILADO	100 % Polypropylene
DTEX	5.250/4 Dtex Nylon / 12.600/12 Polyethylene
ESTRUCTURA	Polypropylene monofilament twisted, Nylon monofilament curled
GRUESO (µm)	
ALTURA DEL CÉSPED (mm)	35
PUNTADAS (no/m²)	22.680
PESO DEL CÉSPED (gms./m²)	2460
GAUGE	3/8”
ESPECIFICACIONES DE LA CAPA INFERIOR	
CAPA PRIMARIA	Polypropylene Thiobac with fiber locked fleece, estabilizado para UV
PESO (gms./m²)	215
CAPA SECUNDARIA	Latex
ESPECIFICACIONES DEL CÉSPED ARTIFICIAL	
PESO TOTAL (gms./m²)	3.425
ANCHURA DEL ROLLO (m)	4,04
LONGITUD DEL ROLLO(m)	30 – 35
CUARZO (kg/m²)	
GRANULADO DE CAUCHO (kg/m²)	
PERMEABILIDAD	+/- 60ltr./m ² /min, unfilled

**Figura 2. 8. Modelo de césped del quinto producto.**



-De Polipropileno (Turf Polipropileno): Polipropileno es un tipo de plástico.

Todos los Turfs de Polipropileno precisan cierta cantidad de relleno de arena con el fin de desarrollar un buen comportamiento. La razón principal para esto reside en el hecho de que este producto no se mantiene firme por sí mismo.

El relleno con arena asimismo es necesario con tal de evitar que se produzca cierto enredamiento del material. La adición de arena es comparable a un mantenimiento constante, independientemente de las opiniones que afirmen lo contrario a este respecto. Aquellos Greens que están cargados con un relleno de arena muy cuantioso se hacen duros con el tiempo y por eso precisan algo más de mantenimiento con el fin de garantizar un buen comportamiento.

Estos Turfs con relleno de arena precisan una cantidad de entre 6 y 8 Kilos de arena por cada metro cuadrado, y deberán ser liberados de la arena y rellenados de nuevo en cuanto la arena se haya apelmazado o haya sido retirada por ejemplo por el agua de la lluvia.

Con el correcto relleno de arena, los Polypropylenos ofrecen una superficie excelente para la recepción de golpes largos (el relleno de arena ayuda a repartir la energía de impacto de la bola cuando ésta es golpeada hacia el Green desde cierta distancia).

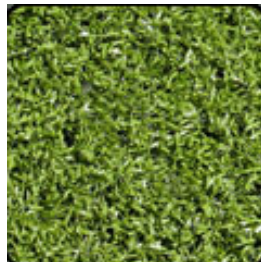
El putting sobre un Green con relleno de arena de todos modos también tiene, como todo, su lado negativo. Se observará la presencia de un efecto “granuloso” cuando haga putting sobre un Green con relleno de arena. Esto significa que la bola siempre correrá más en dirección al granulado que cuando se mueve en dirección contraria.

Este efecto desaparecerá en el caso de la mayor parte de productos de Polipropileno queelijamos.

También encontramos diferentes modelos:

**“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES
ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”****Tipo 1.**

PRODUCTO	TURF PG 03
PROCESO DE PRODUCCIÓN	Tufting
CAMPO DE APLICACIÓN	Putting Green / Chipping
ESPECIFICACIONES DE LA FIBRA	
HILADO	Polyamid
DTEX	8.000 Dtex
ESTRUCTURA	Fibrillated
GRUESO (µm)	80
ALTURA DEL CÉSPED (mm)	13
PUNTADAS (no/m2)	58.800
PESO DEL CÉSPED (gms./m2)	1.750
GAUGE	3/16”
ESPECIFICACIONES DE LA CAPA INFERIOR	
CAPA PRIMARIA	Polyester-Fibre-Glass, estabilizado para UV
PESO (gms./m2)	
CAPA SECUNDARIA	Latex
ESPECIFICACIONES DEL CÉSPED ARTIFICIAL	
PESO TOTAL (gms./m2)	3.700
ANCHURA DEL ROLLO (m)	4.00
LONGITUD DEL ROLLO(m)	30 – 35
CUARZO (kg/m2)	-
GRANULADO DE CAUCHO (kg/m2)	-
PERMEABILIDAD	+/- 45ltr./m2

**Figura 2. 9. Modelo de césped de primer producto.**



“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”

Tipo 2:

PRODUCTO	TURF TG 03
PROCESO DE PRODUCCIÓN	Tufting
CAMPO DE APLICACIÓN	Driving Range
ESPECIFICACIONES DE LA FIBRA	
HILADO	100 % Polypropylene
DTEX	8.800/1 Dtex
ESTRUCTURA	Fibrillated
GRUESO (µm)	
ALTURA DEL CÉSPED (mm)	24
PUNTADAS (no/m²)	22.680
PESO DEL CÉSPED (gms./m²)	976
GAUGE	5/16”
ESPECIFICACIONES DE LA CAPA INFERIOR	
CAPA PRIMARIA	Thiobac con Fiber looked Fleece, estabilizado para UV
PESO (gms./m²)	164
CAPA SECUNDARIA	Latex
ESPECIFICACIONES DEL CÉSPED ARTIFICIAL	
PESO TOTAL (gms./m²)	2.140
ANCHURA DEL ROLLO (m)	4.10
LONGITUD DEL ROLLO(m)	30 – 35
CUARZO (kg/m²)	25
GRANULADO DE CAUCHO (kg/m²)	
PERMEABILIDAD	+/- 60ltr./m ² /min, unfilled



Figura 2. 10. Modelo de césped del segundo producto.

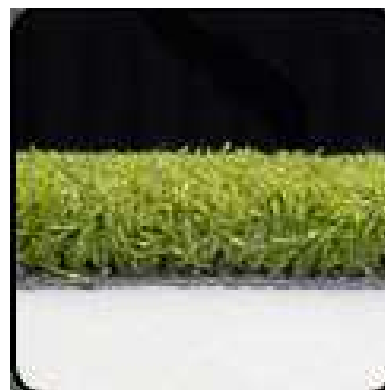
**“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES
ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”****Tipo 3.**

PRODUCTO	TURF PG 06
PROCESO DE PRODUCCIÓN	Tufting
CAMPO DE APLICACIÓN	Putting Green / Chipping
ESPECIFICACIONES DE LA FIBRA	
HILADO	100 % Polypropylene
DTEX	6.400 Dtex
ESTRUCTURA	Fibrillated
GRUESO (µm)	90
ALTURA DEL CÉSPED (mm)	14
PUNTADAS (no/m²)	63.000
PESO DEL CÉSPED (gms./m²)	1.450
GAUGE	3/16”
ESPECIFICACIONES DE LA CAPA INFERIOR	
CAPA PRIMARIA	Polyester-Fibre-Glass, estabilizado para UV
PESO (gms./m²)	
CAPA SECUNDARIA	Latex
ESPECIFICACIONES DEL CÉSPED ARTIFICIAL	
PESO TOTAL (gms./m²)	3.400
ANCHURA DEL ROLLO (m)	4.00
LONGITUD DEL ROLLO(m)	30 – 35
CUARZO (kg/m²)	-
GRANULADO DE CAUCHO (kg/m²)	-
PERMEABILIDAD	+/- 45ltr./m ²

**Figura 2. 11.** Modelo de césped del tercer producto.

**“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES
ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”****Tipo 4.**

PRODUCTO	TURF PG 07
PROCESO DE PRODUCCIÓN	Tufting
CAMPO DE APLICACIÓN	Putting Green
ESPECIFICACIONES DE LA FIBRA	
HILADO	100 % Polypropylene
DTEX	6.600 Dtex
ESTRUCTURA	Fibrillated
GRUESO (µm)	65
ALTURA DEL CÉSPED (mm)	10
PUNTADAS (no/m2)	22.500
PESO DEL CÉSPED (gms./m2)	400
GAUGE	5/16” – 3/8”
ESPECIFICACIONES DE LA CAPA INFERIOR	
CAPA PRIMARIA	Polypropylene, estabilizado para UV
PESO (gms./m2)	120
CAPA SECUNDARIA	Latex: 1.000 gr/sqm
ESPECIFICACIONES DEL CÉSPED ARTIFICIAL	
PESO TOTAL (gms./m2)	1.520
ANCHURA DEL ROLLO (m)	4,05
LONGITUD DEL ROLLO	30m – 35m
CUARZO (kg/m2)	10 (recommended)
GRANULADO DE CAUCHO (kg/m2)	-
PERMEABILIDAD	+/- 35ltr./m2

**Figura 2. 12.** *Modelo de césped del cuarto producto.*

**“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES
ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”****Tipo 5.**

PRODUCTO	TURF TG 01
PROCESO DE PRODUCCIÓN	Tufting
CAMPO DE APLICACIÓN	Tee-Grass/Driving Range
ESPECIFICACIONES DE LA FIBRA	
HILADO	100 % Polypropylene
DTEX	5.250/4 Dtex Nylon / 12.600/12 Polyethylene
ESTRUCTURA	Polypropylene monofilament twisted, Nylon monofilament curled
GRUESO (µm)	
ALTURA DEL CÉSPED (mm)	35
PUNTADAS (no/m²)	22.680
PESO DEL CÉSPED (gms./m²)	2460
GAUGE	3/8”
ESPECIFICACIONES DE LA CAPA INFERIOR	
CAPA PRIMARIA	Polypropylene Thiobac with fiber locked fleece, estabilizado para UV
PESO (gms./m²)	215
CAPA SECUNDARIA	Latex
ESPECIFICACIONES DEL CÉSPED ARTIFICIAL	
PESO TOTAL (gms./m²)	3.425
ANCHURA DEL ROLLO (m)	4,04
LONGITUD DEL ROLLO	30m – 35m
CUARZO (kg/m²)	
GRANULADO DE CAUCHO (kg/m²)	
PERMEABILIDAD	+/- 60ltr./m ² /min, unfilled

**Figura 2. 13.** *Modelo de césped del quinto producto.*



“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”

Patentes:

Número 1:

United States Patent

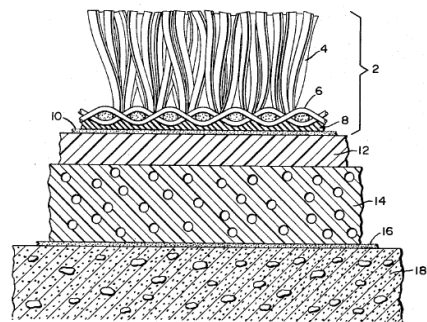
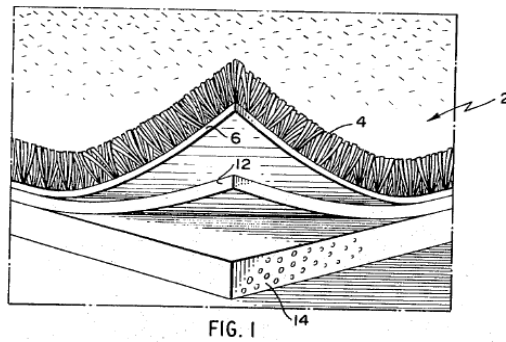
Spinney, Jr. et al.

[15] **3,661,687**

[45] **May 9, 1972**

- [54] **ARTIFICIAL GRASS SPORTS FIELD**
 [72] Inventors: **Arthur F. Spinney, Jr., Saugus; Lawrence J. Warnalis, West Medford, both of Mass.**
 [73] Assignee: **American Biltrite Rubber Co., Inc., Chelsea, Mass.**

[56]	References Cited
	UNITED STATES PATENTS
2,515,847	7/1950 Winkler273/176 J
3,332,828	7/1967 Faria et al.....161/67 X



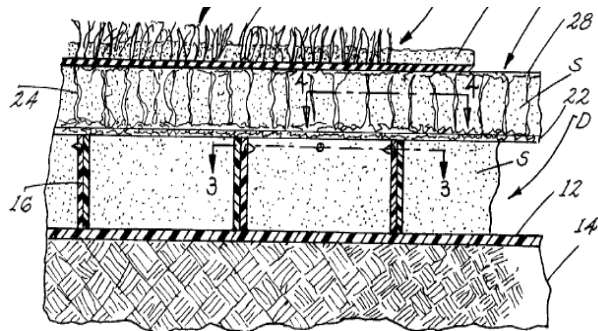
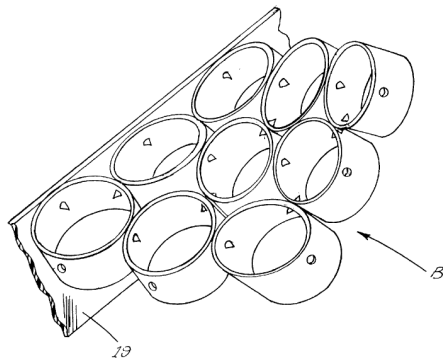
Número 2:

(12) **United States Patent**
 Jones

(10) Patent No.: **US 6,221,445 B1**
 (45) Date of Patent: **Apr. 24, 2001**

- (54) **COMPOSITE ARTIFICIAL TURF STRUCTURE WITH SHOCK ABSORPTION AND DRAINAGE**
 (75) Inventor: **James Martin Jones, Pendleton, SC (US)**
 (73) Assignee: **U.S. Greentech, Inc., Calhoun, GA (US)**

5,250,340	* 10/1993	Bohnhoff .	
5,306,317	* 4/1994	Yoshizaki .	
5,383,314	1/1995	Rothberg	52/169
5,460,867	* 10/1995	Magnuson et al. .	
5,688,073	11/1997	Brodeur et al.	405/45
5,752,784	5/1998	Motz et al.	405/37
5,780,144	7/1998	Bradley	428/217
5,820,296	10/1998	Goughnour	405/43
5,823,711	10/1998	Herd et al.	405/36
5,848,856	* 12/1998	Bohnhoff .	



**“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES
ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”****Número 3:**

(12) **United States Patent**
Reddick

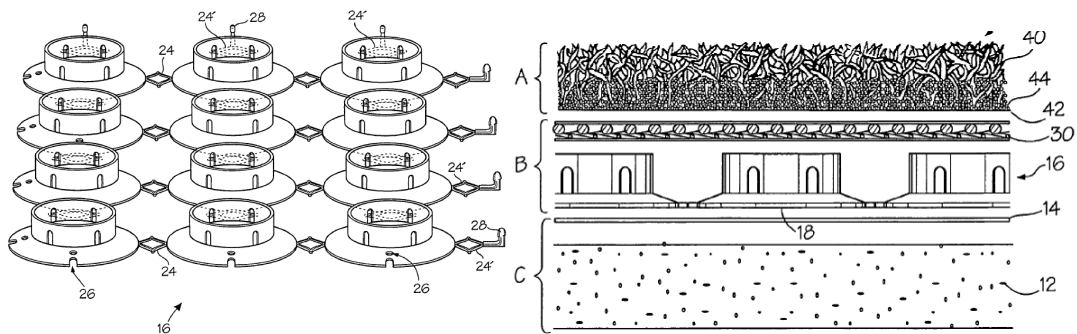
(10) **Patent No.:** **US 7,144,609 B2**
(45) **Date of Patent:** **Dec. 5, 2006**

(54) **ARTIFICIAL TURF SYSTEM**

(75) Inventor: **Randolph S. Reddick**, Calhoun, GA
(US)

(73) Assignee: **U.S. Greentech, Inc.**, Calhoun, GA
(US)

4,462,184 A	7/1984	Cunningham
4,497,853 A	2/1985	Tomarin
4,749,479 A	6/1988	Gray
4,913,596 A	4/1990	Lambert, III
4,934,865 A	6/1990	Varkonyi et al.
5,017,040 A	5/1991	Mott
5,064,308 A	11/1991	Almond et al.
5,076,726 A	12/1991	Heath

**Número 1:**

La patente 3,661,687 del 9 de Mayo de 1972 por Spinney, Jr. et al[1]. Está formada por tres capas, la base que hace una función de drenaje una más estrecha que haría la función de amortiguar los golpes y la tercera que sería la que está compuesta por las fibras de césped sintético que sería donde botaría la bola.

Número 2:

En la patente US 6,221,445 B1 del 21 de Abril de 2001 por Jones[2] vemos que ya se inserta una nueva capa de cilindros huecos de pequeño tamaño presumiblemente de caucho que ayudaran al drenaje y amortiguación de la bola a la hora del impacto de la bola contra el césped sintético.

La capa base cumple la misma función que en la anterior patente, que consiste en drenar la superficie y amoldarse al terreno. A continuación vendría la nueva capa, de la que ya hemos hablado y luego vendría la capa de amortiguación que su función sería la de ayudar a la bola a impactar contra el suelo.

Finalmente vendría la capa de césped que dependiendo de la zona en la que utiliza se usará una largura u otra de fibras.



“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES
ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”

Número 3:

Finalmente encontramos la patente US 7,144,609 B2 del 5 de Diciembre de 2006 por Reddick[3] en la que encontramos 4 capas pero ya adaptada a la tecnología de la época.

Como se observa la distribución de las capas es la misma que en la patente de 2001.

Pero vemos que la capa de cilindros huecos está distribuida uniformemente y unidos a bases circulares que ayudan a una mejor fijación al terreno, esta base está unida directamente a la base de amortiguación por lo que nos queda todo definido en tres partes, la parte C que se observa en el dibujo es la que se fija al terreno haciendo la opción de drenaje, la parte B que es la que acabamos de comentar que comprende la base de cilindros huecos y la capa de amortiguación y para finalizar la capa superior que es la que contiene las fibras de césped sintético que contendrá las fibras de hierbas a la altura que necesitemos.

Empresas que producen césped artificial:

Greenlandgolf[4]: <http://www.greenlandgolf.com/>

Construcción de campos de golf. Cada cliente tiene unas necesidades distintas y cuenta con una zona de instalación diferente. A partir de un estudio detallado del terreno, diseña un green adaptado a tus exigencias en cuanto a ondulaciones, caídas, velocidad, regularidad y calidad de rodadura de la bola en el green, capacidad de recepción, etc.

Y por otro lado, gracias a los conocimientos de diseño, paisajismo, construcción y el juego del golf, adaptado también al entorno, optimiza al máximo el espacio disponible en función de tus necesidades.

Envylawn[5]: <http://www.envylawn.com/spanish/>

Con la escasez de agua cada vez mayor y las preocupaciones por el medioambiente sobre los fertilizantes de césped y productos químicos, los propietarios de viviendas, empresas y gobiernos municipales están optando por instalar el césped artificial EnvyLawn ®. Como fabricante de césped sintético al por mayor, los productos



**“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES
ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”**

incluyen los putting greens de césped artificial, jardines de hierba artificial, campos de golf de hierba sintética y las áreas de recreación de césped sintético.

El césped artificial EnvyLawn elimina las necesidades de mantenimiento constante, tales como el riego, la poda, la fertilización, aireación u otras actividades necesarias para el mantenimiento de la hierba. Los productos de césped artificial y de hierba sintética EnvyLawn son versátiles, seguros, económicos y 100 % reciclables, incluyendo los putting greens de césped sintético, jardines de césped artificial, campos de golf de hierba sintética y áreas de recreación de césped artificial. Pero es su apariencia y sensación naturales lo que provoca esa primera impresión irresistible.

Back nine greens[6]: <http://www.backninegreens.com/putting-greens>

Su césped artificial proporciona un medio ambiente amigable, un bajo mantenimiento del campo de golf. Es seguro para los niños y las mascotas, no requiere riego o siembra, y está libre de pesticidas. Se usan las técnicas más avanzadas de fabricación que garantizan que todos los Back Nine no solo sean una mejora para la propiedad.

Verdalia[7]: <http://www.verdalia.es/>

Los avances a la hora de producir una superficie de comportamiento muy similar al césped natural y las pruebas realizadas para ajustar su óptimo rendimiento con jugadores expertos, se han combinado con las ventajas de este tipo de producto, haciendo del césped sintético un material cada vez más utilizado en instalaciones deportivas. Hoy en día se utiliza bien sea como elemento básico de toda una instalación o bien como un complemento en determinadas zonas de la misma.

El ahorro en los gastos de mantenimiento, su durabilidad y la posibilidad de un uso intensivo ha hecho del césped sintético un producto cada vez más habitual en todo tipo de instalaciones deportivas: campos de fútbol, rugby, golf... La facilidad y el bajo coste del mantenimiento del césped sintético, así como su mayor "resistencia" en superficies que acogen un elevado tráfico de usuarios lo han convertido en una solución muy rentable.



“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES
ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”

Progreen putting greens[8]: <http://www.progreen.com/>

Fue la primera empresa de césped artificial en el Golf Channel. Fueron los primeros en desarrollar también una arena de color verde recebo, el primero en hacer un sistema de PVC taza de apoyo, y el primero en diseñar un soporte estable para el nylon superficies de green.

Tour greens europe[9]: <http://www.tourgreens-europe.com>

Por lo general, debido a los factores limitantes, tales como el espacio disponible para trabajar dentro de las limitaciones presupuestarias, se utilizará exclusivamente para zonas de césped corto.

Intelliturf[10]: <http://www.intelliturf.com/>

Intelliturf tiene raíces que se remontan a 10 años. Son veteranos del césped sintético en la industria.

Con instalaciones en Europa, el Caribe y en los EE.UU. sus clientes disfrutan del golf donde no era posible hace tan sólo unos pocos años. Más de 50 jugadores del circuito tienen ahora césped sintético en sus patios traseros. Muchas personas han cambiado el césped natural por césped sintético.

Southwestgreens[11]: <http://www.southwestgreens.es/>

Southwest Greens hace posible la práctica del golf en lugares variados. Cualquiera que tenga disponible una superficie mínima de 40 metros cuadrados, puede disponer de su propio green de golf. El sello de calidad Nicklaus Design garantiza la exclusividad y calidad de la instalación. Profesionalidad avalada por los mejores jugadores profesionales de golf del momento.

Realiza instalaciones especiales de superficies sintéticas para la práctica del golf en domicilios particulares (golf en casa), en campos de golf y en lugares de ocio (golf y ocio).

Synthetic turf[12]: <http://www.synthetic-turf.com/>

Design turf[13]: <http://www.designturf.ca/>



“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES
ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”

Greenfields[14]: <http://www.cesped-sintetico-greenfields.com/>

El césped sintético proporciona superficies de juego para deportes de alto rendimiento. Varios organismos de legislación deportiva, entre otros la Federación Internacional de Asociaciones de Fútbol (FIFA) y la Federación Internacional de Hockey (FIH), promueven el uso de césped sintético para la realización de actividades deportivas profesionales. Numerosos equipos de todo el mundo consideran el césped sintético como la mejor solución. GreenFields ofrece un sistema de césped artificial para la gran mayoría de disciplinas deportivas.

Los lugares donde se suele aplicar césped sintético deportivo con más frecuencia son campos de fútbol, de hockey y de béisbol, así como en pistas de tenis de césped, superficies para petanca sobre césped y sistemas de putting para golf.

Perfectly green[15]: <http://www.perfectlygreen.co.uk/>

Synthetic turf product[16]: <http://www.syntheticurf.com.au/>

Este tipo de Green proporciona una ayuda fantástica para el golfista serio, además de ser una función de bienestar de gran entretenimiento para toda la familia. Ofrece un paisaje libre de mantenimiento.

Pro putt[17]: <http://www.pro-putt.com/>

A la mayoría de los golfistas les resulta difícil encontrar el equipo y lugar para practicar golf. Con un sistema Pro Putt Golf sintético verde, la práctica estará a sólo un paso, en su propio patio trasero.

La combinación única de arena y fibra sintética le da a la pelota cierto el rebote y las características de rodadura de la hierba natural. El aspecto y la jugabilidad son increíblemente reales con una mayor absorción de disparo de la pelota. Y la velocidad de la bola puede variar añadiendo o quitando arena. El sistema Pro Putt Se puede instalar en varios diseños básicos o personalizados para adaptarse a cualquier ambiente de golf. Ya sea ondulaciones difíciles, pendientes graduales, o incluso construir trampas de arena.



“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”

Evergreens uk[18]: <http://www.evergreensuk.com/>

Sus greens de césped sintético están disponibles en diseños estándar y personalizados y adecuados para uso comercial o doméstico. Ofrecen nylon de alta calidad y superficies de polipropileno con atributos de alto rendimiento para crear fantásticos campos de golf de juego corto y zonas de aventura en los parques de vacaciones.

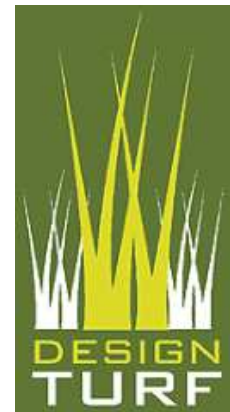
Su marca de greens LazyLawn se puede ver en el Salón de Golf del año en Londres.

Eslóganes de las empresas que producen césped artificial:





“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”





CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA

3.1. INTRODUCCIÓN

Los dos pilares fundamentales de la metodología desarrollada en el presente estudio son la simulación numérica y el diseño de experimentos basado en superficies de respuesta.

En este capítulo se explican los pasos a seguir para generar un modelo numérico con el que simular el comportamiento de cualquier superficie artificial para la práctica de golf. En particular, se ha utilizado el software ABAQUS. Los resultados obtenidos en la simulación numérica servirán para alimentar los diseños de experimentos llevados a cabo.

Para cada una de las superficies artificiales analizadas se ha diseñado un plan de experimentos con el que poder obtener la superficie de respuesta para cada uno de los tres parámetros de control establecidos (CRA, CRX y CRY). En este sentido se ha contado con la ayuda del software NEMRODW.

3.2. DEFINICIÓN DEL MODELO NUMÉRICO

A continuación se recogen los pasos a seguir en ABAQUS para la generación de un modelo numérico de una superficie artificial para la práctica del golf. El modelo consta de varias partes y para su correcto funcionamiento es necesario utilizar varios de los módulos del programa.

Cabe destacar que el modelo numérico desarrollado en este apartado es un ejemplo genérico, y que para simular un ejemplo concreto bastará con modificar los parámetros que lo definen, en lo referente a material, tipo de superficie artificial, etc.



3.2.1. Creación de la geometría del modelo numérico

El primer paso consiste en generar las distintas partes que componen el modelo.

En este caso consta de tres partes, una bicapa donde la capa inferior sería el terreno y la superior la superficie artificial analizada, y la pelota de golf.

Las dos primeras se han modelado como una parte extruida deformable (Figura 3.1.a) mientras que la pelota se ha considerado un elemento rígido de revolución (Figura 3.1.b) debido a que la deformación que sufre durante el bote es prácticamente despreciable frente a la observada en la superficie sobre la que bota (hierba).

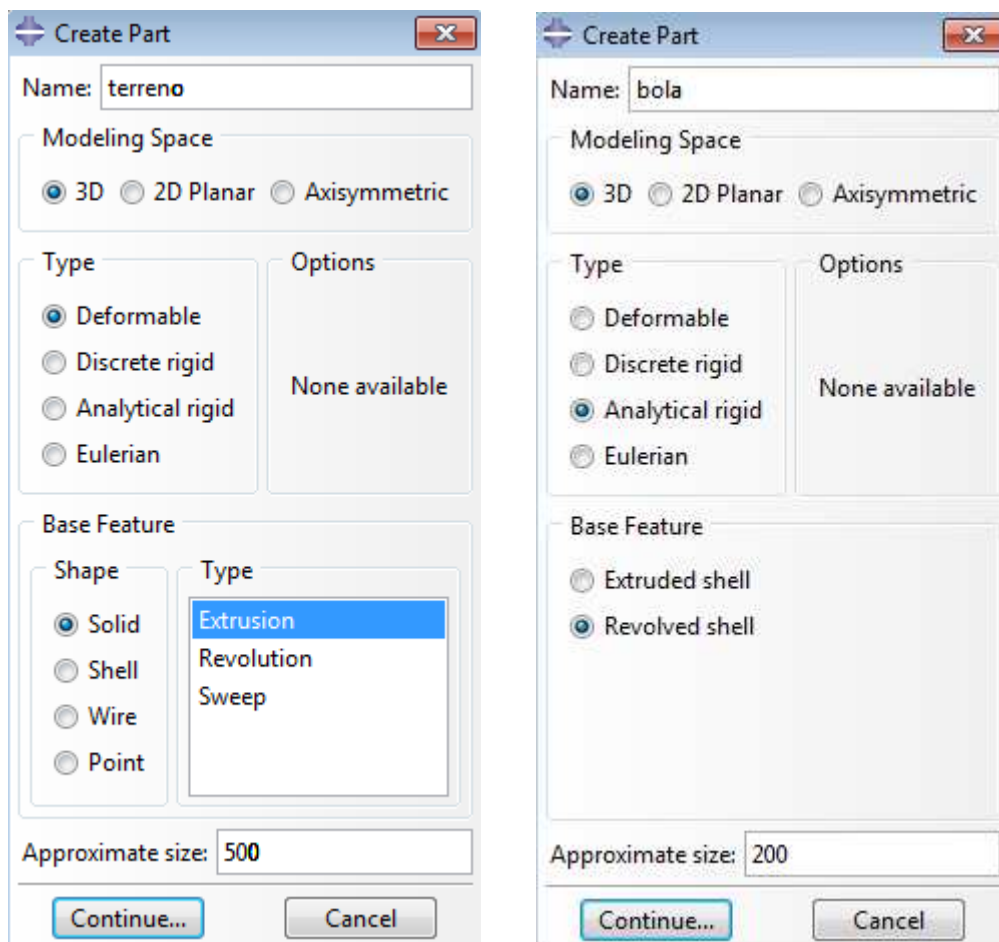


Figura 3.2. a) Creación de la geometría de la bicapa del modelo numérico,
b) Creación de la geometría de la pelota de golf del modelo numérico.



**“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES
ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”**

La Figura 3.2. muestra las tres partes generadas. Las dimensiones de las mismas son:

- Terreno: prisma de $500 \times 500 \times 100$ *mm.*, las dimensiones son suficientemente amplias para que las restricciones en las caras laterales no afecten al bote de la pelota.
- Superficie artificial: prisma de $500 \times 500 \times e$ *mm.*, donde *e* es el espesor que es uno de los parámetros variables que se analizarán en el presente estudio.
- Pelota de golf: esfera de radio 21.5 *mm.*, este tamaño es el típico en las pelotas de golf comerciales.

Como se puede observar en la Figura 3.2.b la superficie artificial va a ser modelada con una serie de huecos interiores iguales entre sí. La forma de estos huecos que va a ser analizada será cilíndrica y prismática, donde en esta última se variará la inclinación de los huecos para analizar el efecto sobre los resultados. Los parámetros geométricos que definen estos huecos también serán considerados como parámetros variables en este estudio.

En el caso de la bola de golf, que se ha considerado un elemento rígido, es necesario crear un punto de referencia para controlar su posición y movimiento. Dicho punto se ha generado en el centro de la esfera y permitirá extraer en cualquier instante del cálculo resultados numéricos referentes a la misma como datos de posición y movimiento.

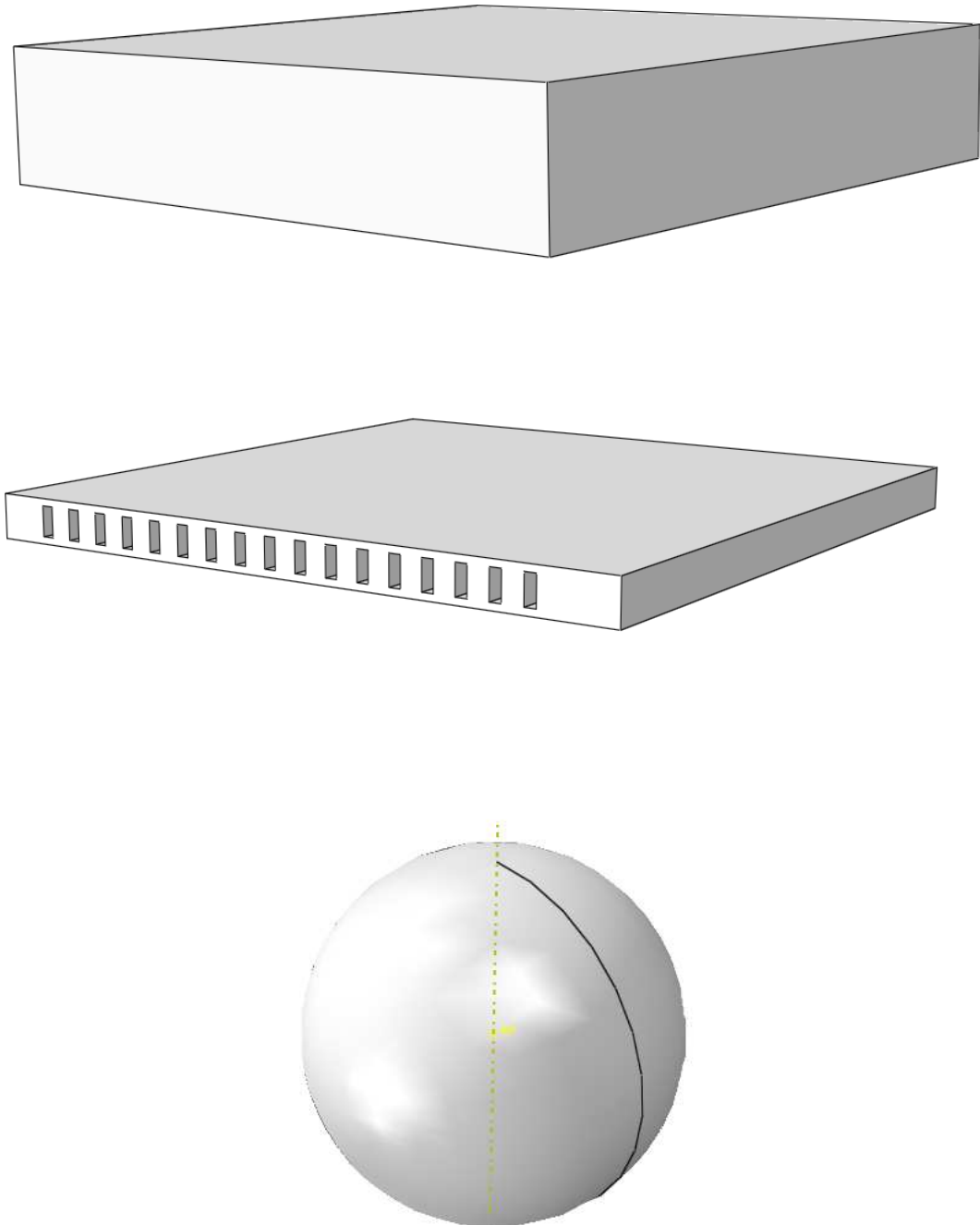


Figura 3.3. *Partes del modelo: a) Terreno, b) Superficie artificial y c) Pelota de golf.*



3.2.2. Materiales

Para el desarrollo del presente trabajo se han empleado cuatro tipos de caucho para la superficie artificial. Las propiedades elásticas e hiperelásticas de cada uno de ellos se recogen en la Tabla 3.1 Para la definición del comportamiento hiperelástico de los tipos de caucho analizados se ha empleado el modelo de Mooney-Rivlin, que es un modelo adecuado y comúnmente empleado para este tipo de materiales. Los coeficientes del modelo de Mooney-Rivlin de la Tabla 3.1 son los característicos de cuatro cauchos típicos.

A pesar de que los parámetros del material de la superficie artificial tienen especial relevancia sobre los resultados obtenidos se ha optado por no hacerlos variar para no complicar en exceso los diseños de experimentos llevados a cabo. Esta decisión también se fundamenta en que la utilización de un material ya existente en el mercado siempre será más económica que la creación de un nuevo caucho, por parte del proveedor del material, con unas propiedades distintas a las estándar.

Por otro lado, para las propiedades del terreno se ha seleccionado, de los disponibles en la biblioteca de materiales de ABAQUS [19], el material U1_1500, ya que es el que más se asemeja a tierra dura. Este material del terreno será utilizado en todos los casos y experimentos, tanto en superficie la artificial con huecos cilíndricos o con huecos prismáticos.

Tabla 3.1. *Propiedades caucho.*

	Coeficiente de Poisson	Módulo de Young [Mpa]	Densidad [kg/m ³]	Hiperelasticidad		
				C10	C01	D1
Material 1	0,49	5	1080	0,825	0,8	0,012
Material 2	0,49	5	1080	0,99417	-0,0292	0,000686
Material 3	0,49	5	1080	0,452	0,181	0,045
Material 4	0,49	5	1080	1,185	0,474	0,118



3.2.3. Ensamblaje del modelo

Una vez creadas cada una de las partes y asignando el material correspondiente es necesario generar un ensamblaje con ellas para poder realizar la simulación numérica. Cada una de las partes en el ensamblaje se denomina instancia y tendrá que ser posicionada espacialmente de manera adecuada, por medio de las diferentes herramientas que dispone el software para tal fin, obteniendo finalmente el modelo ensamblado mostrado en la Figura 3.3.

Además de posicionar correctamente cada una de las instancias es necesario definir los diferentes pares de contacto existentes en el modelo. Por un lado, se tiene el par de contacto terreno-superficie artificial y el par pelota de golf-superficie artificial. Ambos pares de contacto deben permitir la separación de las superficies si así lo requiere el cálculo, como por ejemplo cuando la pelota de golf salga rebotada al contactar con la superficie artificial. Por otro lado, en algunas configuraciones de los huecos de la superficie artificial se puede llegar a producir el contacto entre las caras interiores de un mismo hueco. En un principio este contacto puede ser omitido del cálculo pero será necesario un chequeo de los resultados por si se produjese la interacción y/o penetración de caras de un mismo hueco. En caso afirmativo sería necesario generar un nuevo par de contacto entre las caras que interactúan.

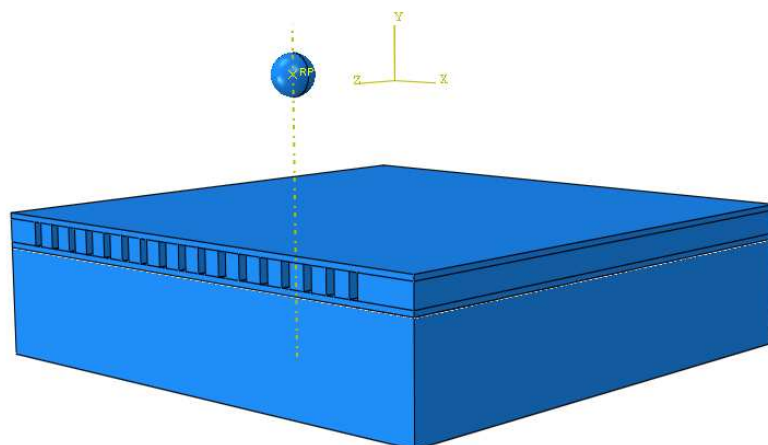


Figura 3. 4. *Ensamblaje del modelo.*



3.2.4. Aplicación de restricciones.

Con el modelo ensamblado es posible aplicar las restricciones necesarias para reproducir el comportamiento real del mismo. En este sentido, hay que tener en cuenta tanto las condiciones de contorno como las cargas existentes.

La condición de contorno que se ha aplicado sobre las caras laterales de la superficie artificial y del terreno, y sobre la cara inferior del terreno en la condición de “Pinned” que restringe los desplazamientos en las tres direcciones del espacio (Figura 3.4.). Esta condición se puede aplicar debido a que la geometría modelada es lo suficientemente grande para que no afecte la fijación de las caras laterales sobre el bote de la pelota de golf que se produce en la zona central.

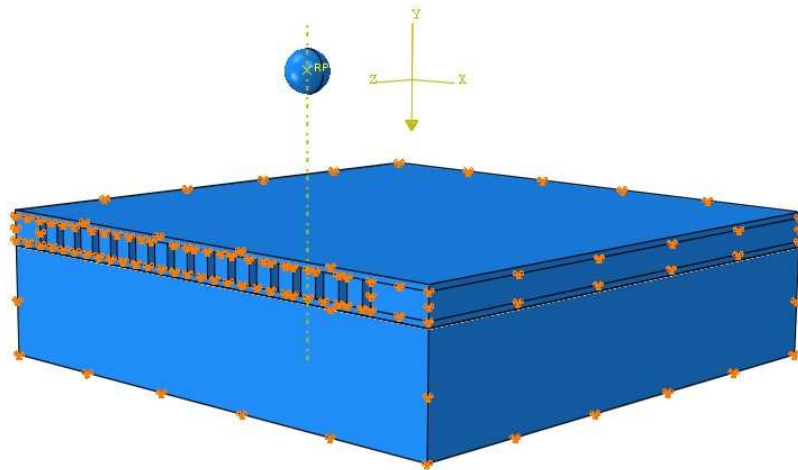


Figura 3. 5. Condición de entorno “Pinned” aplicada en el modelo.

En cuanto a las cargas que es necesario aplicar, por un lado hay que tener en cuenta la gravedad y por otro, las condiciones iniciales de la pelota de golf en lo referente a velocidad lineal y angular. La Figura 3.5 muestra las condiciones iniciales empleadas en todas las simulaciones numéricas realizadas en el presente estudio. Dichas condiciones se aplican sobre el punto de referencia de la pelota de golf, creando un paso anterior.

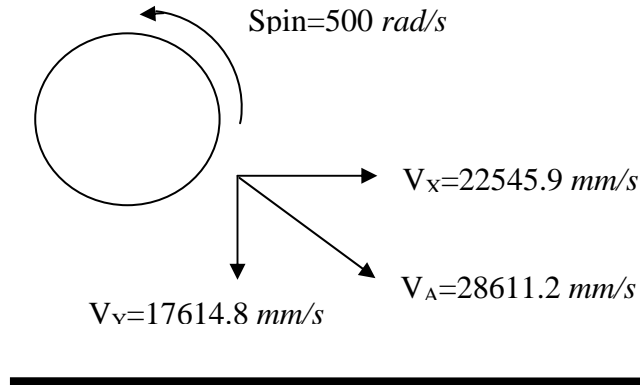


Figura 3. 6. Condiciones iniciales pelota de golf.

3.2.5. Mallado del modelo

Un paso importante dentro del preproceso del modelo es el correspondiente al mallado. Las instancias que hay que mallar son el terreno y la superficie artificial. En ambos casos se han utilizado elementos hexaédricos de ocho nodos que permiten la creación de un mallado mapeado, siendo el tamaño de elemento empleado de 10mm aunque la zona de la superficie artificial donde se produce el bote de la pelota se ha refinado como puede observarse en la Figura 3.6.

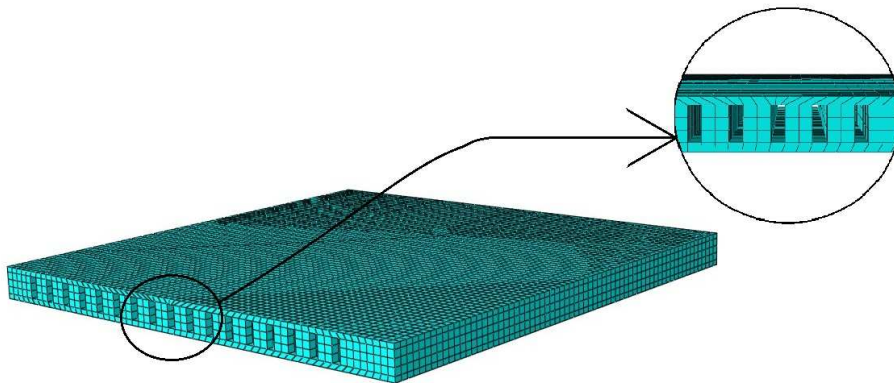


Figura 3. 7. Mallado del modelo.

**3.2.6. Postproceso de resultados.**

Una vez acabado todos los pasos del proceso del modelo numérico es posible lanzar el cálculo obteniendo un fichero de resultados del que se pueden extraer los resultados numéricos necesarios con los que alimentar el diseño de experimentos.

En particular, los datos necesarios para este estudio son las componentes finales (X e Y) de la velocidad del punto de referencia de la pelota de golf después del bote, una vez de haya estabilizado. A partir de estos valores y de las condiciones iniciales de velocidad es posible determinar los coeficientes de restitución CRA, CRX y CRY según las expresiones (3.1),(3.2) y (3.3) respectivamente.

$$CRA = \frac{V_{\text{absoluta-salida}}}{V_{\text{absoluta-entrada}}} \quad (3.1)$$

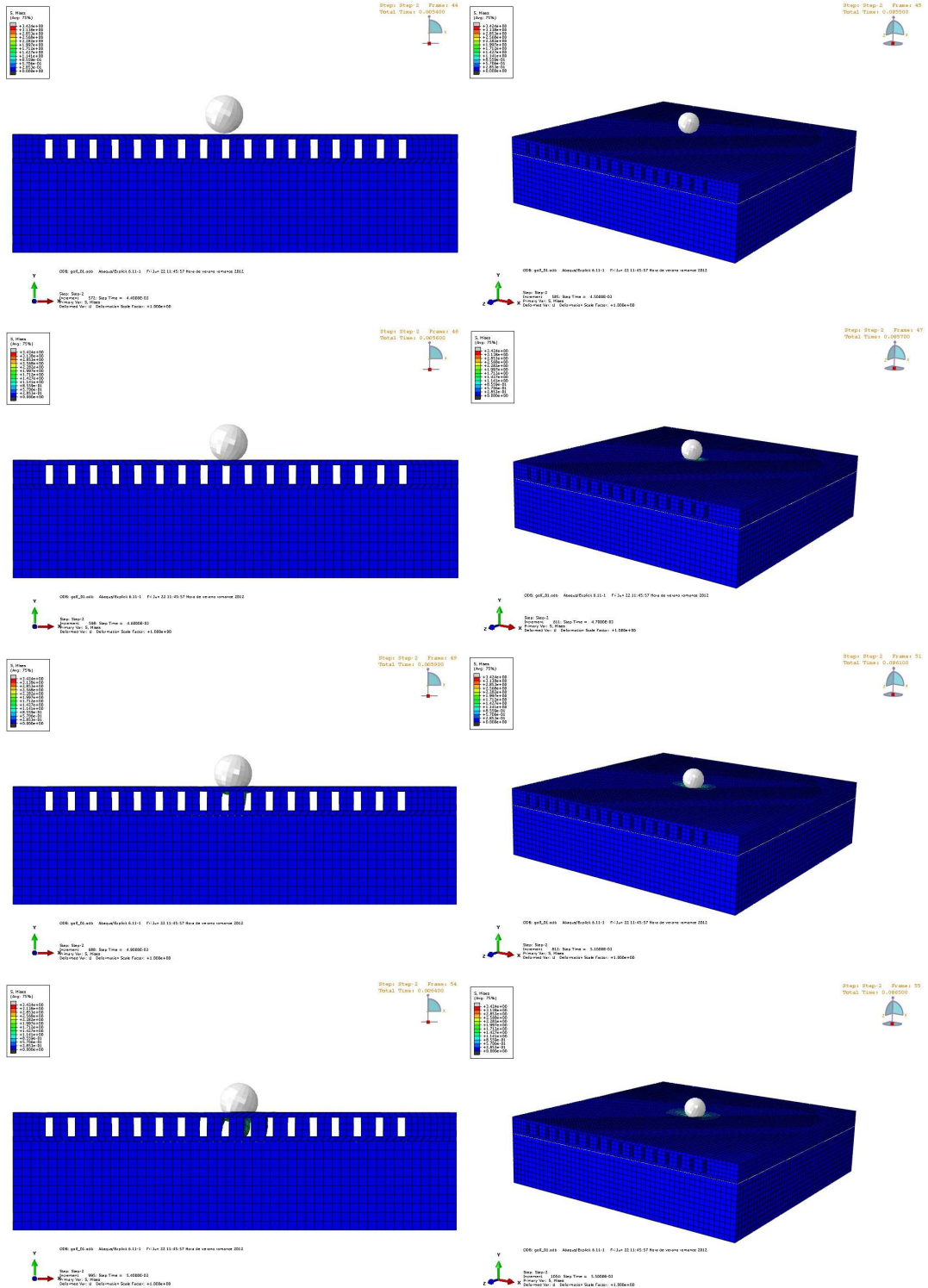
$$CRX = \frac{V_{X\text{salida}}}{V_{X\text{entrada}}} \quad (3.2)$$

$$CRY = \frac{V_{Y\text{salida}}}{V_{Y\text{entrada}}} \quad (3.3)$$

A modo de ejemplo, a continuación, se muestra una secuencia de imágenes en las que se puede ver como la pelota de golf impacta con la superficie artificial y sale rebotada.



“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”





“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”

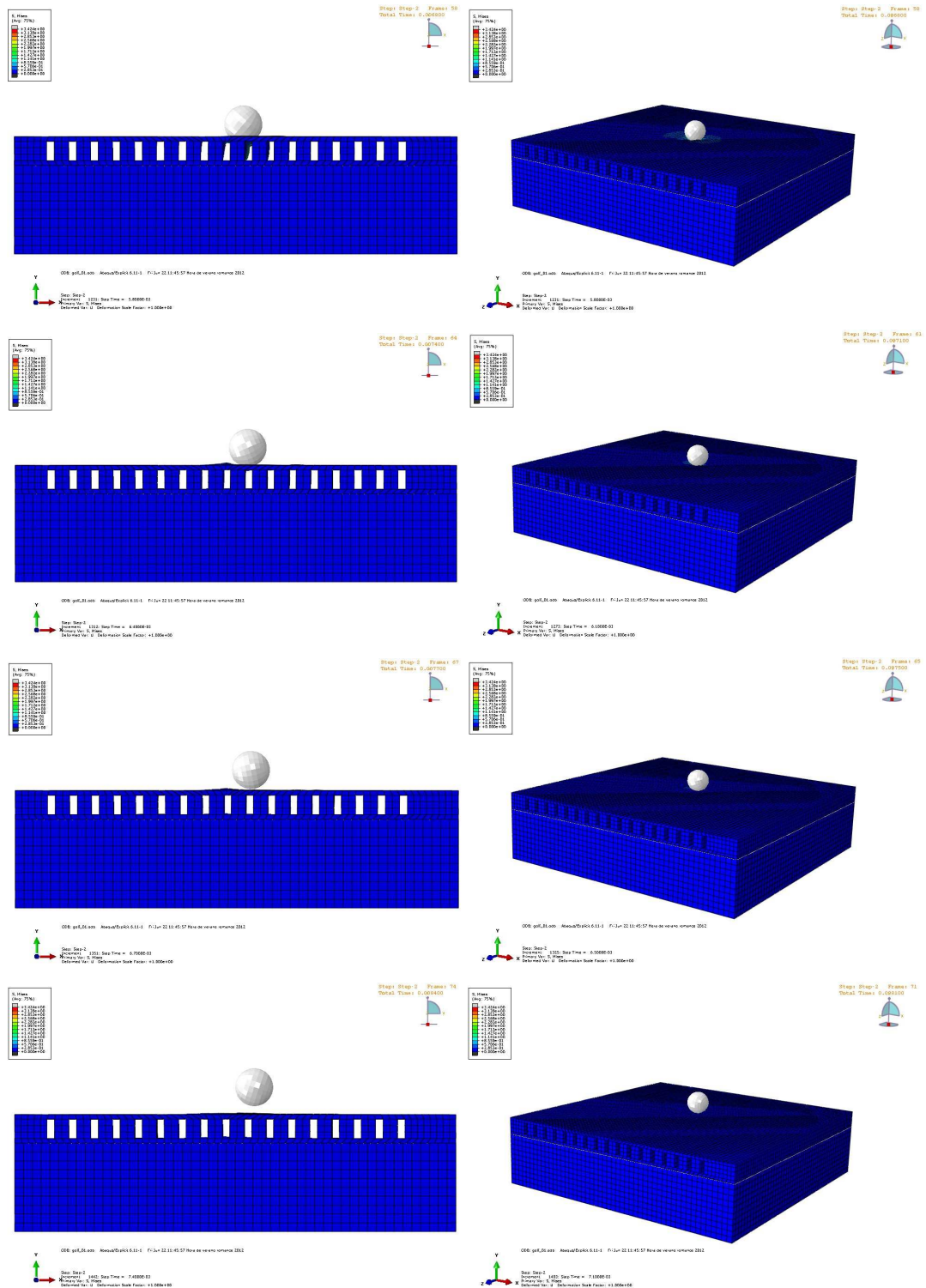


Figura 3. 8. Secuencia de imágenes del bote de la pelota de golf.



3.3. DEFINICIÓN DEL PLAN DE EXPERIMENTACIÓN PARA LA SUPERFICIE ARTIFICIAL CON HUECOS CILÍNDRICOS

En el presente apartado se define el plan experimental, basado en el diseño de experimentos, con el que obtener la superficie de respuesta de cada coeficiente de restitución analizado (CRA, CRX y CRY) en una superficie con huecos cilíndricos generada mediante extrusión de caucho.

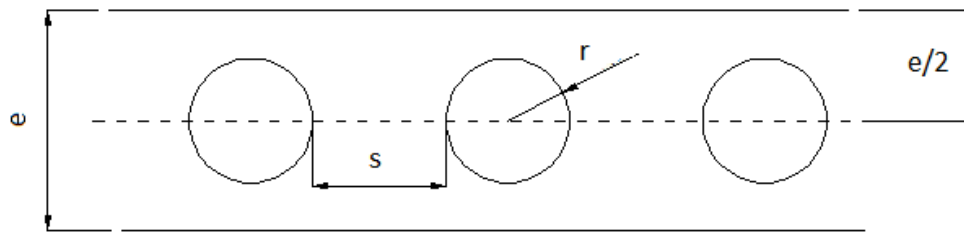
Antes de proceder a la determinación de estas superficies de respuesta es necesario apuntar una primera reflexión sobre los parámetros que influyen en los parámetros analizados. Dichos parámetros se pueden englobar en tres grandes grupos, que son: parámetros del material, condiciones iniciales de la pelota de golf y parámetros geométricos de la superficie artificial.

Resulta evidente que es extremadamente complicado obtener una superficie de respuesta que englobe la variación de todos estos parámetros, por lo que es necesario fijar algunos de ellos. En este sentido, tanto los parámetros del material como las condiciones iniciales de la pelota de golf han sido fijados. En el caso del material se han utilizado cuatro tipos diferentes de caucho cuyas propiedades se han comentado en el apartado anterior.

En cuanto a las condiciones iniciales de la pelota de golf, componentes de la velocidad y spin, se han utilizado valores frecuentes de estos parámetros, también recogidos en el apartado anterior.

Por lo tanto, el presente estudio se centra en la variación de los parámetros geométricos de la superficie artificial. En particular, se han analizado el espesor e , el radio r de los huecos cilíndricos y la separación s existente entre huecos.

Todos los demás parámetros geométricos se ha mantenido constantes como la anchura de extrusión, que tendrá que ser definida por el proveedor, o la altura a a la que se encuentran los huecos, que se han fijado en la mitad del espesor como puede observar en la Figura 3.8.

**Figura 3. 9.** Superficie artificial con huecos cilíndricos.

La tabla 3.2 recoge los rangos de valores de los tres parámetros variables (e , r y s) analizados. Siguiendo un criterio de economía de costes el espesor de la superficie artificial deberá de ser lo más pequeño posible por lo que el espesor máximo no es muy elevado.

Tabla 3.2. Parámetros variables en el rango $[-1.682, 1.682]$.

Parámetros variables	
Espesor e (mm)	[20,80]
Radio r (% del espesor)	[10,40]
Separación s (mm)	[10,40]

Cabe destacar que los valores del radio se consideran como un porcentaje del espesor con el propósito de evitar situaciones invariables como que el radio sea mayor que el espesor. De esta manera para cada experimento el valor del radio depende del espesor correspondiente.

En consecuencia los parámetros e , r y s son los que van a gobernar la superficie de respuesta ya que los demás van a permanecer fijos. La relación existente entre estos parámetros y la superficie de respuesta de cada coeficiente (CRA, CRX y CRY) se puede expresar como $S = f(e^*, r^*, s^*)$, donde f se postula como modelo cuadrático de la forma expresada en la ecuación (3.4), donde e^* , r^* y s^* son las variables codificadas de e , r y s respectivamente.

**“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES
ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”**

$$f(e^*, r^*, s^*) = b_0 + b_1 \cdot e^* + b_2 \cdot r^* + b_3 \cdot s^* + b_{11} \cdot e^{*2} + b_{22} \cdot r^{*2} + b_{33} \cdot s^{*2} + b_{12} \cdot e^* \cdot r^* + b_{13} \cdot e^* \cdot s^* + b_{23} \cdot r^* \cdot s^* \quad (3.4)$$

La codificación de los valores reales de los parámetros es necesaria para que todos ellos varíen en el mismo intervalo, como se puede ver en la Figura 3.47, favoreciendo de esta manera la estimación precisa de los coeficientes que definen la función $f(e^*, r^*, s^*)$. Para cualquier valor real X_i de los parámetros variables dicha codificación se puede realizar a través de la expresión (3.5), obteniendo el valor codificado x_i correspondiente. Donde X_{iNInf} es el valor real del nivel más bajo del factor i , X_{iNSup} es el valor real del nivel más alto del factor i , y \tilde{X}_i , es la media entre los valores reales del nivel más alto y más bajo del factor i .

$$x_i = \frac{2 \cdot 1.682 \cdot (X_i - \tilde{X}_i)}{X_{iNSup} - X_{iNInf}} \quad i = e^*, r^*, s^* \quad (3.5)$$

La determinación de los coeficientes de la función $S = f(e^*, r^*, s^*)$ para cada uno de los coeficientes de restitución se va a realizar a través de un diseño de experimentos central compuesto, utilizando el software NEMRODW. Las principales características de este diseño son:

- Utilización de tres factores, los cuáles son los parámetros e , r y s .
- Dominio esférico de radio clásico, el valor del radio para tres factores es 1.682.
- Codificación de los intervalos de valores de los tres factores recogidos en la Tabla 3.3. para que varíen en $[-1.682, 1.682]$, según la expresión (3.5).
- Matriz de experimentos *composite*, la cual tiene cinco niveles para cada factor, como se puede comprobar en la Figura 3.9.
- Se realizan repeticiones en el punto central del dominio (Nº de experimento 15), ya que es necesario calcular el error existente dependiendo de dónde bota la pelota de golf en la superficie artificial.

**“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES
ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”**

- Utilización de un modelo cuadrático, definido por la expresión (3.4), para el ajuste de la superficie de respuesta de cada coeficiente de restitución.
- La superficie de respuesta permitirá estimar el comportamiento de cualquier punto codificado dentro de la esfera de radio 1.682.

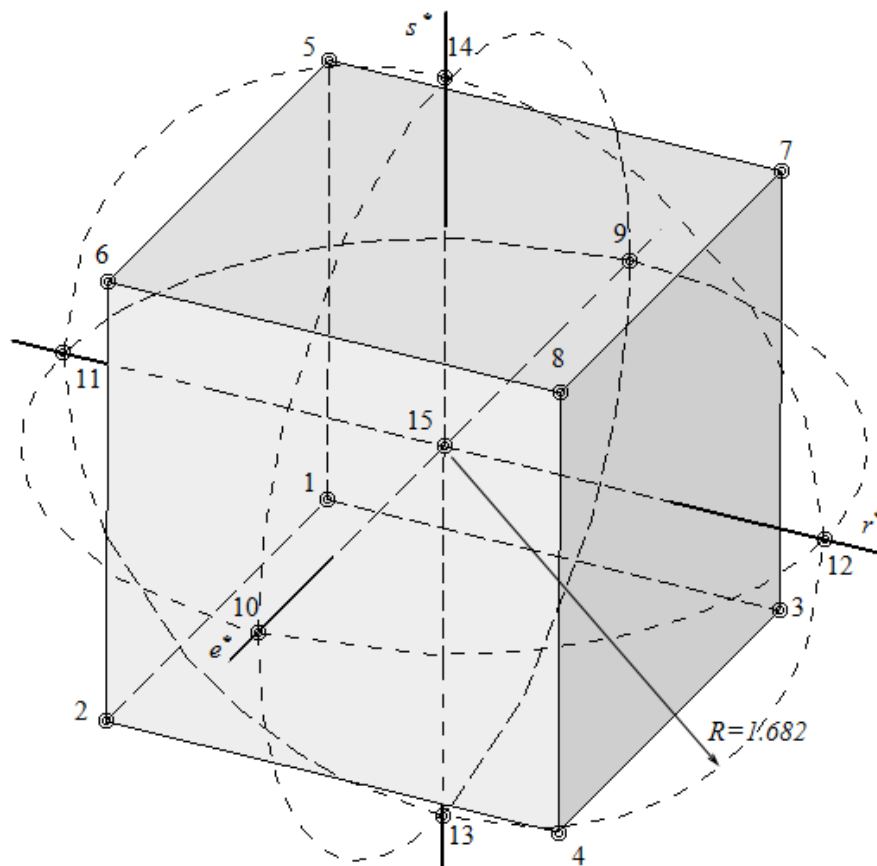


Figura 3. 10. Representación de la matriz de experimentos según las variables codificadas.

La Tabla 3.3. recoge, tanto la matriz de experimentos con las variables codificadas, como la matriz del plan de experimentación con los valores de los factores del diseño de experimentos propuesto para la determinación de los coeficientes de la función $f(e^*, r^*, s^*)$.



“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”

Tabla 3.3. *Diseño propuesto para obtener la superficie de respuesta de cada uno de los coeficientes de restitución.*

Nº Exp.	Matriz de experimentos (Variables codificadas)			Plan de experimentación (Variables reales)		
	e^*	r^*	s^*	e (mm)	r (%) \equiv (mm)	s (mm)
1	-1	-1	-1	32.2	16.1 \equiv 5.2	16.1
2	1	-1	-1	67.8	16.1 \equiv 10.9	16.1
3	-1	1	-1	32.2	33.9 \equiv 10.9	16.1
4	1	1	-1	67.8	33.9 \equiv 23	16.1
5	-1	-1	1	32.2	16.1 \equiv 5.2	33.9
6	1	-1	1	67.8	16.1 \equiv 10.9	33.9
7	-1	1	1	32.2	33.9 \equiv 10.9	33.9
8	1	1	1	67.8	33.9 \equiv 23	33.9
9	-1.682	0	0	20	25 \equiv 5	25
10	1.682	0	0	80	25 \equiv 20	25
11	0	-1.682	0	50	10 \equiv 5	25
12	0	1.682	0	50	40 \equiv 20	25
13	0	0	-1.682	50	25 \equiv 12.5	10
14	0	0	1.682	50	25 \equiv 12.5	40
15	0	0	0	50	25 \equiv 12.5	25

Cada uno de los experimentos del plan de experimentación se realiza a través de una simulación numérica tal y como se ha descrito en el apartado anterior, con la única salvedad que los valores de e , r y s son los recogidos en la Tabla 3.2, obteniendo como resultado final del experimento el valor de los coeficientes de restitución CRA, CRX y CRY. El plan de experimentación propuesto se repite para cada uno de los cuatro cauchos analizados.

Una vez obtenidos todos los valores de los coeficientes de restitución, con la ayuda de NEMRODW, es posible determinar los coeficientes de la función $f(e^*, r^*, s^*)$, para cada una de las respuestas de los distintos materiales.

A partir de las funciones $f(e^*, r^*, s^*)$ determinadas será posible estimar el valor de la respuesta para cualquier combinación de valores de los parámetros e , r y s , previa codificación, siempre y cuando se encuentren dentro del dominio esférico definido anteriormente para este diseño.



3.4. DEFINICIÓN DEL PLAN DE EXPERIMENTACIÓN PARA LA SUPERFICIE ARTIFICIAL CON HUECOS PRISMÁTICOS

En el presente estudio también se ha analizado una superficie artificial con huecos prismáticos para la práctica del golf generada, al igual que la anterior, mediante extrusión de caucho. De nuevo, para poder diseñar un plan de experimentación factible es necesario fijar una serie de parámetros. En este caso, además de los fijados anteriormente, se han mantenido constantes el ángulo de inclinación y la relación de aspecto altura-anchura de los huecos prismáticos. En consecuencia, los parámetros que van a ser variables son el espesor e , la altura h de los huecos prismáticos y la separación s entre huecos. Se han analizado tres superficies artificiales de este tipo en la que la diferencia entre ellas radica en el ángulo de inclinación de los huecos prismáticos (90° , 120° y 135°), tal y como se puede observar en la Figura 3.10.

En lo referente al material se ha optado por emplear únicamente un tipo de caucho para no extender en exceso el estudio. En este sentido el material seleccionado ha sido el material 3, que como se verá más adelante, es el que proporciona unos valores de los coeficientes de restitución más próximos al comportamiento de la hierba natural.

En todos los casos, para obtener la superficie de respuesta de cada coeficiente de restitución, se ha utilizado un diseño de experimentos central compuesto cuyas características son las mismas que las comentadas en el apartado anterior con la salvedad de que en esta ocasión los parámetros e , h y s son los que van a gobernar la superficie de respuesta. La relación existente entre estos parámetros y la superficie de respuesta se puede expresar como $S = f(e^*, h^*, s^*)$, donde f se postula, de nuevo, como modelo cuadrático de la forma expresada en la ecuación (3.6), donde e^* , h^* y s^* son las variables codificadas de e , h y s respectivamente.

$$\begin{aligned} f(e^*, h^*, s^*) = & b_0 + b_1 \cdot e^* + b_2 \cdot h^* + b_3 \cdot s^* + b_{11} \cdot e^{*2} + \\ & + b_{22} \cdot h^{*2} + b_{33} \cdot s^{*2} + b_{12} \cdot e^* \cdot h^* + b_{13} \cdot e^* \cdot s^* + b_{23} \cdot h^* \cdot s^* \end{aligned} \quad (3.6)$$



“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”

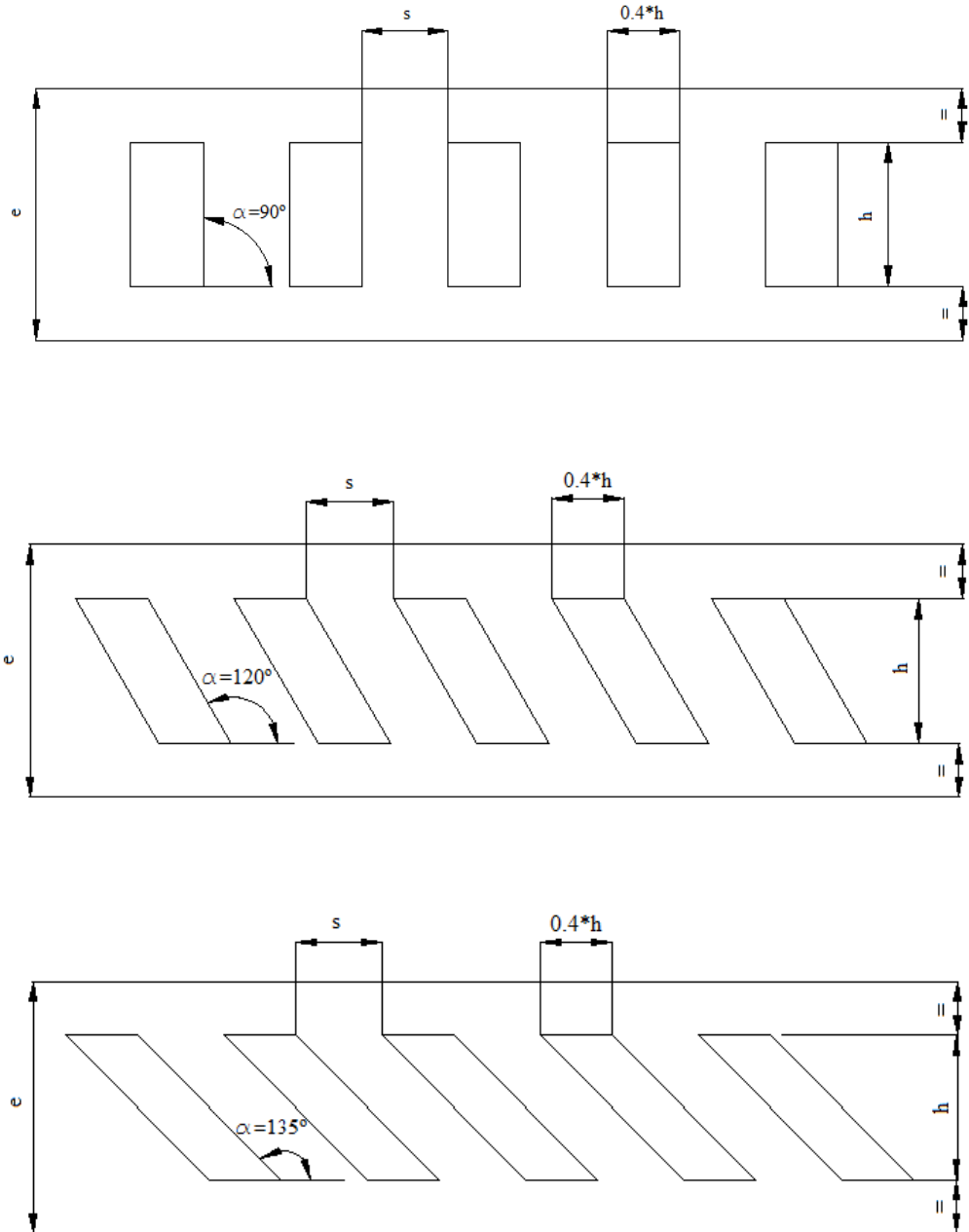


Figura 3. 11. Geometría huecos rectangulares. a)90°, b)120° y c)135°.

**“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES
ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”**

La tabla 3.4. recoge los rangos de valores de los tres parámetros variables (e , h y s), al igual que sucedía anteriormente con el radio de los huecos cilíndricos la altura de los huecos prismáticos se ha considerado como un porcentaje del espesor para evitar incoherencias en el modelo. La tabla 3.5. muestra, tanto la matriz de experimentos con las variables codificadas, como la matriz del plan de experimentación con los valores de los factores del diseño de experimentos propuesto para la determinación de los coeficientes de la función $f(e^*, h^*, s^*)$.

Una vez realizados cada uno de los experimentos se procederá de manera análoga al apartado anterior para la obtención de la superficie de respuesta de cada coeficiente de restitución. De esta manera, a partir de las funciones $f(e^*, h^*, s^*)$, determinadas será posible estimar el valor de la respuesta para cualquier combinación de los valores de los parámetros e , h y s , previa codificación, siempre y cuando se encuentren dentro del dominio esférico definido para este diseño.

Tabla 3.4. *Parámetros considerados en el rango [-1.682,1.682].*

<i>Parámetros variables</i>	
Espesor e (mm)	[20,80]
Altura h (% del espesor)	[20,80]
Separación s (mm)	[10,40]



Tabla 3.5. *Diseño propuesto para obtener la superficie de respuesta.*

Nº Exp.	<i>Matriz de experimentos</i> (Variables codificadas)			<i>Plan de experimentación</i> (Variables reales)		
	e^*	h^*	s^*	e (mm)	h (%) \equiv (mm)	s (mm)
1	-1	-1	-1	32.2	32.2 \equiv 10.4	16.1
2	1	-1	-1	67.8	32.2 \equiv 21.8	16.1
3	-1	1	-1	32.2	67.8 \equiv 21.8	16.1
4	1	1	-1	67.8	67.8 \equiv 46	16.1
5	-1	-1	1	32.2	32.2 \equiv 10.4	33.9
6	1	-1	1	67.8	32.2 \equiv 21.8	33.9
7	-1	1	1	32.2	67.8 \equiv 21.8	33.9
8	1	1	1	67.8	67.8 \equiv 46	33.9
9	-1.682	0	0	20	50 \equiv 10	25
10	1.682	0	0	80	50 \equiv 40	25
11	0	-1.682	0	50	20 \equiv 10	25
12	0	1.682	0	50	80 \equiv 40	25
13	0	0	-1.682	50	50 \equiv 25	10
14	0	0	1.682	50	50 \equiv 25	40
15	0	0	0	50	50 \equiv 25	25



CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en los diseños experimentales llevados a cabo. Se muestran los resultados de las simulaciones realizadas con el programa ABAQUS, así como la superficie de respuesta obtenidas con ayuda del programa NEMRODW.

Los siguientes apartados separan los resultados en función de la geometría y del material de la superficie artificial. Se han utilizado dos geometrías diferentes, la primera con huecos cilíndricos y cuatro tipos de caucho y la segunda con huecos prismáticos con diferente inclinación para un único caucho.

4.2. SUPERFICIE ARTIFICIAL CON HUECOS CILÍNDRICOS

En esta geometría inicial es necesario realizar una serie de simulaciones numéricas con el programa ABAQUS para poder obtener la superficie de respuesta. Para la creación de dichas simulaciones se procede de la manera comentada en un apartado anterior.

Los resultados obtenidos de las simulaciones son los se utilizan para generar la superficie de respuesta. A partir de las velocidades de salida resultantes de la simulación, los coeficientes de restitución pueden ser obtenidos.

En la geometría de huecos cilíndricos elegida (Figura 4.1), los parámetros variables son el espesor de la superficie artificial, el radio de los huecos y la distancia de separación entre ellos. Para poder realizar una correcta superficie de respuesta es necesario realizar quince experimentos y tres repeticiones en el punto central de la



superficie de repuesta. Estos experimentos siguen el plan de experimentación expuesto en el Capítulo 3.

Los datos de entrada de la bola de golf empleados en todas las simulaciones numéricas son los mostrados en la Tabla 4.1.

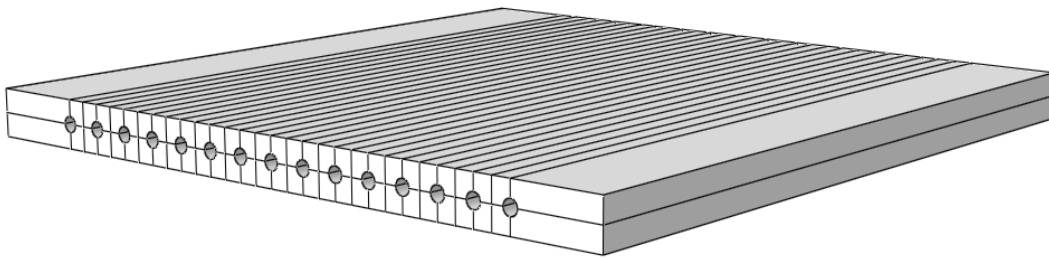


Figura 4. 1. *Ejemplo geometría experimento 1.*

Tabla 4. 1. *Datos de entrada de la bola de golf.*

Velocidad inicial (<i>mm/s</i>)	28611.2
Velocidad inicial eje x (<i>mm/s</i>)	22545.9
Velocidad inicial eje y (<i>mm/s</i>)	-17614.8
Rotación inicial eje z (<i>rad/s</i>)	500
Ángulo de entrada (°)	-38

4.2.1. Superficie de respuesta del material 1.

La tabla 4.2 muestra los resultados obtenidos en cada uno de los experimentos que conforman el plan de experimentación para el material 1. Con esos valores es posible calcular los tres coeficientes de restitución recogidos en la Tabla 4.3 que son las respuestas con las que se calculará cada una de las superficies de respuesta.

Cabe destacar que para el caso de la respuesta CRX ha sido necesario eliminar del cálculo de los coeficientes de la superficie de respuesta el experimento 7 para que la regresión fuese significativa.

**Tabla 4. 2.** *Resultados del diseño de experimentos con el material 1.*

	V_{absoluta}	$V_{X\text{salida}}$	$V_{Y\text{salida}}$	Rotación eje Z	Ángulo
Experimento 1	12776.8	9236.09	8828.4	-711.66	43.71
Experimento 2	11655.7	9529.64	6711.32	-567.47	35.16
Experimento 3	12438	9909.07	7517.52	-652.65	37.19
Experimento 4	11439.4	9459.38	6432.78	-508.60	34.22
Experimento 5	12082	9148.6	7891.6	-691.95	40.78
Experimento 6	11146.5	9219.01	6265.3	-587.71	34.20
Experimento 7	11767.7	8814.82	7796.02	-568.71	41.49
Experimento 8	9145.33	6665.56	6261.57	-466.564	43.21
Experimento 9	12040.5	8642.18	8383.66	-759.966	44.13
Experimento 10	10510	9236.86	5014.08	-531.897	28.49
Experimento 11	12083.8	9384.06	7612.97	-644.017	39.05
Experimento 12	10359.7	6314.22	8213.05	-497.064	52.45
Experimento 13	12273.3	10025.4	7079.93	-597.133	35.23
Experimento 14	11242.3	8045.6	7852.29	-553.977	44.30
Experimento 15	12459.9	9569.36	7979.75	-557.537	39.82
Experimento 15a	11671.6	8936.4	7507.84	-609.874	40.04
Experimento 15b	12420.6	10004.5	7360.73	-616.708	36.34
Experimento 15c	11569.1	8287.43	8072.39	-576.711	44.25

**Tabla 4. 3.** *Respuestas del plan de experimentación con el material 1.*

N°Exp	<i>e</i>	<i>r</i>	<i>s</i>	Respuesta CRA	Respuesta CRX	Respuesta CRY
	Unidad1	Unidad2	Unidad3	Unidad1	Unidad2	Unidad3
1	32.20	16.10	16.10	0.4466	0.4097	0.5012
2	67.80	16.10	16.10	0.4074	0.4227	0.3810
3	32.20	33.90	16.10	0.4347	0.4395	0.4268
4	67.80	33.90	16.10	0.3998	0.4196	0.3652
5	32.20	16.10	33.90	0.4223	0.4058	0.4480
6	67.80	16.10	33.90	0.3896	0.4089	0.3557
7	32.20	33.90	33.90	0.4113	0.3910	0.4426
8	67.80	33.90	33.90	0.3196	0.2956	0.3555
9	20.06	25.00	25.00	0.4208	0.3833	0.4759
10	79.94	25.00	25.00	0.3673	0.4097	0.2847
11	50.00	10.03	25.00	0.4223	0.4162	0.4322
12	50.00	39.97	25.00	0.3621	0.2801	0.4663
13	50.00	25.00	10.03	0.4290	0.4447	0.4019
14	50.00	25.00	39.97	0.3929	0.3569	0.4458
15	50.00	25.00	25.00	0.4355	0.4244	0.4530
16	50.00	25.00	25.00	0.4079	0.3964	0.4262
17	50.00	25.00	25.00	0.4341	0.4437	0.4179
18	50.00	25.00	25.00	0.4044	0.3676	0.4583



“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”

Tabla 4. 4. *Coefficientes de las tres superficies de respuesta.*

Nombre	Respuesta CRA		Respuesta CRX		Respuesta CRY	
	Coef.	Signif. %	Coef.	Signif. %	Coef.	Signif. %
b ₀	0.42054	< 0.01 ***	0.40765	< 0.01 ***	0.43882	< 0.01 ***
b ₁	-0.01822	0.411 **	0.00421	61.2	-0.05427	0.0156 ***
b ₂	-0.01764	0.486 **	-0.03228	0.472 **	0.0014	85.5
b ₃	-0.01805	0.431 **	-0.03295	0.424 **	0.00439	57.1
b ₁₋₁	-0.00912	6.4	-0.0029	71.3	-0.02058	2.22 *
b ₂₋₂	-0.00983	4.97 *	-0.02004	3.27 *	0.00364	62.1
b ₃₋₃	-0.00311	47.8	-0.0013	86.8	-0.0052	48.4
b ₁₋₂	-0.00175	78	-0.00249	82.7	0.0005	96.2
b ₁₋₃	-0.001	87.3	0.00326	77.6	-0.007	51.7
b ₂₋₃	-0.01275	7.3	-0.03326	1.93 *	0.01775	12.7

En la Tabla 4.4. aparecen los coeficientes de la superficie de respuesta para cada uno de los tres coeficientes de restitución. Se puede destacar que el coeficiente b₀, el coeficiente independiente, siempre va a ser significativo para todas las respuestas y materiales.

Para el coeficiente de restitución absoluto (CRA), los coeficientes significativos son el b₁, b₂, b₃ y b₂₋₂. Los tres primeros corresponden a los tres parámetros del plan experimental, espesor, radio y separación (*e*, *r* y *s*). Además es influyente el b₂₋₂ correspondiente al cuadrado del radio (*r*²), aunque es menos importante que los anteriores. Como los valores de los coeficientes son negativos, un aumento de los parámetros equivaldría a una disminución del valor de CRA.

Para el coeficiente de restitución horizontal (CRX), los coeficientes significativos son el b₂, b₃, b₂₋₂ y el b₂₋₃. Los dos primeros corresponden a dos de los parámetros del plan experimental, radio y separación (*r* y *s*). Además es influyente el b₂₋₂ y b₂₋₃, correspondientes al cuadrado del radio (*r*²) y a la interacción del radio con la separación (*r*s*), aunque son menos importante que los anteriores. Como los valores de los coeficientes significativos son negativos, un aumento de los parámetros equivaldría a una disminución del valor de CRX.

**“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES
ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”**

Para el coeficiente de restitución vertical (CRY), los coeficientes significativos son el b_1 y b_{1-1} . El primero corresponde al espesor (e). Además es influyente el b_{1-1} correspondiente al cuadrado del espesor (e^2), aunque es menos importante que los anteriores. Por lo tanto esta respuesta únicamente se rige por un parámetro, en este caso el espesor. Como los valores de los coeficientes significativos son negativos, un aumento de los parámetros equivaldría a una disminución del valor de CRY.

A continuación se observa en la Figura 4.2. seis gráficas correspondientes a los tres coeficientes de restitución. Las gráficas que se encuentran a la izquierda muestran cómo obtener los valores máximos y mínimos del coeficiente de restitución variando los parámetros variables en el plan de experimentación. La línea azul (1) corresponde al espesor, la roja (2) al radio y la verde (3) a la separación. Las gráficas de la derecha muestran los valores máximos y mínimos que se pueden obtener de la respuesta para cada uno de los coeficientes de restitución.

Para obtener un valor máximo del CRA, que sería de 0.45 según la gráfica, es necesario que la separación adquiera un valor codificado de -1.5, el espesor sea -0.7 y el radio tome un valor cercano a 0, como se observa en la Figura 4.2.a.

Para obtener un valor máximo del CRX, aproximadamente 0.47, se necesita que el espesor tenga un valor de -1.5, el radio debe ser el correspondiente al 0.5 y la separación este muy cercana al punto 0.

Para obtener un valor máximo del CRY (0.5), se necesita que el espesor tenga un valor de -1, el radio de 0.8 y la separación sea el punto correspondiente al 1.

Para obtener los valores mínimos o cualquier otro se procederá de manera análoga.



“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”

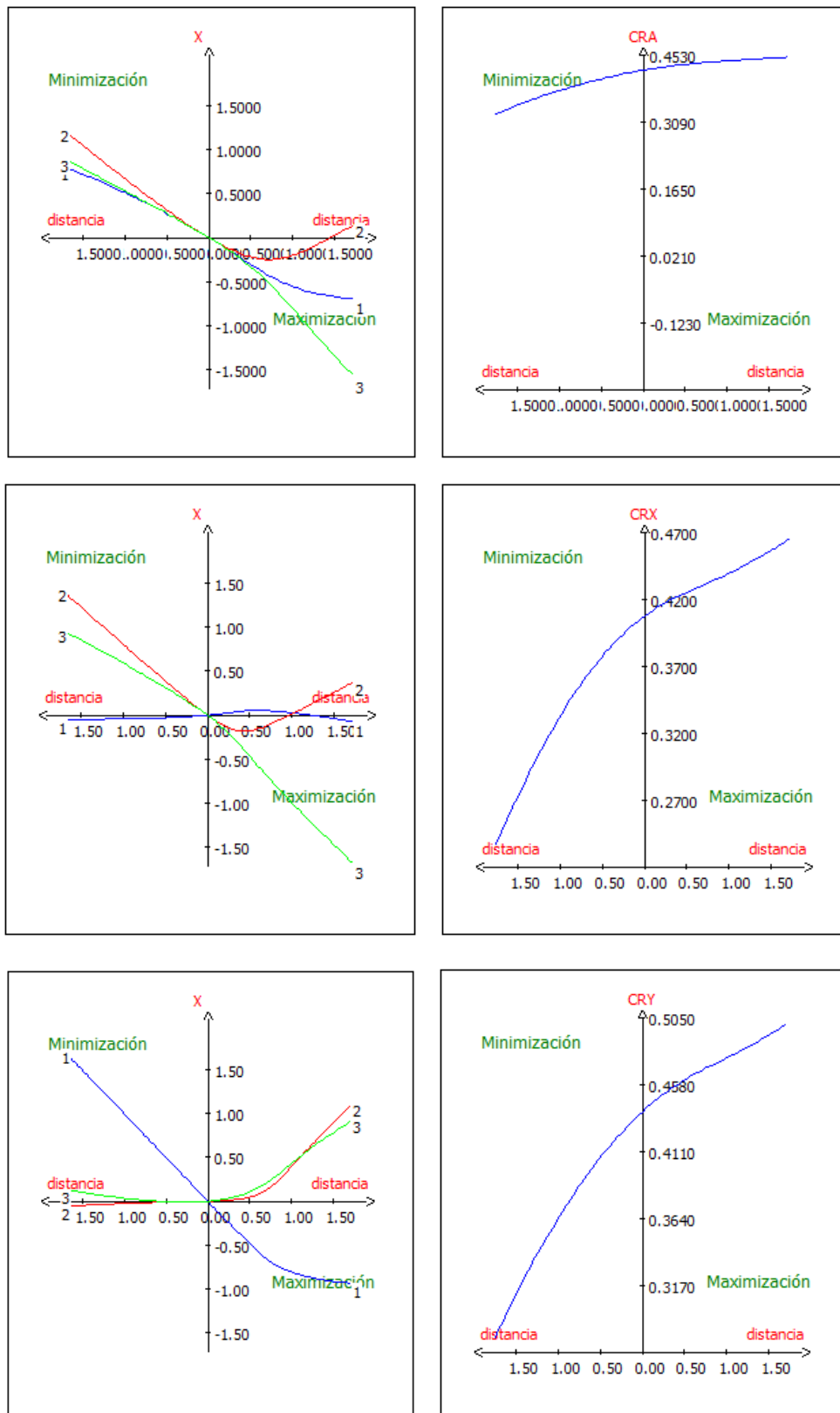


Figura 4. 2. Estudio del camino óptimo de la respuesta: a) CRA, b) CRX y c) CRY.

**4.2.2. Superficie de respuesta del material 2**

La tabla 4.3 muestra los resultados obtenidos en cada uno de los experimentos del plan de experimentación para el material 2. Para este material no se ha llegado a calcular las superficies de respuesta debido a que el coeficiente de restitución del eje vertical (CRY), no entra dentro de los valores óptimos de bote angulado de una pista natural de golf, como se observa en la Tabla 4.6. Esto significa que no se comportará de forma aceptable para la práctica de golf y por eso este material se descarta para la fabricación de una superficie artificial.

Tabla 4. 5. Resultados del diseño de experimentos con el material 2.

	V_{absoluta}	V_{Xsalida}	V_{Ysalida}	Rotación eje Z	Ángulo
Experimento 1	10064	9573.47	3103.55	-503.758	17.96
Experimento 2	10422.8	10104.4	2556.36	-516.158	14.20
Experimento 3	10048	9749.75	2429.98	-490.249	13.99
Experimento 4	9798.84	9281.16	3142.81	-465.747	18.71
Experimento 5	10276.3	9714.85	3350.23	-533.785	19.03
Experimento 6	10796.8	10471.6	2629.96	-546.321	14.10
Experimento 7	10118.7	9645.8	3057.12	-525.446	17.59
Experimento 8	9018.97	8736.35	2240.09	-473.939	14.38
Experimento 9	9418.99	9027.33	2687.91	-503.003	16.58
Experimento 10	9615.9	9149.45	2958.57	-468.567	17.92
Experimento 11	10316.1	9934.7	2778.81	-558.576	15.63
Experimento 12	10381.7	10189	1991.25	-527.491	11.06
Experimento 13	10426.1	10088.6	2631.16	-505.194	14.62
Experimento 14	10166.2	9520.71	3564.85	-524.381	20.53
Experimento 15	10273.9	9503.63	3903.08	-515.929	22.33

**Tabla 4. 6.** *Respuesta el plan de experimentación con el material 2.*

N°Exp	<i>e</i>	<i>r</i>	<i>s</i>	Respuesta CRA	Respuesta CRX	Respuesta CRY
	Unidad1	Unidad2	Unidad3	Unidad1	Unidad2	Unidad3
1	32.20	16.10	16.10	0.3518	0.4246	0.1762
2	67.80	16.10	16.10	0.3643	0.4482	0.1451
3	32.20	33.90	16.10	0.3512	0.4324	0.1380
4	67.80	33.90	16.10	0.3425	0.4117	0.1784
5	32.20	16.10	33.90	0.3592	0.4309	0.1902
6	67.80	16.10	33.90	0.3774	0.4645	0.1493
7	32.20	33.90	33.90	0.3537	0.4278	0.1736
8	67.80	33.90	33.90	0.3152	0.3875	0.1272
9	20.06	25.00	25.00	0.3292	0.4004	0.1526
10	79.94	25.00	25.00	0.3361	0.4058	0.1680
11	50.00	10.03	25.00	0.3606	0.4406	0.1578
12	50.00	39.97	25.00	0.3629	0.4519	0.1130
13	50.00	25.00	10.03	0.3644	0.4475	0.1494
14	50.00	25.00	39.97	0.3553	0.4223	0.2024
15	50.00	25.00	25.00	0.3591	0.4215	0.2216

**4.2.3. Superficie de respuesta del material 3.**

Vemos aquí los resultados obtenidos para el material 3 utilizado. Aparecen los resultados de simulación (Tabla 4.8.) y las respuestas de los tres coeficientes de restitución (Tabla 4.9.).

Tabla 4. 7. *Resultados del diseño de experimentos con el material 3.*

	V_{absoluta}	$V_{X\text{salida}}$	$V_{Y\text{salida}}$	Rotación eje Z	Ángulo
Experimento 1	11684.2	7640.13	8840.19	-675.674	49.16
Experimento 2	10691.4	8064.57	7019.19	-502.344	41.04
Experimento 3	11289.4	7402.7	8523.51	-607.703	49.03
Experimento 4	10097.2	7996.46	6165.2	-494.165	37.63
Experimento 5	10818.6	7160.03	8110.21	-631.485	48.56
Experimento 6	10588.7	7945.05	6999.71	-495.304	41.38
Experimento 7	10278.2	5595.34	8621.74	-512.798	57.02
Experimento 8	8376.7	5826.91	6018	-396.545	45.92
Experimento 9	11030	6645.58	8803.26	-713.728	52.95
Experimento 10	10166.2	8017.93	6250.18	-469.371	37.94
Experimento 11	11388.1	8300.2	7797.1	-590.117	43.21
Experimento 12	9233.36	5221.95	7614.87	-516.458	55.56
Experimento 13	11396.9	8750.31	7302.22	-542.493	39.85
Experimento 14	9566.49	6359.83	7146.34	-556.953	48.33
Experimento 15	10738	7584.56	7601.27	-544.329	45.06
Experimento 15a	10786.3	7806.13	7443.75	-566.408	43.64
Experimento 15b	10742.9	8031.13	7135.18	-544.737	41.62
Experimento 15c	10485.1	6530.78	8202.76	-537.303	51.47

**Tabla 4. 8.** *Plan de experimentación material 3.*

N°Exp	<i>e</i>	<i>r</i>	<i>s</i>	Respuesta CRA	Respuesta CRX	Respuesta CRY
	Unidad1	Unidad2	Unidad3	Unidad1	Unidad2	Unidad3
1	32.20	16.10	16.10	0.4084	0.3389	0.5019
2	67.80	16.10	16.10	0.3737	0.3577	0.3985
3	32.20	33.90	16.10	0.3946	0.3283	0.4839
4	67.80	33.90	16.10	0.3529	0.3547	0.3500
5	32.20	16.10	33.90	0.3781	0.3176	0.4604
6	67.80	16.10	33.90	0.3701	0.3524	0.3974
7	32.20	33.90	33.90	0.3592	0.2482	0.4895
8	67.80	33.90	33.90	0.2928	0.2584	0.3416
9	20.06	25.00	25.00	0.3855	0.2948	0.4998
10	79.94	25.00	25.00	0.3553	0.3556	0.3548
11	50.00	10.03	25.00	0.3980	0.3681	0.4426
12	50.00	39.97	25.00	0.3227	0.2316	0.4323
13	50.00	25.00	10.03	0.3983	0.3881	0.4146
14	50.00	25.00	39.97	0.3344	0.2821	0.4057
15	50.00	25.00	25.00	0.3753	0.3364	0.4315
16	50.00	25.00	25.00	0.3770	0.3462	0.4226
17	50.00	25.00	25.00	0.3755	0.3562	0.4051
18	50.00	25.00	25.00	0.3665	0.2897	0.4657



“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”

Tabla 4. 9. *Coefficientes de las tres superficies de respuesta.*

Nombre	Respuesta CRA		Respuesta CRX		Respuesta CRY	
	Coef.	Signif. %	Coef.	Signif. %	Coef.	Signif. %
b ₀	0.37357	< 0.01 ***	0.33192	< 0.01 ***	0.43103	< 0.01 ***
b ₁	-0.0148	0.0679 ***	0.0141	4.98 *	-0.05059	< 0.01 ***
b ₂	-0.01876	0.0139 ***	-0.02978	0.123 **	-0.00816	16.6
b ₃	-0.0174	0.0233 ***	-0.02799	0.180 **	-0.00455	42
b ₁₋₁	-0.00087	76.9	-0.00226	73.1	-0.00063	91.2
b ₂₋₂	-0.00441	16.3	-0.01128	11.4	0.0029	61.6
b ₃₋₃	-0.00247	41.5	0.0011	86.7	-0.00664	26.6
b ₁₋₂	-0.00825	5.2	-0.002	80.8	-0.01438	7.4
b ₁₋₃	0.00025	94.6	-0.00025	97.6	0.00338	64.2
b ₂₋₃	-0.00775	6.4	-0.01875	4.68 *	0.00513	48.5

En la Tabla 4.9. aparecen los coeficientes de la superficie de respuesta correspondientes al material 3 para cada uno de los tres coeficientes de restitución. Al igual que sucedía con el material 1 el coeficiente es b₀ es el más significativo.

Para el coeficiente de restitución absoluto (CRA), los coeficientes significativos son el b₁, b₂ y b₃. Los tres coeficientes influyentes corresponden a los tres parámetros del plan experimental, espesor, radio y separación (*e*, *r* y *s*). Como los valores de los coeficientes significativos son negativos, un aumento de los parámetros equivaldría a una disminución del valor de CRA.

Para el coeficiente de restitución horizontal (CRX), los coeficientes significativos son el b₁, b₂, b₃ y b₂₋₃. Los tres primeros corresponden a los tres parámetros del plan experimental, espesor, radio y separación (*e*, *r* y *s*). Además es influyente b₂₋₃, correspondientes a la iteración entre el radio y la separación (*r*s*). Aunque los más influyentes son el b₂ y b₃. Los valores de los coeficientes más significativos son negativos, esto quiere decir que un aumento de los parámetros equivaldría a una disminución del valor de CRX, aunque el valor del coeficiente b₁ (espesor) es positivo y un aumento de este produciría que el valor de CRX aumentase.

**“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES
ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”**

Para el coeficiente de restitución vertical (CRY), el coeficiente más significativo es el b_1 . Corresponde al espesor (e). Por lo tanto esta respuesta únicamente se rige por un parámetro, en este caso el espesor. Como este es negativo, un aumento equivaldría a una disminución del valor de CRY.

A continuación se observa en la Figura 4.3. seis gráficas correspondientes a los tres coeficientes de restitución. Las gráficas que se encuentran a la izquierda muestran cómo obtener los valores máximos y mínimos del coeficiente de restitución modificando los parámetros variables en el plan de experimentación. La línea azul (1) corresponde al espesor, la roja (2) al radio y la verde (3) a la separación. Las gráficas de la derecha muestran los valores máximos y mínimos que se pueden obtener de la respuesta para cada uno de los coeficientes de restitución.

Para obtener un valor máximo del CRA, que sería de 0.41 según la gráfica, es necesario que el valor codificado del espesor sea -1.3, el del radio 0 y el de la separación -1.2.

Para obtener un valor máximo del CRX, aproximadamente 0.39, se necesita que el espesor tenga un valor de 0.6, el radio debe ser el correspondiente al 0 y la separación sea de -1.5.

Para obtener un valor máximo del CRY (0.52), se necesita que el espesor tenga un valor de -1.5, el radio de 0.5 y la separación sea el punto correspondiente al -0.2.



“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”

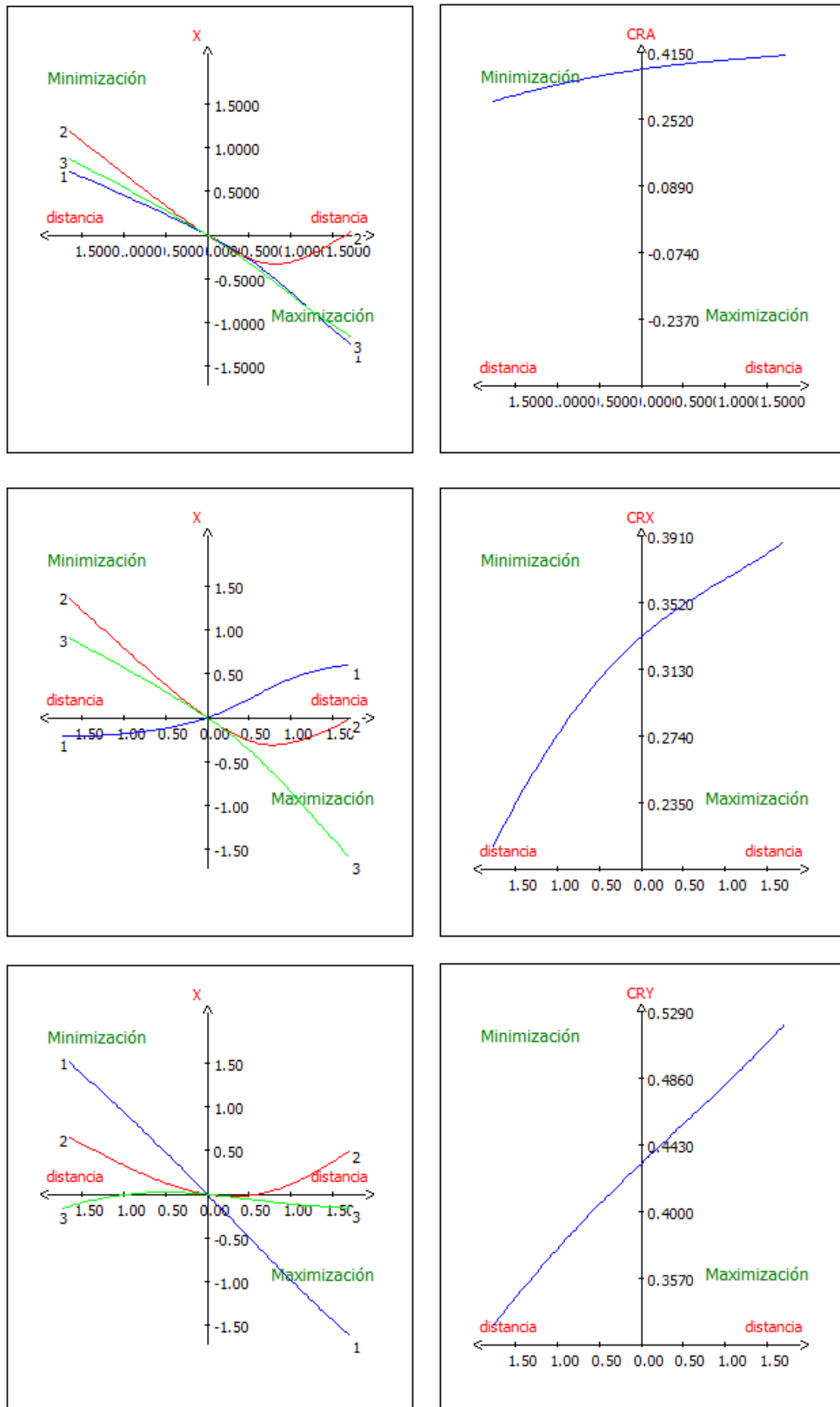


Figura 4. 3. Estudio del camino óptimo de la respuesta: a) CRA, b) CRX y c) CRY.

**4.2.4. Superficie de respuesta del material 4.**

Se recogen en este apartado los resultados obtenidos para el material 4. Aparecen los resultados de simulación (Tabla 4.11.) y las respuestas de los tres coeficientes de restitución (Tabla 4.12.).

Tabla 4. 10. *Resultados del diseño de experimentos con el material 4.*

	$V_{absoluta}$	$V_{Xsalida}$	$V_{Ysalida}$	Rotación eje Z	Ángulo
Experimento 1	14517.6	9627.54	10866	-765.329	48.46
Experimento 2	12682.3	9272.63	8652.04	-572.678	43.02
Experimento 3	14286.9	10216.6	9986.73	-636.777	44.35
Experimento 4	12376	9463.09	7975.96	-475.006	40.13
Experimento 5	13604.7	8683.75	10472.9	-743.053	50.34
Experimento 6	12111.2	9480.75	7536.39	-650.563	38.48
Experimento 7	13341.4	8048.25	10640.5	-505.981	52.90
Experimento 8	10047.2	7248.83	6957.01	-514.597	43.82
Experimento 9	13789	8592	10784.9	-818.408	51.46
Experimento 10	11457.2	8722.13	7429.13	-537.085	40.42
Experimento 11	13754.3	9701.94	9749.59	-684.824	45.14
Experimento 12	11616.5	5821.24	10052.6	-537.26	59.93
Experimento 13	14123.5	10933.1	8940.99	-571.886	39.28
Experimento 14	12424.2	7853.47	9627.2	-589.303	50.79
Experimento 15	13971.6	10066.2	9688.95	-523.064	43.91
Experimento 15a	13641.6	9576.72	9714.9	-598.706	45.41
Experimento 15b	13797.2	10258.6	9226.27	-535.9	41.97
Experimento 15c	13581.7	9060.89	10117.5	-565.634	48.15

**Tabla 4. 11.** *Respuestas del plan de experimentación con el material 4.*

N°Exp	<i>e</i>	<i>r</i>	<i>s</i>	Respuesta CRA	Respuesta CRX	Respuesta CRY
	Unidad1	Unidad2	Unidad3	Unidad1	Unidad2	Unidad3
1	32.20	16.10	16.10	0.5074	0.4270	0.6169
2	67.80	16.10	16.10	0.4433	0.4113	0.4912
3	32.20	33.90	16.10	0.4993	0.4531	0.5670
4	67.80	33.90	16.10	0.4326	0.4197	0.4528
5	32.20	16.10	33.90	0.4755	0.3852	0.5946
6	67.80	16.10	33.90	0.4233	0.4205	0.4278
7	32.20	33.90	33.90	0.4663	0.3570	0.6041
8	67.80	33.90	33.90	0.3512	0.3215	0.3950
9	20.06	25.00	25.00	0.4819	0.3811	0.6123
10	79.94	25.00	25.00	0.4004	0.3869	0.4218
11	50.00	10.03	25.00	0.4807	0.4303	0.5535
12	50.00	39.97	25.00	0.4060	0.2582	0.5707
13	50.00	25.00	10.03	0.4936	0.4849	0.5076
14	50.00	25.00	39.97	0.4342	0.3483	0.5465
15	50.00	25.00	25.00	0.4883	0.4465	0.5500
16	50.00	25.00	25.00	0.4768	0.4248	0.5515
17	50.00	25.00	25.00	0.4822	0.4550	0.5238
18	50.00	25.00	25.00	0.4747	0.4019	0.5744



Tabla 4. 12. *Coefficientes de las tres superficies de respuesta.*

Nombre	Respuesta CRA		Respuesta CRX		Respuesta CRY	
	Coef.	Signif. %	Coef.	Signif. %	Coef.	Signif. %
b ₀	0.48033	< 0.01 ***	0.43121	< 0.01 ***	0.55061	< 0.01 ***
b ₁	-0.03185	< 0.01 ***	-0.00285	76.7	-0.06850	< 0.01 ***
b ₂	-0.01649	0.205 **	-0.02784	1.71 *	-0.00598	47.8
b ₃	-0.01962	0.0699 ***	-0.03349	0.690 **	-0.00308	71.1
b ₁₋₁	-0.01351	0.768 **	-0.01251	23.1	-0.01501	11.0
b ₂₋₂	-0.01262	1.08 *	-0.02666	2.45 *	0.00090	91.7
b ₃₋₃	-0.00537	19.7	-0.00102	91.8	-0.01148	20.6
b ₁₋₂	-0.00813	12.9	-0.01088	39.6	-0.00375	73.0
b ₁₋₃	-0.00463	36.4	0.00613	62.7	-0.01700	14.4
b ₂₋₃	-0.00788	14.0	-0.02013	13.6	0.00800	46.8

En la Tabla 4.12. aparecen los coeficientes de las superficies de respuesta correspondientes al material 4 para cada uno de los tres coeficientes de restitución. De nuevo el coeficiente b₀, es el más significativo.

Para el coeficiente de restitución absoluto (CRA), los coeficientes significativos son el b₁, b₂, b₃, b₁₋₁ y b₂₋₂. Los tres primeros corresponden a los tres parámetros del plan experimental, espesor, radio y separación (*e*, *r* y *s*). Además es influyente b₁₋₁, correspondiente al cuadrado del espesor (*e*²) y el b₂₋₂, el cuadrado del radio (*r*²). Aunque los más influyentes son el b₁ y b₃. Como los valores de los coeficientes significativos son negativos, un aumento de los parámetros equivaldría a una disminución del valor de CRA.

Para el coeficiente de restitución horizontal (CRX), los coeficientes significativos son el b₂, b₃ y b₂₋₂. Los dos primeros corresponden a dos de los parámetros del plan experimental, radio y separación (*r* y *s*). Además es influyente b₂₋₂, correspondiente al cuadrado del radio (*r*²). Aunque el más influyente es el b₃. Los valores de los coeficientes más significativos son negativos, esto quiere decir que un aumento de los parámetros equivaldría a una disminución del valor de CRX.



**“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES
ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”**

Para el coeficiente de restitución vertical (CRY), el coeficiente más significativo es el b_1 . Corresponde al espesor (e). Por lo tanto esta respuesta únicamente se rige por un parámetro, en este caso el espesor. Como este es negativo, un aumento equivaldría a una disminución del valor de CRY.

A continuación se observa en la Figura 4.4. seis gráficas correspondientes a los tres coeficientes de restitución. Las gráficas que se encuentran a la izquierda muestran cómo obtener los valores máximos y mínimos del coeficiente de restitución variando los parámetros variables en el plan de experimentación. La línea azul (1) corresponde al espesor, la roja (2) al radio y la verde (3) a la separación. Las gráficas de la derecha muestran los valores máximos y mínimos que se pueden obtener de la respuesta para cada uno de los coeficientes de restitución.

Para obtener un valor máximo del CRA, que sería de 0.51 según la gráfica, es necesario que el valor codificado del espesor sea -0.9, el del radio corresponda al valor 0.2 y el de la separación al -1.

Para obtener un valor máximo del CRX, aproximadamente 0.49, se necesita que el espesor tenga un valor de 0.6, el radio debe ser el correspondiente al 0.2 y la separación sea de -1.5.

Para obtener un valor máximo del CRY (0.6), se necesita que el espesor tenga un valor de -1.5, el radio de 0.3 y la separación sea el punto correspondiente al 0.6.



“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”

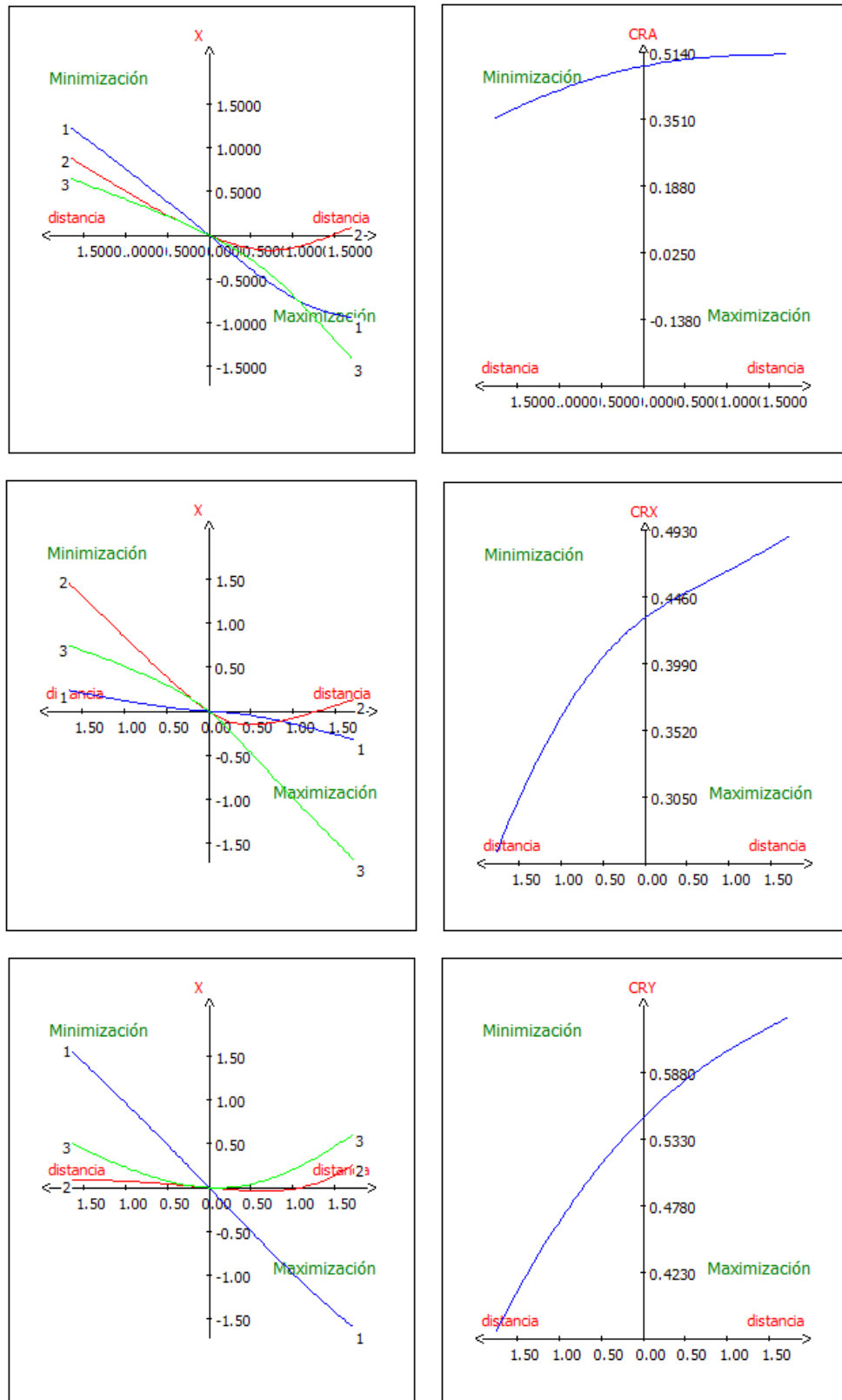


Figura 4. 4. Estudio del camino óptimo de la respuesta: a) CRA, b) CRX y c) CRY.



4.3. SUPERFICIE ARTIFICIAL CON HUECOS PRISMÁTICOS

Para obtener las superficies de respuesta de la superficie artificial de huecos prismáticos se procede de la misma manera que en la superficie artificial con huecos cilíndricos.

En esta ocasión los parámetros variables de esta geometría son el espesor de la superficie artificial, la altura de los rectángulos y la distancia de separación entre ellos. Los datos iniciales de la pelota de golf son los mismos que en el apartado anterior.

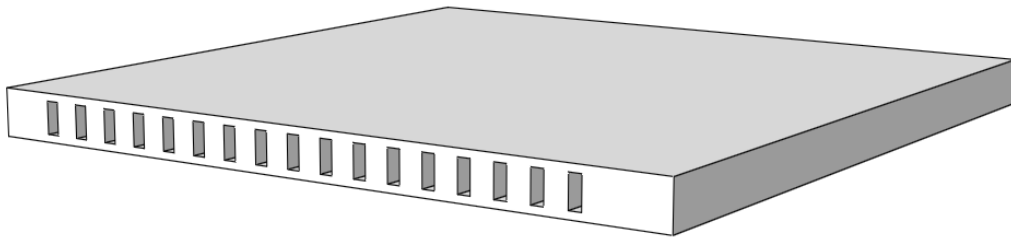


Figura 4. 5. *Ejemplo geometría con huecos prismáticos a 90°.*

Con la superficie artificial de huecos cilíndricos se han utilizado cuatro tipos diferentes de caucho. En este caso, se ha escogido el material 3, ya que es el que proporciona valores de los coeficientes de restitución más próximos a los de la hierba natural. Se ha variado el ángulo de inclinación en 90°, 120° y 135° con el objetivo de analizar su posible efecto sobre los resultados. Los resultados obtenidos tanto en el análisis de todos ellos como en el diseño experimental se muestran a continuación.

**4.3.1. Superficie de respuesta con ángulo de inclinación 90°**

En este apartado se muestran los resultados obtenidos para la superficie de huecos prismáticos con un ángulo de inclinación de 90°. Aparecen los resultados de simulación (Tabla 4.17.) y las respuestas de los tres coeficientes de restitución que (Tabla 4.18.).

Tabla 4. 13. *Resultados del diseño de experimentos con ángulo de inclinación 90°.*

	V_{absoluta}	$V_{X\text{salida}}$	$V_{Y\text{salida}}$	Rotación eje Z	Ángulo
Experimento 1	11564.2	6250.12	9729.73	-743.507	57.28
Experimento 2	12392.6	8497.13	9020.88	-700.929	46.71
Experimento 3	13582.8	8090.08	10910.7	-733.192	53.44
Experimento 4	12274.1	8118.9	9205.32	-357.107	48.59
Experimento 5	12866.6	7691.99	10314.3	-833.059	53.29
Experimento 6	12356.9	8186.79	9255.83	-722.801	48.51
Experimento 7	12722.8	8153.33	9766.92	-595.451	50.15
Experimento 8	13913.9	10390.6	9253.75	-477.555	41.69
Experimento 9	12785.2	5916.77	11333.7	-993.216	62.43
Experimento 10	12428	9405.96	8122.98	-631.150	40.81
Experimento 11	13004.3	8234.23	10065.3	-740.543	50.71
Experimento 12	13837.1	10223	9324.93	-662.788	42.37
Experimento 13	14317.3	10083.8	10163.7	-519.778	45.23
Experimento 14	14181.6	9604.95	10433.7	-608.677	47.37
Experimento 15	14190.5	9659.47	10395.4	-651.033	47.10
Experimento 15a	14215.2	9721.17	10371.6	-605.904	46.85
Experimento 15b	13909.9	8939.11	10657.3	-596.804	50.01
Experimento 15c	13574.9	8499.25	10584.9	-611.168	51.24

**“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES
ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”****Tabla 4. 14.** *Plan de experimentación inclinación 90°.*

N°Exp	<i>e</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	Respuesta CRA	Respuesta CRX	Respuesta CRY
	Unidad1	Unidad2	Unidad3	Unidad1	Unidad2	Unidad3
1	32.20	16.10	16.10	0.4042	0.2772	0.5524
2	67.80	16.10	16.10	0.4331	0.3769	0.5121
3	32.20	33.90	16.10	0.4747	0.3588	0.6194
4	67.80	33.90	16.10	0.4290	0.3601	0.5226
5	32.20	16.10	33.90	0.4497	0.3412	0.5855
6	67.80	16.10	33.90	0.4319	0.3631	0.5255
7	32.20	33.90	33.90	0.4447	0.3616	0.5545
8	67.80	33.90	33.90	0.4863	0.4609	0.5253
9	20.06	25.00	25.00	0.4469	0.2624	0.6434
10	79.94	25.00	25.00	0.4344	0.4172	0.4611
11	50.00	10.03	25.00	0.4545	0.3652	0.5714
12	50.00	39.97	25.00	0.4836	0.4534	0.5294
13	50.00	25.00	10.03	0.5004	0.4473	0.5770
14	50.00	25.00	39.97	0.4957	0.4260	0.5923
15	50.00	25.00	25.00	0.4960	0.4284	0.5902
16	50.00	25.00	25.00	0.4968	0.4312	0.5888
17	50.00	25.00	25.00	0.4862	0.3965	0.6050
18	50.00	25.00	25.00	0.4745	0.3770	0.6009

En este ángulo de inclinación, el grado de significación de la regresión era demasiado elevado para obtener una respuesta correcta, por lo que gracias a los residuos se procede a desactivar los experimentos que causan este error.



Tabla 4. 15. *Coefficientes de las tres superficies de respuesta.*

Nombre	Respuesta CRA		Respuesta CRX		Respuesta CRY	
	Coef.	Signif. %	Coef.	Signif. %	Coef.	Signif. %
b ₀	0.48872	< 0.01 ***	0.40858	< 0.01 ***	0.59640	< 0.01 ***
b ₁	-0.00423	29.0	0.04164	0.132 **	-0.05188	< 0.01 ***
b ₂	0.00899	4.90 *	0.03061	0.600 **	-0.01472	2.01 *
b ₃	-0.00508	16.5	-0.00591	39.7	-0.00338	44.4
b ₁₋₁	-0.01846	0.0791 ***	-0.02577	0.504 **	-0.01643	0.499 **
b ₂₋₂	-0.00821	3.24 *	-0.00120	84.8	-0.01714	0.408 **
b ₃₋₃	0.00187	55.2	0.00852	20.4	-0.00494	24.2
b ₁₋₂	0.01483	1.73 *	0.02218	5.2	0.00392	52.7
b ₁₋₃	0.01025	10.8	-0.00825	48.0	0.02780	0.720 **
b ₂₋₃	0.00300	60.1	-0.00400	72.8	0.00830	27.9

En la Tabla 4.18. aparecen los coeficientes de las superficies de respuesta correspondientes a la superficie de huecos prismáticos con una inclinación de 90° para cada uno de los coeficientes de restitución. Destacando que el coeficiente b₀, el coeficiente independiente, de nuevo va a ser significativo en todas las superficies de respuesta.

Para que la regresión sea significativa ha sido necesario desactivar los experimentos 1 y 4 del cálculo de los coeficientes de la superficie de respuesta en los tres casos anteriores.

Para el coeficiente de restitución absoluto (CRA), los coeficientes significativos son el b₂, b₁₋₁, b₂₋₂ y b₁₋₂. El primero corresponde a un parámetro del plan experimental, el espesor (*e*). Además es influyente b₁₋₁, correspondientes al cuadrado del espesor (*e*²), el b₂₋₂, el cuadrado de la altura (*h*²) y el b₁₋₂ que corresponde la interacción entre el espesor y la altura (*e***h*). Aunque el más influyentes es el b₁₋₁. El valor de los coeficientes significativos b₁₋₁ (más influyente) y b₂₋₂ son negativos, lo que quiere decir un aumento de esos parámetros equivaldría a una disminución del valor de CRA.

**“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES
ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”**

Para el coeficiente de restitución horizontal (CRX), los coeficientes significativos son el b_1 , b_2 y b_{1-1} . Los dos primeros corresponden a dos de los parámetros del plan experimental, espesor y altura (e y h). Además es influyente b_{1-1} , correspondiente al cuadrado del espesor (e^2). El valor del coeficiente significativo b_{1-1} es negativo, esto quiere decir que un aumento de este parámetro equivaldría a una disminución del valor de CRX.

Para el coeficiente de restitución vertical (CRY), los coeficientes más significativos son el b_1 , b_2 , b_{1-1} , b_{2-2} y b_{1-3} . Los dos primeros corresponden a dos de los parámetros del plan experimental, espesor y altura (e y h). Además es influyente b_{1-1} , correspondientes al cuadrado del espesor (e^2), el b_{2-2} , el cuadrado de la altura (h^2) y el b_{1-3} que corresponde a la interacción entre el espesor y la separación ($e*s$). Exceptuando el coeficiente b_{1-3} , todos los demás son negativos, esto quiere decir que un aumento de los parámetros equivaldría a una disminución del valor de CRY.

A continuación se observa en la Figura 4.6. seis gráficas correspondientes a los tres coeficientes de restitución. Las gráficas que se encuentran a la izquierda muestran cómo obtener los valores máximos y mínimos del coeficiente de restitución variando los parámetros variables en el plan de experimentación. La línea azul (1) corresponde al espesor, la roja (2) a la altura y la verde (3) a la separación. Las gráficas de la derecha muestran los valores máximos y mínimos que se pueden obtener de la respuesta para cada uno de los coeficientes de restitución.

Para obtener un valor máximo del CRA, que sería de 0.51 según la gráfica, es necesario que el valor codificado del espesor sea -0.5, el de la altura -0.3 y el de la separación -1.5.

Para obtener un valor máximo del CRX, aproximadamente 0.51, se necesita que el espesor tenga un valor de 0.7, la altura debe ser el correspondiente al 0 y la separación sea de -0.9.

Para obtener un valor máximo del CRY (0.7), se necesita que el espesor tenga un valor de -1.2, la altura de -0.5 y la separación sea el punto correspondiente al -1.



“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”

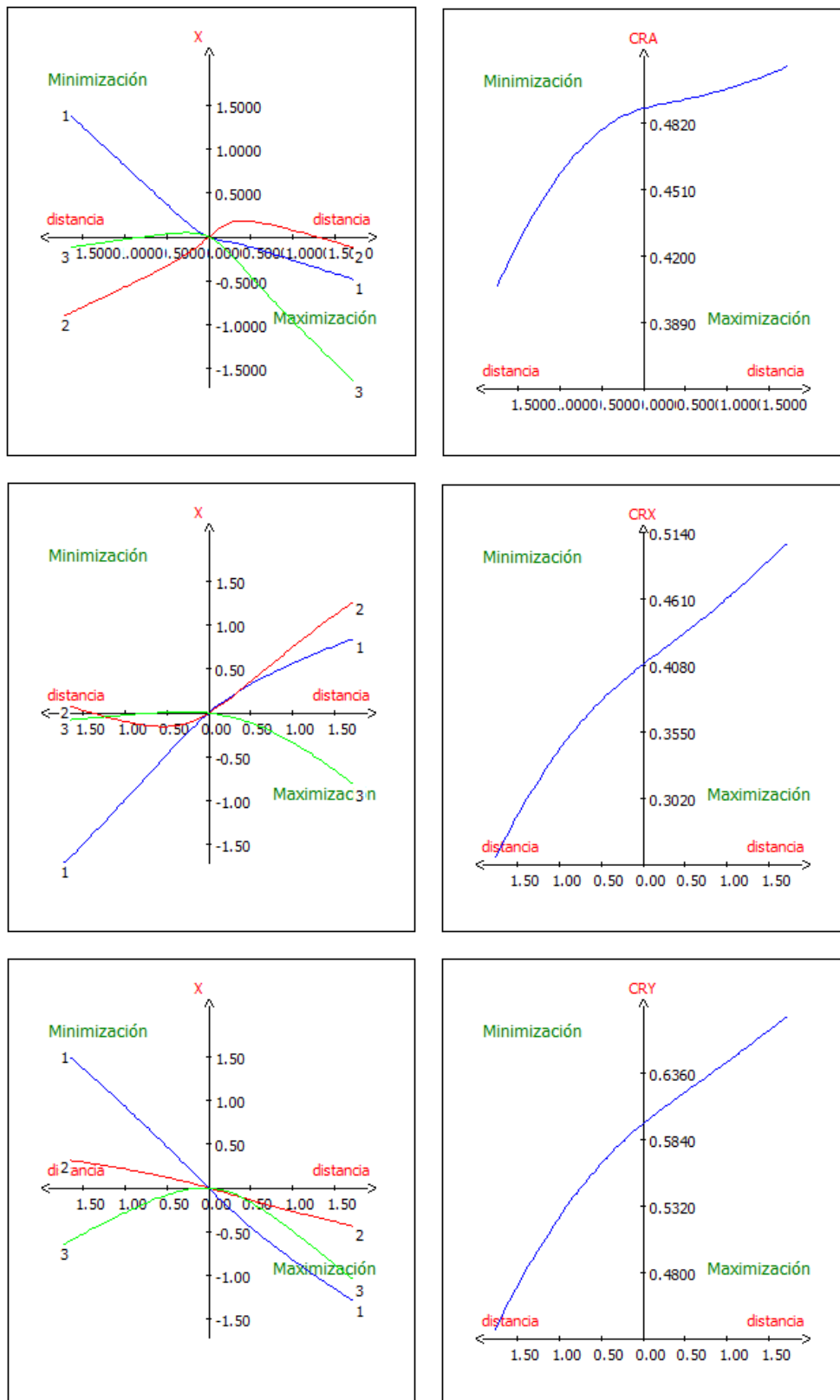


Figura 4. 6. Estudio del camino óptimo de la respuesta: a) CRA, b) CRX y c) CRY.

**4.3.2. Ángulo de inclinación 120°**

En este apartado se muestran los resultados obtenidos para la superficie de huecos prismáticos con un ángulo de inclinación de 120°. Aparecen los resultados de simulación (Tabla 4.17.) y las respuestas de los tres coeficientes de restitución (Tabla 4.18.).

Tabla 4. 16. *Resultados del diseño de experimentos con ángulo de inclinación 120°.*

	V_{absoluta}	V_{Xsalida}	V_{Ysalida}	Rotación eje Z	Ángulo
Experimento 1	12592.2	7126.56	10381.5	-823.426	55.53
Experimento 2	12036.6	8397.05	8623.79	-681.021	45.76
Experimento 3	12143.3	8473.33	8698.39	-613.818	45.75
Experimento 4	10595	8309.58	6573	-484.792	38.34
Experimento 5	11429.6	7679.18	8465.59	-670.877	47.79
Experimento 6	12282.7	8456.19	8908.33	-709.275	46.49
Experimento 7	12032.8	8323.58	8689.48	-789.729	46.23
Experimento 8	13223.5	10420.7	8140.64	-687.668	38.00
Experimento 9	12090.6	6440.01	10232.7	-981.429	57.82
Experimento 10	11972.1	9771.1	6917.81	-500.080	35.30
Experimento 11	13022.8	7980.93	10290.7	-771.359	52.20
Experimento 12	12026.5	9361.43	7549.78	-717.807	38.89
Experimento 13	12884.2	9584.23	8610.79	-521.194	41.94
Experimento 14	13780.9	9604.18	9883.02	-625.773	45.82
Experimento 15	13422.8	9204.19	9770.04	-528.125	46.71
Experimento 15a	13357.6	9487.05	9403.29	-630.65	44.75
Experimento 15b	13312.5	8752.46	10030.8	-547.117	48.89
Experimento 15c	13053.6	9376.2	9082.08	-631.482	44.09

**“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES
ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”****Tabla 4. 17.** *Plan de experimentación inclinación 120°.*

N°Exp	<i>e</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	Respuesta CRA	Respuesta CRX	Respuesta CRY
	Unidad1	Unidad2	Unidad3	Unidad1	Unidad2	Unidad3
1	32.20	16.10	16.10	0.4401	0.3161	0.5894
2	67.80	16.10	16.10	0.4207	0.3724	0.4896
3	32.20	33.90	16.10	0.4244	0.3758	0.4938
4	67.80	33.90	16.10	0.3703	0.3686	0.3732
5	32.20	16.10	33.90	0.3995	0.3406	0.4806
6	67.80	16.10	33.90	0.4293	0.3751	0.5057
7	32.20	33.90	33.90	0.4206	0.3692	0.4933
8	67.80	33.90	33.90	0.4622	0.4622	0.4621
9	20.06	25.00	25.00	0.4226	0.2856	0.5809
10	79.94	25.00	25.00	0.4184	0.4334	0.3927
11	50.00	10.03	25.00	0.4552	0.3540	0.5842
12	50.00	39.97	25.00	0.4203	0.4152	0.4286
13	50.00	25.00	10.03	0.4503	0.4251	0.4888
14	50.00	25.00	39.97	0.4817	0.4260	0.5611
15	50.00	25.00	25.00	0.4691	0.4082	0.5546
16	50.00	25.00	25.00	0.4669	0.4208	0.5338
17	50.00	25.00	25.00	0.4653	0.3882	0.5695
18	50.00	25.00	25.00	0.4562	0.4159	0.5156



Tabla 4. 18. *Coefficientes de las tres superficies de respuesta.*

Nombre	Respuesta CRA		Respuesta CRX		Respuesta CRY	
	Coef.	Signif. %	Coef.	Signif. %	Coef.	Signif. %
b ₀	0.46530	< 0.01 ***	0.40906	< 0.01 ***	0.54424	< 0.01 ***
b ₁	-0.00067	69.1	0.03113	0.244 **	-0.03976	0.154 **
b ₂	-0.00518	4.31 *	0.02010	2.29 *	-0.03695	0.239 **
b ₃	0.00797	1.38 *	0.00847	27.0	0.00859	34.0
b ₁₋₁	-0.01966	0.115 **	-0.02077	2.34 *	-0.02386	2.65 *
b ₂₋₂	-0.01356	0.341 **	-0.01189	14.8	-0.01693	9.0
b ₃₋₃	-0.00357	11.1	0.00259	73.7	-0.01037	27.2
b ₁₋₂	-0.00286	24.8	-0.00063	94.8	-0.00964	40.9
b ₁₋₃	0.01811	0.286 **	0.00980	32.5	0.02679	4.16 *
b ₂₋₃	0.01501	0.493 **	0.00747	44.7	0.02264	7.5

En la Tabla 4.18. aparecen los coeficientes de las superficies de respuesta correspondientes a la superficie de huecos prismáticos con un ángulo de inclinación de 120° para cada uno de los tres coeficientes de restitución. Destacando que el coeficiente b₀, el coeficiente independiente, de nuevo va a ser significativo para todas las respuestas y materiales.

Para el coeficiente de restitución absoluto (CRA), los coeficientes significativos son el b₂, b₃, b₁₋₁, b₂₋₂, b₁₋₃ y b₂₋₃. Los dos primeros corresponden a parámetros del plan experimental, altura y separación (*h* y *s*). Además es influyente b₁₋₁, correspondientes al cuadrado del espesor (*e*²), el b₂₋₂, el cuadrado de la altura (*h*²) y el b₁₋₃ que corresponde a la interacción entre el espesor y la separación (*e*s*) y el b₂₋₃, la altura por la separación (*h*s*). El valor de los coeficientes significativos b₂, b₁₋₁ y b₂₋₂ son negativos, lo que quiere decir que un aumento de esos parámetros equivaldría a una disminución del valor de CRA. Mientras que el b₃, b₁₋₃ y b₂₋₃ son positivos, y el valor de CRA aumentaría si éstos aumentasen.

Para el coeficiente de restitución horizontal (CRX), los coeficientes significativos son el b₁, b₂ y b₁₋₁. Los dos primeros corresponden a dos de los parámetros del plan experimental, espesor y altura (*e* y *h*). También influye el b₁₋₁, correspondiente al cuadrado del espesor (*e*²). El valor del coeficiente significativo b₁₋₁ es negativo, esto

**“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES
ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”**

quiere decir que un aumento de este parámetro equivaldría a una disminución del valor de CRX.

Para el coeficiente de restitución vertical (CRY), los coeficientes más significativos son el b_1 , b_2 , b_{1-1} y b_{1-3} . Los dos primeros corresponden a dos de los parámetros del plan experimental, espesor y altura (e y h). Además es influyente b_{1-1} , correspondientes al cuadrado del espesor (e^2) y el b_{1-3} que corresponde a la interacción entre el espesor y la separación ($e*s$). Exceptuando el coeficiente b_{1-3} , todos los demás son negativos, esto quiere decir que un aumento de esos parámetros equivaldría a una disminución del valor de CRY.

A continuación se observa en la Figura 4.7. seis gráficas correspondientes a los tres coeficientes de restitución. Las gráficas que se encuentran a la izquierda muestran cómo obtener los valores máximos y mínimos del coeficiente de restitución variando los parámetros variables en el plan de experimentación. La línea azul (1) corresponde al espesor, la roja (2) la altura y la verde (3) a la separación. Las gráficas de la derecha muestran los valores máximos y mínimos que se pueden obtener de la respuesta para cada uno de los coeficientes de restitución.

Para obtener un valor máximo del CRA, que sería de 0.48 según la gráfica, es necesario que el valor codificado del espesor sea 0.5, el de la altura corresponda al valor 0.4 y el de la separación al 1.5.

Para obtener un valor máximo del CRX, aproximadamente 0.46, se necesita que el espesor tenga un valor de 0.6, la altura debe ser el correspondiente al 0.6 y la separación sea de 1.4.

Para obtener un valor máximo del CRY (0.6), se necesita que el espesor tenga un valor de -0.9, la altura de -1 y la separación sea el punto correspondiente al -0.9.



“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”

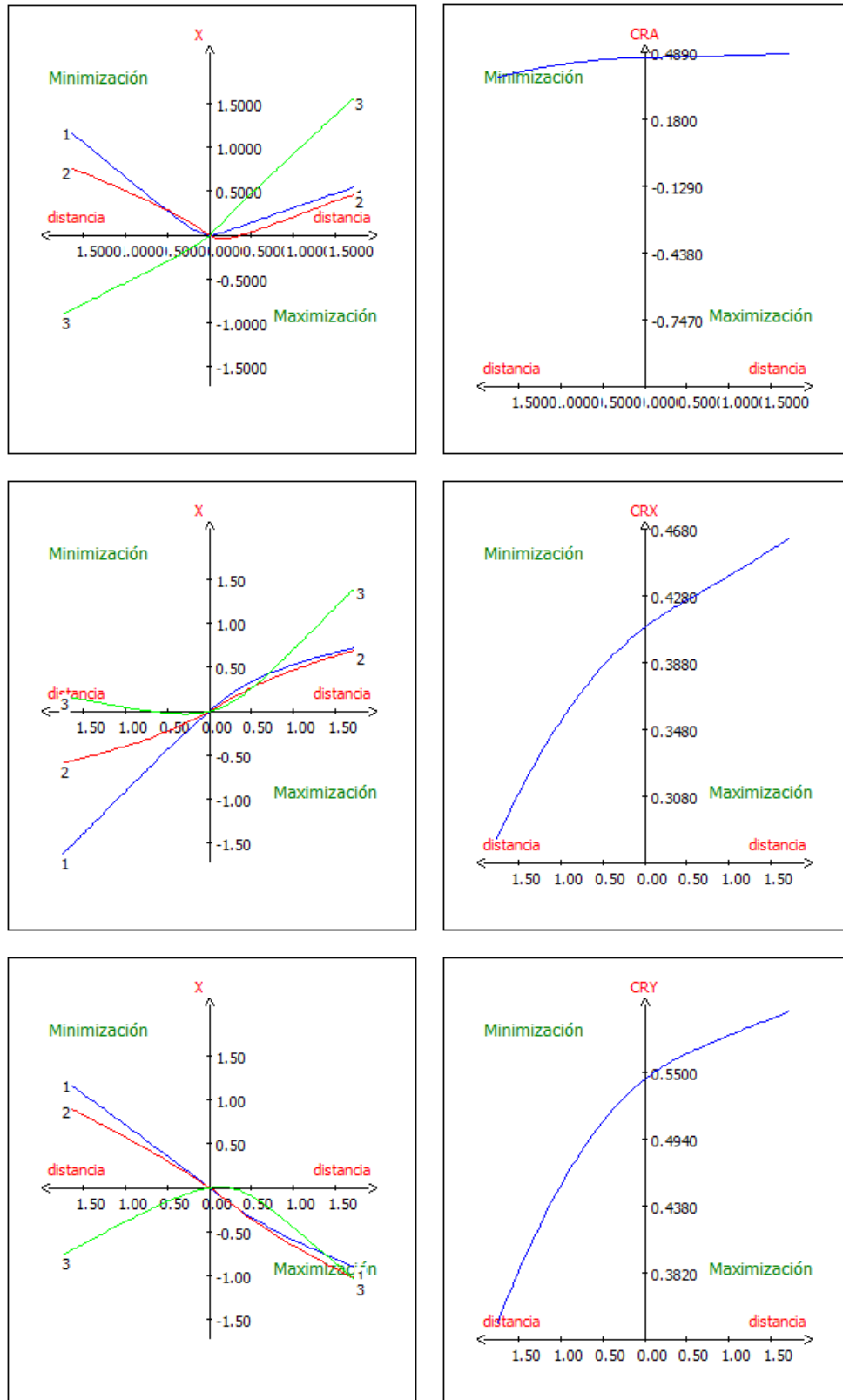


Figura 4. 7. Estudio del camino óptimo de la respuesta: a) CRA, b) CRX y c) CRY.

**4.3.3. Ángulo de inclinación 135°**

En este apartado se muestran los resultados obtenidos para la superficie de huecos prismáticos con una inclinación de 135°. Aparecen los resultados de simulación (Tabla 4.20.) y las respuestas de los tres coeficientes de restitución (Tabla 4.21.).

Tabla 4. 19. Resultados del diseño de experimentos con un ángulo de inclinación 135°.

	V_{absoluta}	V_{Xsalida}	V_{Ysalida}	Rotación eje Z	Ángulo
Experimento 1	12927.3	7897.4	10234.6	-746.953	52.34
Experimento 2	11024.7	8643.94	6843.03	-680.484	38.37
Experimento 3	9045.68	6009.33	6761.09	-607.579	48.37
Experimento 4	10127.3	9629.53	3135.89	-527.693	18.04
Experimento 5	11492.4	6067.49	9760.21	-696.955	58.13
Experimento 6	11574.7	8873.95	7431.52	-611.261	39.94
Experimento 7	12032.1	10276.2	6258.69	-689.349	31.34
Experimento 8	9714.62	8088.96	5379.82	-442.310	33.63
Experimento 9	12192.5	5830.06	10708.3	-764.852	61.43
Experimento 10	10285.8	9439.33	4086.24	-577.846	23.41
Experimento 11	12831.3	8108.48	9944.63	-758.412	50.81
Experimento 12	11419.6	11149.1	2470.9	-566.558	12.50
Experimento 13	8937.44	7693.67	4548.11	-520.047	30.59
Experimento 14	13046.9	9605.1	8829.73	-643.895	42.59
Experimento 15	11828.7	8592.76	8129.08	-537.336	43.41
Experimento 15a	11148.8	7682.93	8078.87	-509.311	46.44
Experimento 15b	11460.3	8955.39	7151.13	-551.064	38.61
Experimento 15c	11494.2	9318.29	6729.43	-610.494	35.84

**“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES
ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”****Tabla 4. 20.** *Plan de experimentación inclinación 135°.*

N°Exp	<i>e</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	Respuesta CRA	Respuesta CRX	Respuesta CRY
	Unidad1	Unidad2	Unidad3	Unidad1	Unidad2	Unidad3
1	32.20	16.10	16.10	0.4518	0.3503	0.5810
2	67.80	16.10	16.10	0.3853	0.3834	0.3885
3	32.20	33.90	16.10	0.3162	0.2665	0.3838
4	67.80	33.90	16.10	0.3540	0.4271	0.1780
5	32.20	16.10	33.90	0.4017	0.2691	0.5541
6	67.80	16.10	33.90	0.4046	0.3936	0.4219
7	32.20	33.90	33.90	0.4205	0.4558	0.3553
8	67.80	33.90	33.90	0.3395	0.3588	0.3054
9	20.06	25.00	25.00	0.4261	0.2586	0.6079
10	79.94	25.00	25.00	0.3595	0.4187	0.2320
11	50.00	10.03	25.00	0.4485	0.3596	0.5646
12	50.00	39.97	25.00	0.3991	0.4945	0.1403
13	50.00	25.00	10.03	0.3124	0.3412	0.2582
14	50.00	25.00	39.97	0.4560	0.4260	0.5013
15	50.00	25.00	25.00	0.4134	0.3811	0.4615
16	50.00	25.00	25.00	0.3897	0.3408	0.4586
17	50.00	25.00	25.00	0.4006	0.3972	0.4060
18	50.00	25.00	25.00	0.4017	0.4133	0.3820

En este ángulo de inclinación, el grado de significación de la regresión era demasiado elevado para obtener una respuesta correcta, por lo que gracias a los residuos se procede a desactivar los experimentos que causan este error.



Tabla 4. 21. *Coefficientes de las tres superficies de respuesta inclinación.*

Nombre	Respuesta CRA		Respuesta CRX		Respuesta CRY	
	Coef.	Signif. %	Coef.	Signif. %	Coef.	Signif. %
b ₀	0.40134	< 0.01 ***	0.38261	< 0.01 ***	0.42699	< 0.01 ***
b ₁	-0.00568	13.7	0.05331	0.0375 ***	-0.09419	0.126 **
b ₂	-0.01149	2.64 *	0.04232	0.146 **	-0.11077	0.0488 ***
b ₃	0.03246	0.139 **	0.03162	0.686 **	0.03213	12.0
b ₁₋₁	-0.00277	37.8	-0.01352	13.3	-0.00140	93.8
b ₂₋₂	0.00837	5.2	0.01777	6.1	-0.02526	18.7
b ₃₋₃	-0.00577	12.0	0.00221	78.9	-0.01572	39.4
b ₁₋₂	0.02039	1.36 *	0.01786	16.8	-0.00074	97.7
b ₁₋₃	0.01164	5.8	0.00911	45.8	0.01776	50.3
b ₂₋₃	0.03264	0.358 **	0.05361	0.242 **	0.00226	93.1

En la Tabla 4.21. aparecen los coeficientes de las superficies de respuesta correspondientes a la superficie de huecos prismáticos con un ángulo de inclinación de 135° para cada uno de los coeficientes de restitución. Destacando que el coeficiente b₀, el coeficiente independiente, va a ser significativo para todas las respuestas y materiales.

Para que la regresión sea significativa ha sido necesario desactivar el experimento 8 del cálculo de los coeficientes de la superficie de respuesta en los tres casos anteriores.

Para el coeficiente de restitución absoluto (CRA), los coeficientes significativos son el b₂, b₃, b₁₋₂ y b₂₋₃. Los dos primeros corresponden a parámetros del plan experimental, altura y separación (*h* y *s*). Además es influyente b₁₋₂, correspondientes al espesor por la altura (*e*h*), y el b₂₋₃, correspondiente a la interacción entre la altura y la separación (*h*s*). El valor del coeficiente b₂ es negativo, lo que quiere decir que un aumento de este parámetro equivaldría a una disminución del valor de CRA. Mientras que el b₃, b₁₋₂ y b₂₋₃ son positivos, y el valor de CRA aumentaría si éstos aumentasen.

**“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES
ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”**

Para el coeficiente de restitución horizontal (CRX), los coeficientes significativos son el b_1 , b_2 , b_3 y b_{2-3} . Los tres primeros corresponden a los parámetros del plan experimental, espesor, altura y separación (e , h y s). También influye el b_{2-3} , correspondiente a la altura por la separación ($h*s$). Los valores de los coeficientes son positivos, lo que supone que un aumento de los parámetros equivaldría a un aumento del valor de CRX.

Para el coeficiente de restitución vertical (CRY), los coeficientes más significativos son el b_1 y b_2 . Los dos coeficientes corresponden a los parámetros del plan experimental, espesor y altura (e y h). Ambos coeficientes son negativos, esto quiere decir que un aumento de esos parámetros equivaldría a una disminución del valor de CRY, siendo el b_2 más influyente.

A continuación se observa en la Figura 4.8. seis gráficas correspondientes a los tres coeficientes de restitución. Las gráficas que se encuentran a la izquierda muestran cómo obtener los valores máximos y mínimos del coeficiente de restitución variando los parámetros variables en el plan de experimentación. La línea azul (1) corresponde al espesor, la roja (2) la altura y la verde (3) a la separación. Las gráficas de la derecha muestran los valores máximos y mínimos que se pueden obtener de la respuesta para cada uno de los coeficientes de restitución.

Para obtener un valor máximo del CRA, que sería de 0.45 según la gráfica, es necesario que el valor codificado del espesor sea 0.5, y el de la altura corresponda a 1 y el de la separación al 1.2.

Para obtener un valor máximo del CRX, aproximadamente 0.61, se necesita que el espesor tenga un valor de 0.5, la altura debe ser el correspondiente al 1.2 y la separación sea de 0.9.

Para obtener un valor máximo del CRY (0.64), se necesita que el espesor tenga un valor de -1.4, la altura de -0.9 y la separación sea el punto correspondiente al 0.



“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”

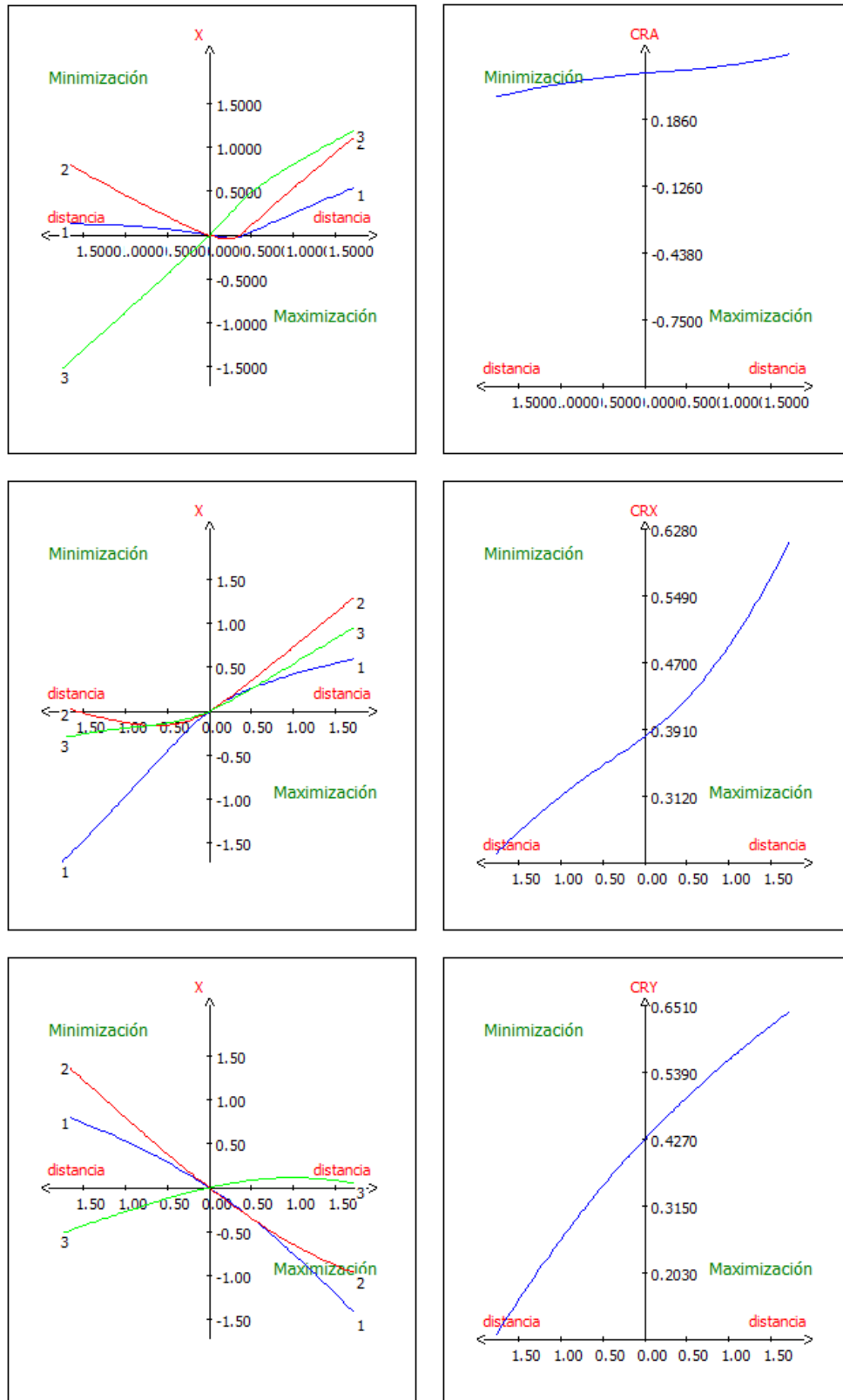


Figura 4. 8. Estudio del camino óptimo de la respuesta: a) CRA, b) CRX y c) CRY.



4.4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Para la realización análisis de los resultados obtenidos se ha escogido como rango de comparación de la superficie artificial los coeficientes de restitución para el green de hierba natural que aparecen en el capítulo del estado del arte y que se muestran en la Tabla 4.23.

Tabla 4. 22. *Coefficientes de restitución para bote angulado de la hierba natural.*

	GREEN-Bote angulado	
	Calidad media	Calidad alta
CRX	0.271 - 0.528	0.382 -0.470
CRY	0.291 - 0.417	0.311 -0.366
CRA	0.330 - 0.438	0.373-0.416

Para eeste estudio se trabaja con la calidad media que se supone suficiente. A continuación se comentan las diferentes geometrías y materiales analizados para que su comportamiento se asemeje lo más posible a la hierba natural.

4.4.1 Superficie artificial con huecos cilíndricos

Con este tipo de superficie se han probado cuatro clases diferentes de caucho. En el material 1, el coeficiente de restitución absoluto CRA, se ha comprobado que dos experimentos quedan fuera del rango de valores óptimos, que corresponden con espesor, radio y separación elevados o muy pequeños, el primero de ellos correspondería con los valores codificados (1, 1, 1) y el segundo con (-1,-1,-1) del diseño experimental. Todos los valores del coeficiente de restitución horizontal CRX, según el rango de calidad media, son válidos. Por último en el coeficiente de restitución vertical CRY se han observado varios experimentos que quedan fuera del rango válido, por este motivo se puede utilizar la fórmula (4.3) para definir los valores de espesor, radio y separación para obtener un valor dentro del rango. También se pueden utilizar las ecuaciones (4.1) y (4.2) para resolver los coeficientes de restitución absoluto y horizontal.



$$\begin{aligned} f(e^*, r^*, s^*)_{CRA} = & 0.42054 - 0.01822 \cdot e^* - 0.01764 \cdot r^* - \\ & - 0.01805 \cdot s^* - 0.00912 \cdot e^{*2} - 0.00983 \cdot r^{*2} - 0.00311 \cdot s^{*2} - \\ & - 0.00175 \cdot e^* \cdot r^* - 0.001 \cdot e^* \cdot s^* - 0.01275 \cdot r^* \cdot s^* \end{aligned} \quad (4.1)$$

$$\begin{aligned} f(e^*, r^*, s^*)_{CRX} = & 0.40765 + 0.00421 \cdot e^* - 0.03228 \cdot r^* - \\ & - 0.03295 \cdot s^* - 0.0029 \cdot e^{*2} - 0.02004 \cdot r^{*2} - 0.0013 \cdot s^{*2} - \\ & - 0.00249 \cdot e^* \cdot r^* + 0.00326 \cdot e^* \cdot s^* - 0.03326 \cdot r^* \cdot s^* \end{aligned} \quad (4.2)$$

$$\begin{aligned} f(e^*, r^*, s^*)_{CRY} = & 0.43882 - 0.05427 \cdot e^* + 0.0014 \cdot r^* + \\ & + 0.00439 \cdot s^* - 0.02058 \cdot e^{*2} + 0.00364 \cdot r^{*2} - 0.0052 \cdot s^{*2} + \\ & + 0.0005 \cdot e^* \cdot r^* - 0.007 \cdot e^* \cdot s^* + 0.01775 \cdot r^* \cdot s^* \end{aligned} \quad (4.3)$$

Para obtener los valores de e^* , r^* y s^* bastaría con igualar cada ecuación al valor que buscamos del coeficiente de restitución, dentro del rango de calidad media de la hierba natural, fijando dos de ellos, dentro de los parámetros variables acotados anteriormente, y se obtendría el valor de la tercera variable.

Para el material 2, se observa que todos los valores del coeficiente de restitución vertical no entran dentro del rango establecido como correcto, por lo tanto no se realiza el cálculo de la superficie de respuesta, pudiéndose concluir que este material no sería aceptable para la fabricación de una superficie artificial.

En el material 3, el coeficiente de restitución absoluto entra dentro del rango de valores de la hierba natural exceptuando un par de experimentos, en el cual uno de ellos corresponde a los valores (1, 1, 1) de las variables codificadas, lo que conlleva que los valores reales de espesor, radio y separación son elevados. Para el coeficiente de restitución horizontal, ocurre lo mismo que para el coeficiente de restitución

**“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES
ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”**

absoluto, siendo uno de los experimentos el mismo que en el coeficiente anterior. Por último, en cuanto al coeficiente de restitución vertical, hay varios experimentos que superan el valor máximo del rango de la hierba natural. Para la estimación de todos ellos se puede proceder de la misma manera que en el material 1, utilizando esta vez las ecuaciones (4.4), (4.5) y (4.6) para los coeficientes CRA, CRX y CRY respectivamente.

$$\begin{aligned} f(e^*, r^*, s^*)_{CRA} = & 0.37357 - 0.0148 \cdot e^* - 0.01876 \cdot r^* - \\ & - 0.0174 \cdot s^* - 0.00087 \cdot e^{*2} - 0.00441 \cdot r^{*2} - 0.00247 \cdot s^{*2} - \\ & - 0.00825 \cdot e^* \cdot r^* + 0.00025 \cdot e^* \cdot s^* - 0.00775 \cdot r^* \cdot s^* \end{aligned} \quad (4.4)$$

$$\begin{aligned} f(e^*, r^*, s^*)_{CRX} = & 0.33192 + 0.0141 \cdot e^* - 0.02978 \cdot r^* - \\ & - 0.02799 \cdot s^* - 0.00226 \cdot e^{*2} - 0.01128 \cdot r^{*2} + 0.0011 \cdot s^{*2} - \\ & - 0.002 \cdot e^* \cdot r^* - 0.00025 \cdot e^* \cdot s^* - 0.01875 \cdot r^* \cdot s^* \end{aligned} \quad (4.5)$$

$$\begin{aligned} f(e^*, r^*, s^*)_{CRY} = & 0.43103 - 0.05059 \cdot e^* - 0.00816 \cdot r^* - \\ & - 0.00455 \cdot s^* - 0.00063 \cdot e^{*2} + 0.0029 \cdot r^{*2} - 0.00664 \cdot s^{*2} - \\ & - 0.01438 \cdot e^* \cdot r^* + 0.00338 \cdot e^* \cdot s^* + 0.00513 \cdot r^* \cdot s^* \end{aligned} \quad (4.6)$$

El último material utilizado es el denominado como material 4. En este caso el coeficiente de restitución absoluto supera el máximo establecido en varios de sus experimentos, aunque prácticamente la mitad de ellos entran dentro del rango de calidad media. Los valores del coeficiente de restitución horizontal son válidos para el rango de hierba natural. Por último, casi todos los valores del coeficiente de restitución vertical superan el máximo valor del rango de calidad media de la hierba natural a excepción de unos pocos. Para la obtención de los coeficientes de se pueden utilizar las ecuaciones (4.7), (4.8) y (4.9).



$$\begin{aligned} f(e^*, r^*, s^*)_{CRA} = & 0.48033 - 0.03185 \cdot e^* - 0.01649 \cdot r^* - \\ & - 0.01962 \cdot s^* - 0.01351 \cdot e^{*2} - 0.01262 \cdot r^{*2} - 0.00537 \cdot s^{*2} - \\ & - 0.00813 \cdot e^* \cdot r^* - 0.00463 \cdot e^* \cdot s^* - 0.00788 \cdot r^* \cdot s^* \end{aligned} \quad (4.7)$$

$$\begin{aligned} f(e^*, r^*, s^*)_{CRX} = & 0.43121 - 0.00285 \cdot e^* - 0.02784 \cdot r^* - \\ & - 0.03349 \cdot s^* - 0.01251 \cdot e^{*2} - 0.02666 \cdot r^{*2} - 0.00102 \cdot s^{*2} - \\ & - 0.01088 \cdot e^* \cdot r^* + 0.00613 \cdot e^* \cdot s^* - 0.02013 \cdot r^* \cdot s^* \end{aligned} \quad (4.8)$$

$$\begin{aligned} f(e^*, r^*, s^*)_{CRY} = & 0.55061 - 0.06850 \cdot e^* - 0.00598 \cdot r^* - \\ & - 0.00308 \cdot s^* - 0.01501 \cdot e^{*2} + 0.00090 \cdot r^{*2} - 0.01148 \cdot s^{*2} - \\ & - 0.00375 \cdot e^* \cdot r^* - 0.01700 \cdot e^* \cdot s^* + 0.00800 \cdot r^* \cdot s^* \end{aligned} \quad (4.9)$$

Se puede observar, una vez realizado este análisis de los resultados obtenidos de la superficie artificial de huecos cilíndricos, que de los cuatro materiales usados para el estudio, el que mejor reproduce los datos de la hierba natural es el denominado como material 3. En consecuencia, ha sido el material seleccionado para analizar la superficie artificial con huecos prismáticos.

4.4.1 Superficie artificial con huecos prismáticos.

Se han utilizado para esta superficie artificial tres geometrías diferentes variando el ángulo de inclinación de los huecos creados. Se ha seleccionado el material 3 para las tres inclinaciones porque como se ha comprobado en el apartado anterior es el más aceptable de los cuatro materiales disponibles.

Primero se han utilizado huecos con un ángulo de inclinación de 90°. En esta superficie artificial, el coeficiente de restitución absoluto obtenido supera en muchos

**“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES
ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”**

experimentos el máximo valor del rango establecido de calidad media para la hierba natural. La gran mayoría de los valores del coeficiente de restitución horizontal entran dentro del rango mientras que los valores del coeficiente de restitución vertical superan todos ellos el valor máximo establecido aunque algunos de ellos son bastante cercanos. Para la obtención de los coeficientes de restitución se procede de la misma manera que en el apartado anterior con las ecuaciones (4.10), (4.11) y (4.12).

$$\begin{aligned} f(e^*, h^*, s^*)_{CRA} = & 0.48872 - 0.00423 \cdot e^* + 0.00899 \cdot h^* - \\ & - 0.00508 \cdot s^* - 0.01846 \cdot e^{*2} - 0.00821 \cdot h^{*2} + 0.00187 \cdot s^{*2} + \\ & + 0.01483 \cdot e^* \cdot h^* + 0.01025 \cdot e^* \cdot s^* + 0.00300 \cdot h^* \cdot s^* \end{aligned} \quad (4.10)$$

$$\begin{aligned} f(e^*, h^*, s^*)_{CRX} = & 0.40858 + 0.04164 \cdot e^* + 0.03061 \cdot h^* - \\ & - 0.00591 \cdot s^* - 0.02577 \cdot e^{*2} - 0.00120 \cdot h^{*2} + 0.00852 \cdot s^{*2} + \\ & + 0.02218 \cdot e^* \cdot h^* - 0.00825 \cdot e^* \cdot s^* - 0.00400 \cdot h^* \cdot s^* \end{aligned} \quad (4.11)$$

$$\begin{aligned} f(e^*, h^*, s^*)_{CRY} = & 0.59640 - 0.05188 \cdot e^* - 0.01472 \cdot h^* - \\ & - 0.00338 \cdot s^* - 0.01643 \cdot e^{*2} - 0.01714 \cdot h^{*2} - 0.00494 \cdot s^{*2} + \\ & + 0.00392 \cdot e^* \cdot h^* + 0.02780 \cdot e^* \cdot s^* + 0.00830 \cdot h^* \cdot s^* \end{aligned} \quad (4.12)$$

A continuación se comentan los resultados obtenidos para el ángulo de inclinación de 120°. El coeficiente de restitución absoluto en este caso supera en algunos experimentos el valor máximo del rango establecido. Como ocurriría con el ángulo de inclinación de 90°, todos los valores del coeficiente de restitución horizontal son válidos. Por último, varios valores del coeficiente de restitución vertical entran dentro del rango de valores para la hierba natural. Para la obtención de los coeficientes de restitución de esta inclinación se pueden utilizar las ecuaciones (4.13), (4.14) y (4.15).



$$\begin{aligned} f(e^*, h^*, s^*)_{CRA} = & 0.46530 - 0.00067 \cdot e^* - 0.00518 \cdot h^* + \\ & + 0.00797 \cdot s^* - 0.01966 \cdot e^{*2} - 0.01356 \cdot h^{*2} - 0.00357 \cdot s^{*2} - \\ & - 0.00286 \cdot e^* \cdot h^* + 0.01811 \cdot e^* \cdot s^* + 0.01501 \cdot h^* \cdot s^* \end{aligned} \quad (4.13)$$

$$\begin{aligned} f(e^*, h^*, s^*)_{CRX} = & 0.40906 + 0.03113 \cdot e^* + 0.02010 \cdot h^* + \\ & + 0.00847 \cdot s^* - 0.02077 \cdot e^{*2} - 0.01189 \cdot h^{*2} + 0.00259 \cdot s^{*2} - \\ & - 0.00063 \cdot e^* \cdot h^* + 0.00980 \cdot e^* \cdot s^* + 0.00747 \cdot h^* \cdot s^* \end{aligned} \quad (4.14)$$

$$\begin{aligned} f(e^*, h^*, s^*)_{CRY} = & 0.54424 - 0.03976 \cdot e^* - 0.03695 \cdot h^* + \\ & + 0.00859 \cdot s^* - 0.02386 \cdot e^{*2} - 0.01693 \cdot h^{*2} - 0.01037 \cdot s^{*2} - \\ & - 0.00964 \cdot e^* \cdot h^* + 0.02679 \cdot e^* \cdot s^* + 0.02264 \cdot h^* \cdot s^* \end{aligned} \quad (4.15)$$

Para la última inclinación estudiada, la correspondiente a un ángulo de 135°, la gran mayoría de los valores del coeficiente de restitución absolutos están dentro de los valores límite del rango de calidad media, y los pocos que no están en este rango, lo superan pero son muy cercanos a él. Los valores del coeficiente de restitución horizontal son válidos exceptuando un par de experimentos. En este caso, los valores del coeficiente de restitución vertical son muy amplios, aunque muchos de ellos son válidos comparados con el rango seleccionado de calidad media de la hierba natural. Para la obtención de los coeficientes de restitución, se procede como en los casos anteriores utilizando las ecuaciones (4.16), (4.17) y (4.18) que definen la superficie de respuesta CRA, CRX y CRY respectivamente.



$$\begin{aligned} f(e^*, h^*, s^*)_{CRA} = & 0.40134 - 0.00568 \cdot e^* - 0.01149 \cdot h^* + \\ & + 0.03246 \cdot s^* - 0.00277 \cdot e^{*2} + 0.00837 \cdot h^{*2} - 0.00577 \cdot s^{*2} + \\ & + 0.02039 \cdot e^* \cdot h^* + 0.01164 \cdot e^* \cdot s^* + 0.032641 \cdot h^* \cdot s^* \end{aligned} \quad (4.16)$$

$$\begin{aligned} f(e^*, h^*, s^*)_{CRX} = & 0.38261 + 0.05331 \cdot e^* + 0.04232 \cdot h^* + \\ & + 0.03162 \cdot s^* - 0.01352 \cdot e^{*2} + 0.01777 \cdot h^{*2} + 0.00221 \cdot s^{*2} + \\ & + 0.01786 \cdot e^* \cdot h^* + 0.00911 \cdot e^* \cdot s^* + 0.05361 \cdot h^* \cdot s^* \end{aligned} \quad (4.17)$$

$$\begin{aligned} f(e^*, h^*, s^*)_{CRY} = & 0.42699 - 0.09419 \cdot e^* - 0.11077 \cdot h^* + \\ & + 0.03213 \cdot s^* - 0.00140 \cdot e^{*2} - 0.02526 \cdot h^{*2} - 0.01572 \cdot s^{*2} - \\ & - 0.00074 \cdot e^* \cdot h^* + 0.01776 \cdot e^* \cdot s^* + 0.00226 \cdot h^* \cdot s^* \end{aligned} \quad (4.18)$$



CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

5.1. CONCLUSIONES

El presente estudio está basado en la determinación de superficies de respuesta a partir de la técnica de diseño de experimentos. Se ha comprobado que es posible, en todos los casos, ajustar el comportamiento de los coeficientes de restitución de las superficies artificiales analizadas a partir de un modelo cuadrático con tres factores.

En este estudio se han analizado dos geometrías diferentes de superficie artificial. En la primera se han escogido huecos cilíndricos y se han utilizado cuatro tipos de caucho diferentes, denominados como material 1, 2, 3 y 4. El material 2 se ha desestimado ya que se ha comprobado que es un material demasiado blando para esta aplicación, haciendo que el coeficiente de restitución vertical no llegue al mínimo establecido para la calidad media de la hierba natural.

Con los tres materiales restantes, se ha decidido seleccionar el mejor de todos ellos para proceder a la realización de la segunda superficie artificial, la correspondiente a los huecos prismáticos. Los valores del coeficiente de restitución vertical del material 4 son demasiado elevados por lo tanto no es conveniente su utilización. Tanto para el material 1 como para el material 3, los valores obtenidos de los coeficientes de restitución son aceptables, siendo los del material 3 más próximos al comportamiento de la hierba natural. Por lo tanto el material 3 ha sido el seleccionado para realizar el diseño de experimentos correspondiente a la superficie artificial con huecos prismáticos.

Para esta superficie artificial se ha variado el ángulo de inclinación de los huecos prismáticos para tres posiciones, las correspondientes a 90°, 120° y 135°. Según se ha observado en el análisis de resultados, en la inclinación a 90° muchos de los valores



“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”

de los coeficientes de restitución no entraban dentro del rango correspondiente. En la inclinación a 120° se observa una mejoría en los resultados ya que más valores son válidos para la calidad media seleccionada. Por último, en la inclinación a 135° los coeficientes de restitución absoluto y horizontal son válidos, mientras que los valores del coeficiente de restitución vertical son muy amplios, aunque muchos de ellos son válidos comparados con el rango seleccionado de calidad media de la hierba natural, por lo que esta inclinación puede ser considerada como la más favorable.

Tras la realización de este estudio, se puede concluir que para la fabricación de la superficie artificial el mejor material es el material 3. Tanto la superficie artificial con huecos cilíndricos como la de huecos prismáticos con inclinación a 135° son válidas para obtener unos coeficientes de restitución dentro del rango de valores establecido para la calidad media de hierba natural.

5.2. TRABAJO FUTURO

En el apartado anterior se ha concluido que tanto la superficie artificial con huecos cilíndricos como la superficie artificial con huecos prismáticos con inclinación a 135° son válidas. La decisión de cuál de las dos geometrías a seleccionar será del fabricante. Para ello deberá tener en cuenta la facilidad de la fabricación de las superficies ya que se realizará mediante extrusión y será necesario diseñar el correspondiente molde.

Otro parámetro importante a tener en cuenta es el coste, por ejemplo, cuanto menor sea el material utilizado menor será este, por lo tanto con ayuda de las superficies de respuesta desarrolladas será posible seleccionar una configuración de geometría válida en la que el volumen sea lo menor posible.

También será necesario definir un cuaderno de cargas que deberá cumplir la superficie artificial definitiva, por ejemplo en lo referente a poder soportar el peso de una persona o carrito de golf. En este sentido y para ahorrar costes, se puede hacer uso de la simulación numérica para validar la superficie artificial sin necesidad de llegar a fabricarla.



CAPÍTULO 6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Patente 3,661,687 del 9 de Mayo de 1972 por Spinney, Jr. et al
- [2] Patente US 6,221,445 B1 del 21 de Abril de 2001 por Jones
- [3] Patente US 7,144,609 B2 del 5 de Diciembre de 2006 por Reddick
- [4] <http://www.greenlandgolf.com/>
- [5] <http://www.envylawn.com/spanish/>
- [6] <http://www.backninegreens.com/putting-greens>
- [7] <http://www.verdalia.es/>
- [8] <http://www.progreen.com/>
- [9] <http://www.tourgreens-europe.com>
- [10] <http://www.intelliturf.com/>
- [11] <http://www.southwestgreens.es/>
- [12] <http://www.synthetic-turf.com/>
- [13] <http://www.designturf.ca/>
- [14] <http://www.cesped-sintetico-greenfields.com/>



[15] <http://www.perfectlygreen.co.uk/>

[16] <http://www.syntheticurf.com.au/>

[17] <http://www.pro-putt.com/>

[18] <http://www.evergreensuk.com/>

[19] Documentación de Abaqus.



ANEXO 1

**Variación de la respuesta de la superficie artificial con huecos cilíndricos
utilizando el material 1.**



“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”

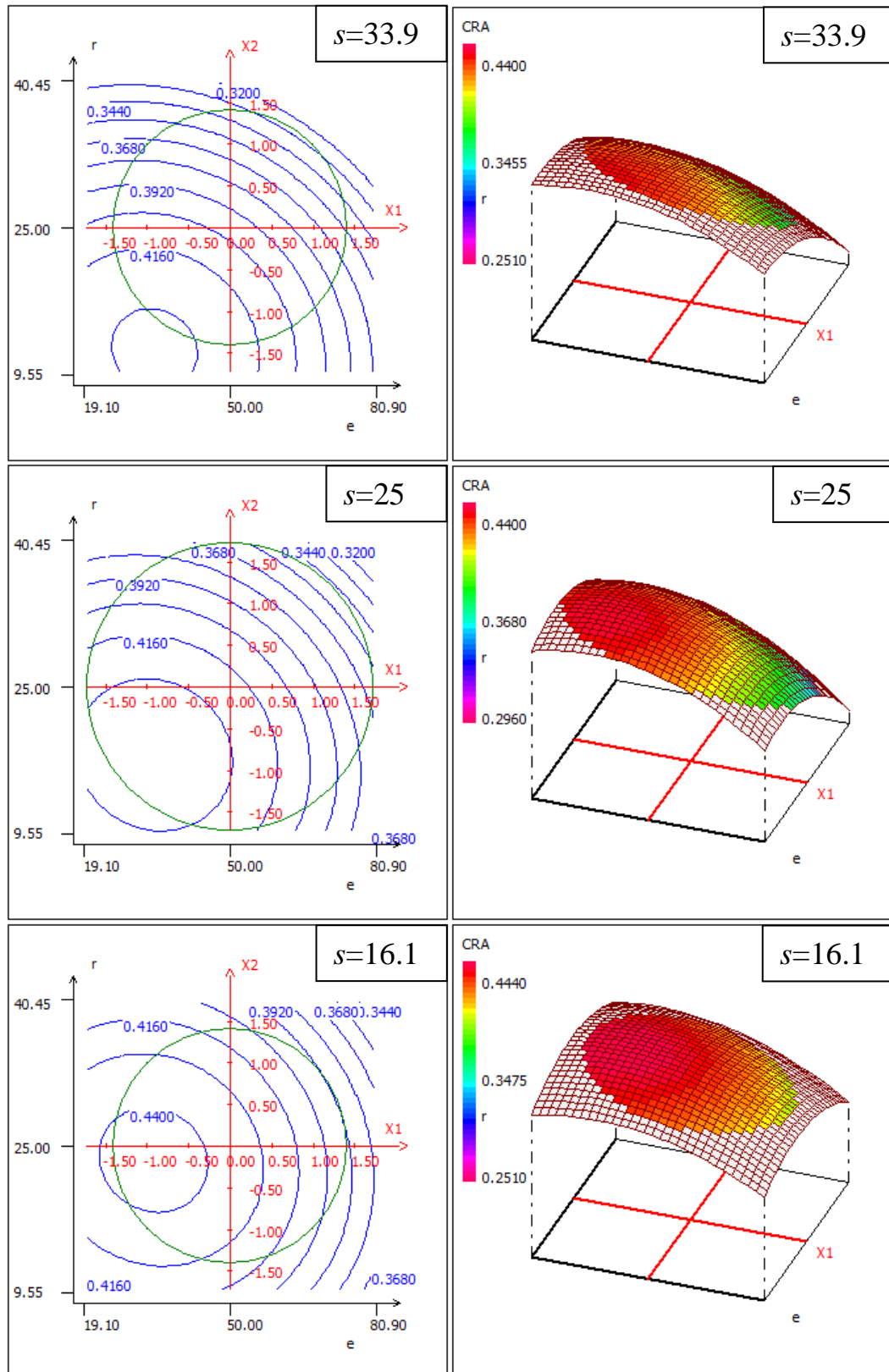


Figura 9. Variación de la respuesta CRA en función de e y r fijado s .



“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”

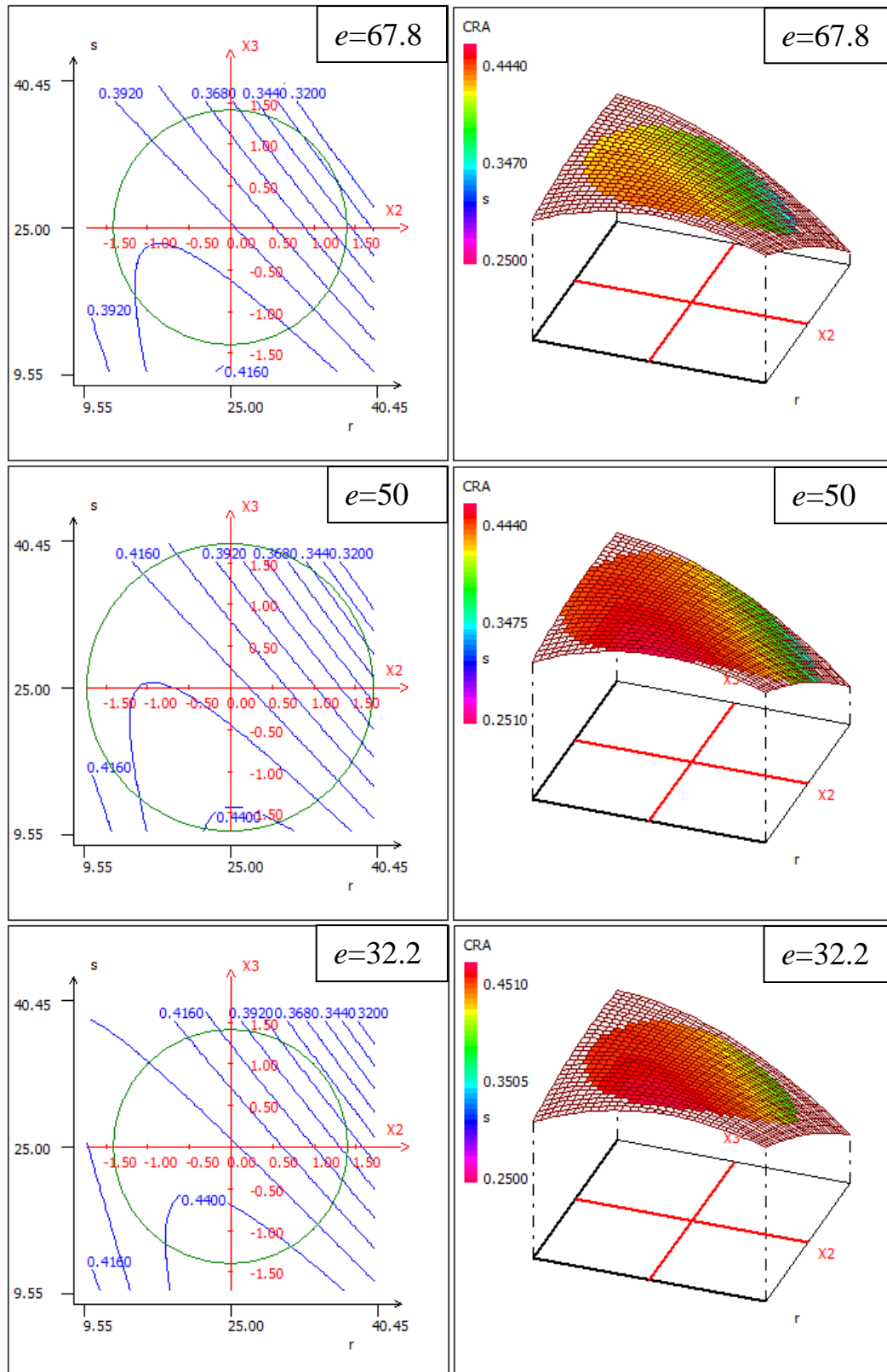


Figura 10. Variación de la respuesta CRA en función de r y s fijado e .



“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”

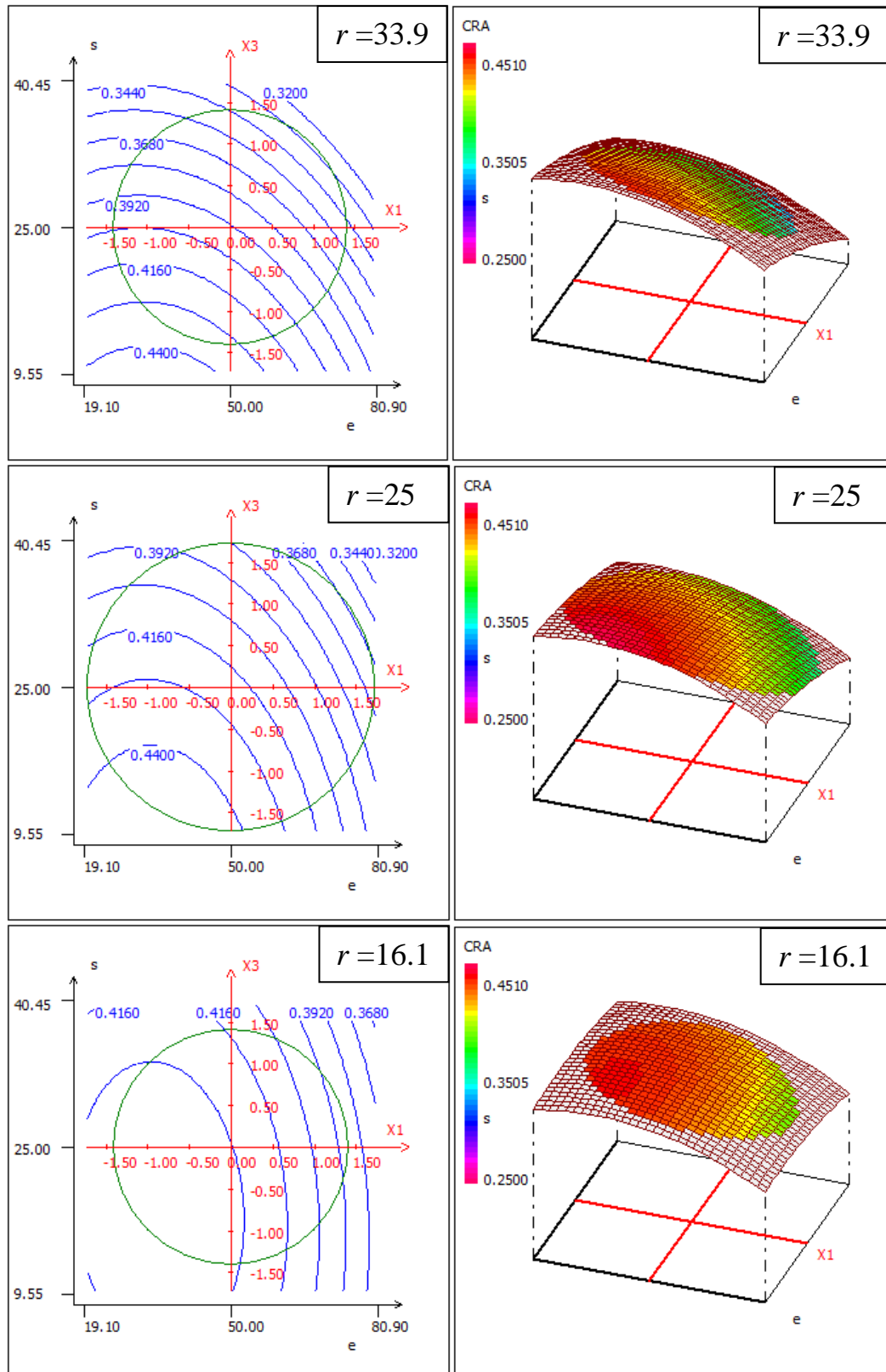


Figura 11. Variación de la respuesta CRA en función de e y s fijado r .



“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”

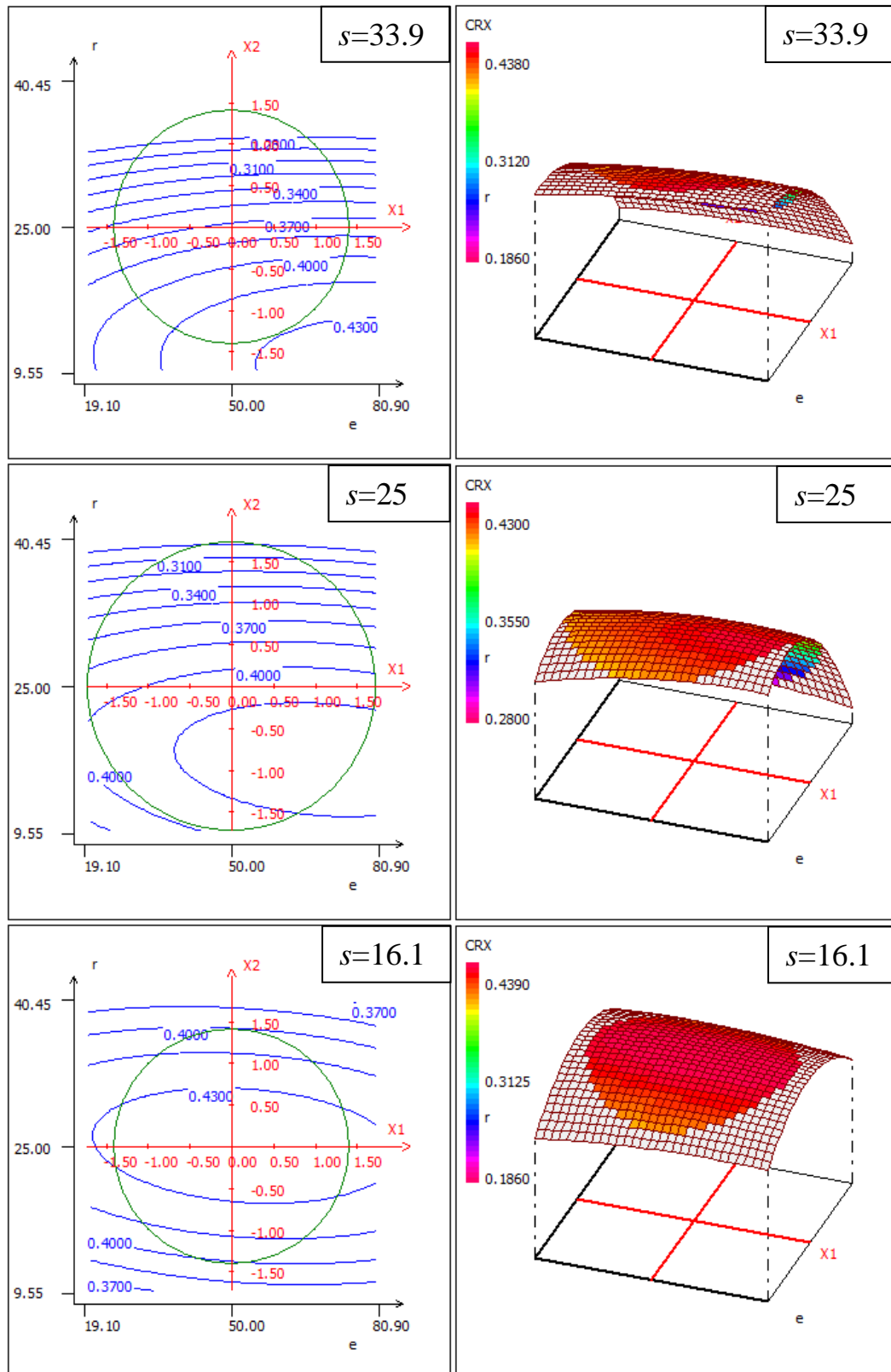


Figura 12. Variación de la respuesta CRX en función de e y r fijado s .



“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”

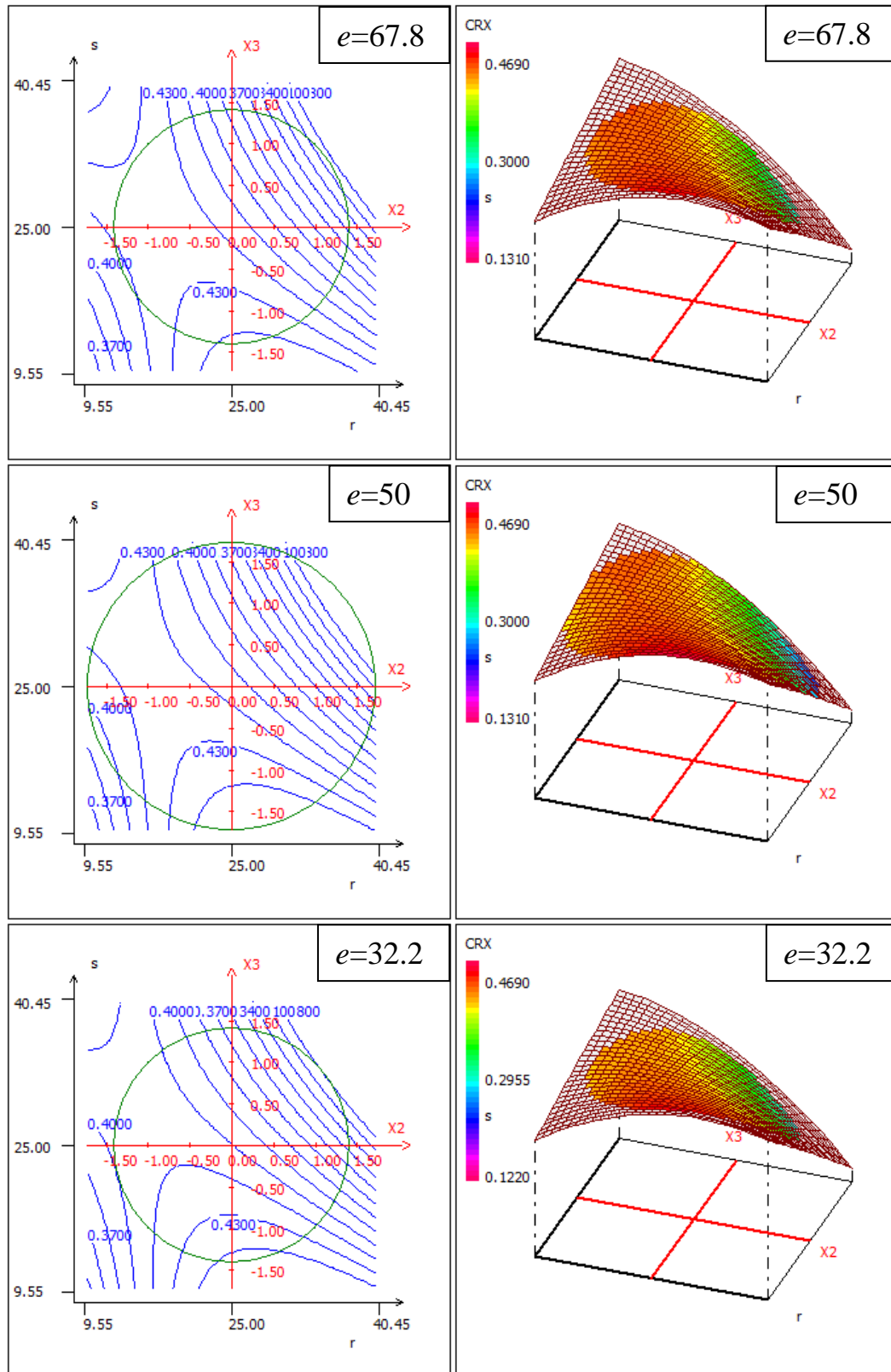


Figura 13. Variación de la respuesta CRX en función de r y s fijado e .



“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”

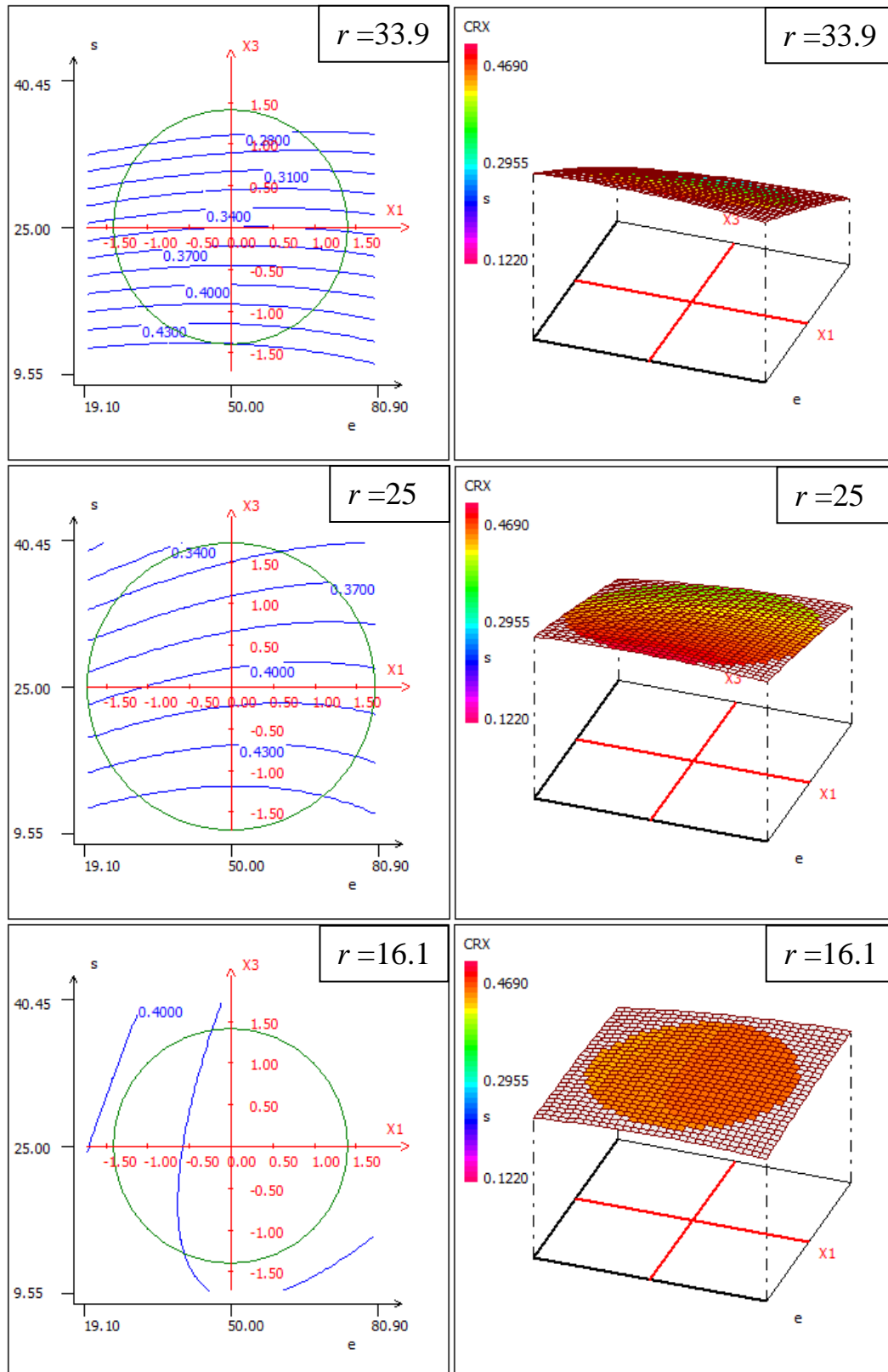


Figura 14. Variación de la respuesta CRX en función de e y s fijado r .



“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”

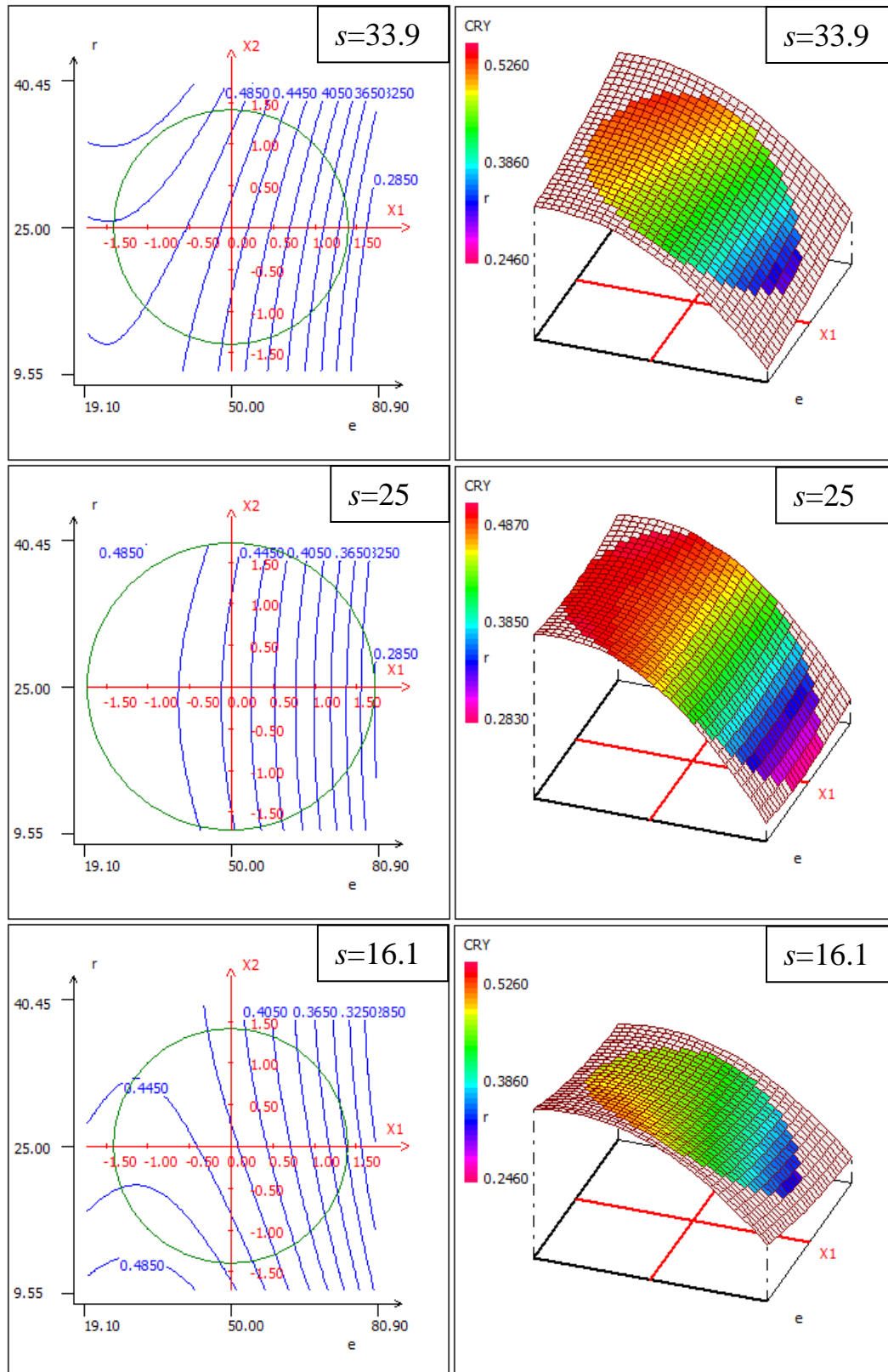


Figura 15. Variación de la respuesta CRY en función de e y r fijado s .



“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”

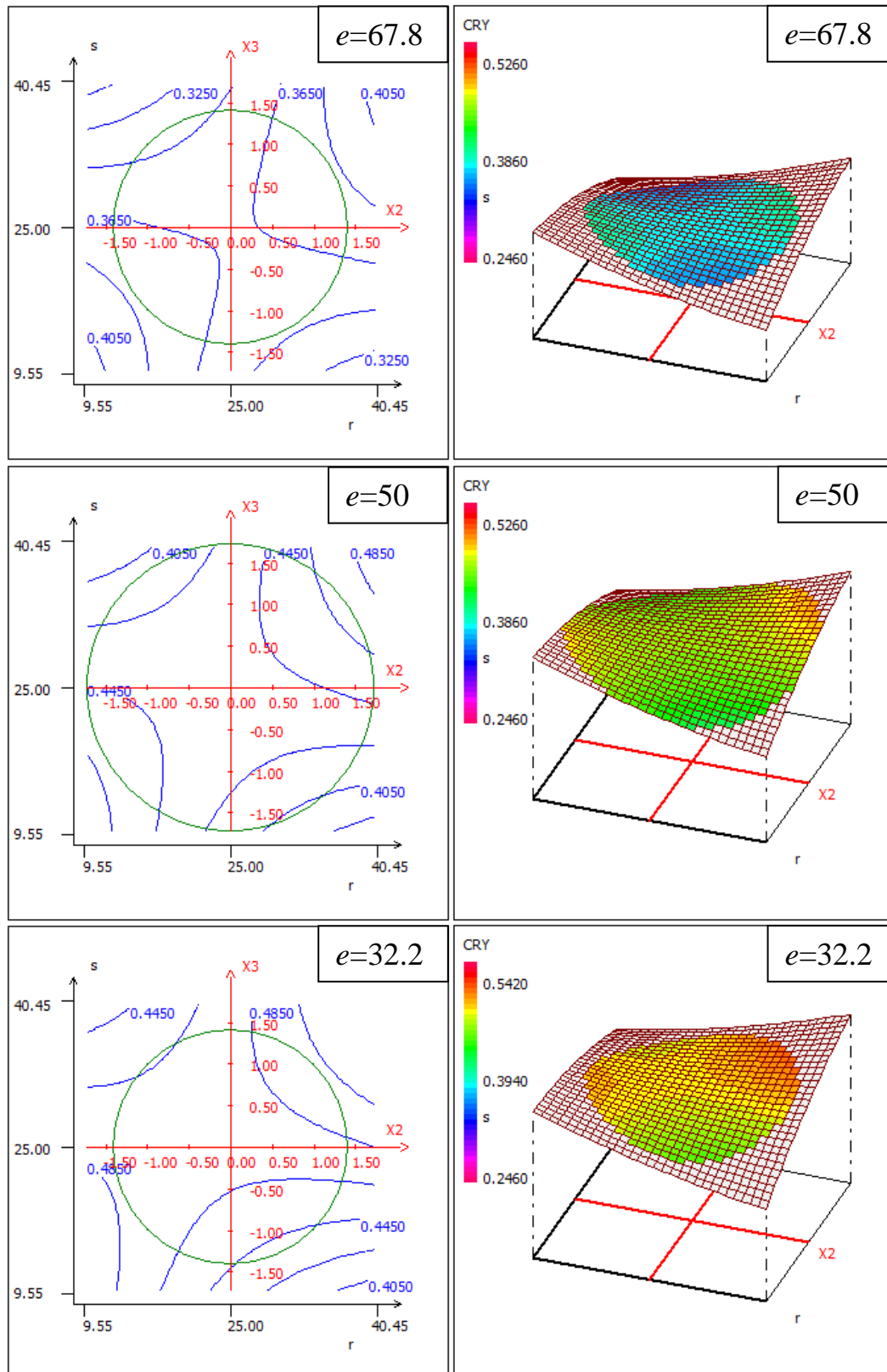


Figura 16. Variación de la respuesta CRY en función de r y s fijado e .



“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”

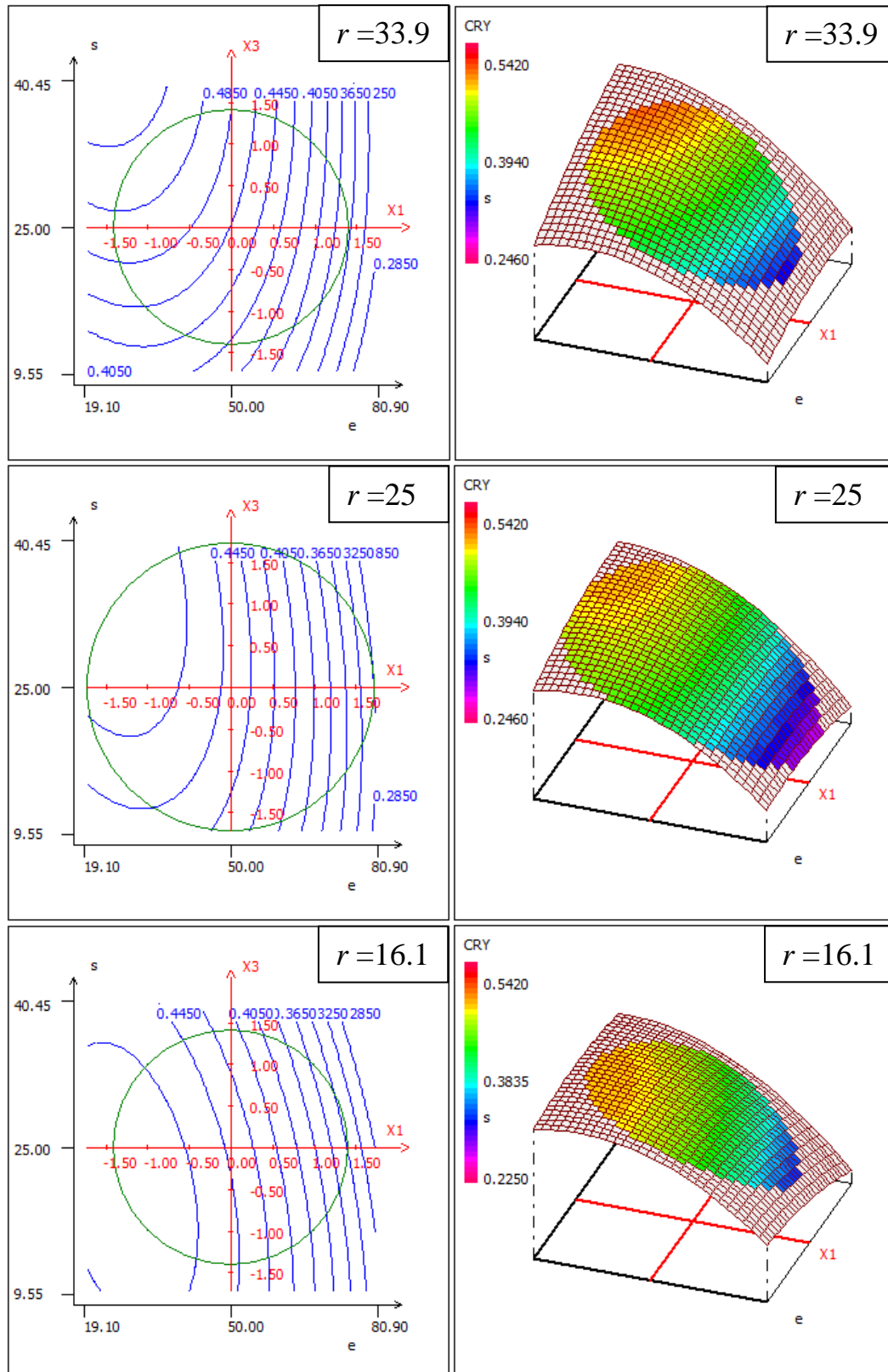


Figura 17. Variación de la respuesta CRY en función de e y s fijado r.



ANEXO 2

**Variación de la respuesta de la superficie artificial con huecos cilíndricos
utilizando el material 3.**



“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”

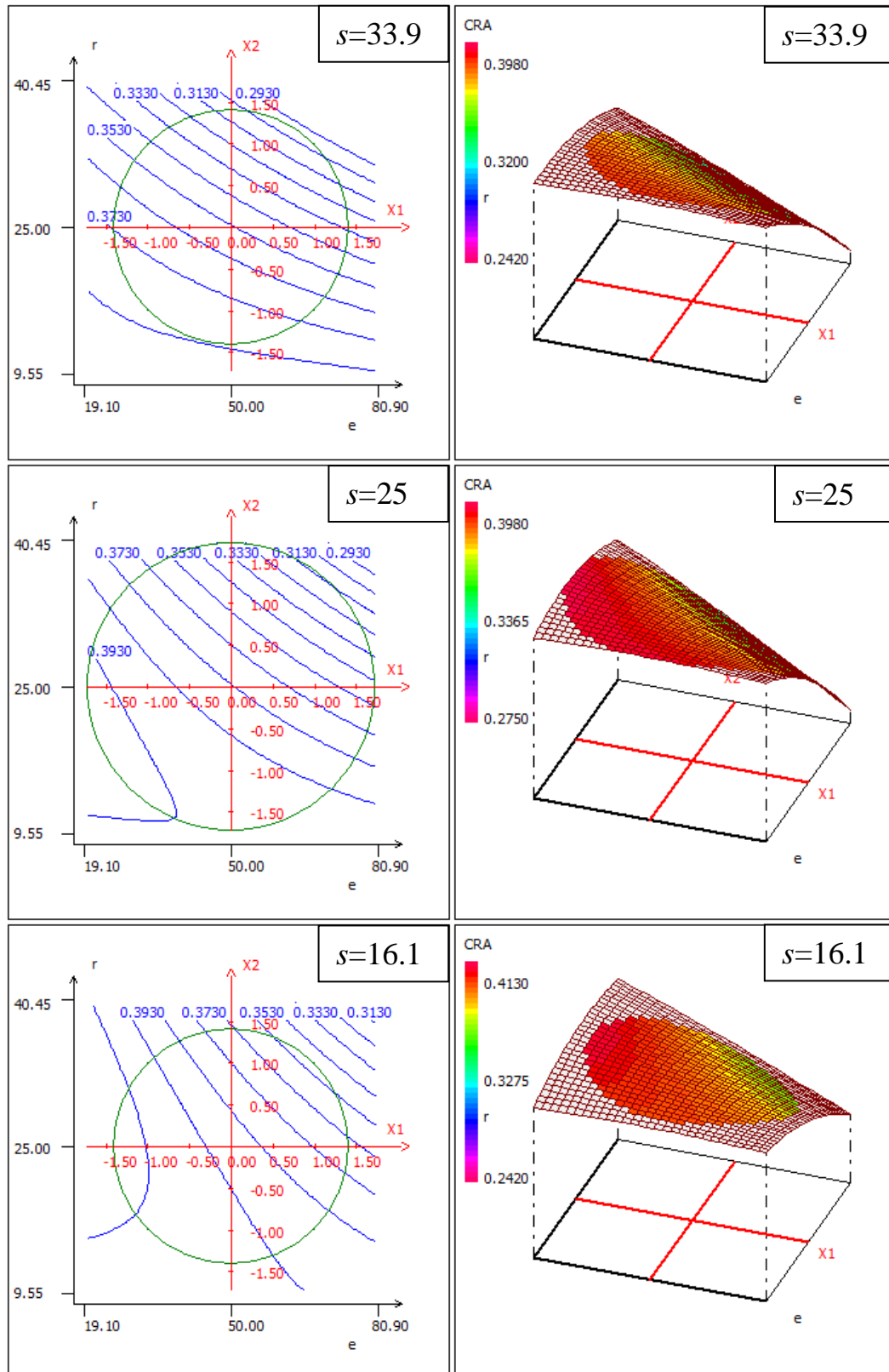


Figura 18. Variación de la respuesta CRA en función de e y r fijado s .



“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”

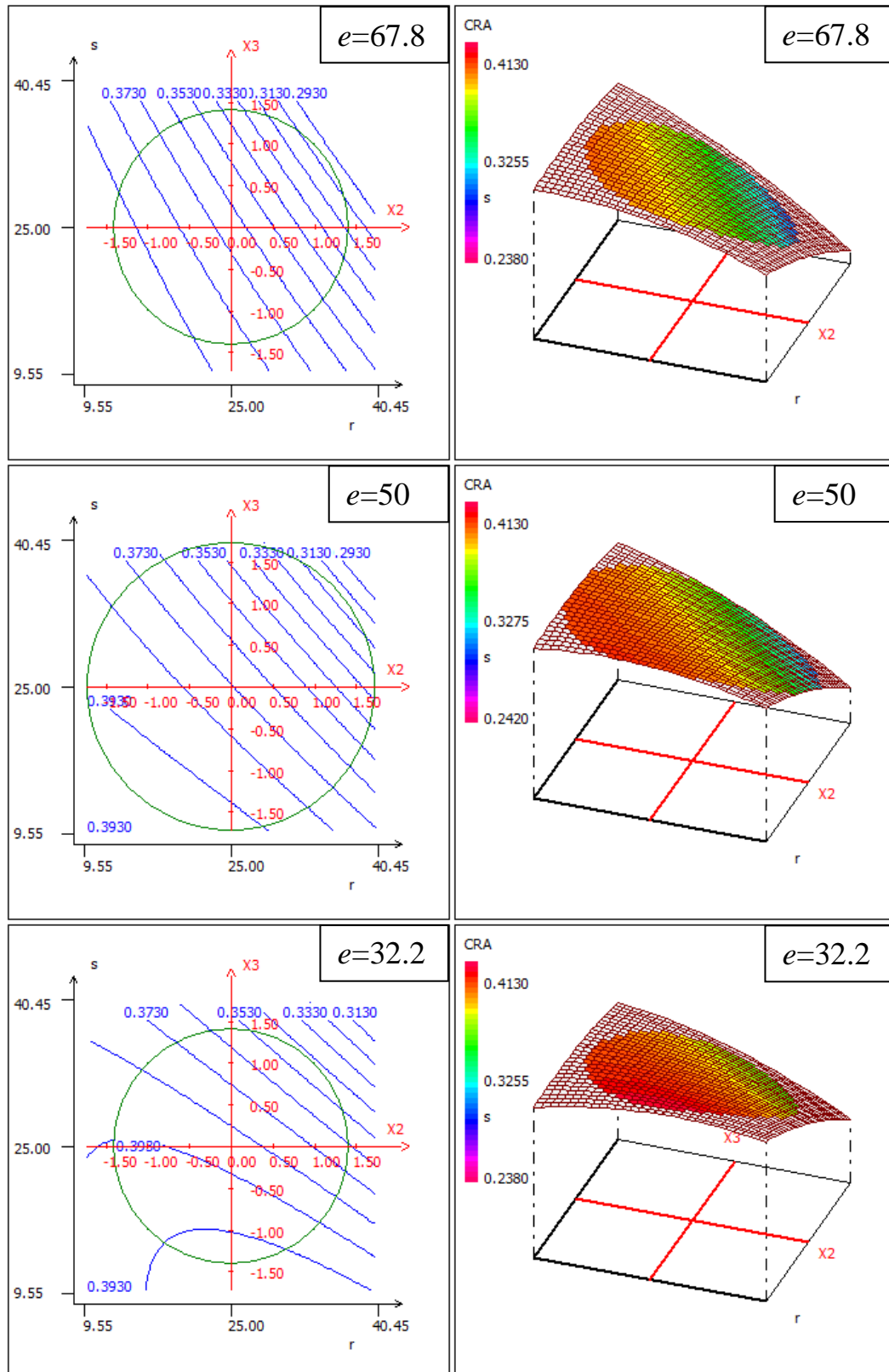


Figura 19. Variación de la respuesta CRA en función de r y s fijado e .



“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”

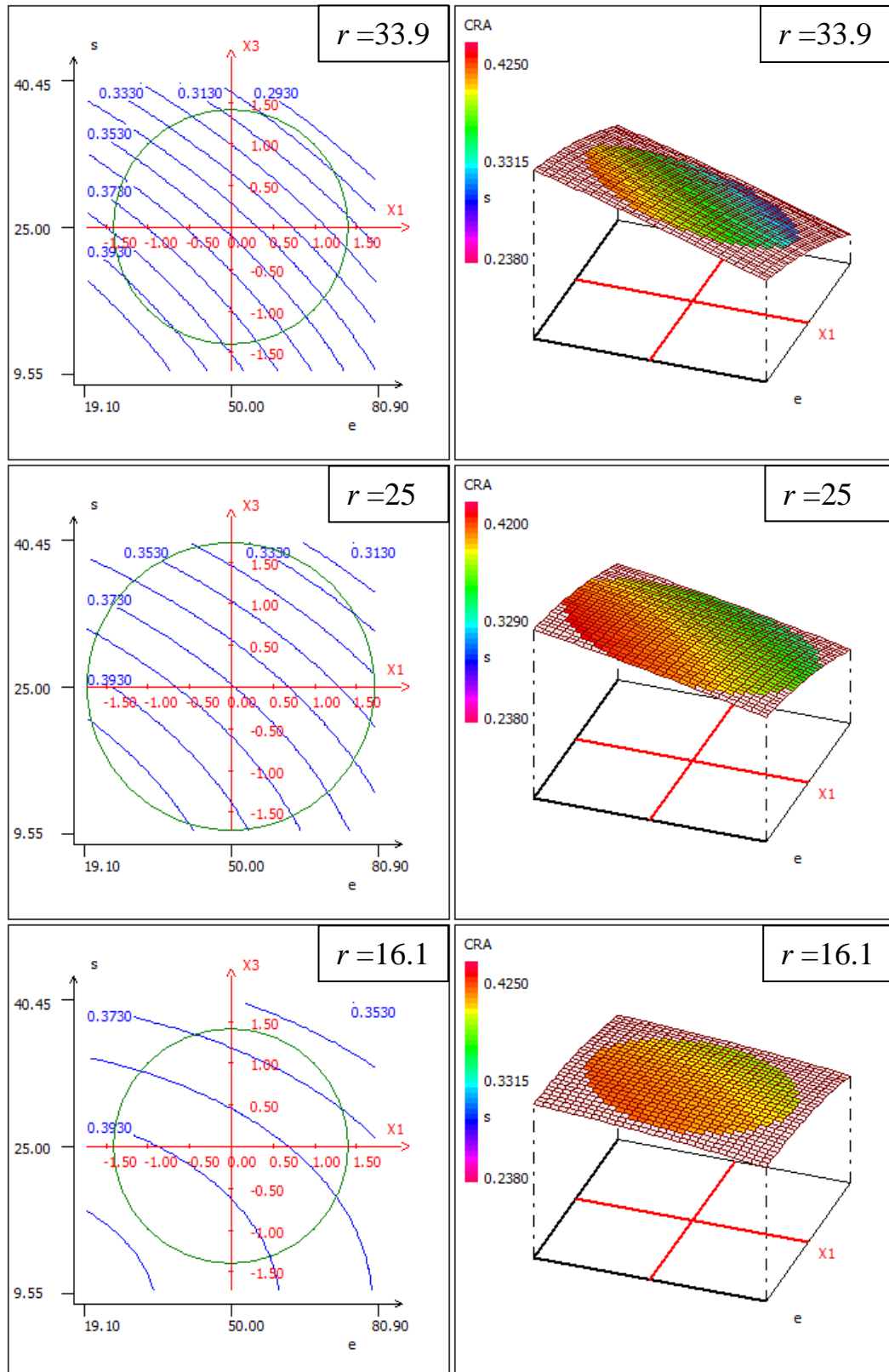


Figura 20. Variación de la respuesta CRA en función de e y s fijado r.



“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”

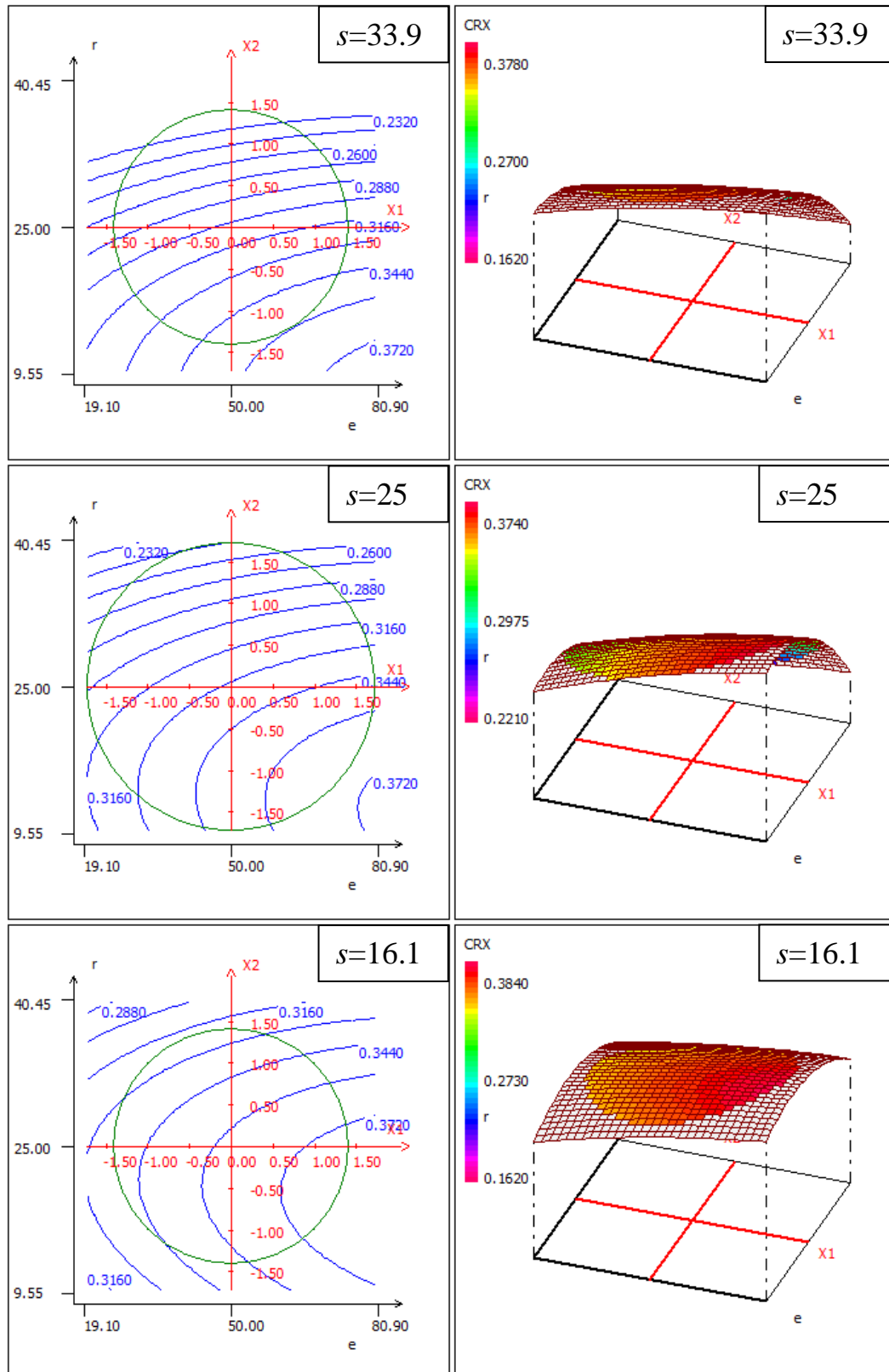


Figura 21. Variación de la respuesta CRX en función de e y r fijado s .



“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”

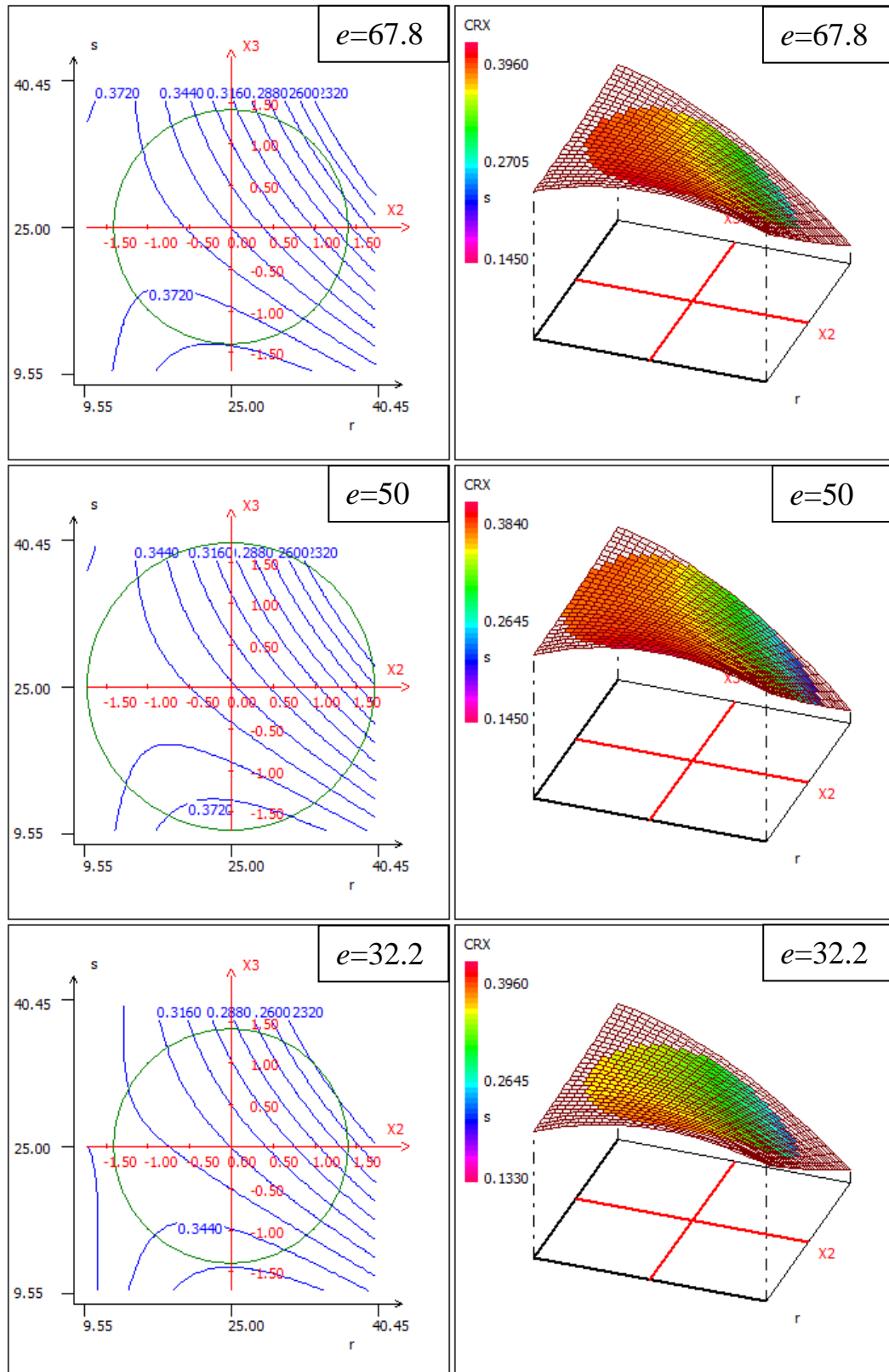


Figura 22. Variación de la respuesta CRX en función de r y s fijado e .



“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”

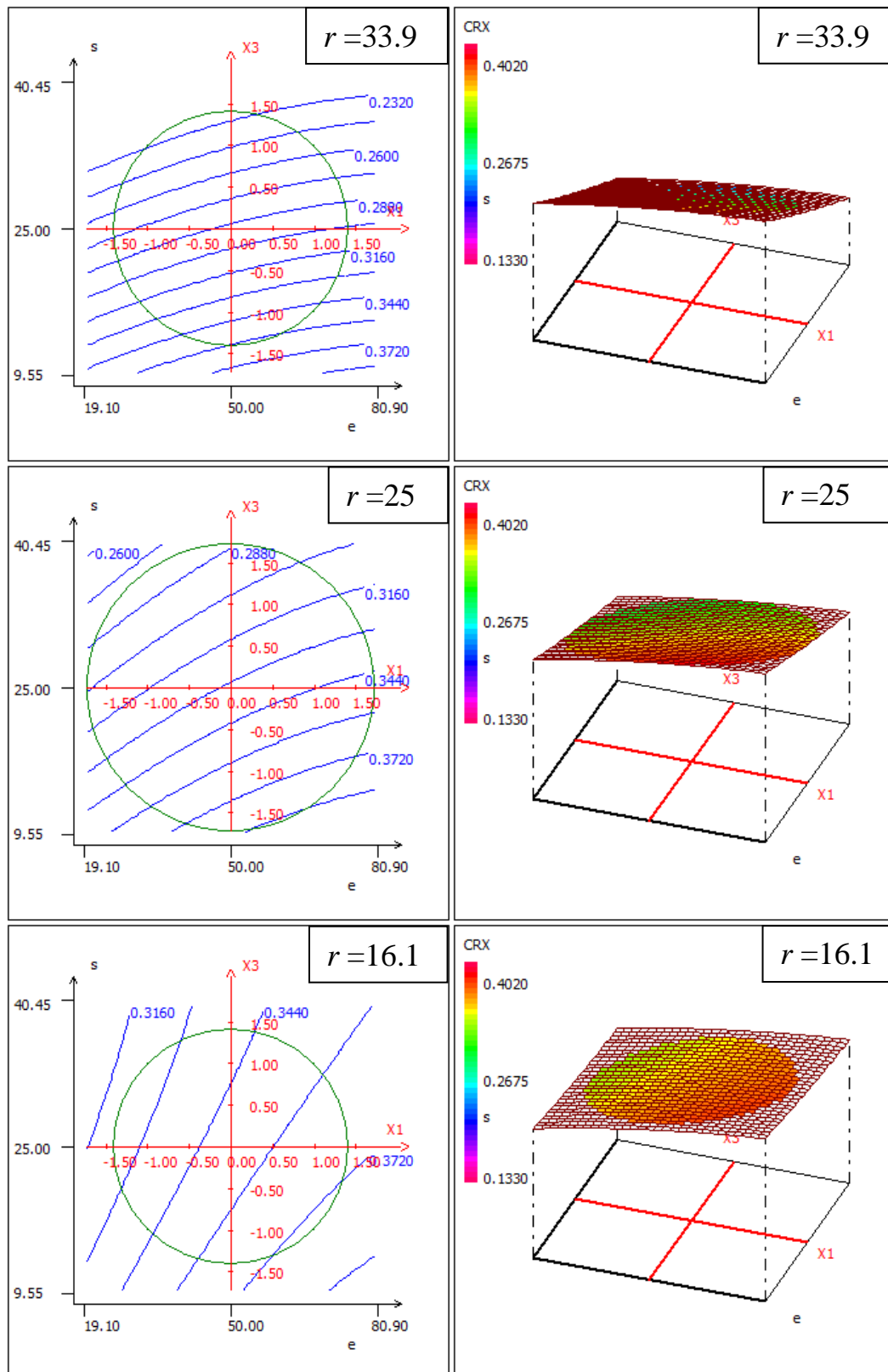


Figura 23. Variación de la respuesta CRX en función de e y s fijado r .



“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”

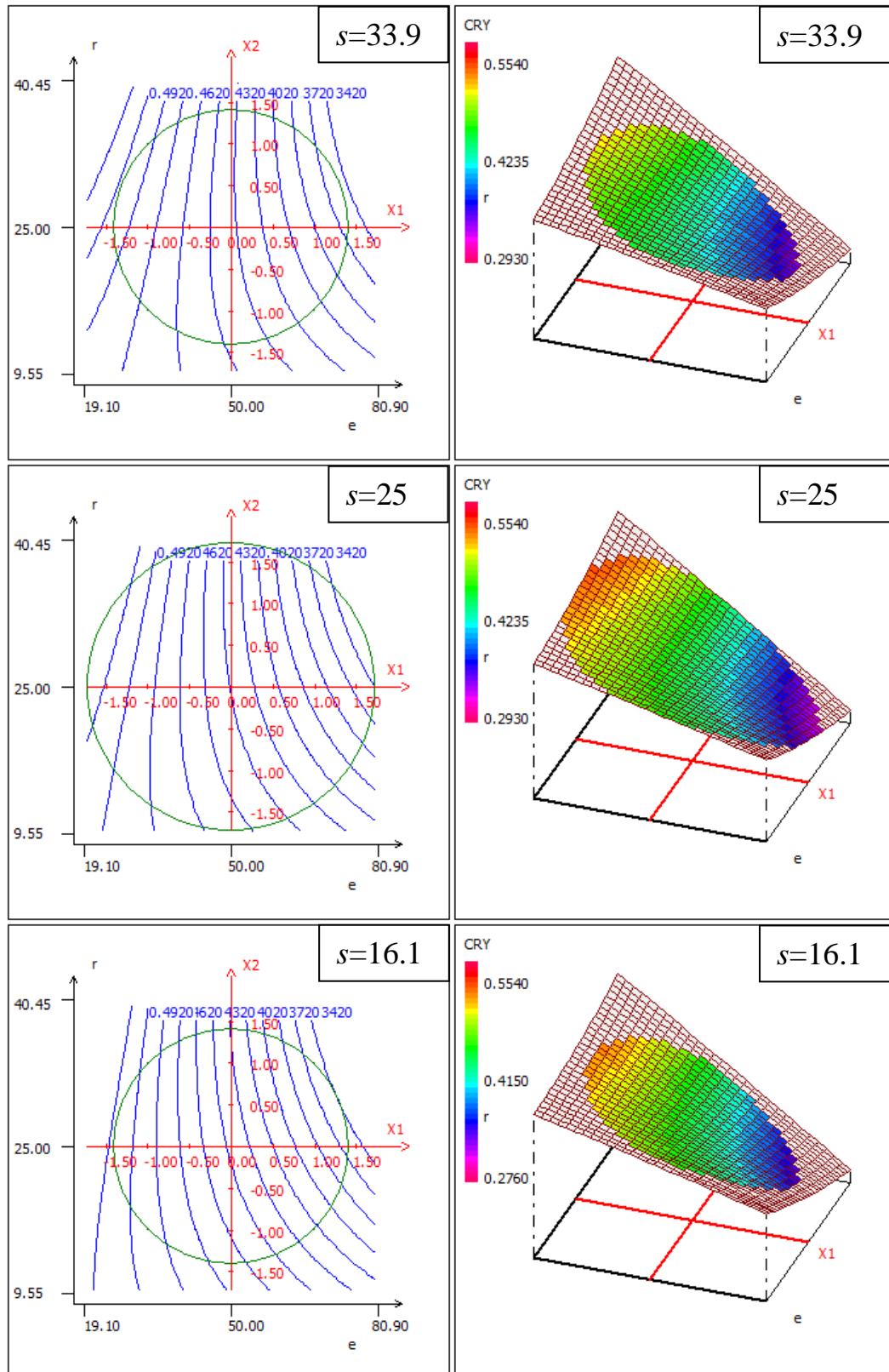


Figura 24. Variación de la respuesta CRY en función de e y r fijado s .



“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”

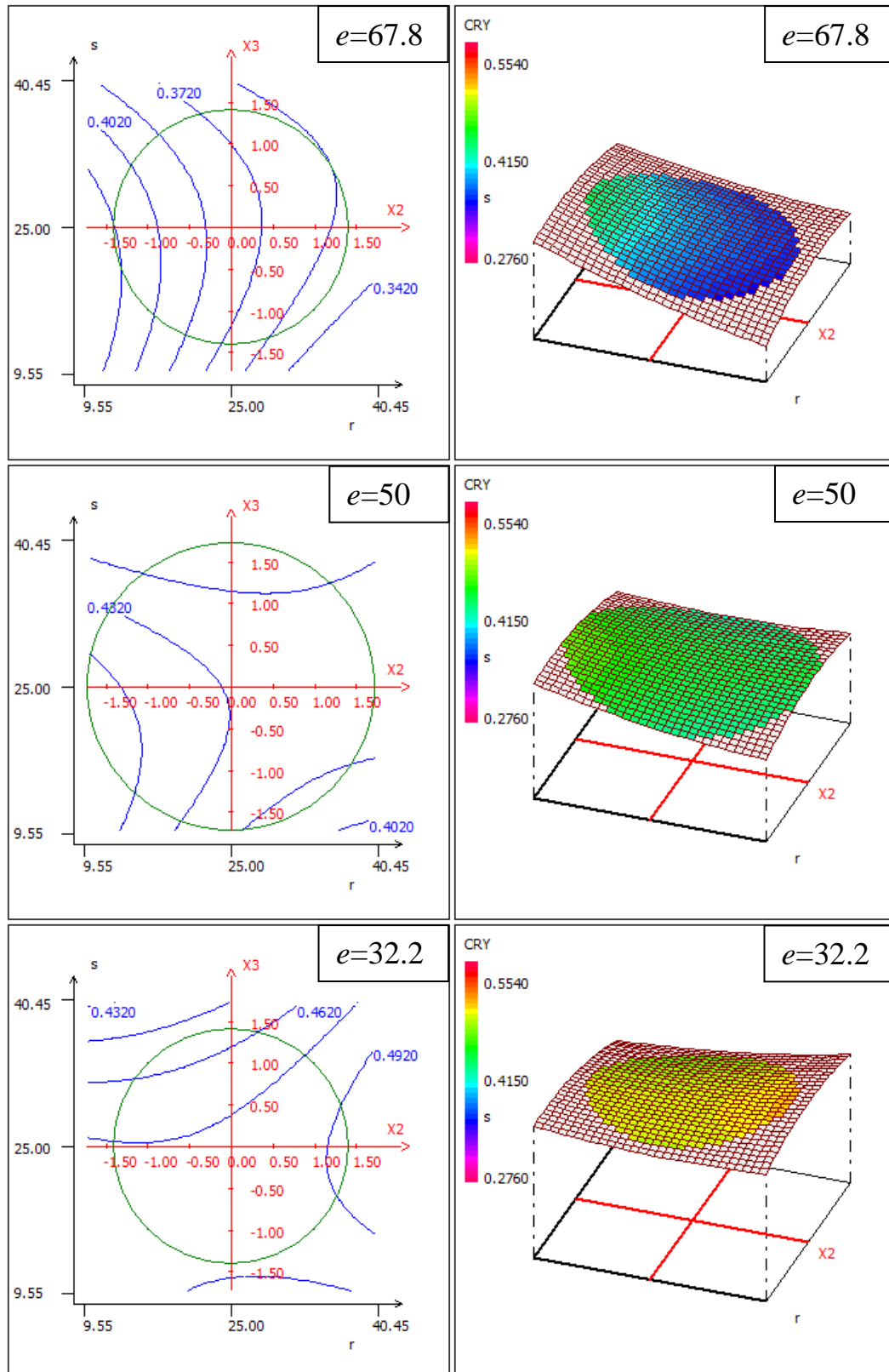


Figura 25. Variación de la respuesta CRY en función de r y s fijado e .



“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”

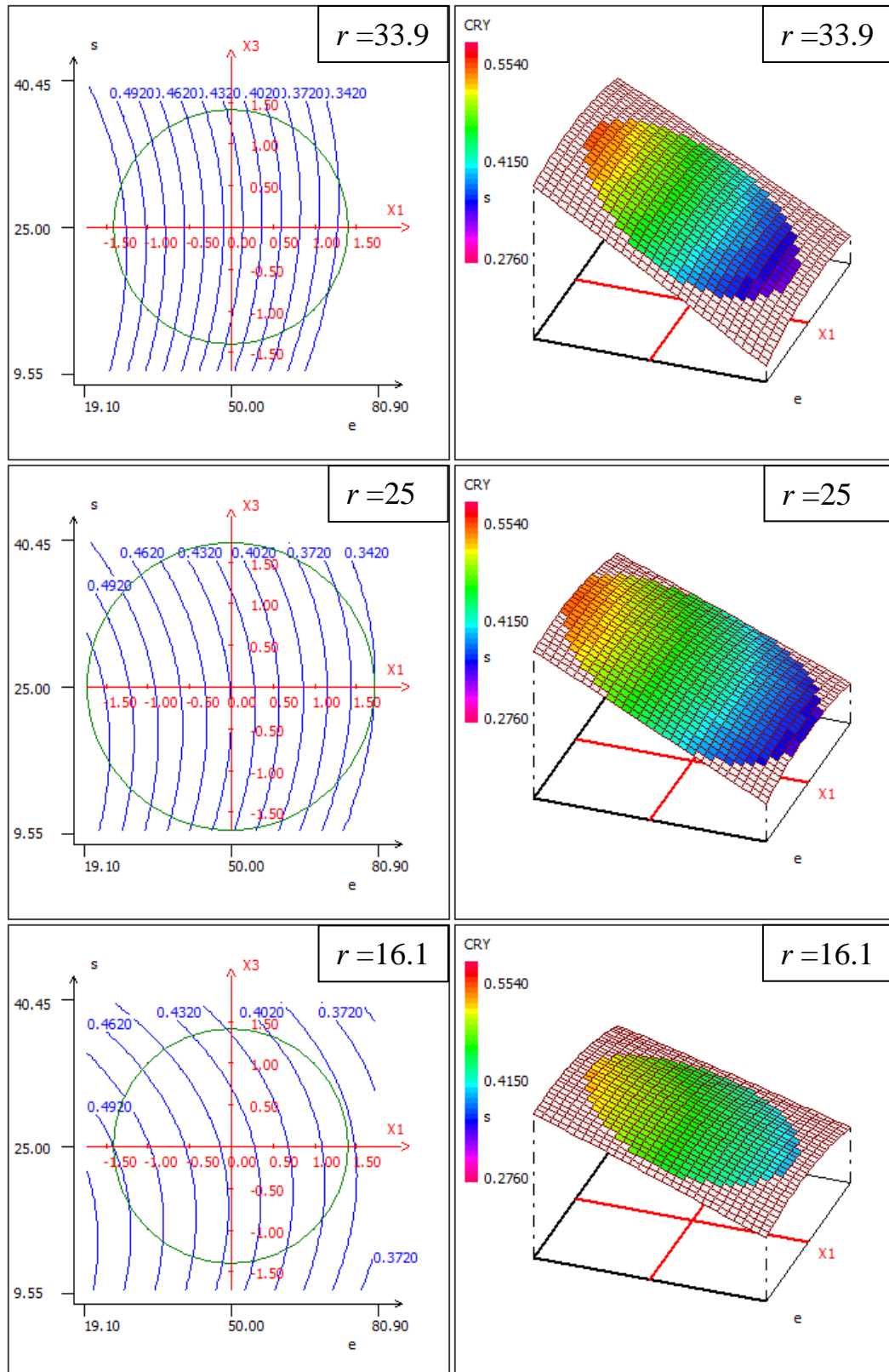


Figura 26. Variación de la respuesta CRY en función de e y s fijado r .



ANEXO 3

**Variación de la respuesta de la superficie artificial con huecos cilíndricos
utilizando el material 4.**



“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”

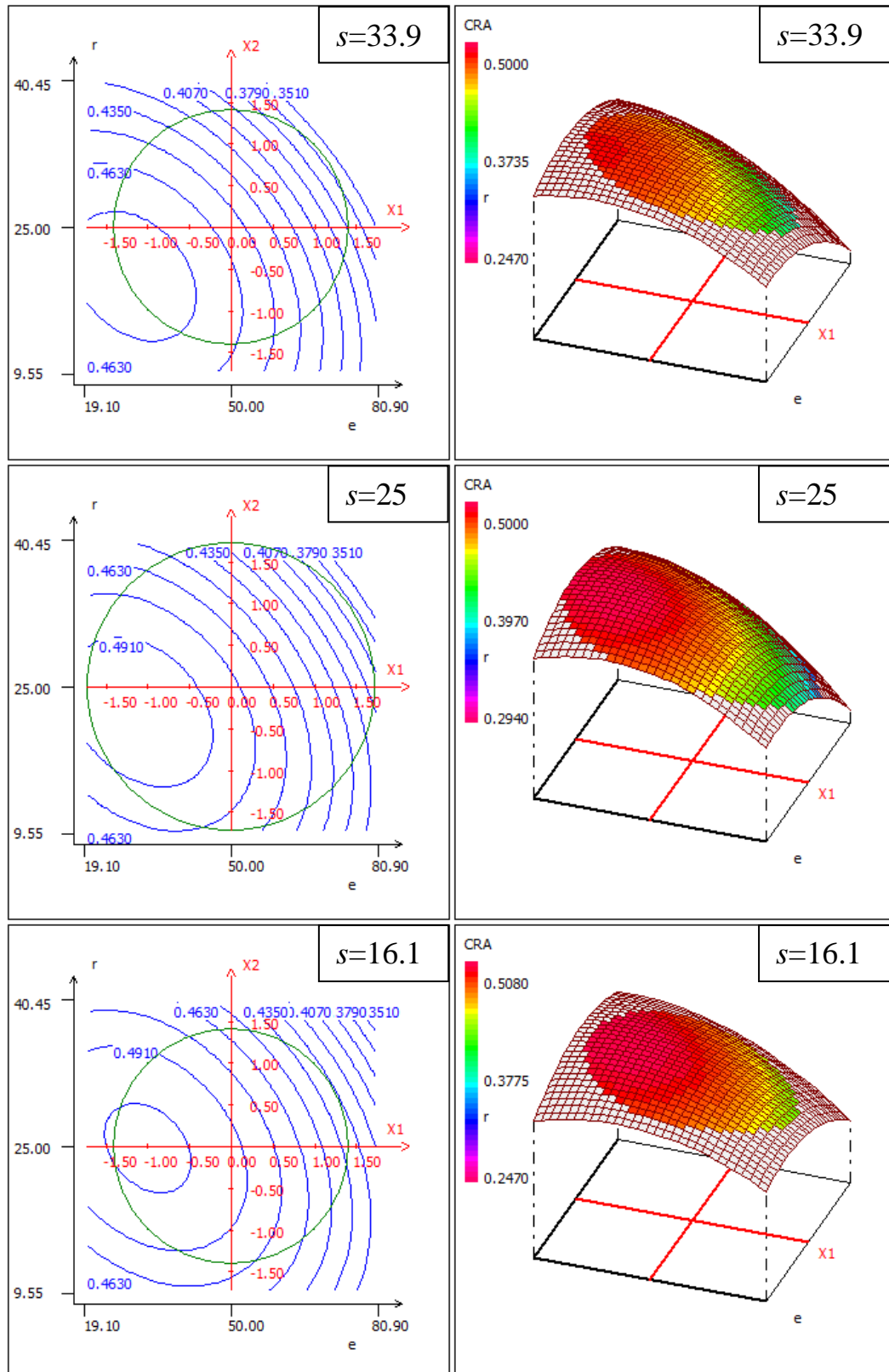


Figura 27. Variación de la respuesta CRA en función de e y r fijado s .



“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”

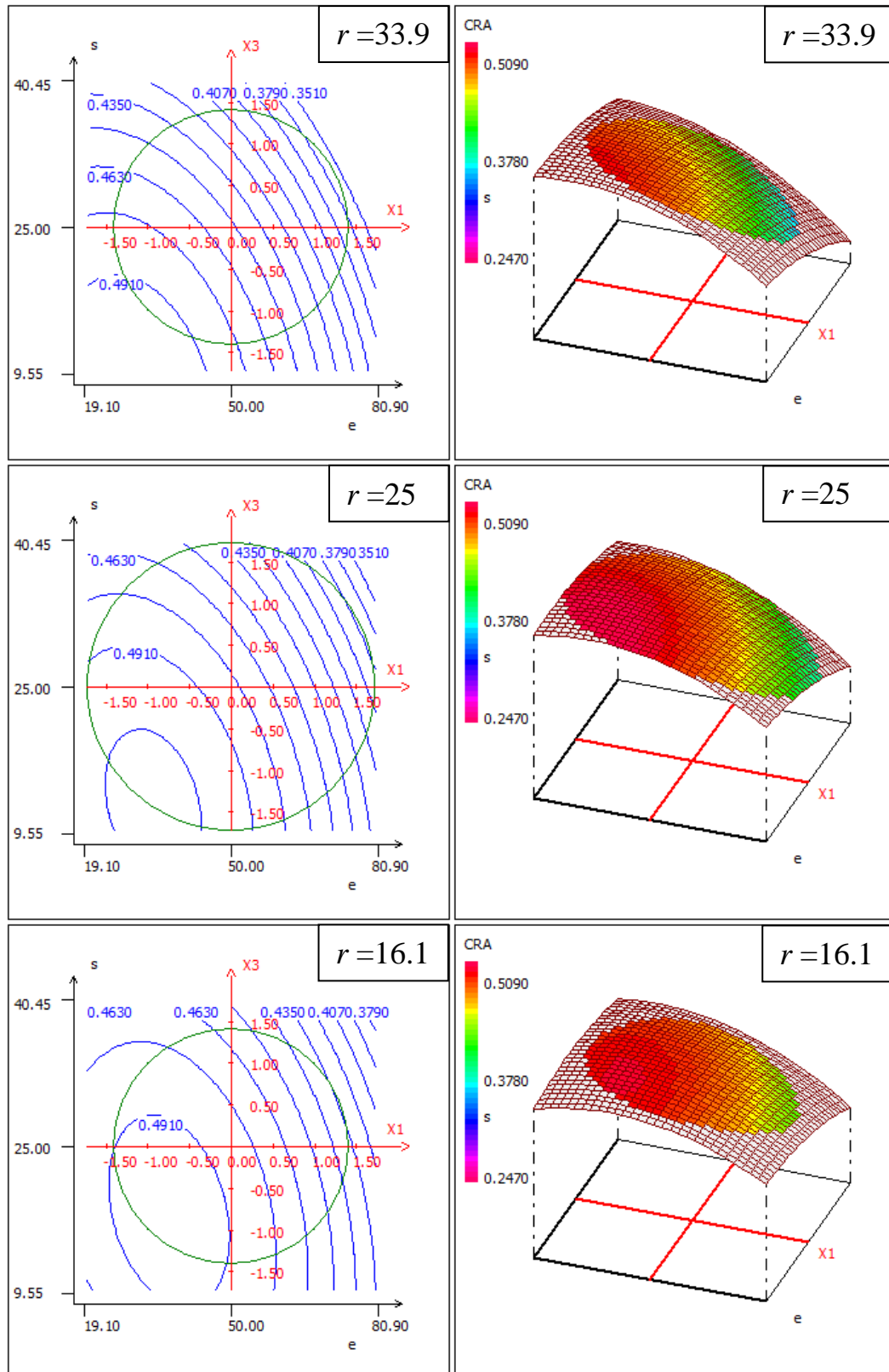


Figura 29. Variación de la respuesta CRA en función de e y s fijado r .



“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”

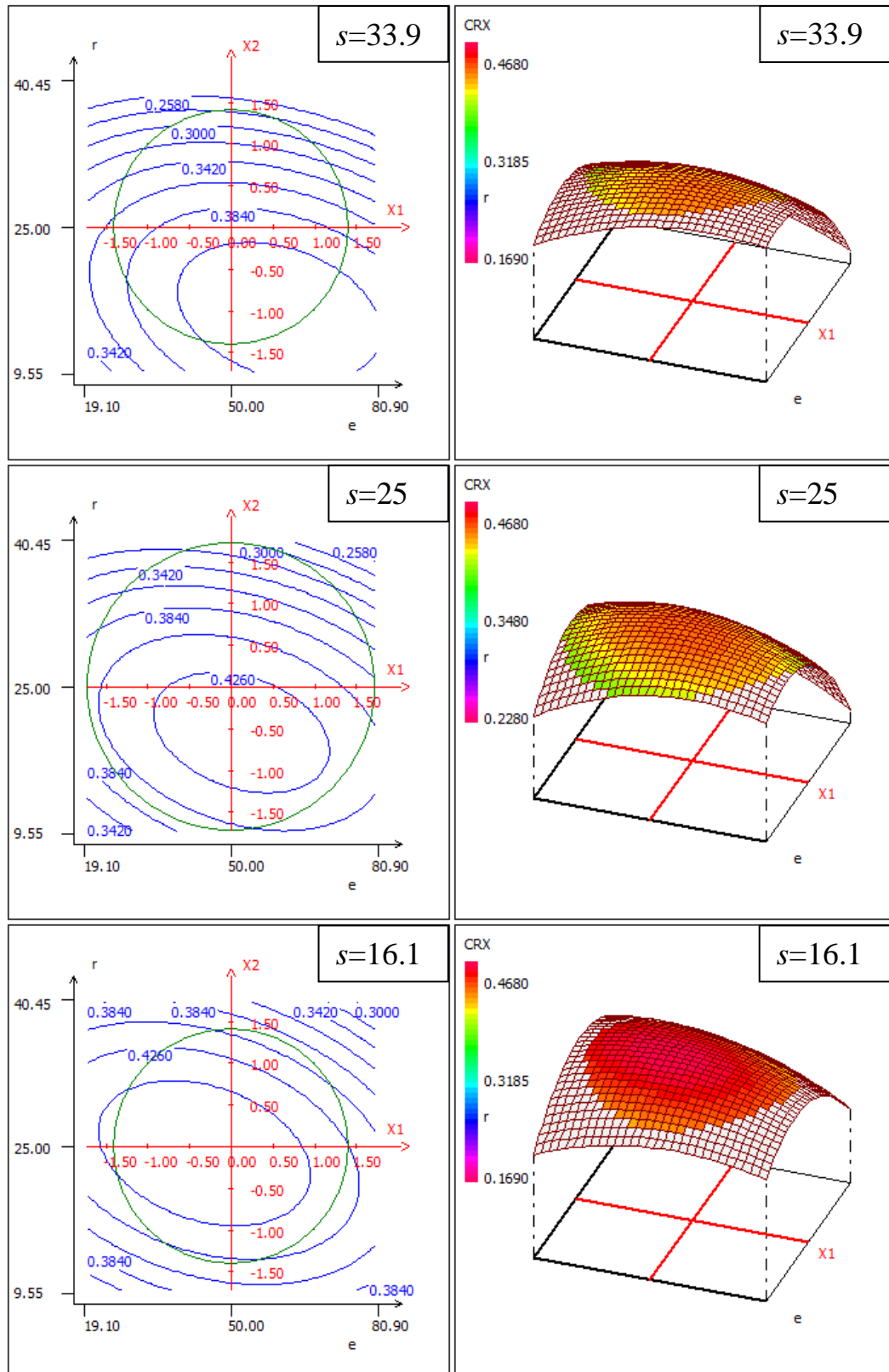


Figura 30. Variación de la respuesta CRX en función de e y r fijado s .



“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”

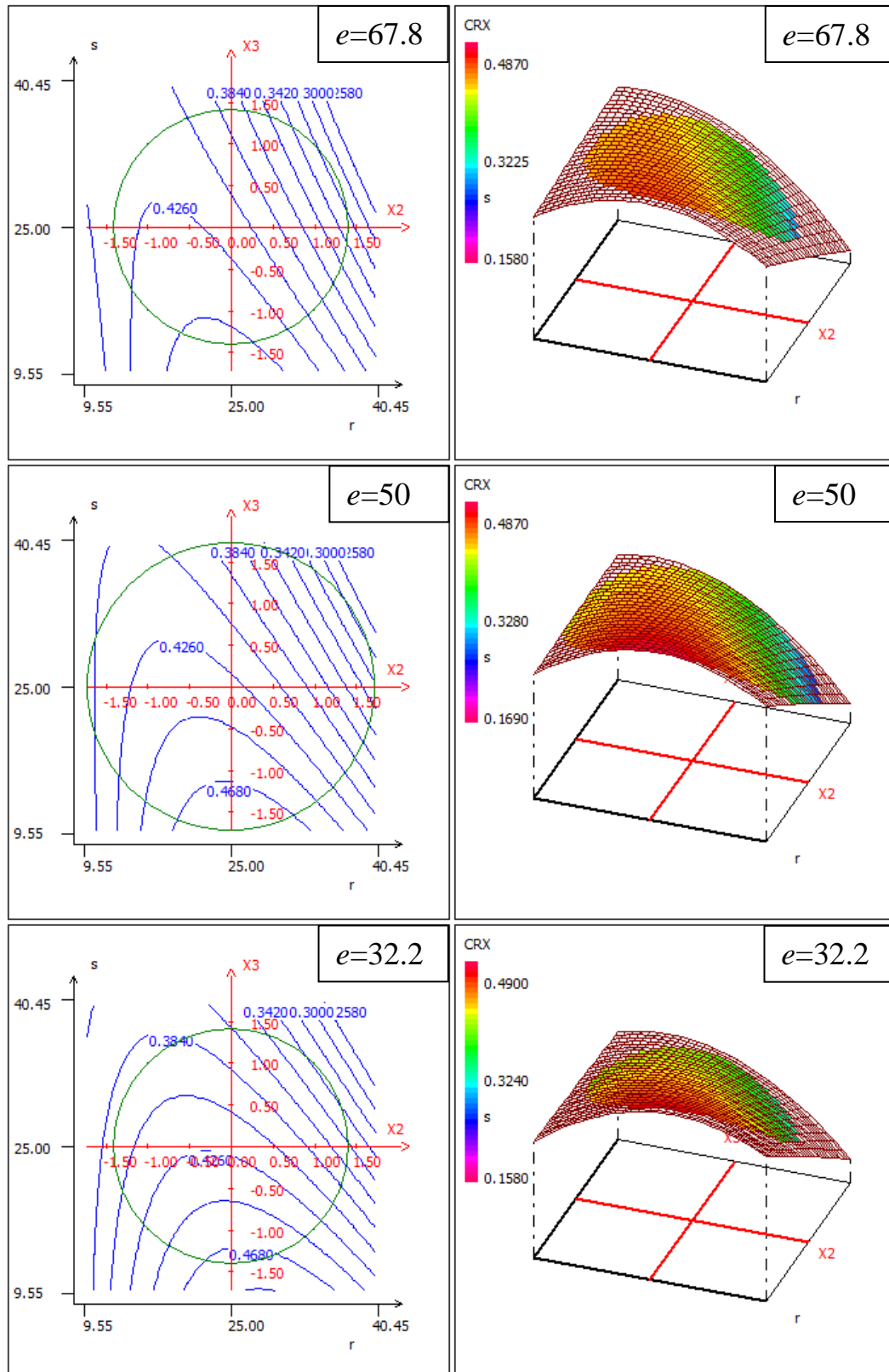


Figura 31. Variación de la respuesta CRX en función de r y s fijado e .



“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”

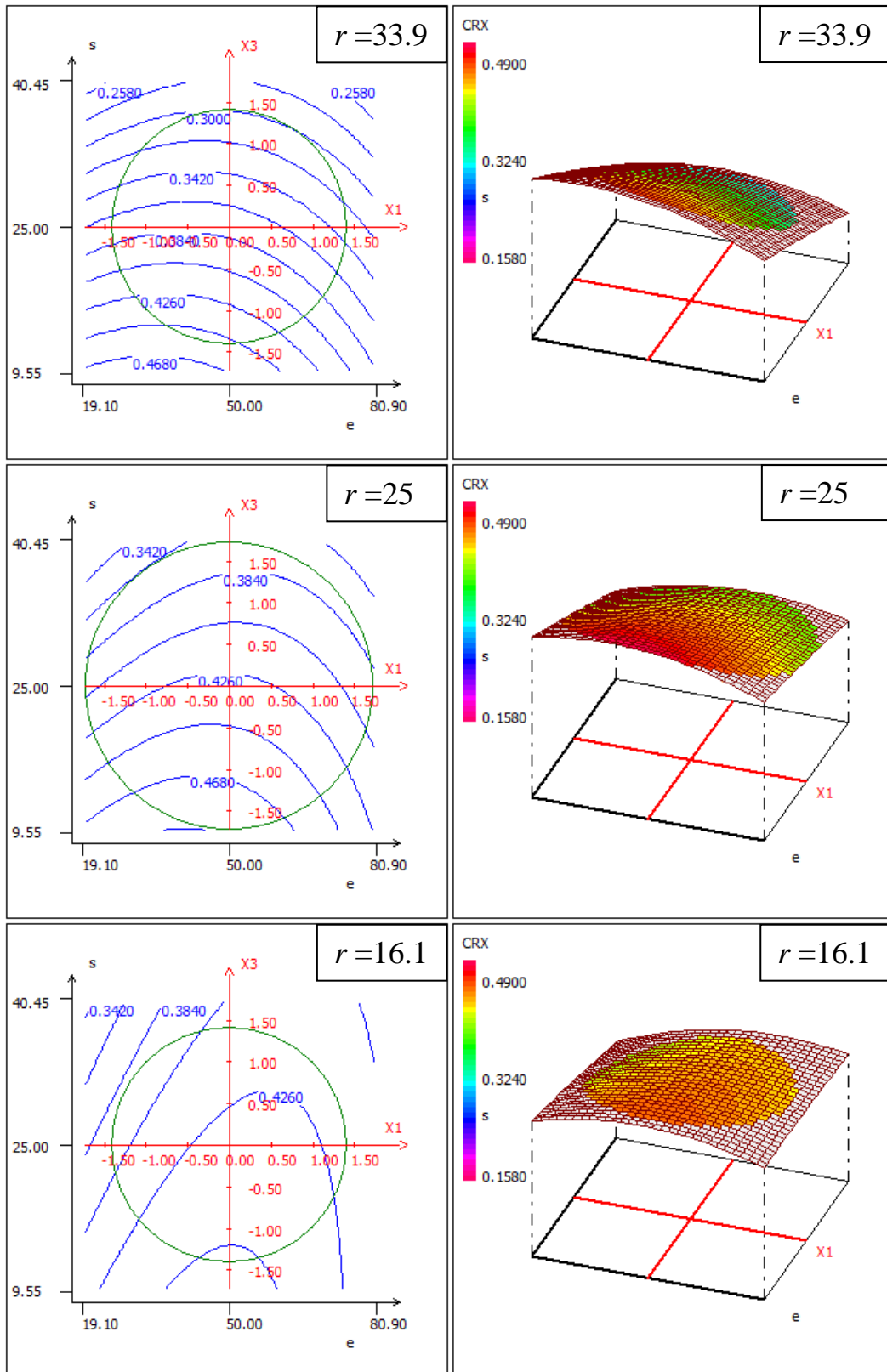


Figura 32. Variación de la respuesta CRX en función de e y s fijado r.



“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”

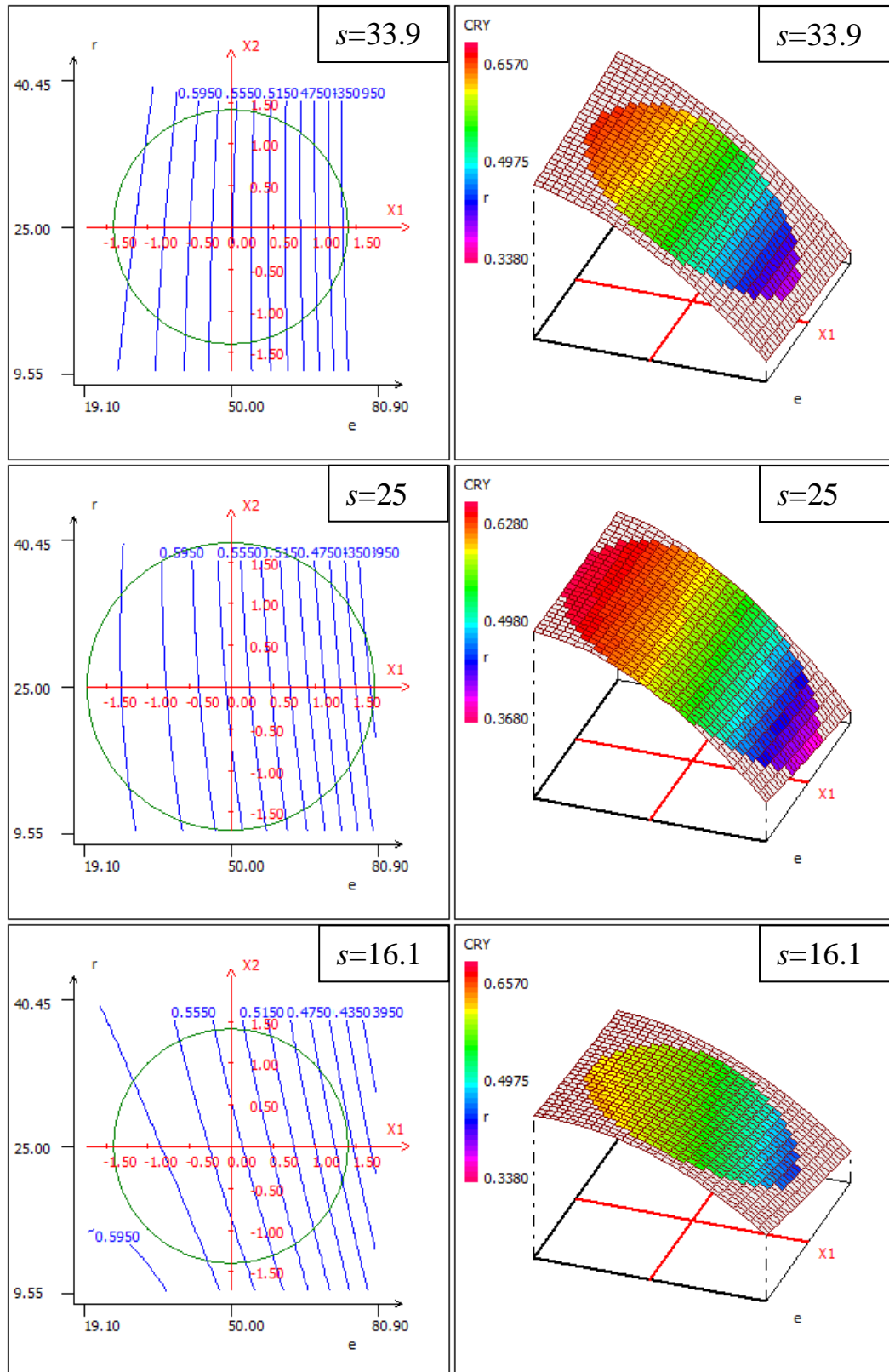


Figura 33. Variación de la respuesta CRY en función de e y r fijado s .



“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”

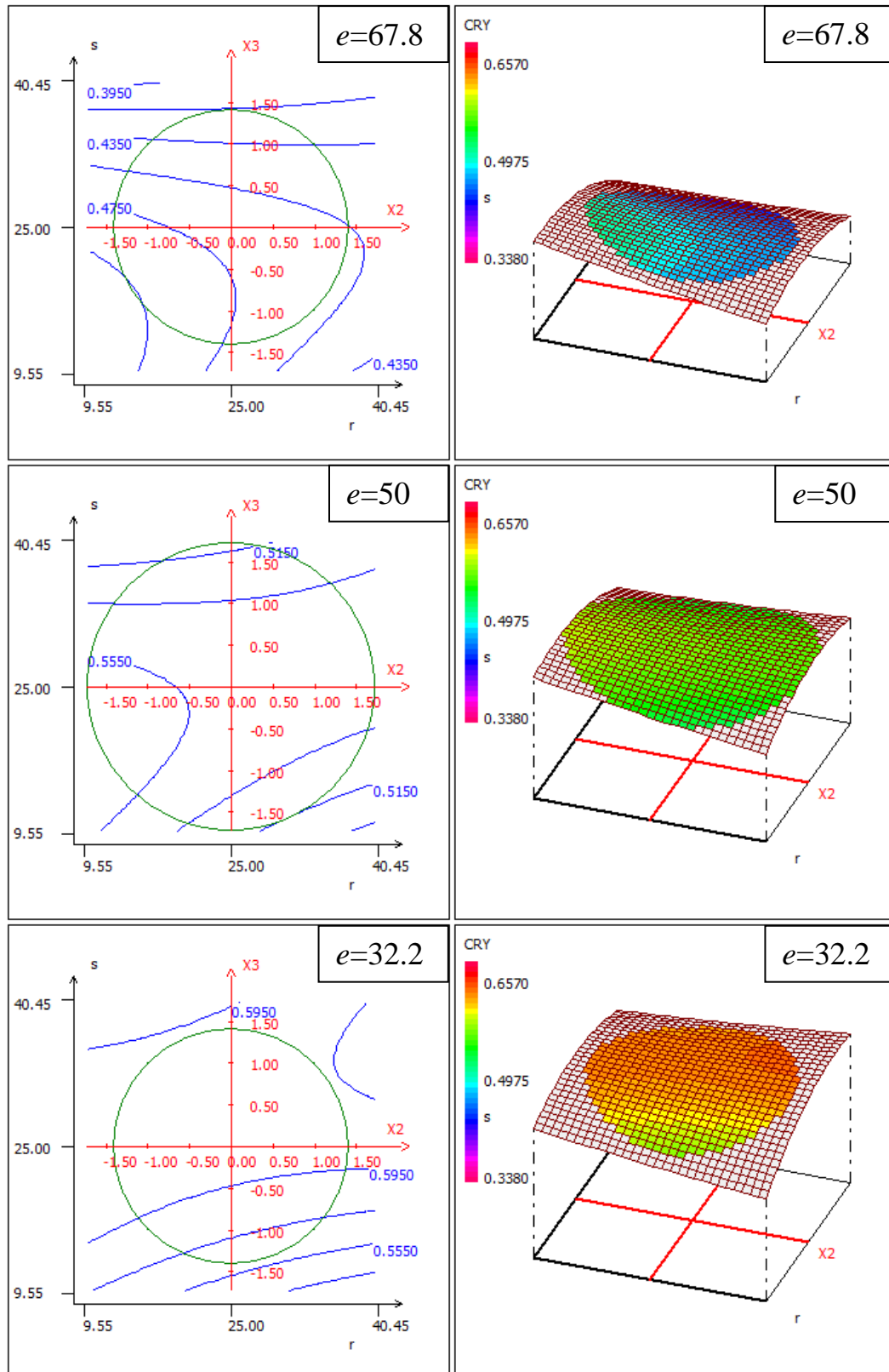


Figura 34. Variación de la respuesta CRY en función de r y s fijado e .



“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”

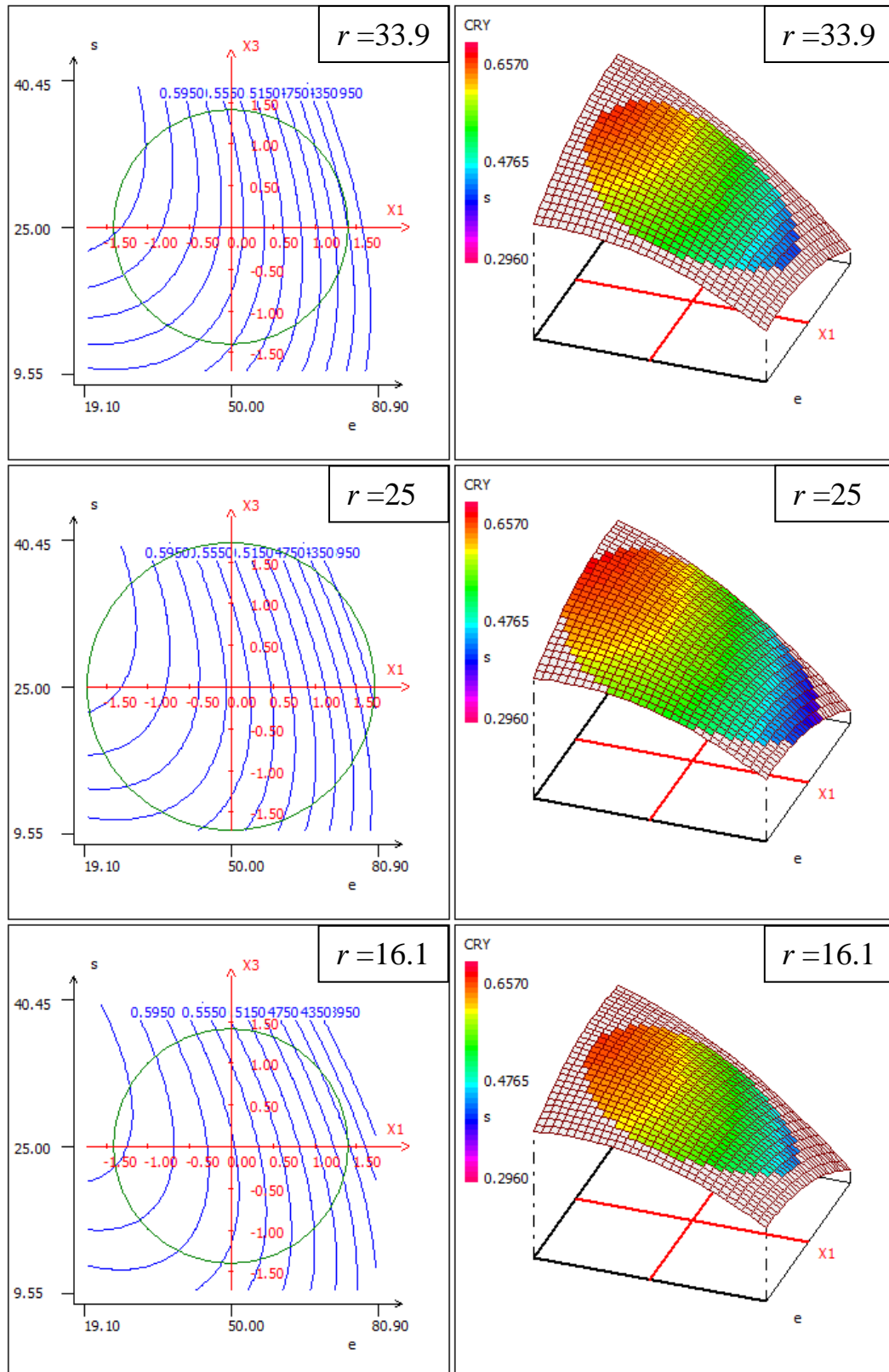


Figura 35. Variación de la respuesta CRY en función de e y s fijado r .



ANEXO 4

Variación de la respuesta de la superficie artificial con huecos prismáticos con inclinación a 90°.



“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”

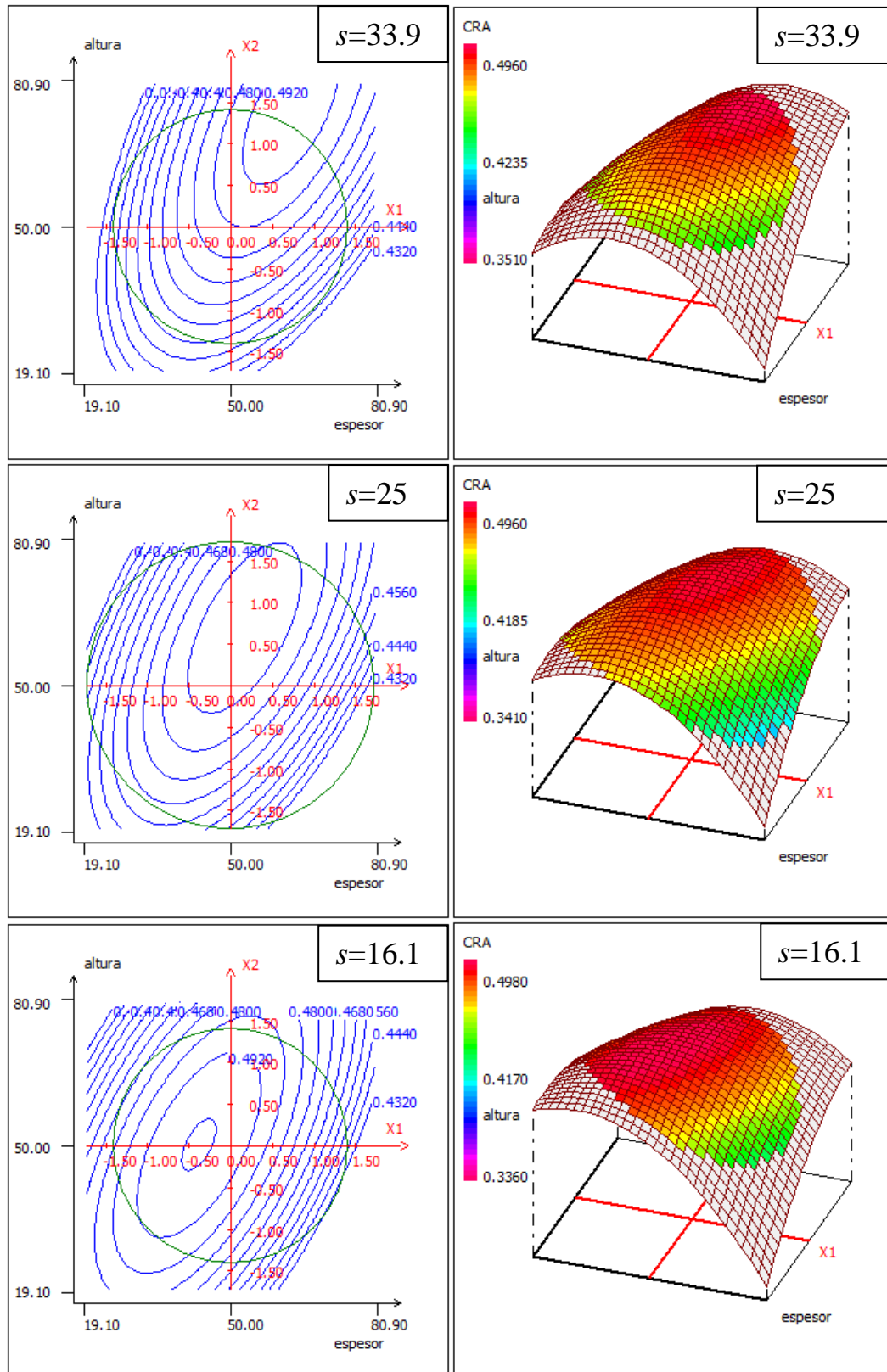


Figura 36. Variación de la respuesta CRA en función de e y h fijado s .



“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”

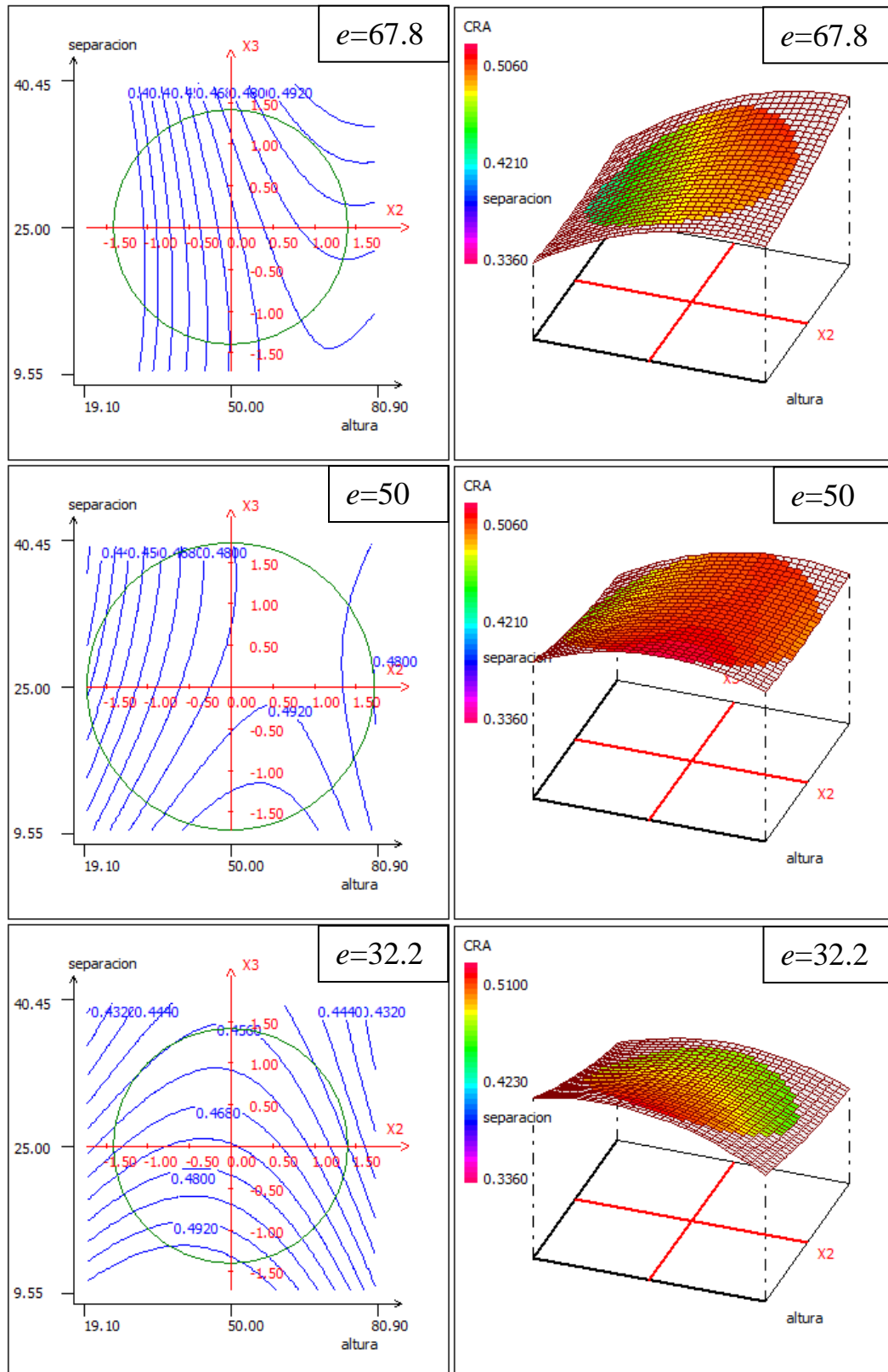


Figura 37. Variación de la respuesta CRA en función de h y s fijado e .



“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”

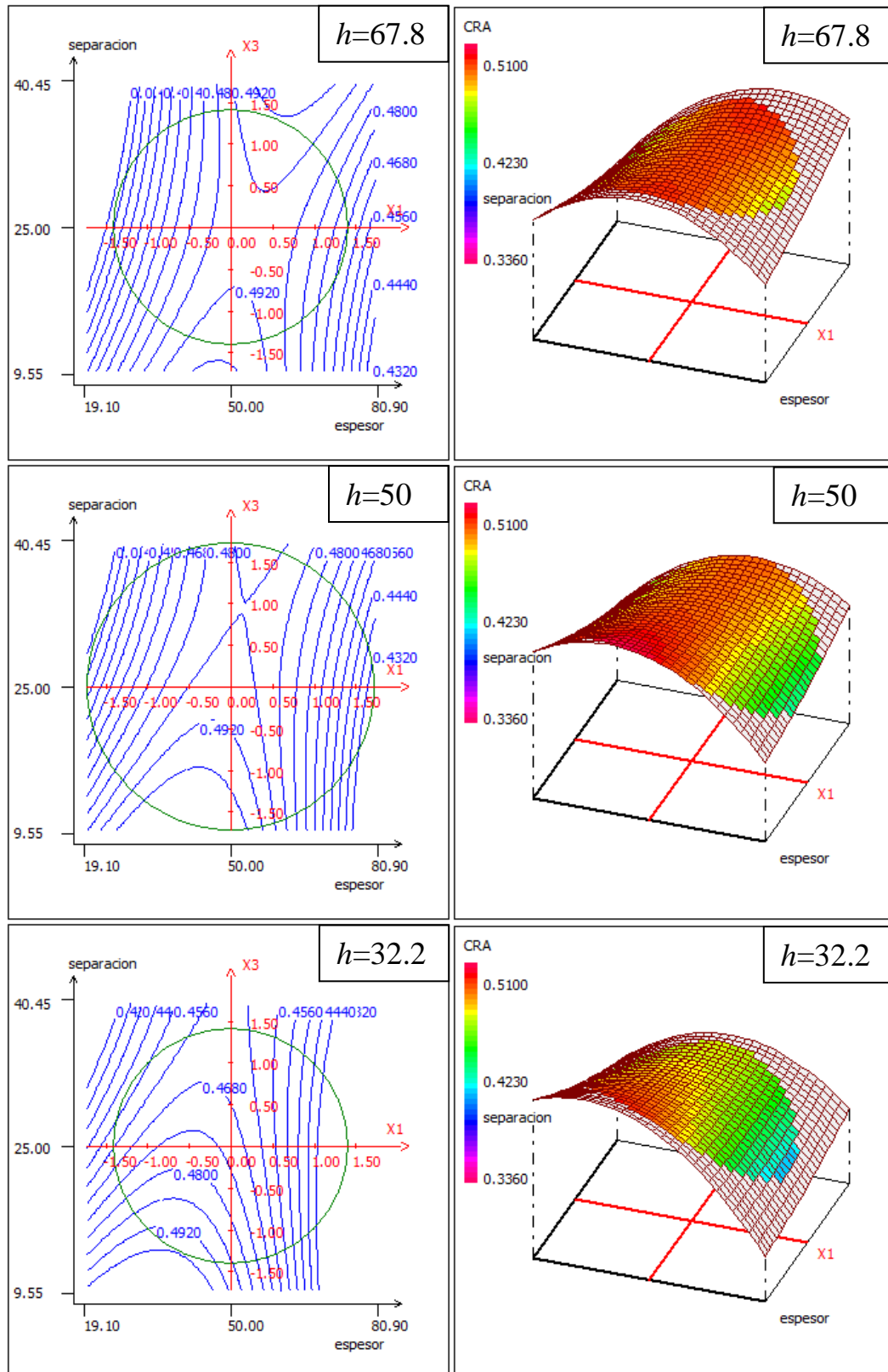


Figura 38. Variación de la respuesta CRA en función de e y s fijado h .



“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”

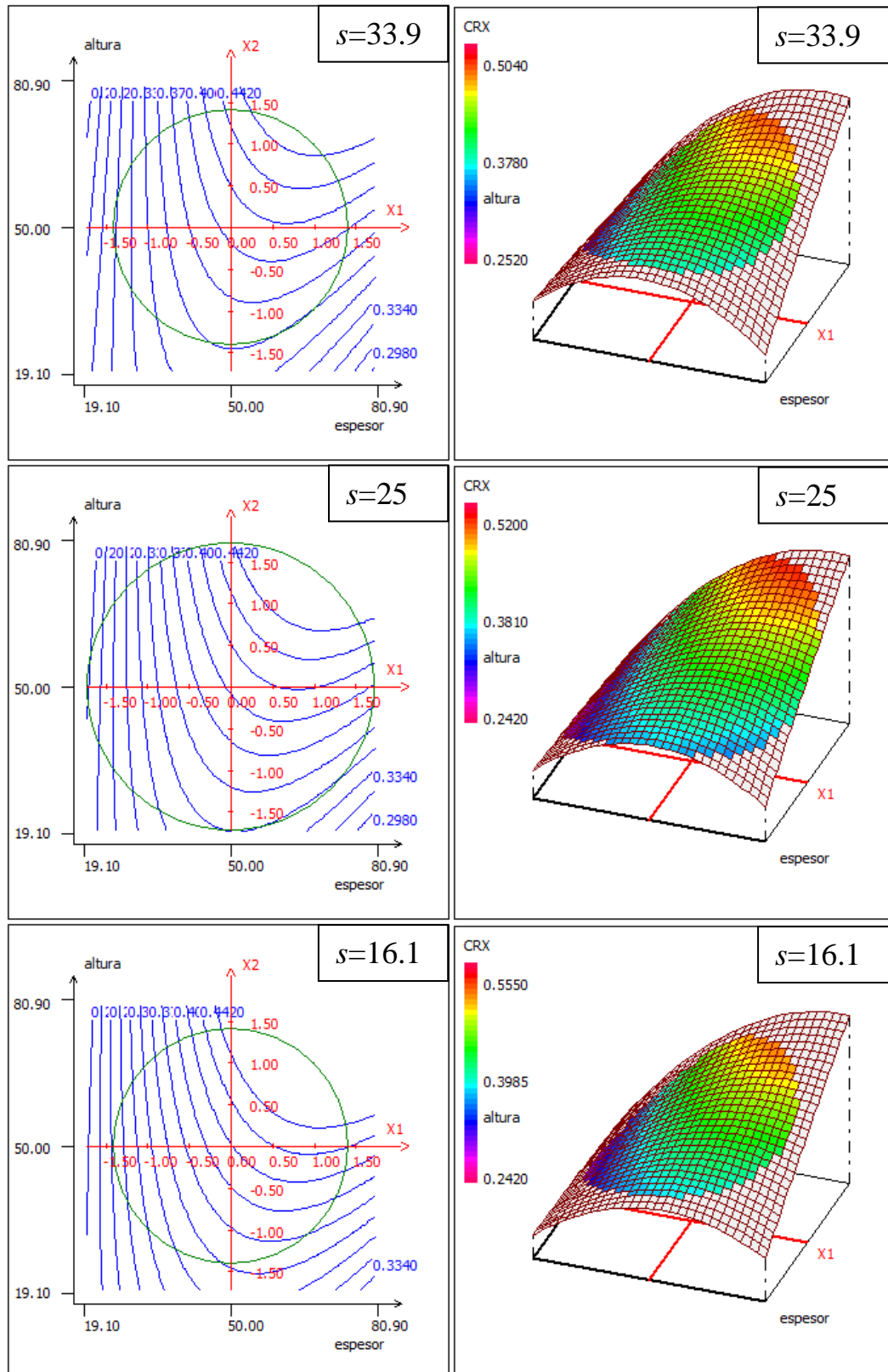


Figura 39. Variación de la respuesta CRX en función de e y h fijado s .



“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”

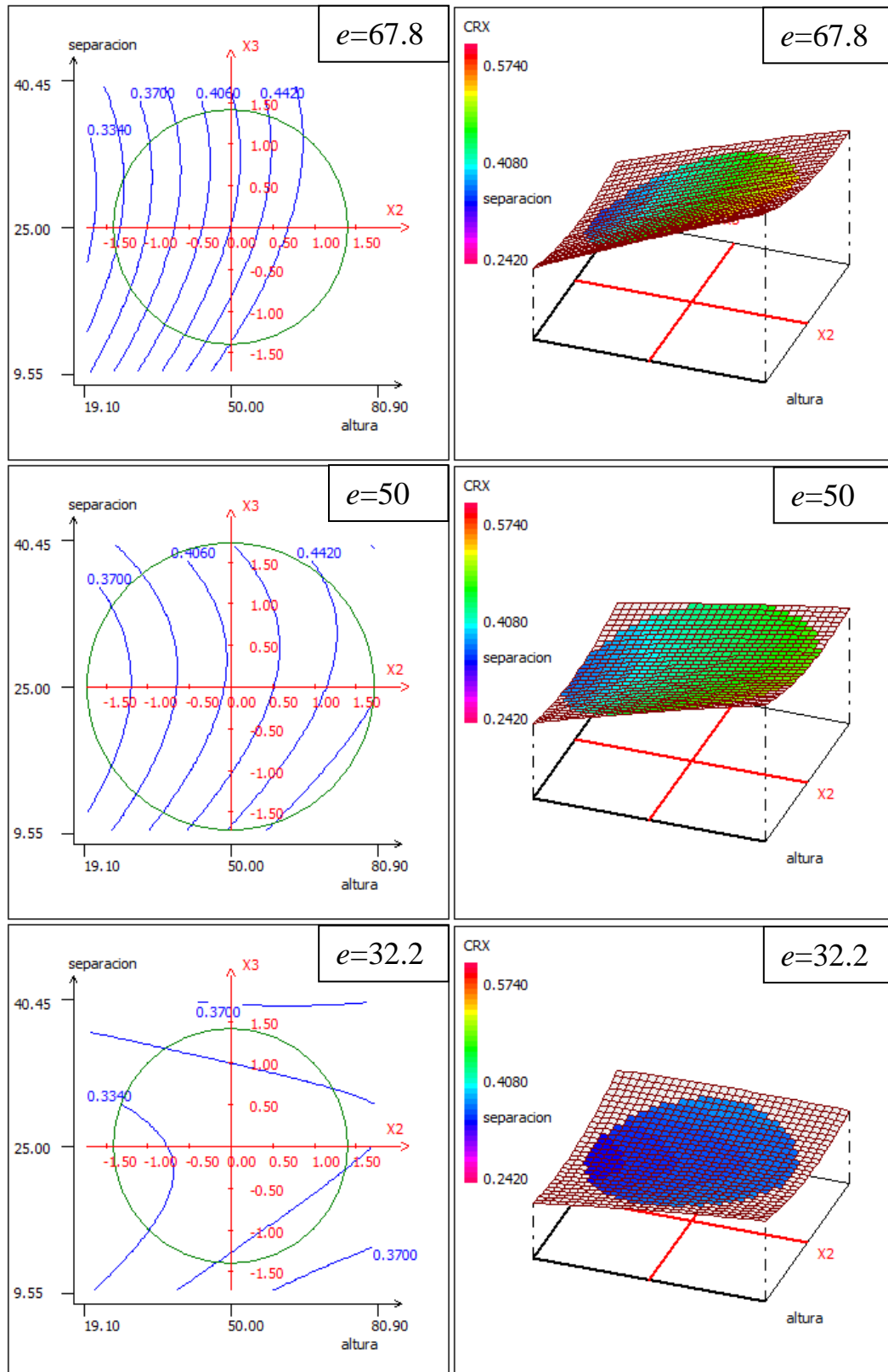


Figura 40. Variación de la respuesta CRX en función de h y s fijado e .



“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”

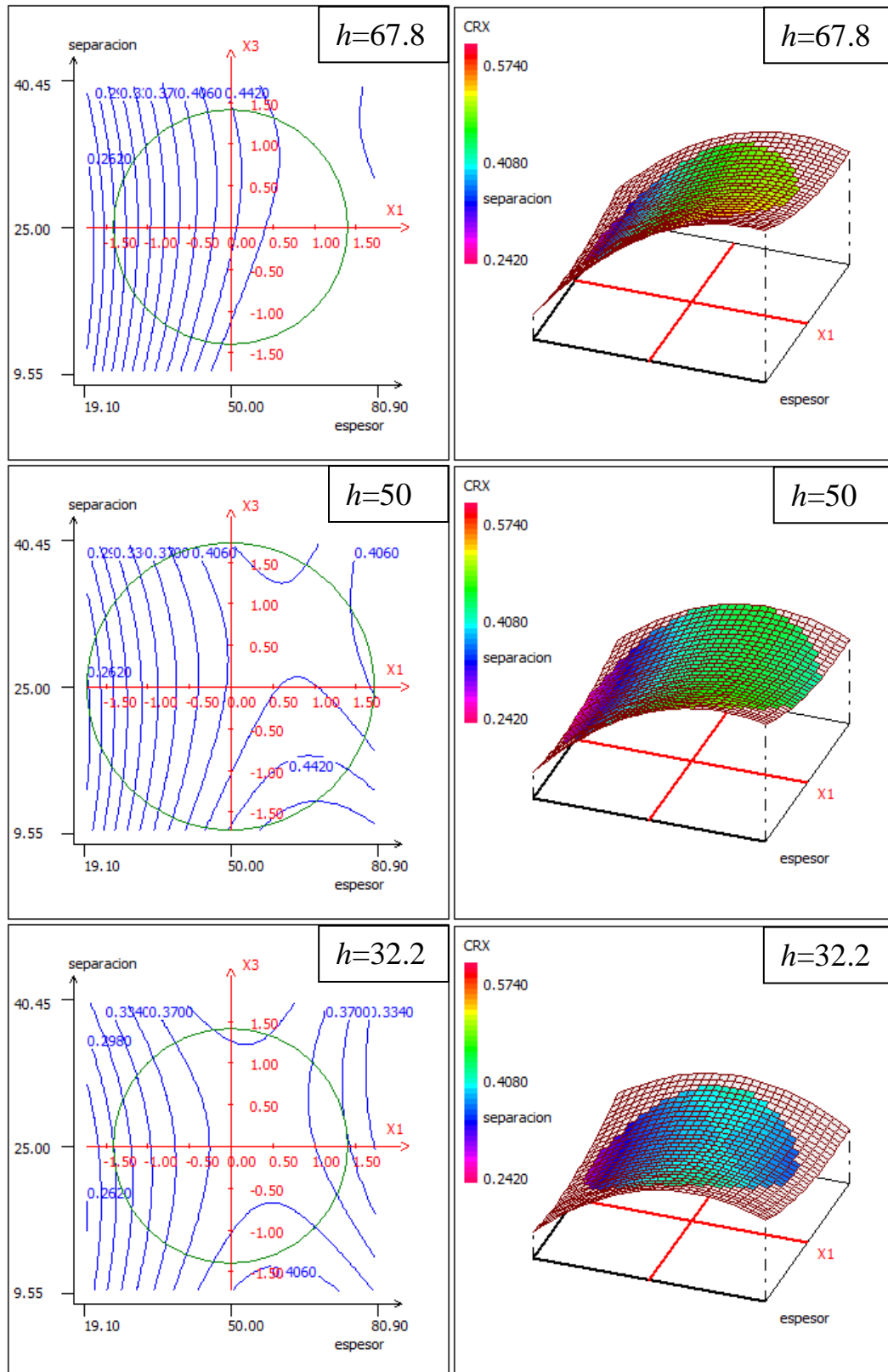


Figura 41. Variación de la respuesta CRX en función de e y s fijado h .



“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”

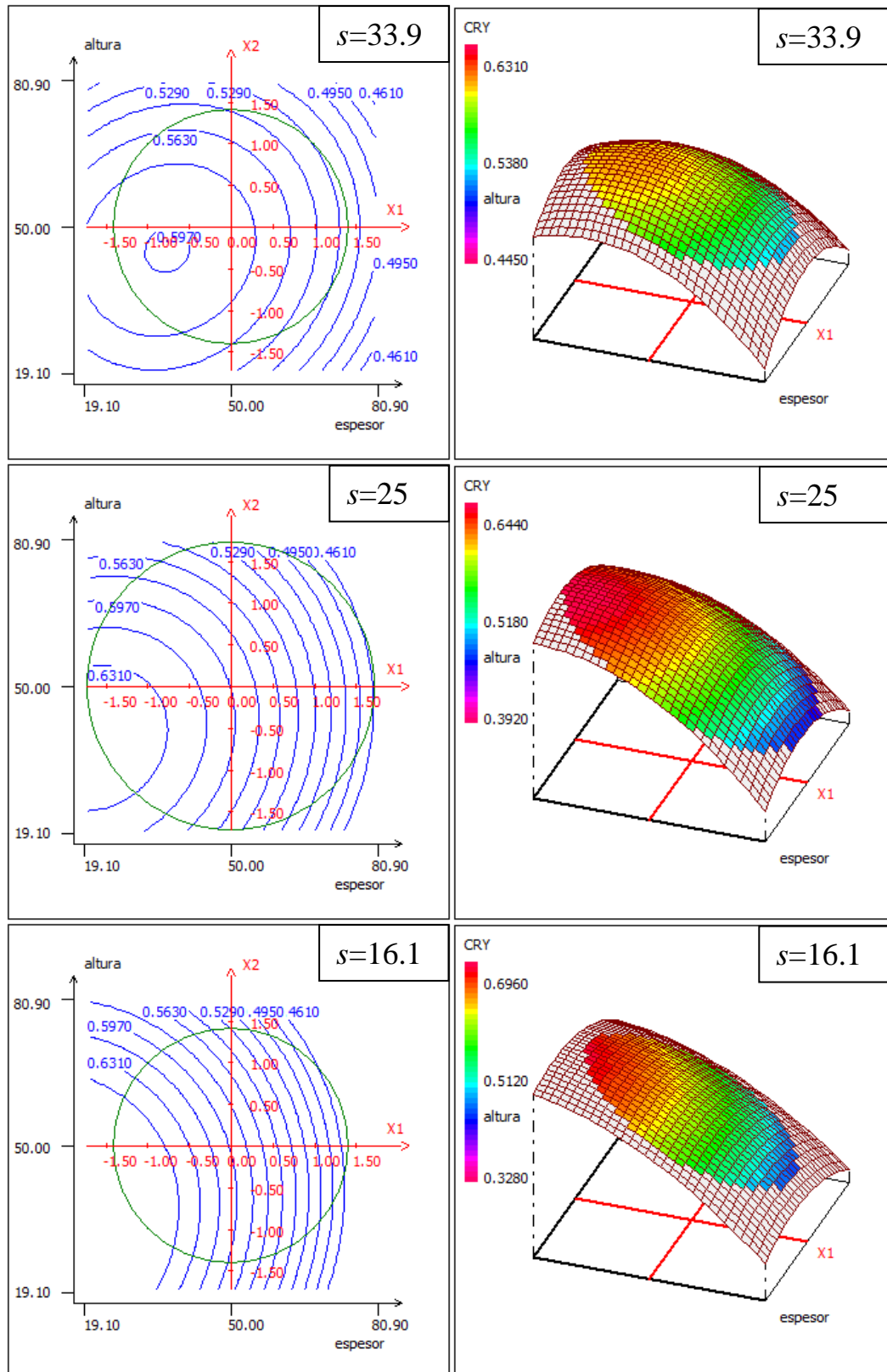


Figura 42. Variación de la respuesta CRY en función de e y h fijado s .



“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”

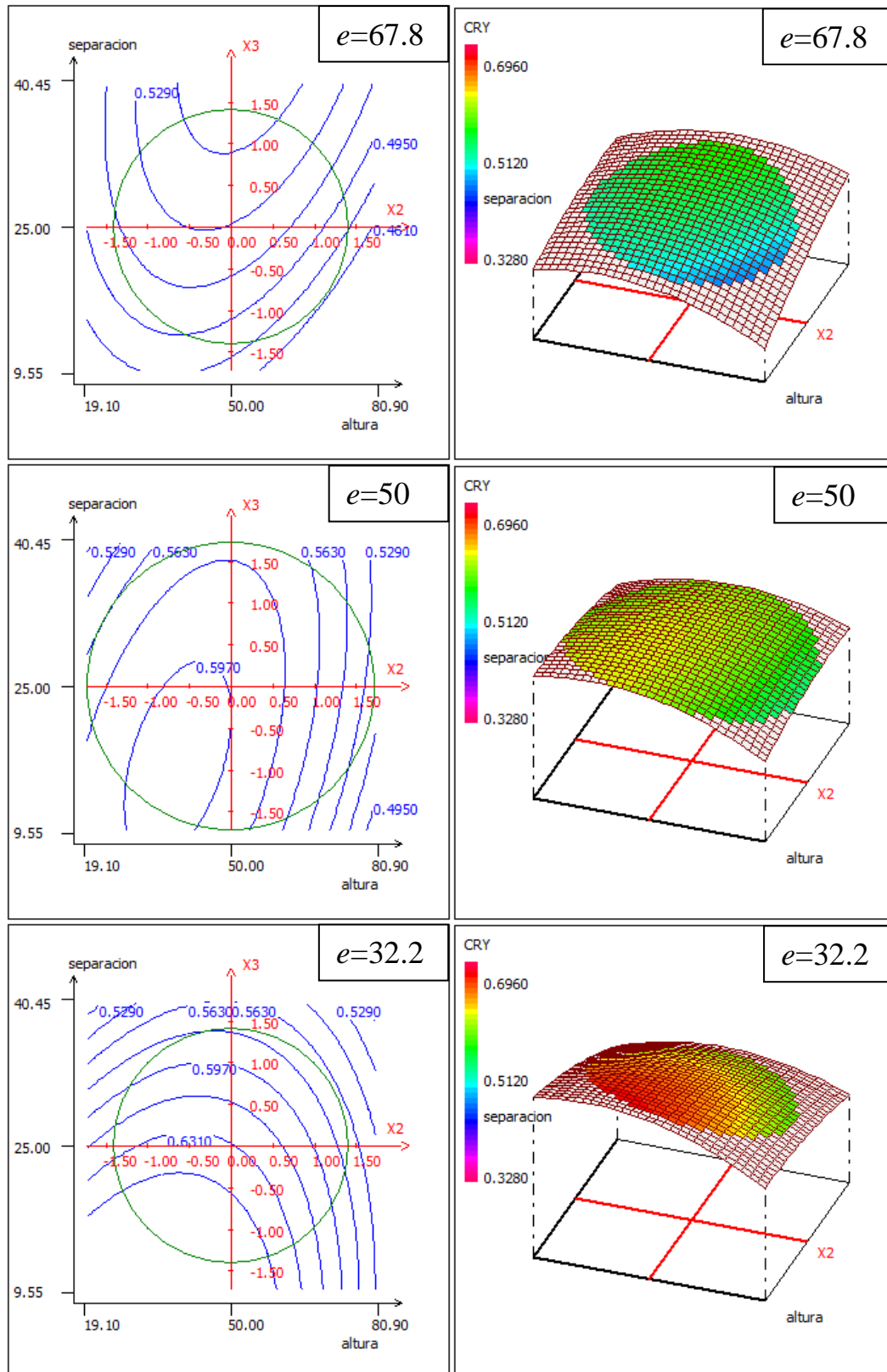


Figura 43. Variación de la respuesta CRY en función de h y s fijado e .



“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”

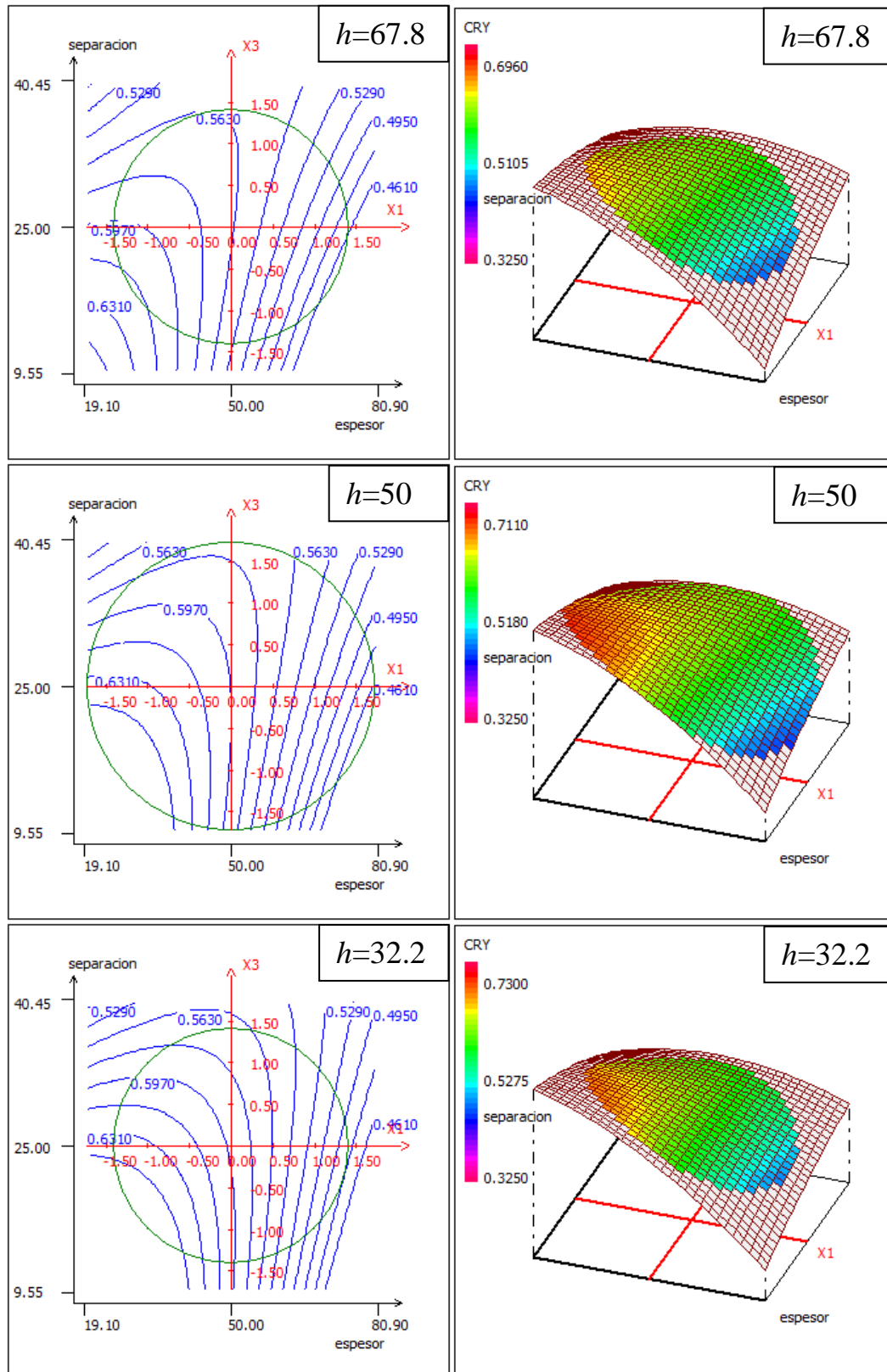


Figura 44. Variación de la respuesta CRY en función de e y s fijado h .



ANEXO 5

Variación de la respuesta de la superficie artificial con huecos prismáticos con inclinación a 120°.



“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”

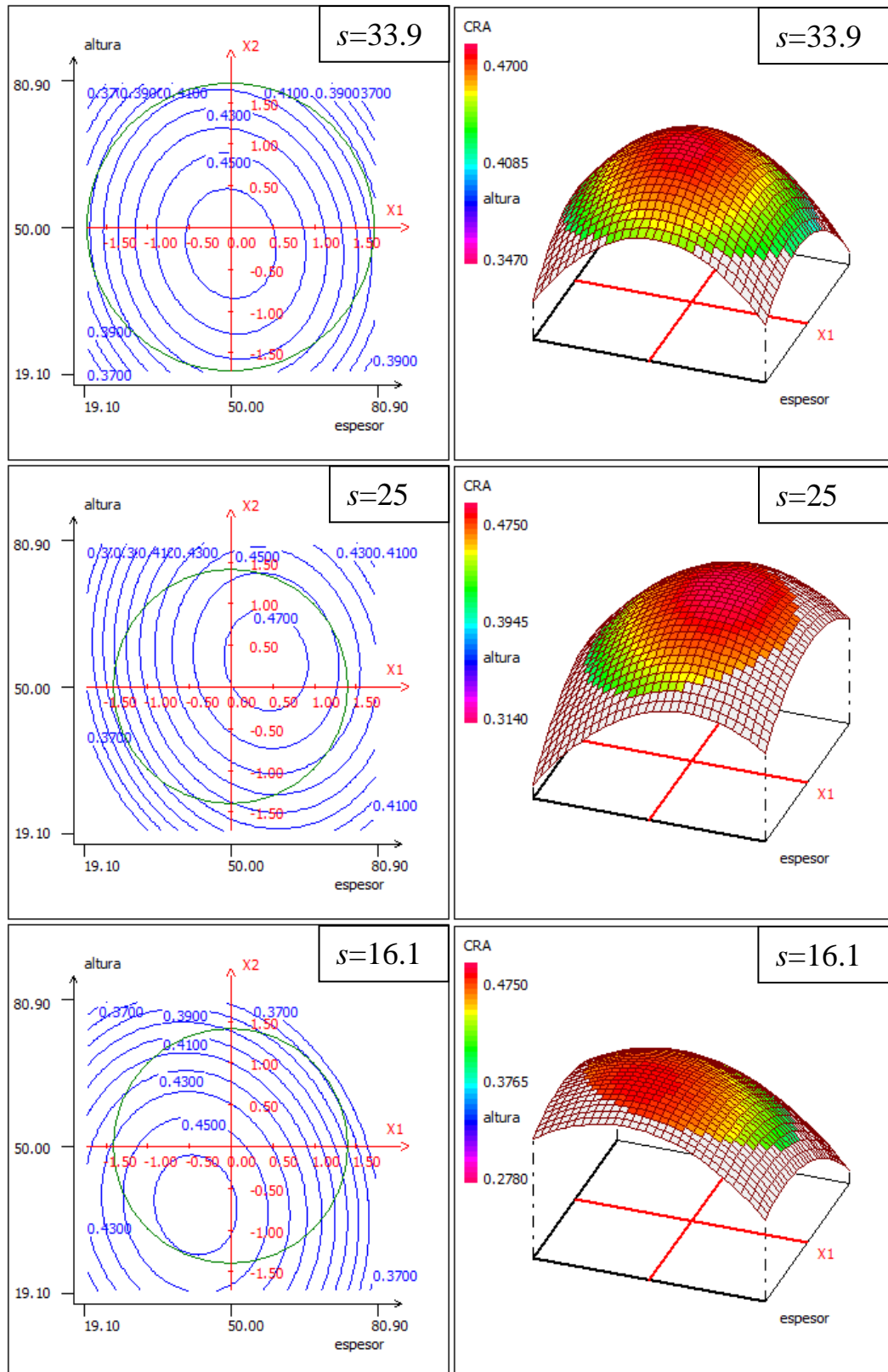


Figura 45. Variación de la respuesta CRA en función de e y h fijado s .



“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”

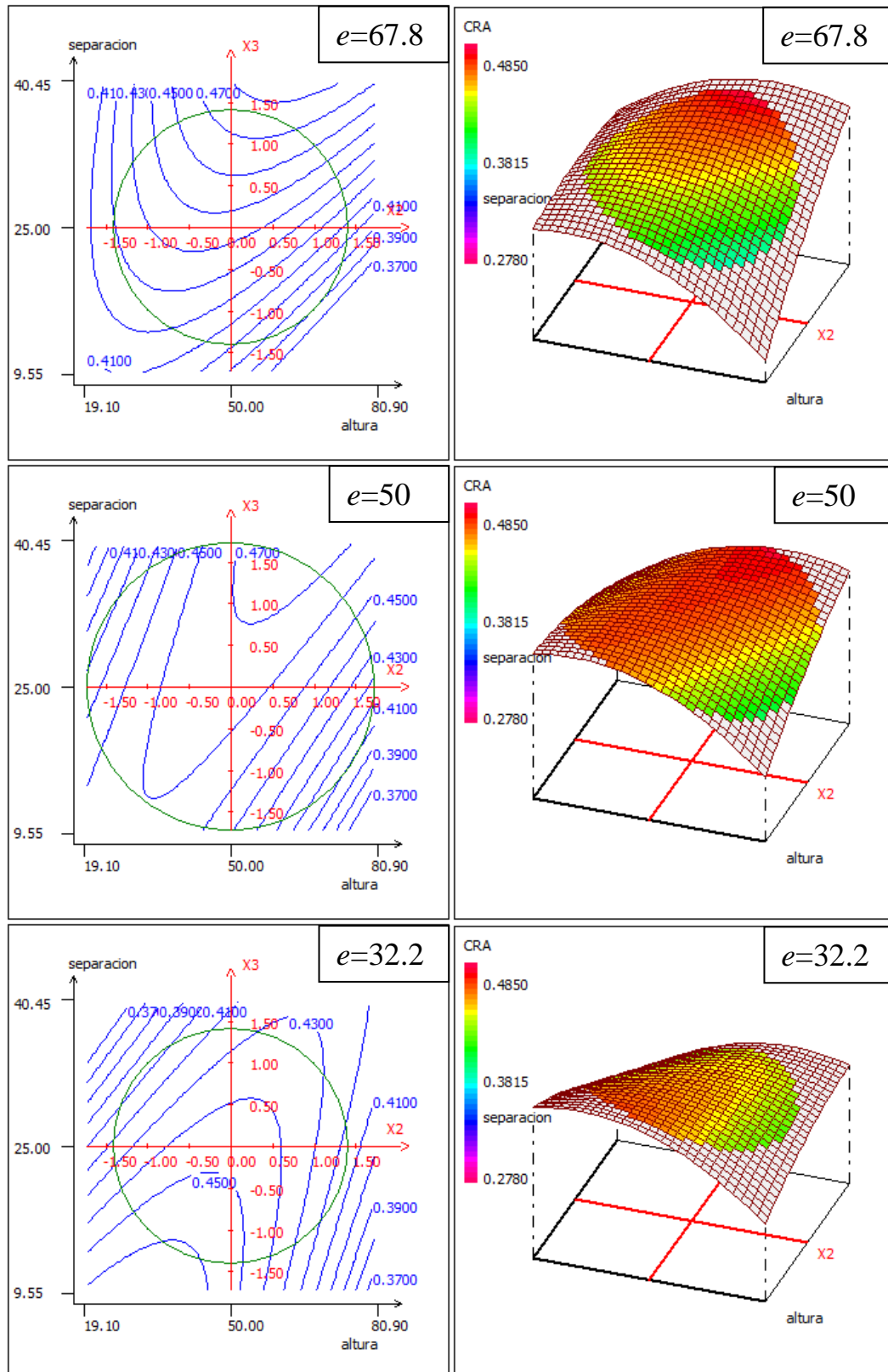


Figura 46. Variación de la respuesta CRA en función de h y s fijado e .



“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”

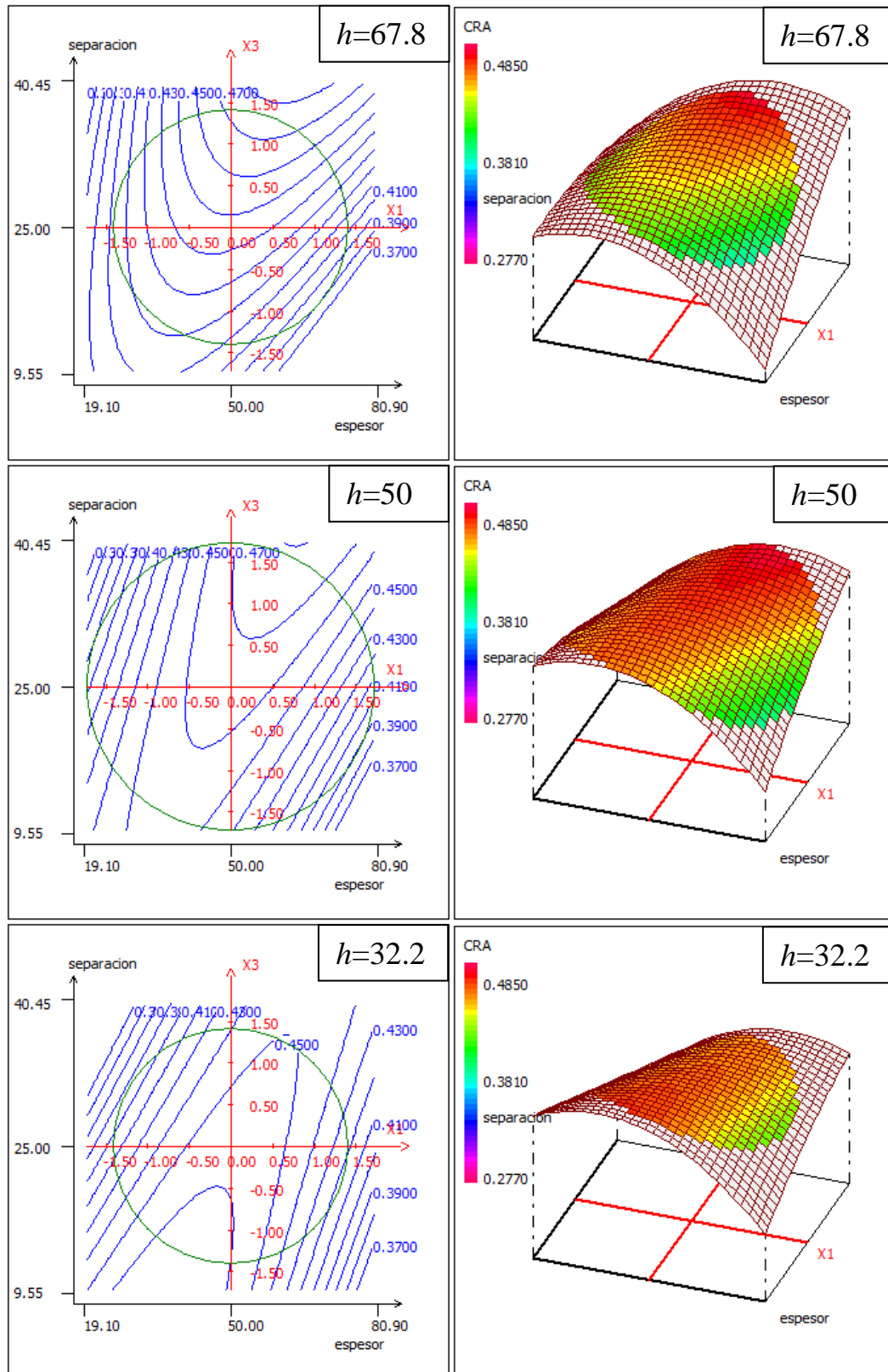


Figura 47. Variación de la respuesta CRA en función de e y s fijado h .



“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”

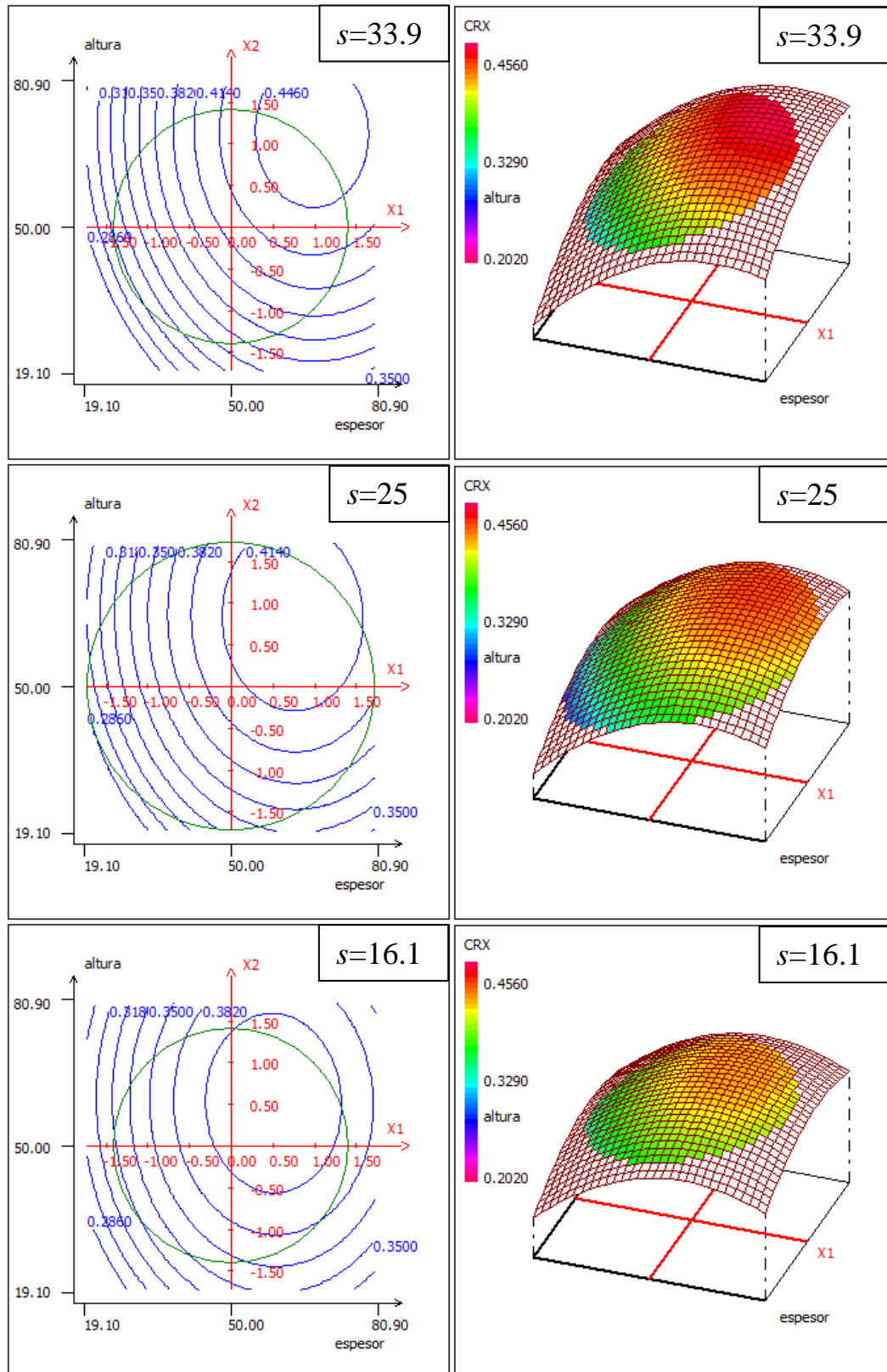


Figura 48. Variación de la respuesta CRX en función de e y h fijado s.



“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”

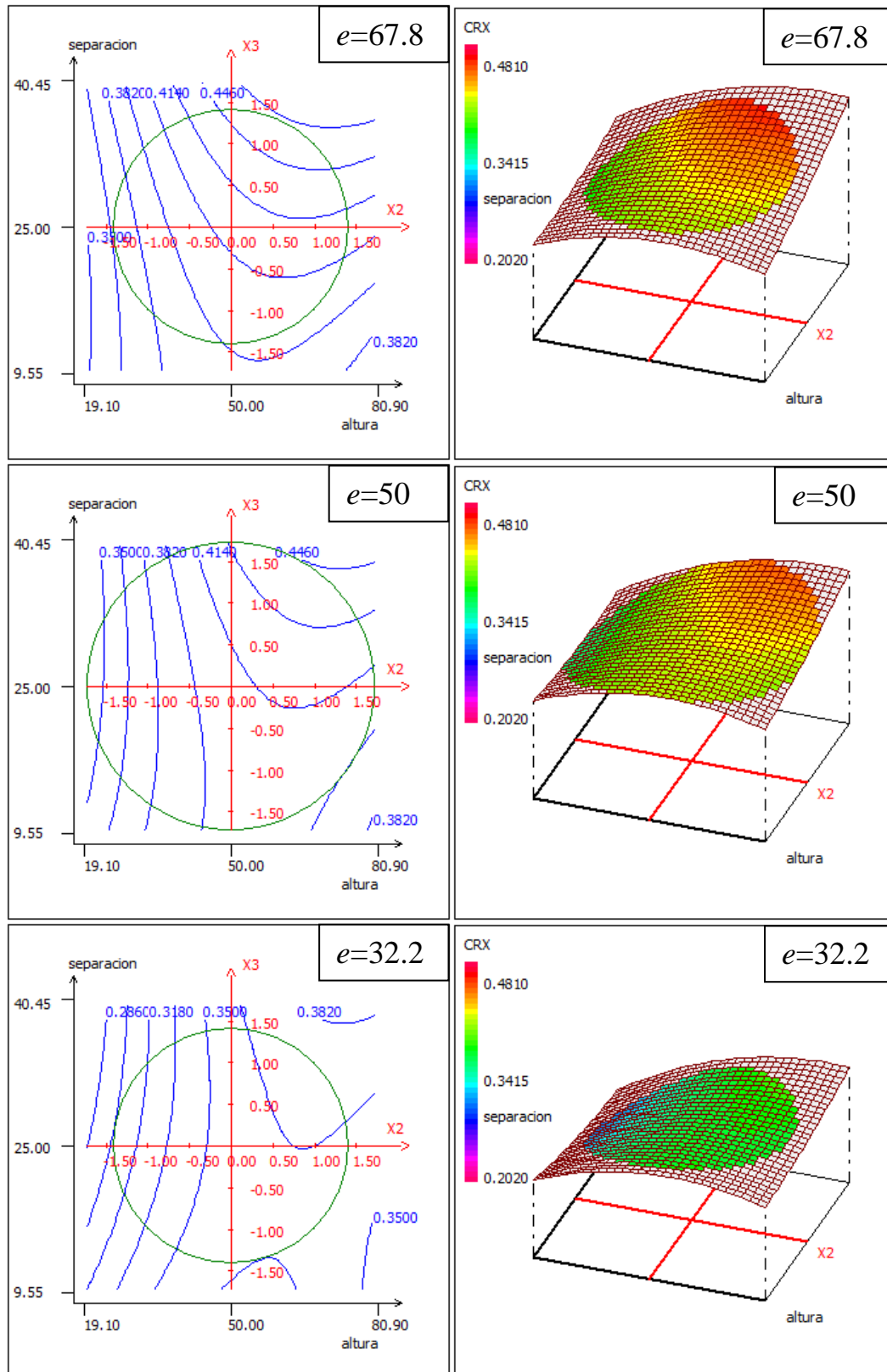


Figura 49. Variación de la respuesta CRX en función de h y s fijado e .



“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”

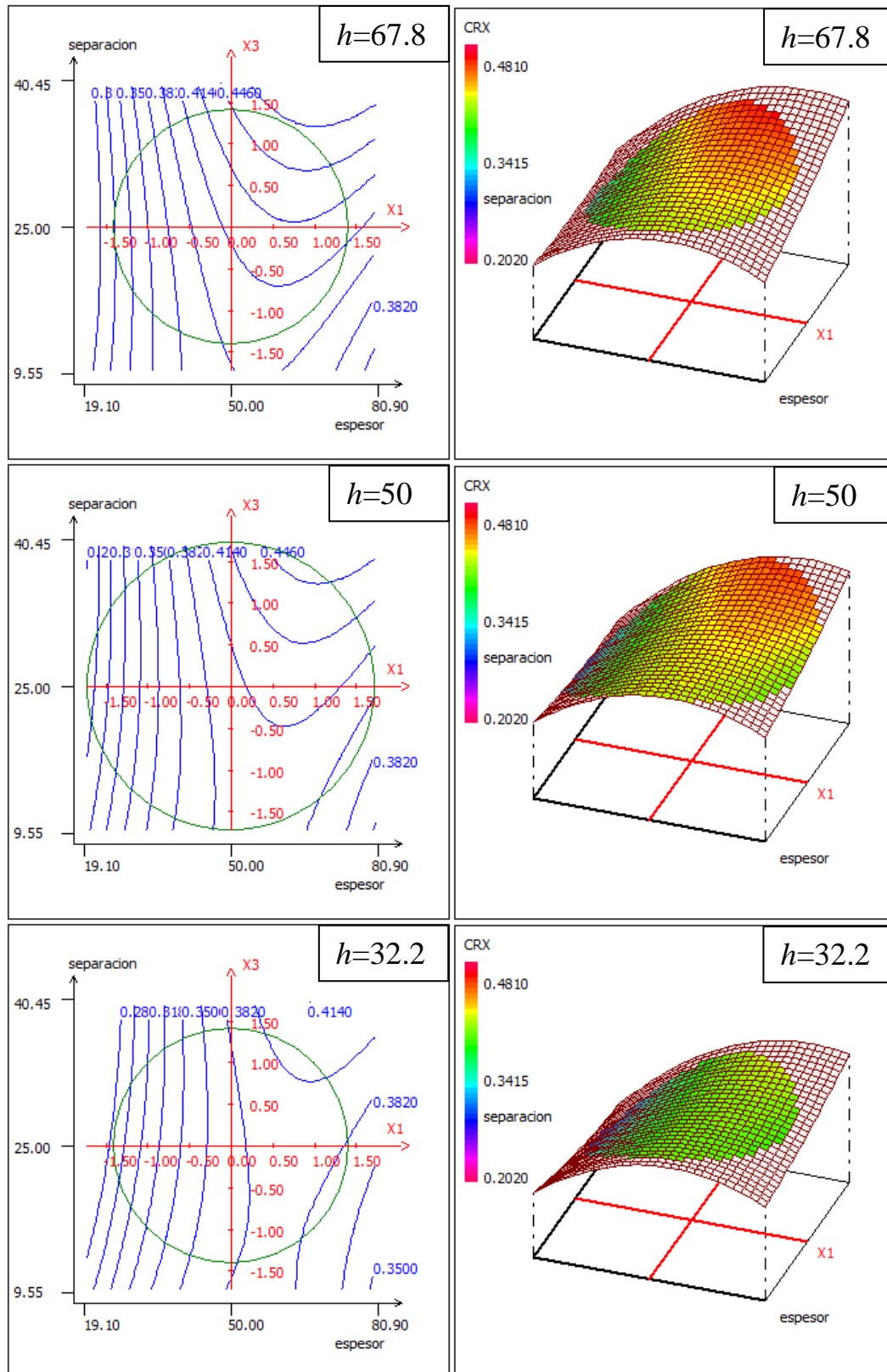


Figura 50. Variación de la respuesta CRX en función de e y s fijado h .



“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”

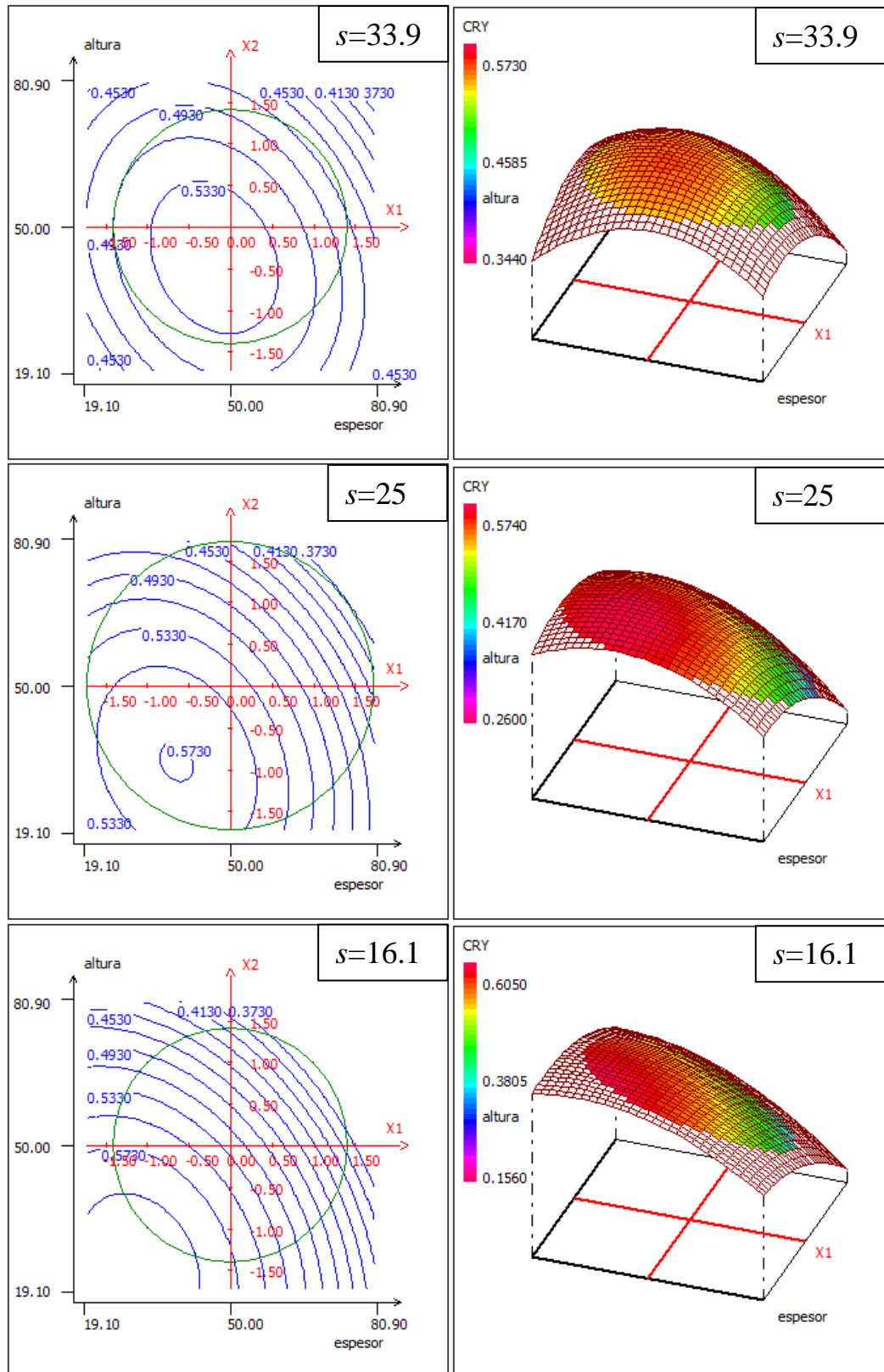


Figura 51. Variación de la respuesta CRY en función de e y h fijado s .



“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”

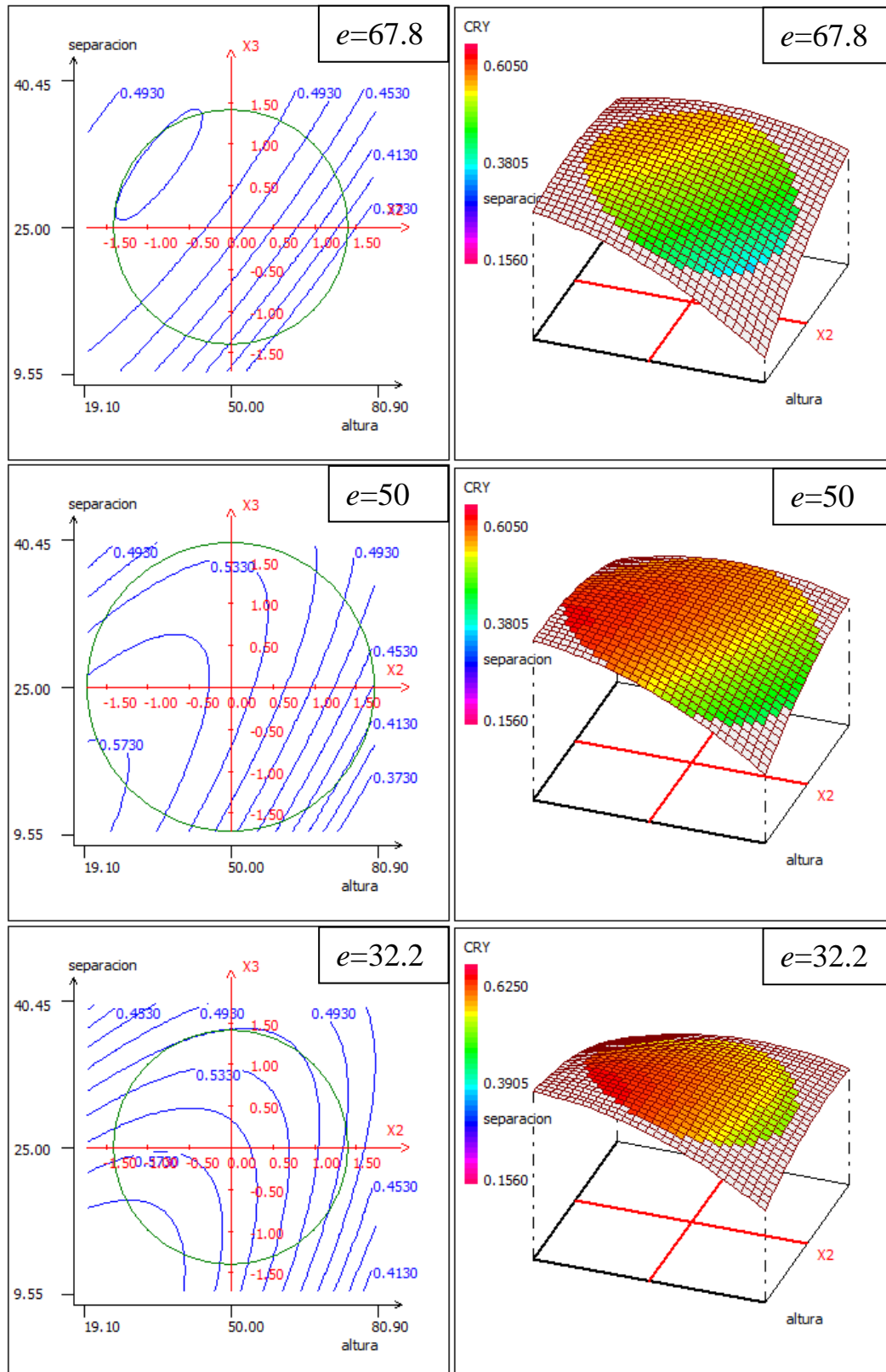


Figura 52. Variación de la respuesta CRY en función de h y s fijado e.



“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”

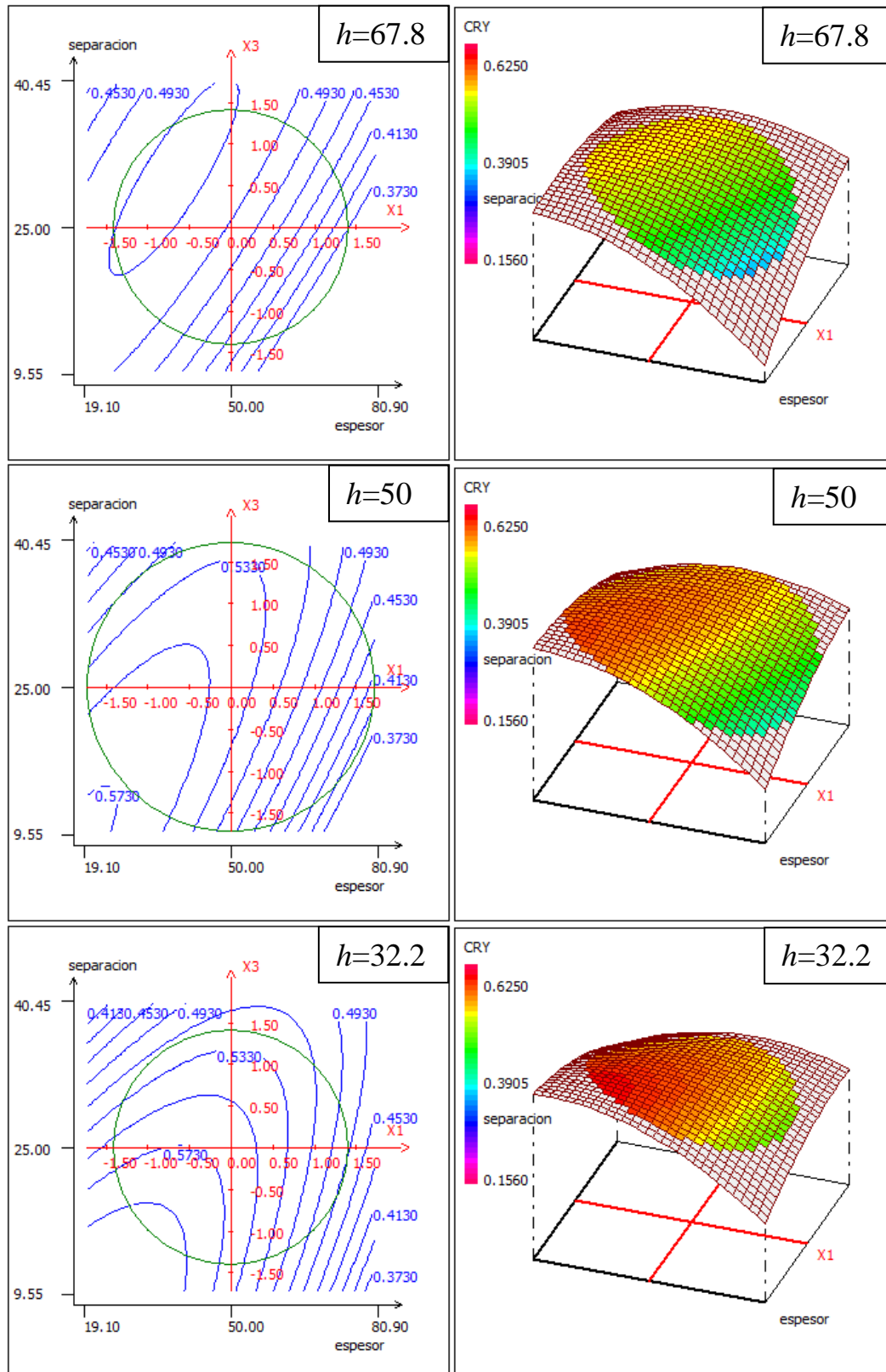


Figura 53. Variación de la respuesta CRY en función de e y s fijado h.



ANEXO 6

Variación de la respuesta de la superficie artificial con huecos prismáticos con inclinación a 135°.



INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL

**“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES
ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”**



“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”

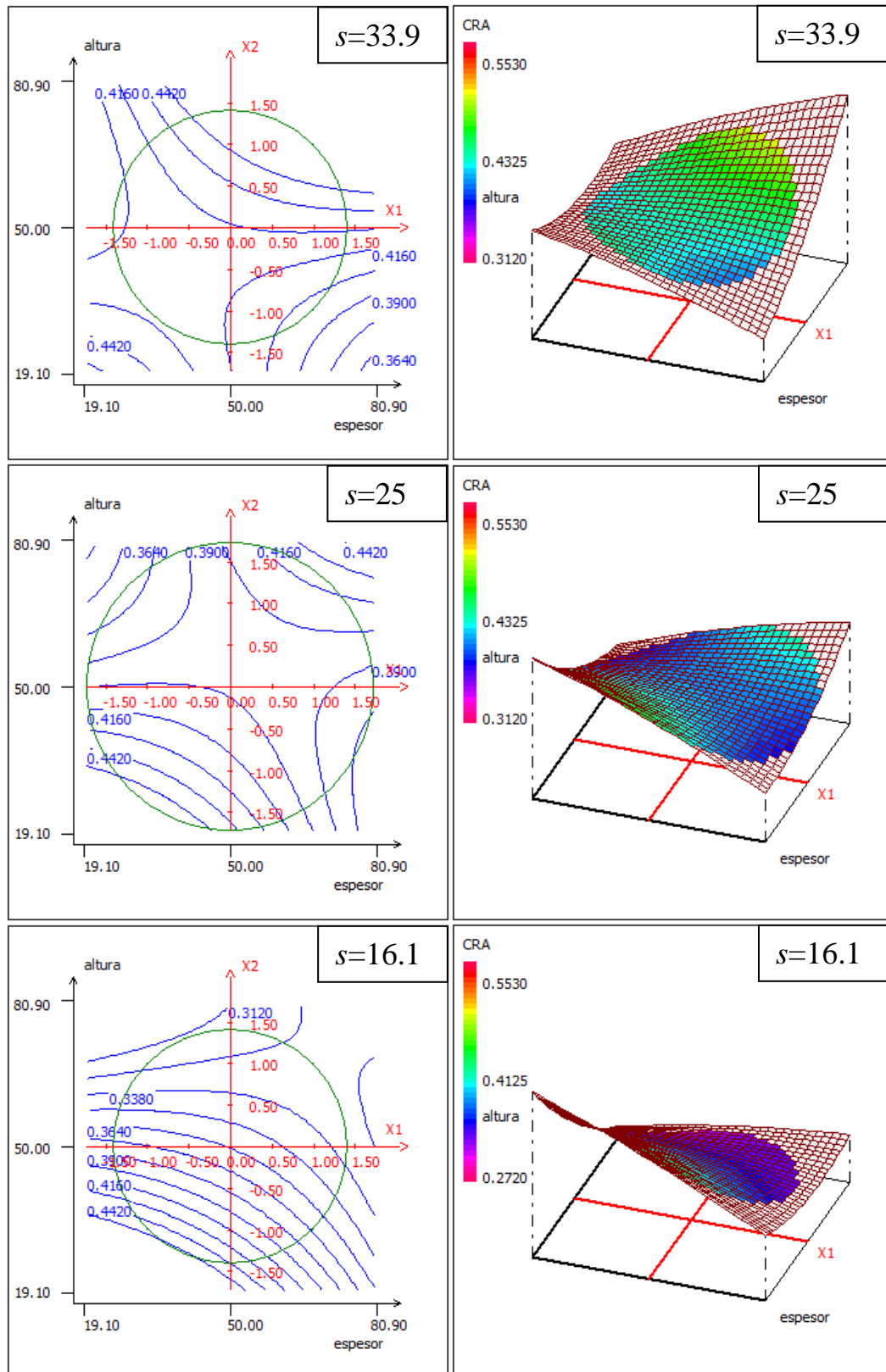


Figura 54. Variación de la respuesta CRA en función de e y h fijado s.



“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”

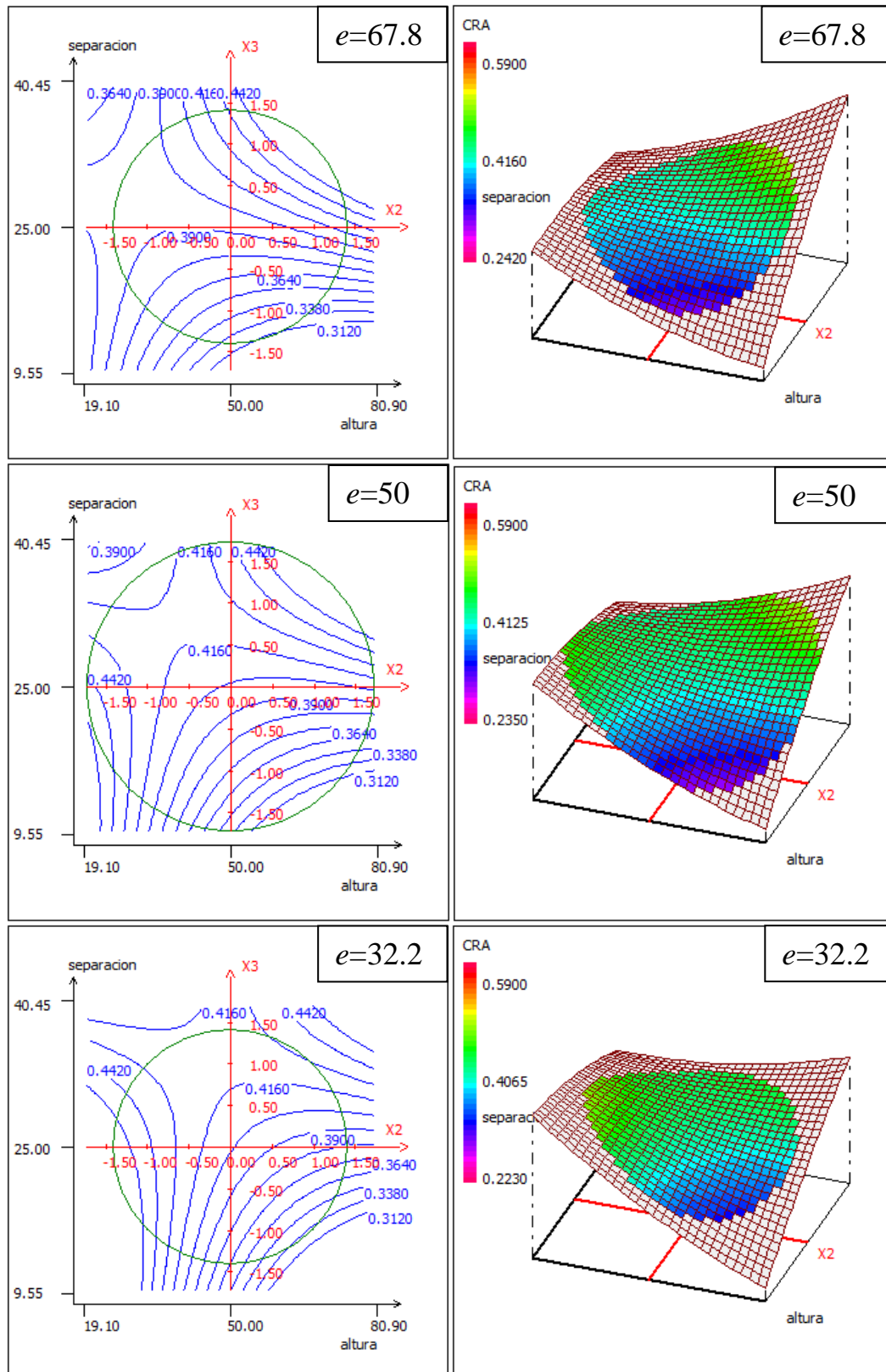


Figura 55. Variación de la respuesta CRA en función de h y s fijado e.



“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”

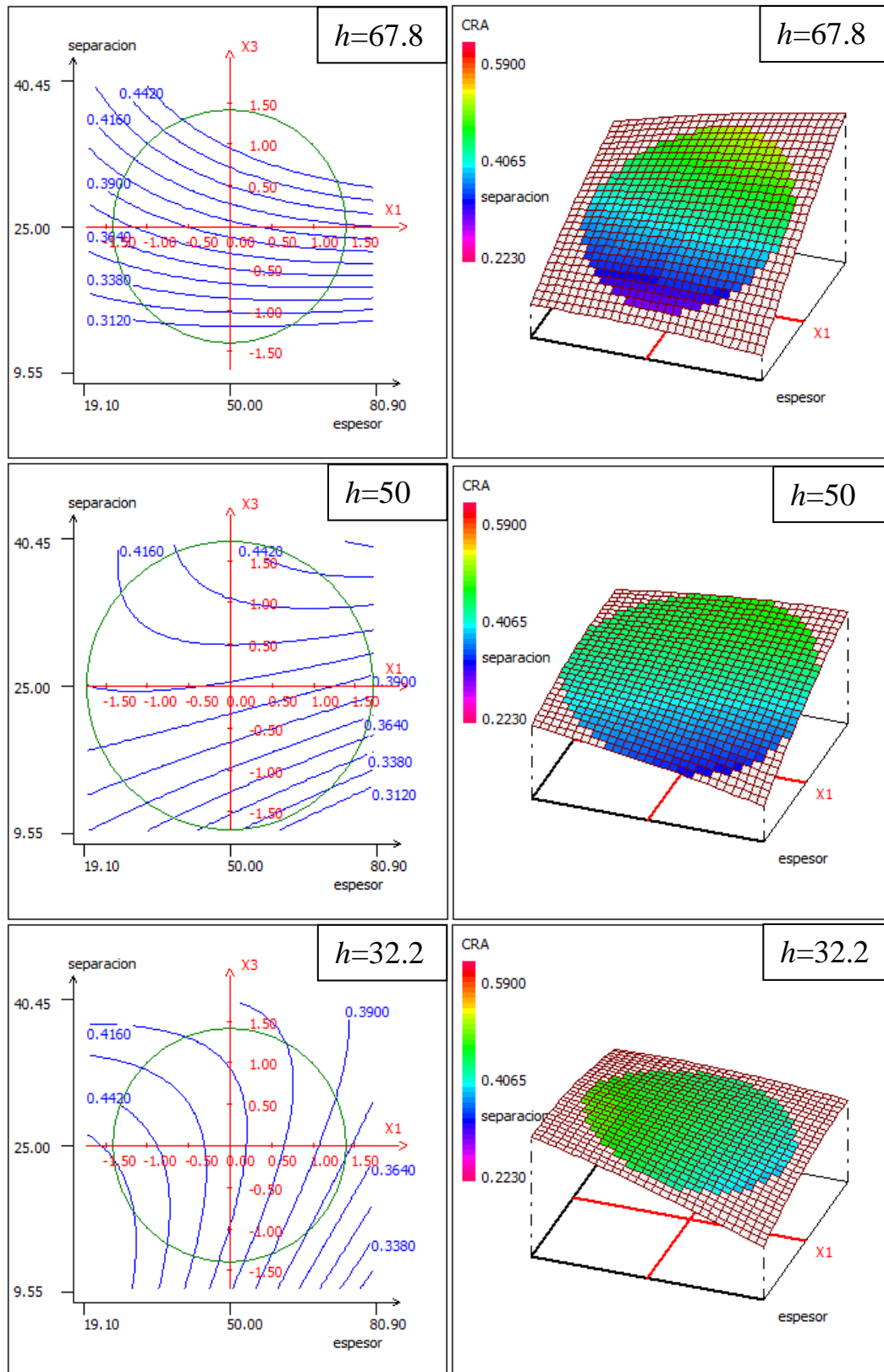


Figura 56. Variación de la respuesta CRA en función de e y s fijado h .



“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”

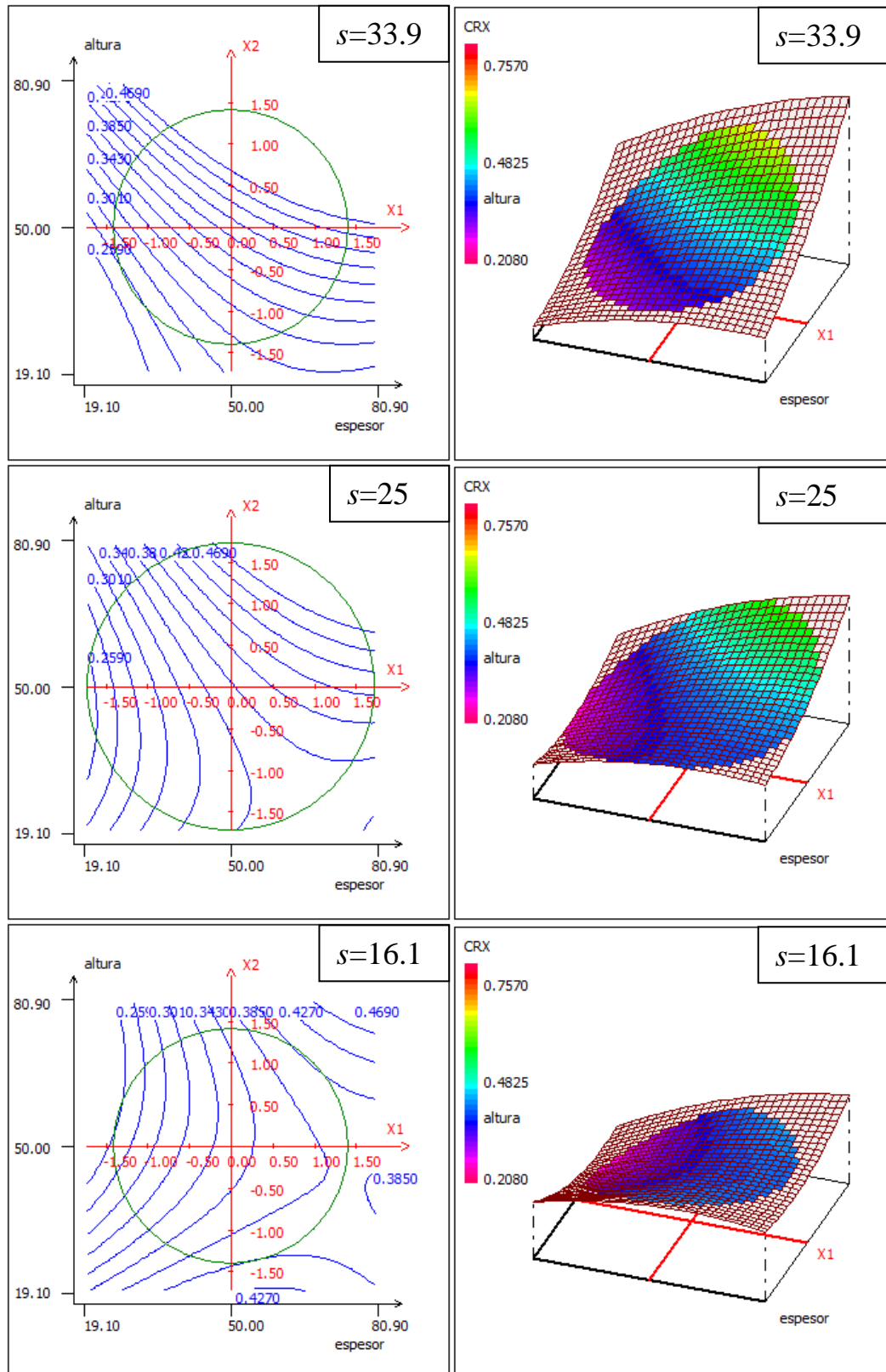


Figura 57. Variación de la respuesta CRX en función de e y h fijado s.



“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”

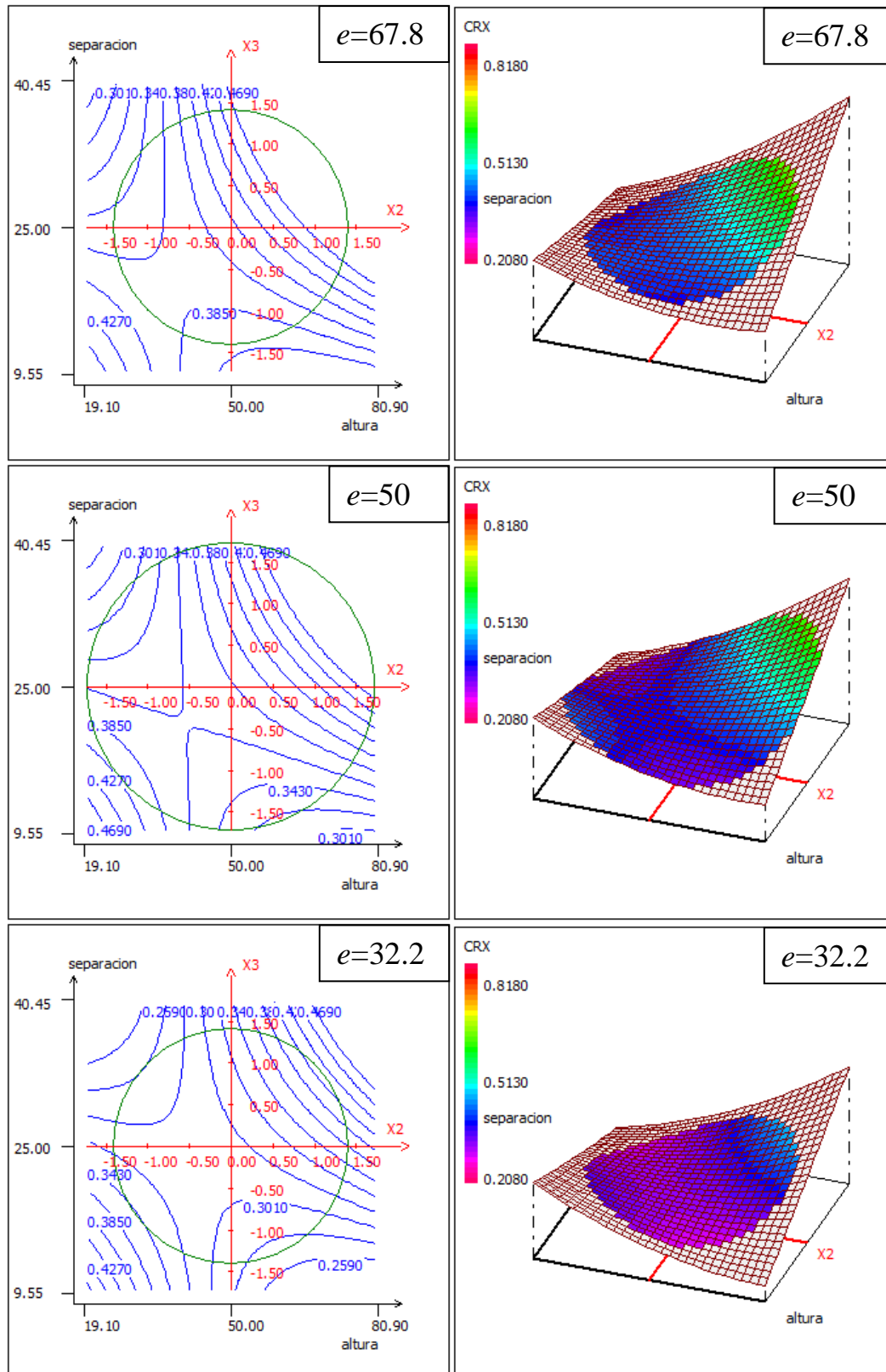


Figura 58. Variación de la respuesta CRX en función de h y s fijado e .



“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”

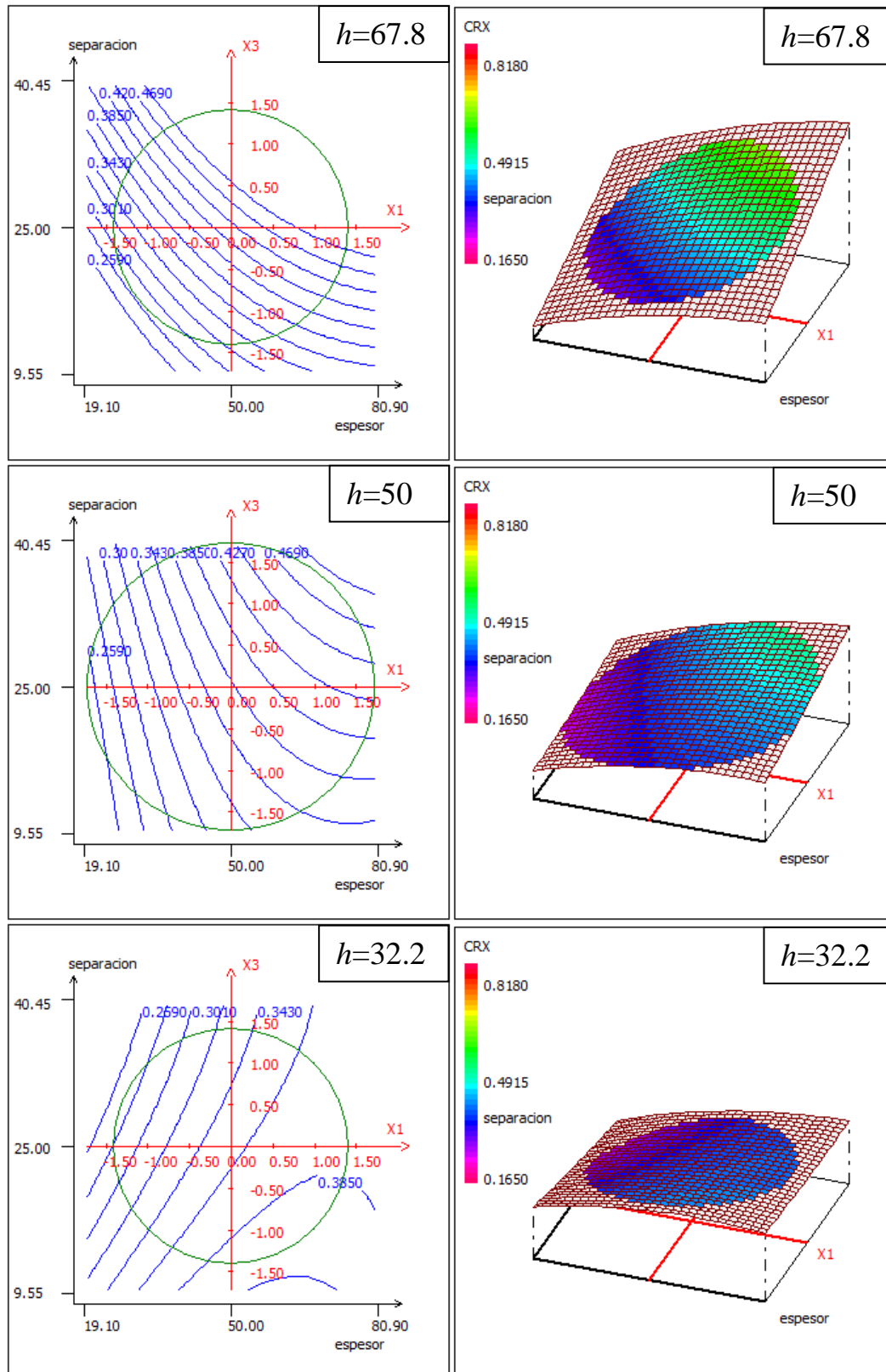


Figura 59. Variación de la respuesta CRX en función de e y s fijado h .



“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”

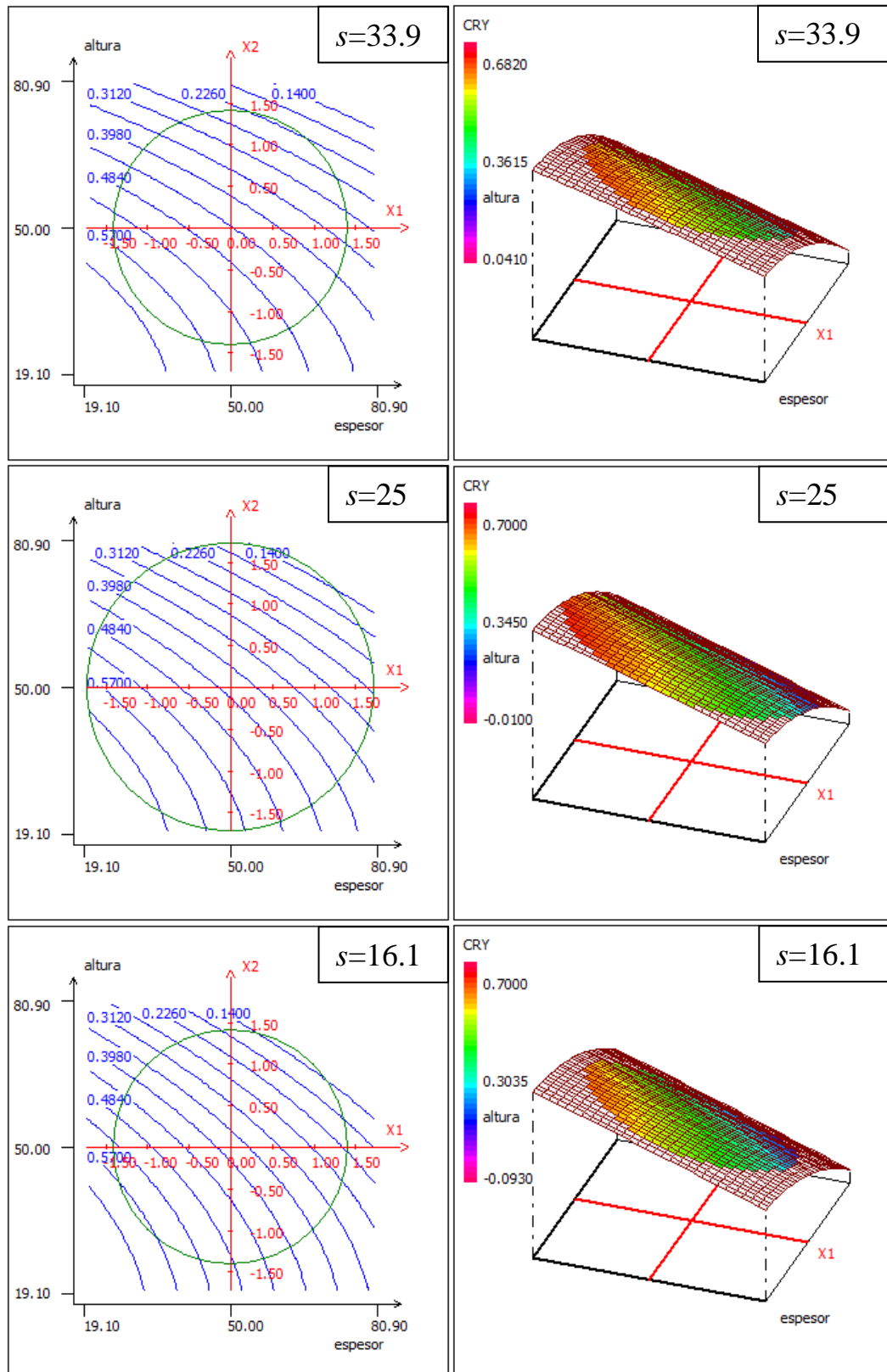


Figura 60. Variación de la respuesta CRY en función de e y h fijado s .



“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”

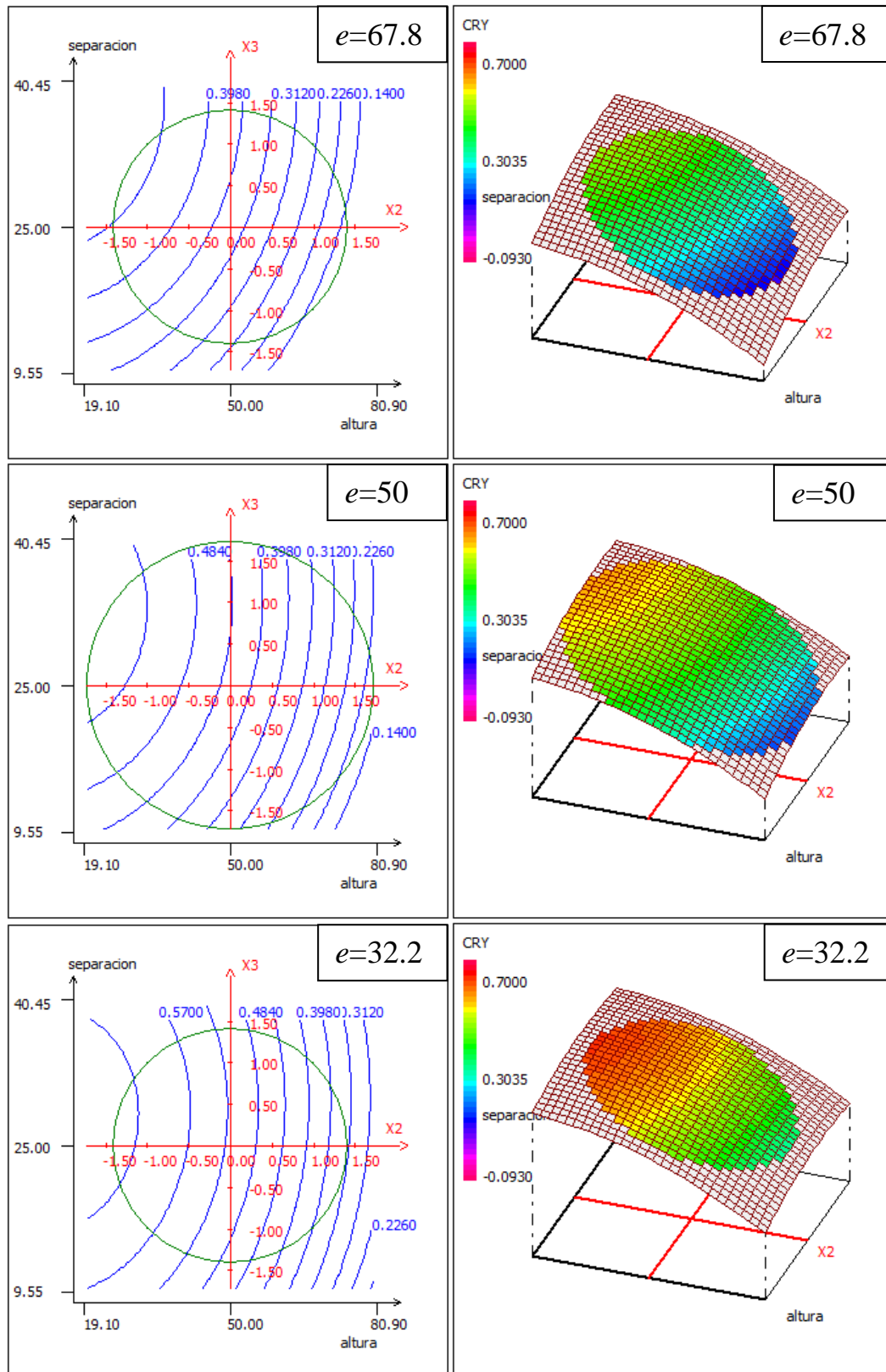


Figura 61. Variación de la respuesta CRY en función de h y s fijado e.



“ESTUDIO PARAMÉTRICO DE SUPERFICIES ARTIFICIALES PARA LA PRÁCTICA DE GOLF”

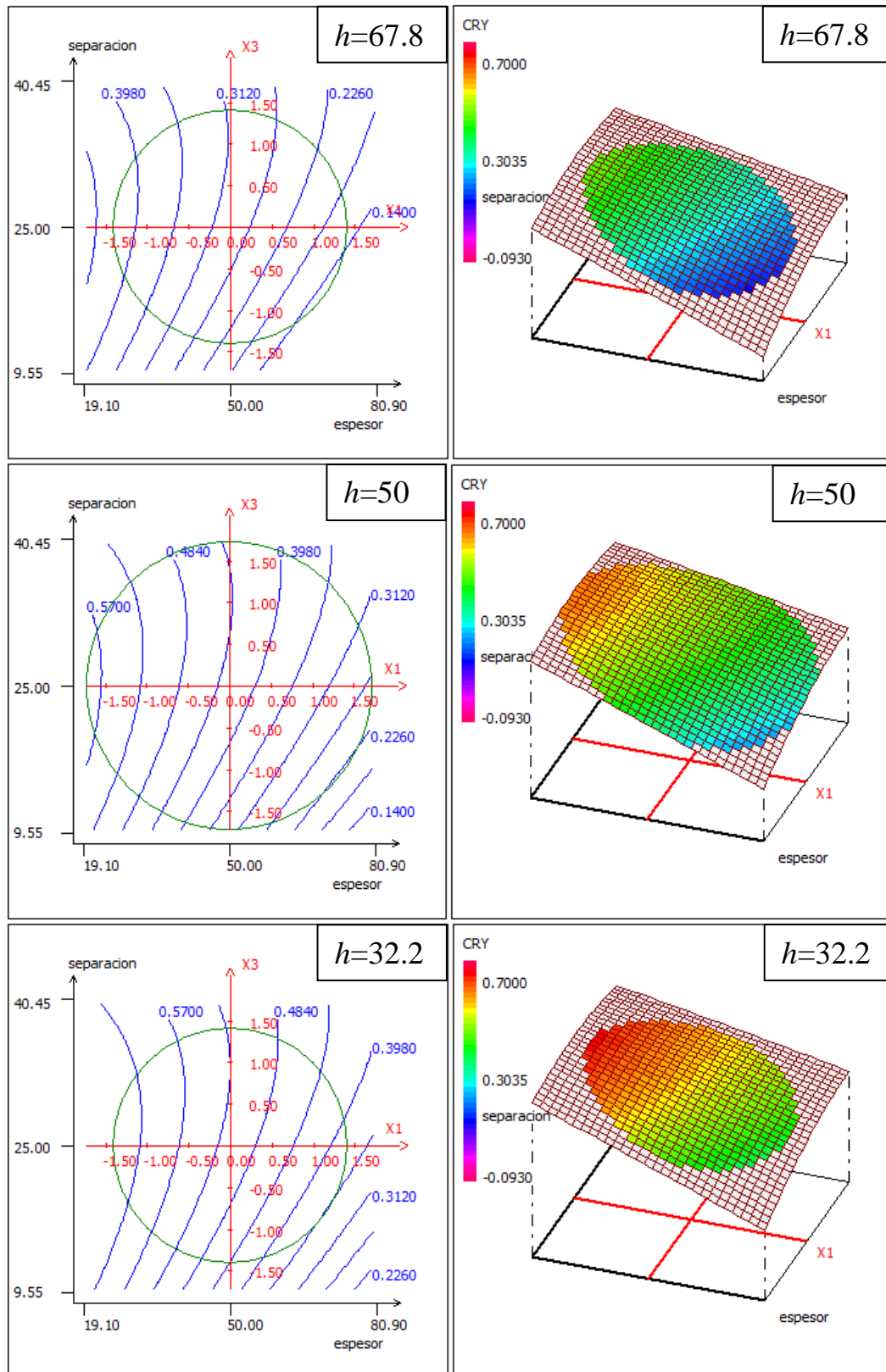


Figura 62. Variación de la respuesta CRY en función de e y s fijado h .