

## CÁLCULO DE ACORTAMIENTO EN PLIEGUES PARALELOS APLASTADOS (PLIEGUES CLASE 1C cf. Ramsay 1967)

El método de cálculo de acortamiento en pliegues paralelos aplastados usado en este trabajo es el de la roseta de isógonas (Srivastava y Shah 2008), que es un método gráfico que construye una elipse ajustada a los extremos de las isógonas de buzamiento del pliegue, estando éstas centradas en un punto (Figura 1).

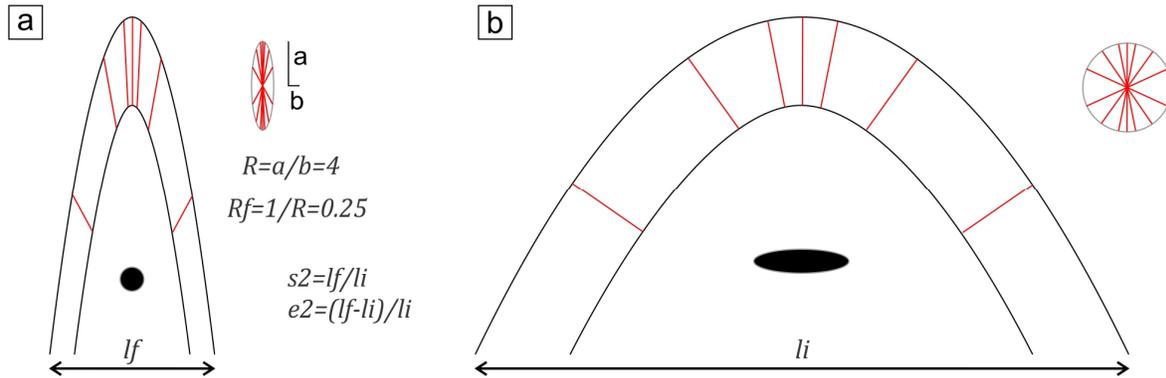


Figura 1: Esquema del método de la roseta de isógonas para la determinación del aplastamiento en un pliegue paralelo aplastado. En (a),  $a$  y  $b$  son los semiejes de la elipse definida por las isógonas de buzamiento centradas (en rojo). b. Estirando el pliegue y la elipse en la dirección del semieje  $b$ , se obtiene un pliegue paralelo donde la elipse se ajusta a un círculo perfecto. El pequeño círculo negro en (a) se transformó en la elipse negra en (b), como referencia de la deformación aplicada. Las longitudes inicial ( $li$ ) y final ( $lf$ ) en la dirección del semieje  $b$ , son parámetros que definen mediciones de la deformación (acortamiento) en esa dirección, conocidas como estiramiento ( $s2$ ) y extensión ( $e2$ ).

En la práctica, se dibujan las isógonas de buzamiento de un pliegue clase 1C y se centran todas en un punto. Los extremos de esas isógonas centradas se ajustan a una elipse, que es la elipse de deformación por aplastamiento. Utilizando cualquier programa de diseño gráfico, se puede estirar el pliegue junto con la elipse en la dirección del semieje  $b$  hasta que la elipse se convierta en un círculo ( $b = a$ ). En esa situación, el pliegue debería aproximarse a un pliegue paralelo (clase 1B), donde todas las isógonas de buzamiento tienen la misma longitud (diámetro del círculo). En el pliegue paralelo, por definición, cada isógona es perpendicular a la capa plegada en el punto en que la interseca.

Los semiejes de la elipse de deformación por aplastamiento son  $a = s1$  y  $b = s2$ , donde  $s1$  y  $s2$  son los estiramientos, una medida de la deformación (Figura 1). Nos interesa  $s2$ , ya que es el estiramiento en la dirección de aplastamiento. La razón inversa de esta elipse se denomina  $Rf$ . Asumiendo área constante,  $s2 = 1/s1$ . Por lo tanto:

$$Rf = \frac{s2}{s1} = \frac{s2}{\left(\frac{1}{s2}\right)}$$

$$Rf = s2 \cdot s2$$

$$\sqrt{Rf} = s2$$

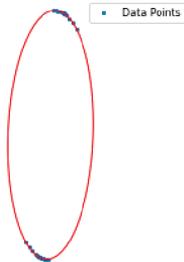
Recordando que  $s2$  es una medida de la extensión en la misma dirección,  $e2$ , dada por  $e2 = s2 - 1$  (Figura 1), se obtienen los valores de acortamiento asociados (extensión negativa).

El método de la roseta de isógonas (Figura 1) tiene el inconveniente de tener que ajustar “a ojo” tanto las isógonas de buzamiento como la elipse que se define por estas últimas, incrementando el margen de error de los resultados. Para evitar estos inconvenientes, hemos desarrollado un código que nos permite calcular las isógonas de buzamiento, centrarlas y ajustar la elipse de manera numérica, evitando así un ajuste “a ojo” y obteniendo resultados más precisos, ya sea para pliegues completos o limbo por limbo. Los resultados de este análisis en una serie de pliegues del área de estudio se presentan a continuación. Los gráficos que se muestran a continuación están en el formato de la salida del programa, que no persigue criterios de estilo. Los ángulos reportados son por convención positivos en sentido antihorario y se miden desde el eje horizontal del gráfico. La tabla final resume los resultados y su análisis estadístico. SD: Desvío estándar, M. ERROR: margen de error.

## **REFERENCIAS**

- Ramsay, J.G. 1967. Folding and fracturing of rocks. McGraw-Hill 568 p., New York
- Srivastava, D.C. y Shah, J. 2008. The “isogon rosette” method for rapid estimation of strain in flattened folds. *Journal of Structural Geology* 30(4): 444-450.

Limbo izquierdo



Limbo derecho



Deformación de limbo izquierdo anticlinal, derecho sinclinal:

Ecuación de la elipse:  $0.000107x^2 + 2.04e-06xy + 5.14e-06y^2 + 6.14e-18x + -5.28e-19y = 1$

Ángulo de rotación de la elipse: 90.58

Semiejes a, b: 441.69 96.87

Rf: 0.22

Estiramiento s2 (por aplanamiento): 0.47

Deformación de limbo derecho anticlinal, izquierdo sinclinal:

Ecuación de la elipse:  $4.47e-05x^2 + -2.76e-06xy + 5.13e-06y^2 + 5.23e-19x + -4.43e-20y = 1$

Ángulo de rotación de la elipse: 88.0

Semiejes a, b: 443.7 149.54

Rf: 0.34

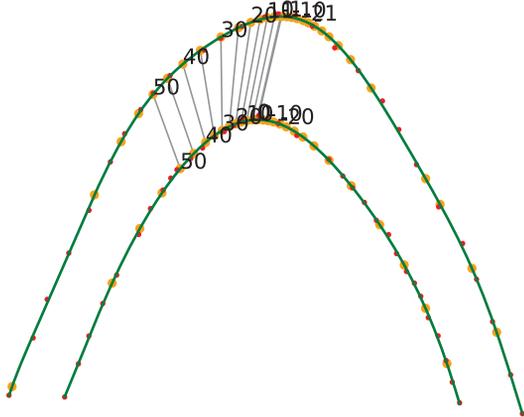
Estiramiento s2 (por aplanamiento): 0.58

Buzamiento en charnela de techo: 4.77

Buzamiento en charnela de base: 6.79

Buzamiento de superficie axial (isógona axial): -89.75

Capa A  
Limbo izquierdo



CAPA A limbo izquierdo

Deformación de limbo izquierdo anticlinal, derecho sinclinal:  
 Ecuación de la elipse:  $0.000154x^2 + -0.000117xy + 0.000106y^2 + 2.67e-20x + -6.53e-20y = 1$   
 Ángulo de rotación de la elipse: 56.05  
 Semiejes a, b: 122.1, 71.96  
 Rf: 0.59  
 Estiramiento s2 (por aplanamiento): 0.77  
 Ángulo entre elipse de deformación y plano axial: -16.49

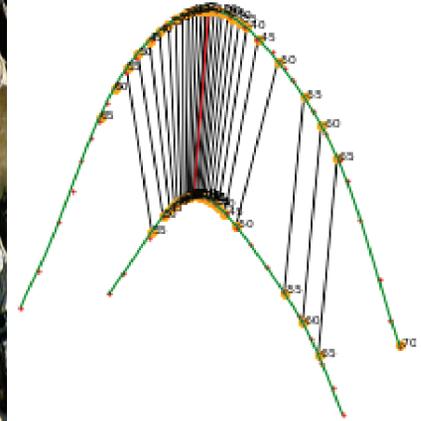
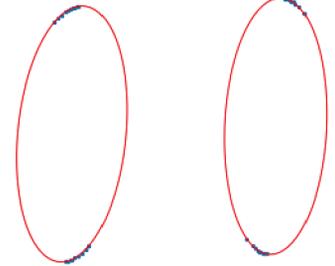
Buzamiento en charnela de techo: -7.31  
 Buzamiento en charnela de base: 0.42  
 Buzamiento de superficie axial: 72.55

Pto Español Gardiner cave  
P1090969



Capa B

Limbo izquierdo      Limbo derecho hasta -55



CAPA B

Deformación de limbo izquierdo anticlinal, derecho sinclinal:  
 Ecuación de la elipse:  $0.000209x^2 + -3.45e-05xy + 4.01e-05y^2 + 3.15e-18x + -1.8e-20y = 1$   
 Ángulo de rotación de la elipse: 84.22  
 Semiejes a, b: 161.47 68.88  
 Rf: 0.43  
 Estiramiento s2 (por aplanamiento): 0.65

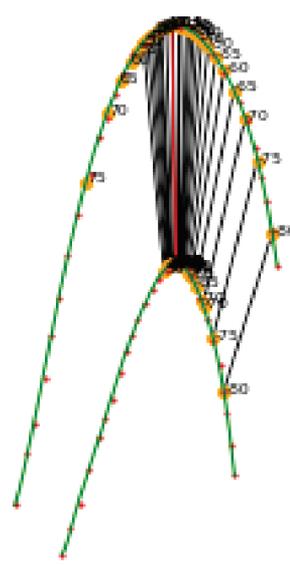
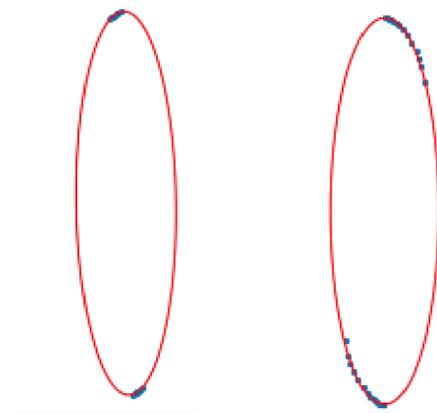
Deformación de limbo derecho anticlinal, izquierdo sinclinal:  
 Ecuación de la elipse:  $0.000238x^2 + -1.85e-05xy + 3.89e-05y^2 + 9.47e-18x + -1.69e-18y = 1$   
 Ángulo de rotación de la elipse: 87.34  
 Semiejes a, b: 161.15 64.78  
 Rf: 0.4  
 Estiramiento s2 (por aplanamiento): 0.63

Buzamiento en charnela de techo: -3.35  
 Buzamiento en charnela de base: 1.88  
 Buzamiento de superficie axial (isógona axial): 85.39



Limbo izquierdo

Limbo derecho



Deformación de limbo izquierdo anticlinal, derecho sinclinal:

Ecuación de la elipse:  $9.33e-05x^2 + 2.36e-06xy + 6.19e-06y^2 + 1.76e-18x + 7.29e-20y = 1$

Ángulo de rotación de la elipse: 90.78

Semiejes a, b: 402.47 103.54

Rf: 0.26

Estiramiento s2 (por aplanamiento): 0.51

Deformación de limbo derecho anticlinal, izquierdo sinclinal:

Ecuación de la elipse:  $8.02e-05x^2 + -1.57e-07xy + 6.24e-06y^2 + 1.77e-18x + -2.95e-19y = 1$

Ángulo de rotación de la elipse: 89.94

Semiejes a, b: 400.47 111.67

Rf: 0.28

Estiramiento s2 (por aplanamiento): 0.53

Buzamiento en charnela de techo: 2.61

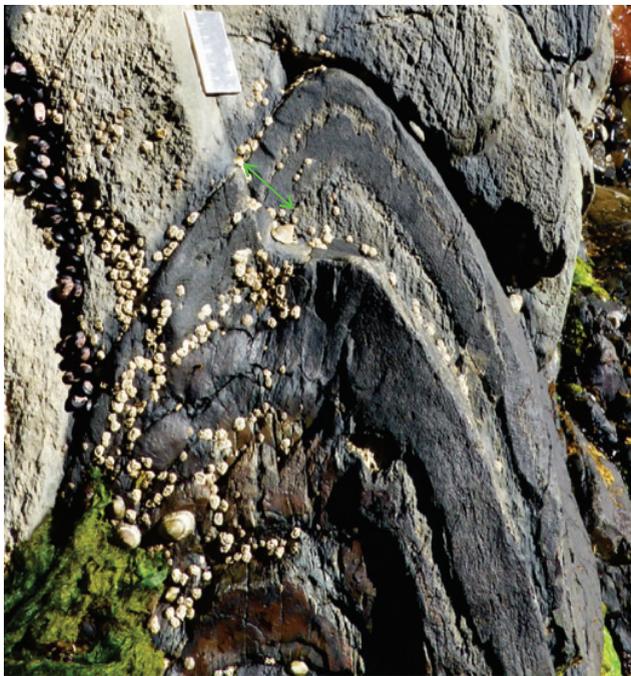
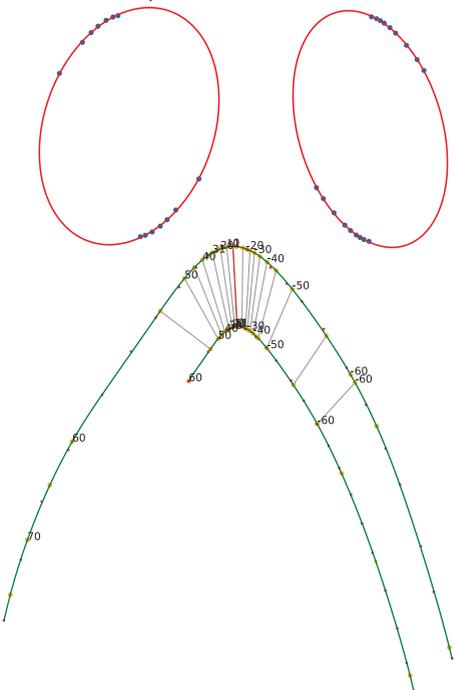
Buzamiento en charnela de base: -1.53

Buzamiento de superficie axial (isógona axial): -89.06

# Pto Español Gardiner cave P1090971

Limbo izquierdo

Limbo derecho



Deformación de limbo izquierdo anticlinal, derecho sinclinal:

Ecuación de la elipse:  $0.000112x^2 + -3.82e-05xy + 6.54e-05y^2 + 5.4e-18x + 1.27e-18y = 1$

Ángulo de rotación de la elipse: 70.41

Semiejes a, b: 130.58, 91.64

Rf: 0.7

Estiramiento s2 (por aplanamiento): 0.84

Ángulo entre elipse de deformación y plano axial: 157.49

Deformación de limbo derecho anticlinal, izquierdo sinclinal:

Ecuación de la elipse:  $0.000164x^2 + 6.12e-05xy + 7.08e-05y^2 + 7.73e-19x + -4.41e-19y = 1$

Ángulo de rotación de la elipse: 106.67

Semiejes a, b: 127.4, 76.04

Rf: 0.6

Estiramiento s2 (por aplanamiento): 0.77

Ángulo entre elipse de deformación y plano axial: 193.76

Buzamiento en charnela de techo: 2.03

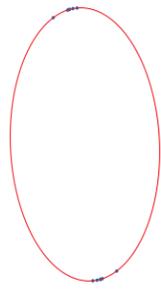
Buzamiento en charnela de base: 0.22

Buzamiento de superficie axial: -87.09

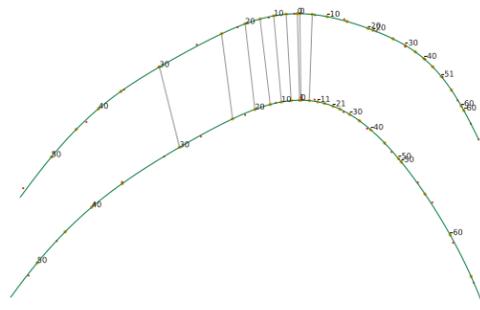
Pto Español Gardiner cave  
P1090991

Capa A, limbo izquierdo

CAPA A:  
Deformación de limbo izquierdo anticlinal, derecho sinclinal:  
Ecuación de la elipse:  $0.000873x^2 + 5.31e-05xy + 0.000265y^2 + -3.4e-17x + -3.1e-18y = 1$   
Ángulo de rotación de la elipse: 92.5  
Semiejes a, b: 61.6, 33.83  
Rf: 0.55  
Estiramiento s2 (por aplanamiento): 0.74  
Ángulo entre elipse de deformación y plano axial: 170.45



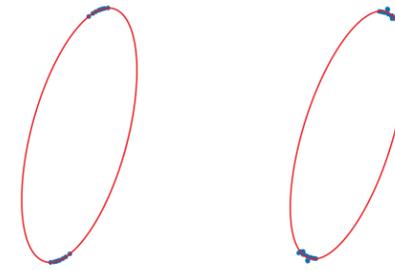
Buzamiento en charnela de techo: -7.26  
Buzamiento en charnela de base: 1.82  
Buzamiento de superficie axial: -77.96



Capa D

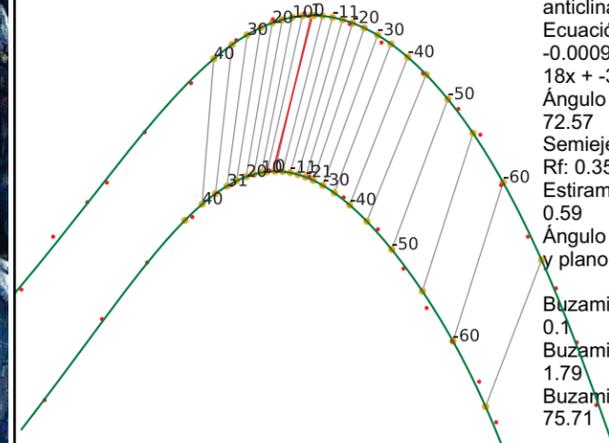
limbo izquierdo limbo derecho

CAPA D  
Deformación de limbo izquierdo anticlinal, derecho sinclinal:  
Ecuación de la elipse:  $0.00161x^2 + -0.000747xy + 0.000335y^2 + 1.97e-17x + -3.64e-18y = 1$   
Ángulo de rotación de la elipse: 74.85  
Semiejes a, b: 65.32, 24.15  
Rf: 0.37  
Estiramiento s2 (por aplanamiento): 0.61  
Ángulo entre elipse de deformación y plano axial: -0.86



Deformación de limbo derecho anticlinal, izquierdo sinclinal:  
Ecuación de la elipse:  $0.00174x^2 + -0.000951xy + 0.000378y^2 + 8.6e-18x + -3.25e-18y = 1$   
Ángulo de rotación de la elipse: 72.57  
Semiejes a, b: 66.15, 22.99  
Rf: 0.35  
Estiramiento s2 (por aplanamiento): 0.59  
Ángulo entre elipse de deformación y plano axial: -3.15

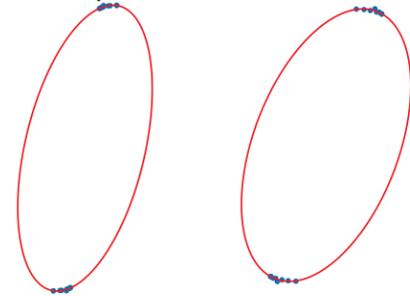
Buzamiento en charnela de techo: -0.1  
Buzamiento en charnela de base: 1.79  
Buzamiento de superficie axial: 75.71



CAPA C  
Deformación de limbo izquierdo anticlinal, derecho sinclinal:

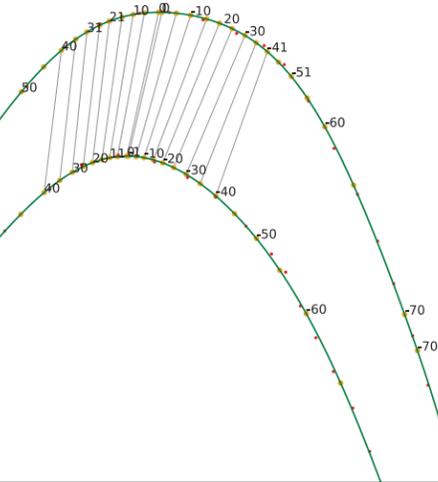
Capa C  
limbo izquierdo limbo derecho

Ecuación de la elipse:  $0.000178x^2 + -6.97e-05xy + 3.99e-05y^2 + 1.47e-18x + -2.99e-19y = 1$   
Ángulo de rotación de la elipse: 76.58  
Semiejes a, b: 178.05, 73.32  
Rf: 0.41  
Estiramiento s2 (por aplanamiento): 0.64  
Ángulo entre elipse de deformación y plano axial: -12.17

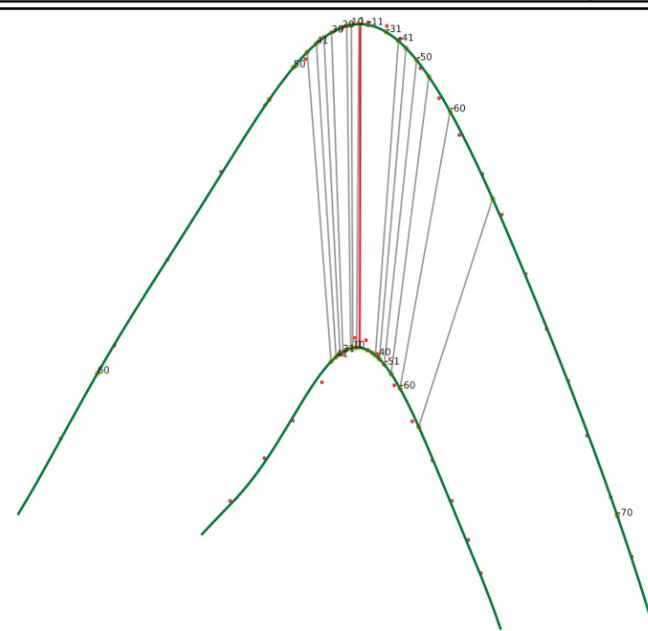


Deformación de limbo derecho anticlinal, izquierdo sinclinal:

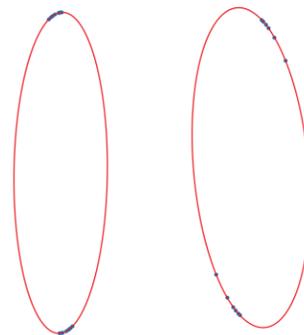
Ecuación de la elipse:  $0.000104x^2 + -5.66e-05xy + 4.07e-05y^2 + 1.2e-18x + -4.68e-19y = 1$   
Ángulo de rotación de la elipse: 69.09  
Semiejes a, b: 182.85, 93.34  
Rf: 0.51  
Estiramiento s2 (por aplanamiento): 0.71  
Ángulo entre elipse de deformación y plano axial: -19.66



Buzamiento en charnela de techo: 12.08  
Buzamiento en charnela de base: 1.19  
Buzamiento de superficie axial: 88.75



Capa E  
limbo izquierdo limbo derecho



CAPA F  
Deformación de limbo izquierdo anticlinal, derecho sinclinal:  
Ecuación de la elipse:  $0.000718x^2 + -1.72e-05xy + 6.17e-05y^2 + -2.4e-18x + -6.06e-20y = 1$   
Ángulo de rotación de la elipse: 89.25  
Semiejes a, b: 127.4, 37.33  
Rf: 0.29  
Estiramiento s2 (por aplanamiento): 0.54  
Ángulo entre elipse de deformación y plano axial: -0.61

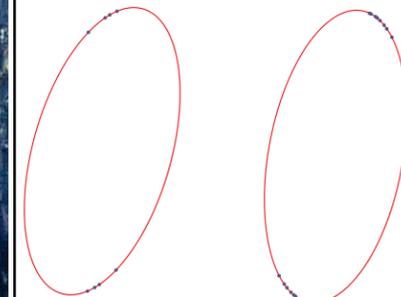
Deformación de limbo derecho anticlinal, izquierdo sinclinal:  
Ecuación de la elipse:  $0.000423x^2 + 6.47e-05xy + 5.8e-05y^2 + 7.44e-18x + -1.66e-18y = 1$   
Ángulo de rotación de la elipse: 95.02  
Semiejes a, b: 134.59, 48.45  
Rf: 0.36  
Estiramiento s2 (por aplanamiento): 0.6  
Ángulo entre elipse de deformación y plano axial: 5.16

Buzamiento en charnela de techo: -1.1  
Buzamiento en charnela de base: -7.21  
Buzamiento de superficie axial: 89.87

Capa E

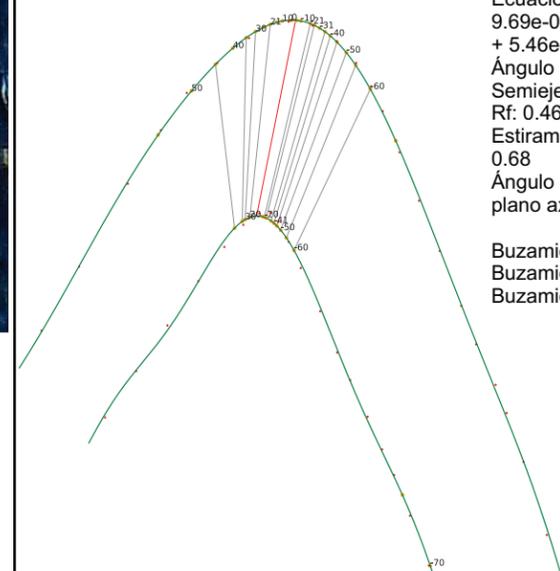
limbo izquierdo limbo derecho

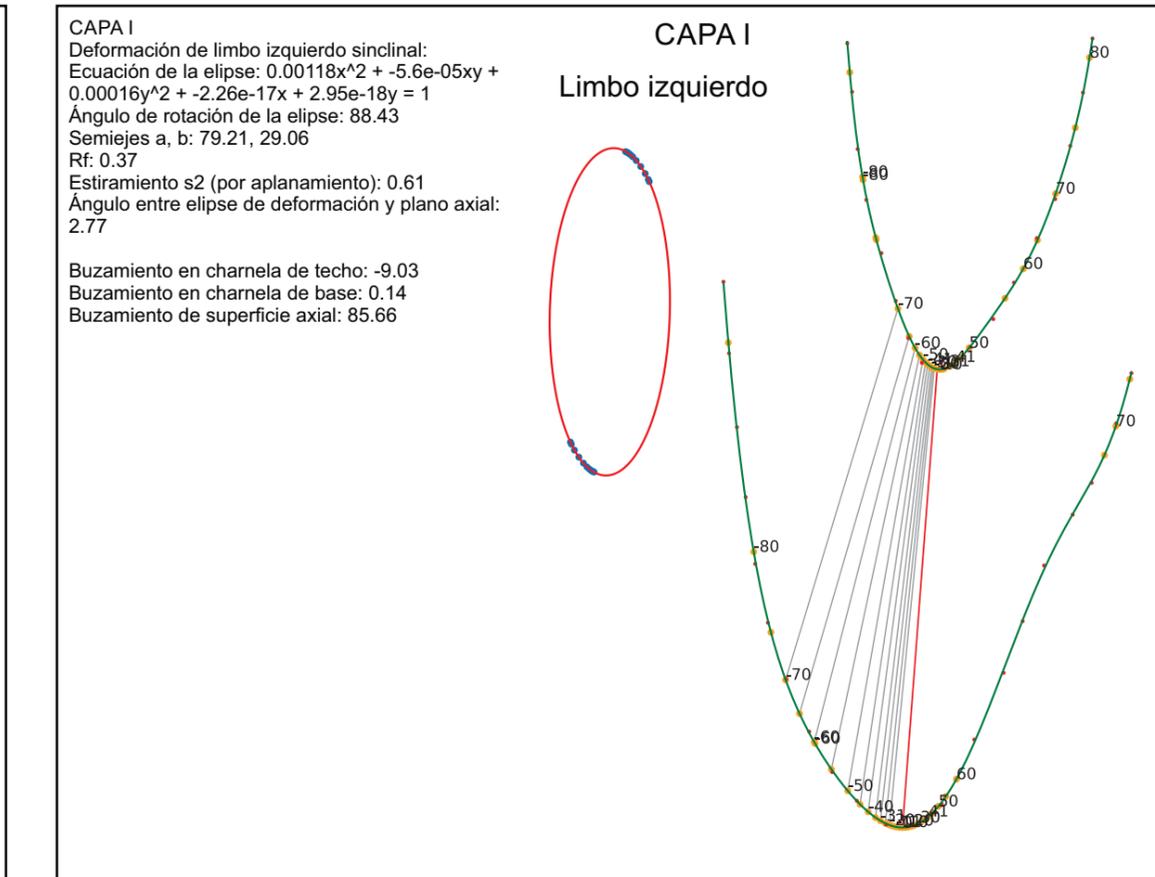
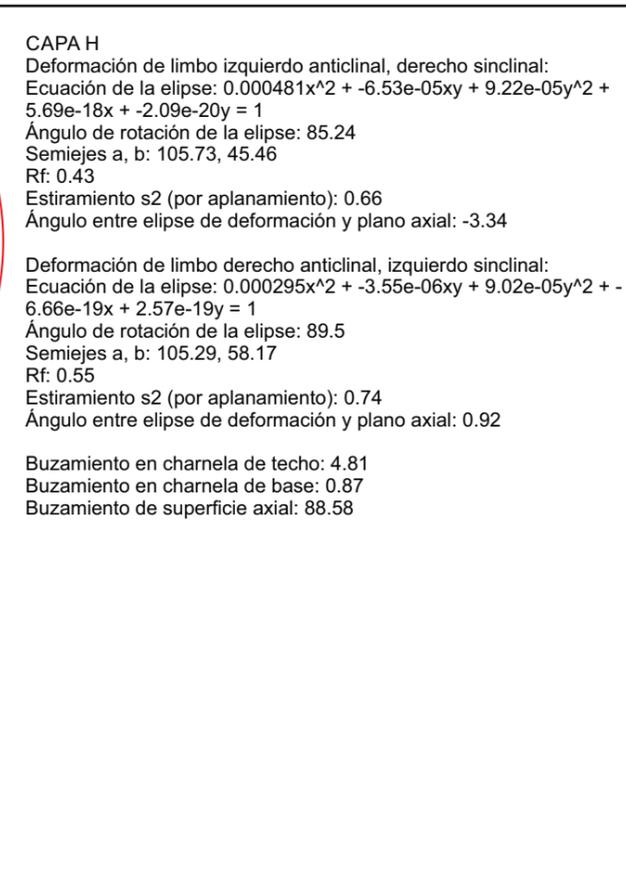
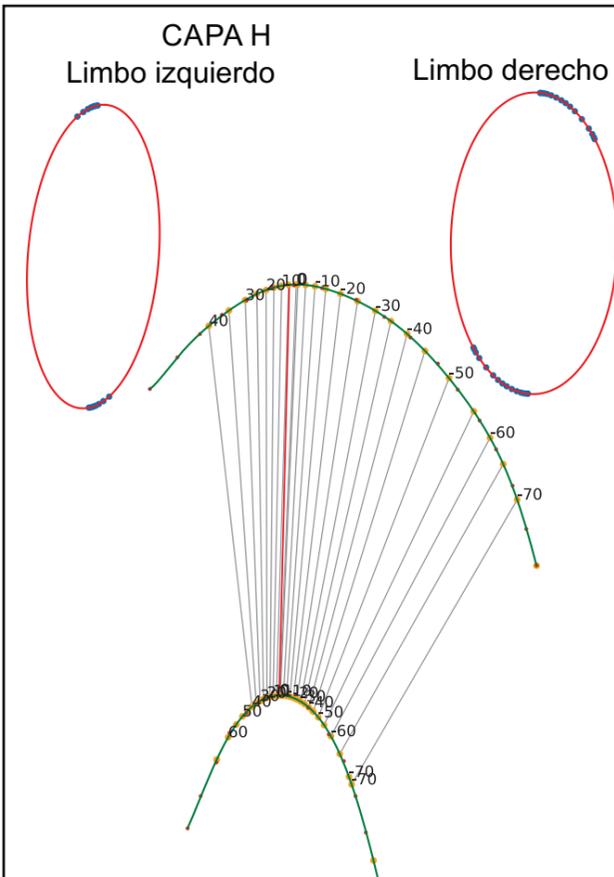
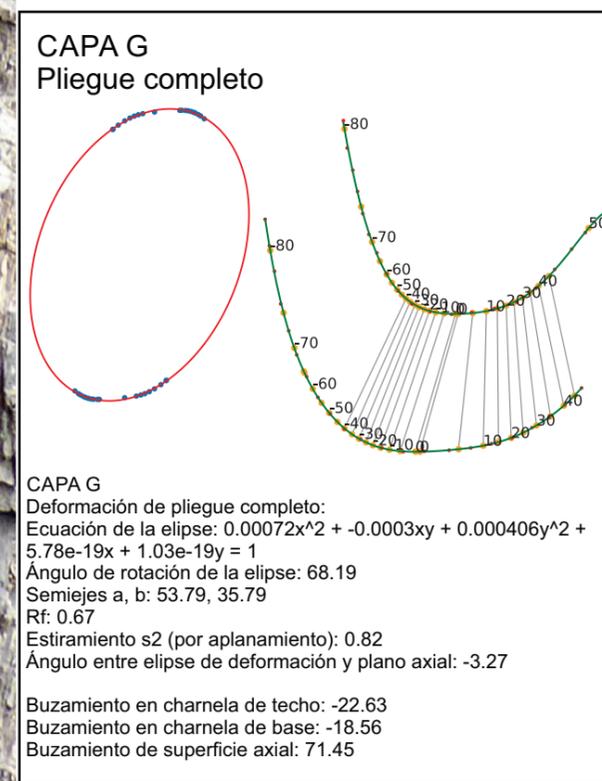
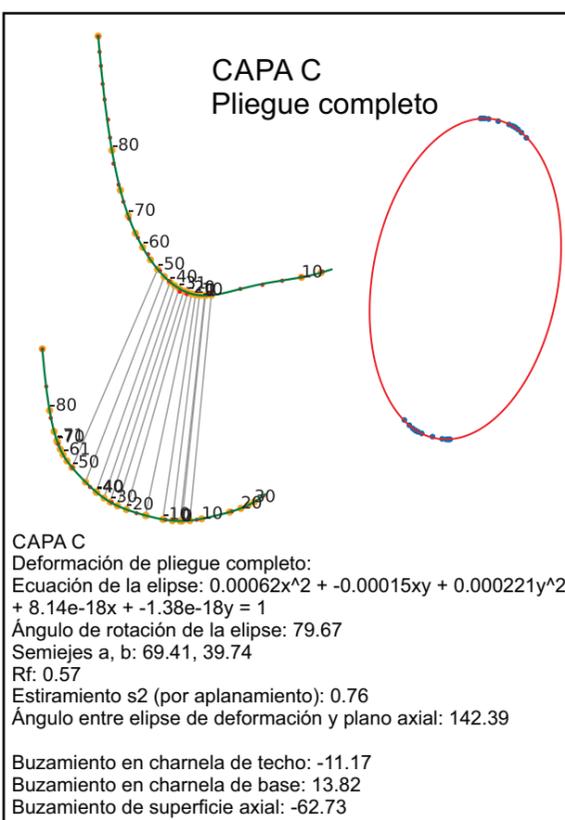
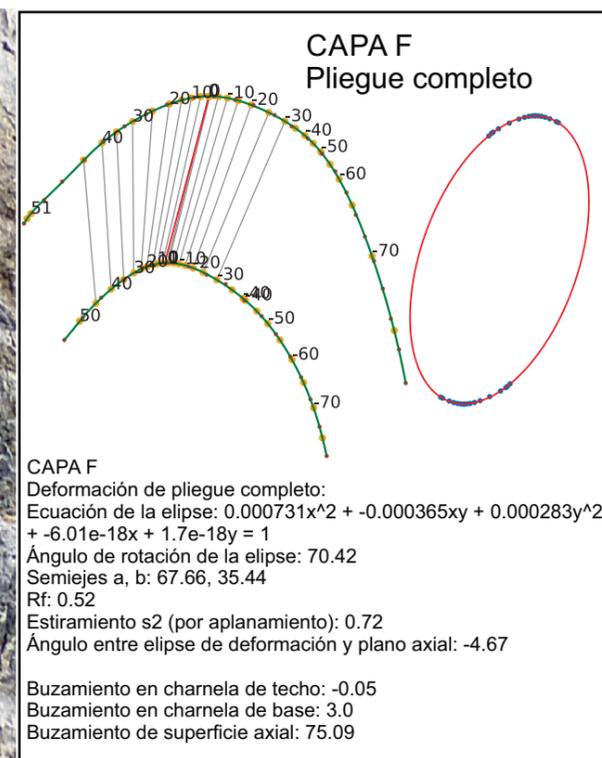
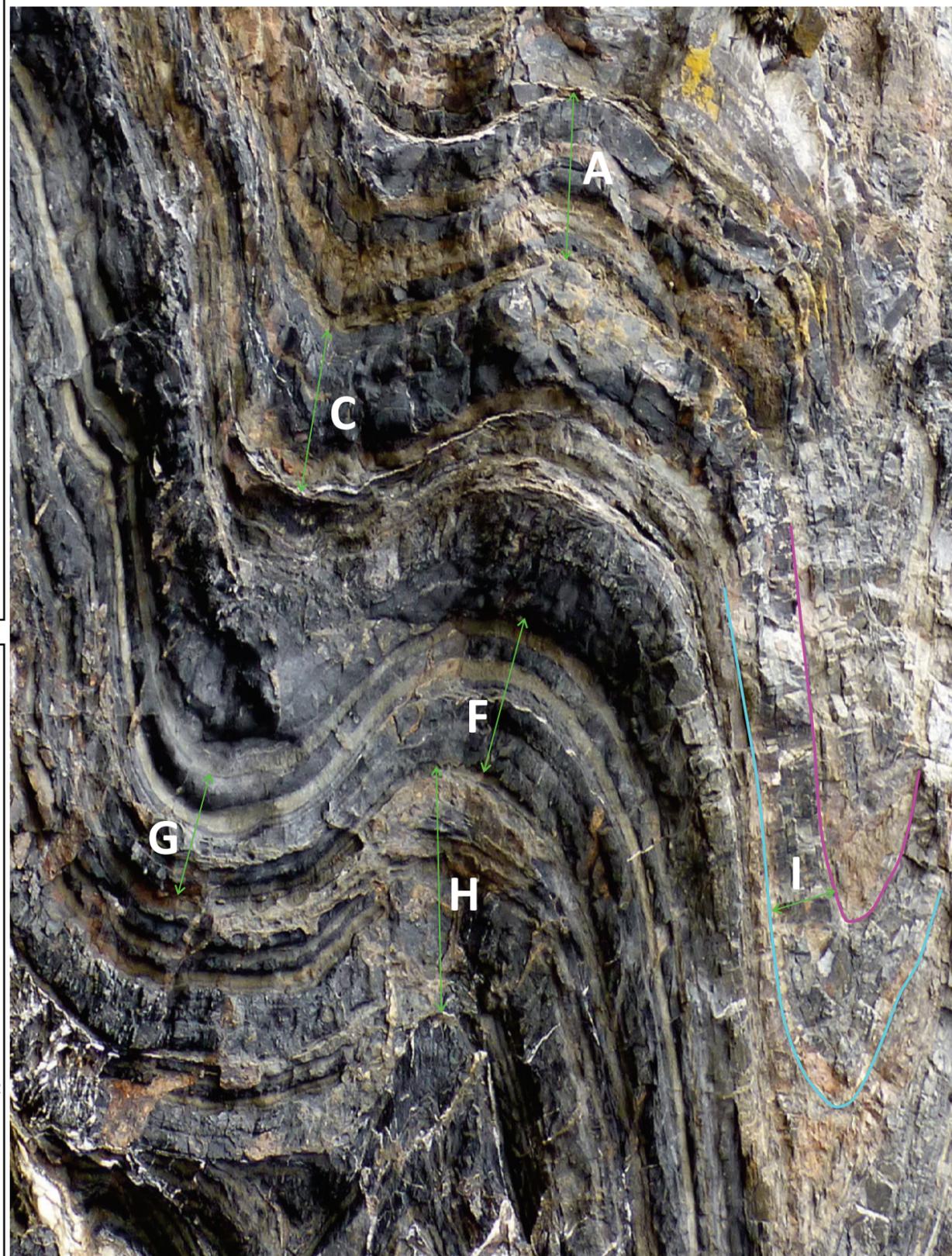
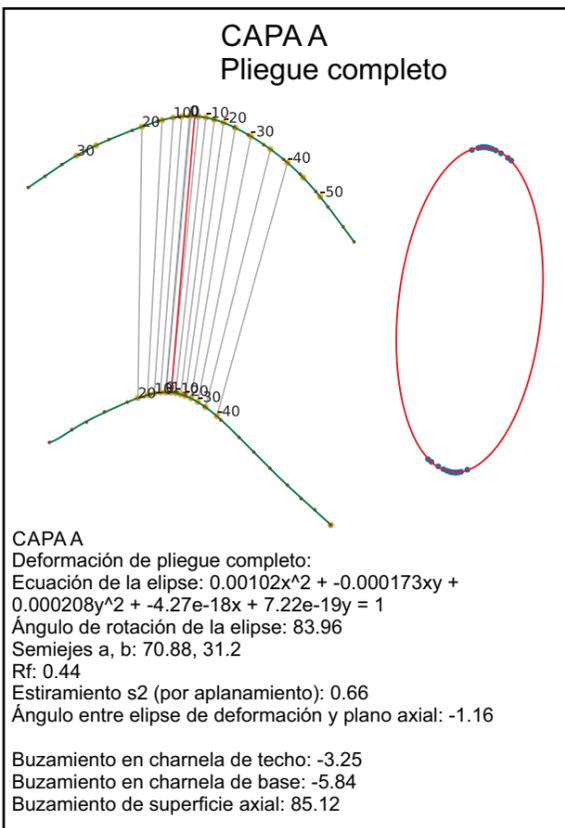
CAPA E  
Deformación de limbo izquierdo anticlinal, derecho sinclinal:  
Ecuación de la elipse:  $0.000296x^2 + -0.000131xy + 8.81e-05y^2 + 1.25e-17x + -8.09e-19y = 1$   
Ángulo de rotación de la elipse: 73.89  
Semiejes a, b: 120.2, 56.39  
Rf: 0.47  
Estiramiento s2 (por aplanamiento): 0.68  
Ángulo entre elipse de deformación y plano axial: -4.77



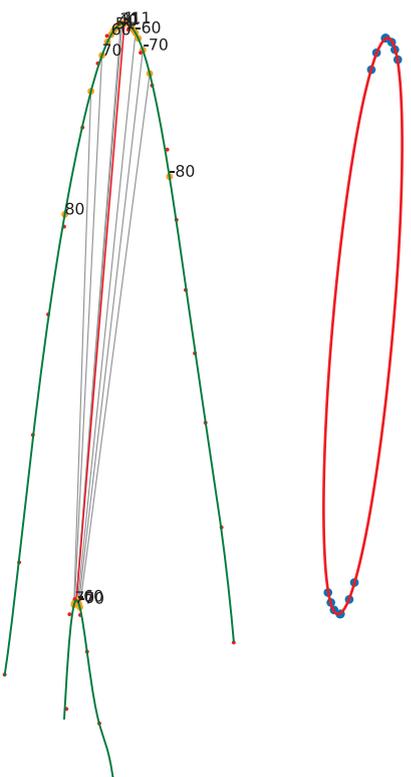
Deformación de limbo derecho anticlinal, izquierdo sinclinal:  
Ecuación de la elipse:  $0.000337x^2 + -9.69e-05xy + 8.07e-05y^2 + -1.41e-17x + 5.46e-18y = 1$   
Ángulo de rotación de la elipse: 79.64  
Semiejes a, b: 117.95, 53.79  
Rf: 0.46  
Estiramiento s2 (por aplanamiento): 0.68  
Ángulo entre elipse de deformación y plano axial: 0.98

Buzamiento en charnela de techo: -4.16  
Buzamiento en charnela de base: 1.76  
Buzamiento de superficie axial: 78.66





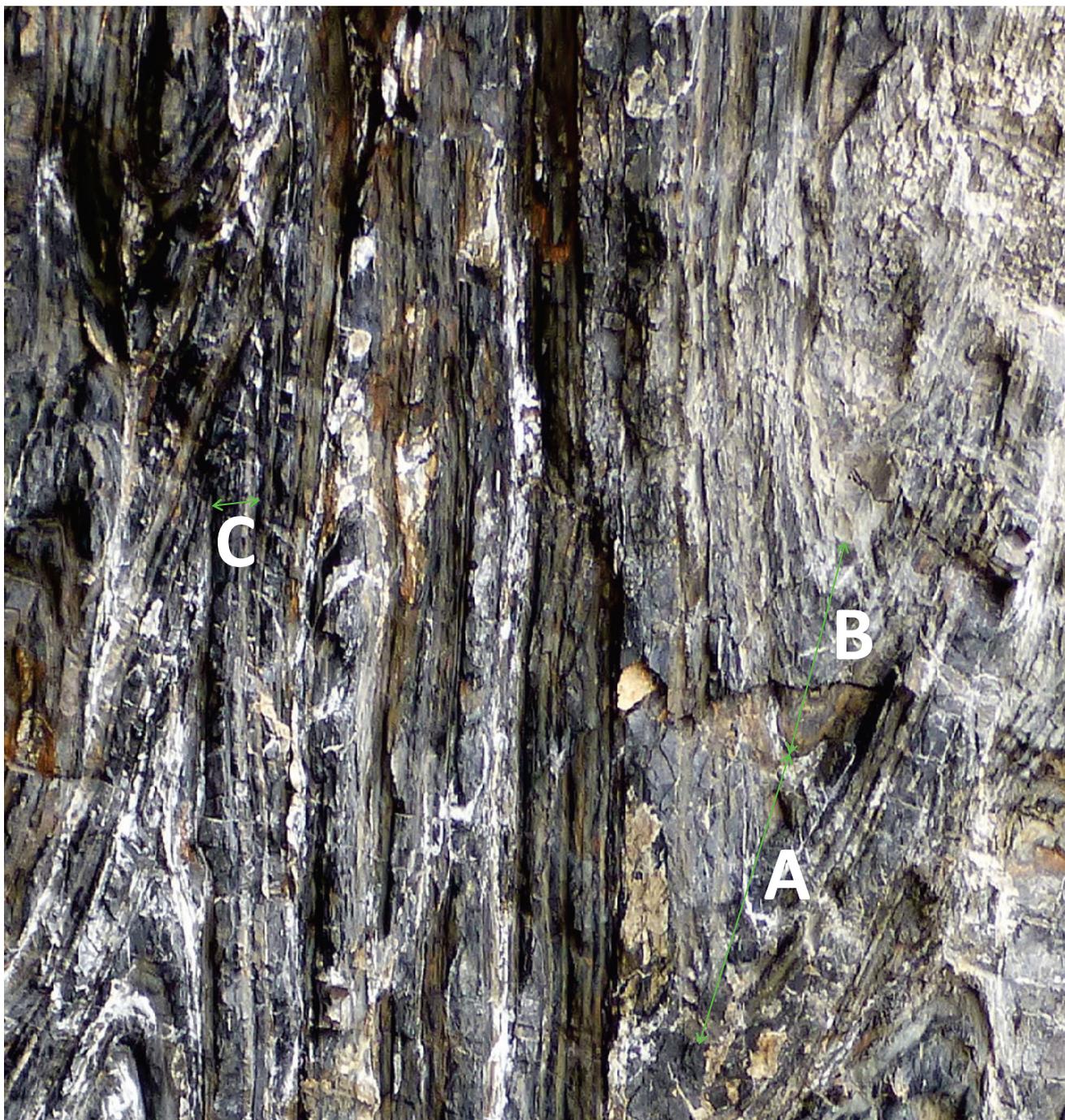
CAPA C  
Pliegue completo



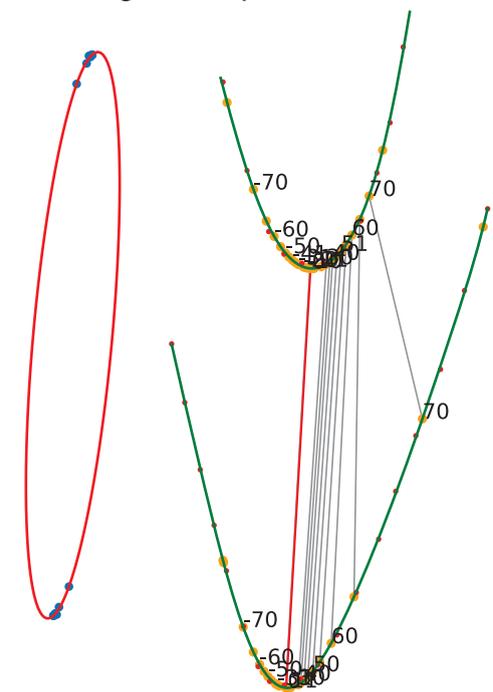
CAPA C  
Deformación de pliegue completo:  
Ecuación de la elipse:  $0.00303x^2 + -0.000523xy + 5.62e-05y^2 + 7.73e-18x + -7.79e-19y = 1$   
Ángulo de rotación de la elipse: 85.02  
Semiejes a, b: 172.81, 18.09  
Rf: 0.1  
Estiramiento s2 (por aplanamiento): 0.32  
Ángulo entre elipse de deformación y plano axial: -0.23

Buzamiento en charnela de techo: -3.17  
Buzamiento en charnela de base: 3.53  
Buzamiento de superficie axial: 85.25

Pto Español Gardiner cave  
P1090904



CAPA B  
Pliegue completo



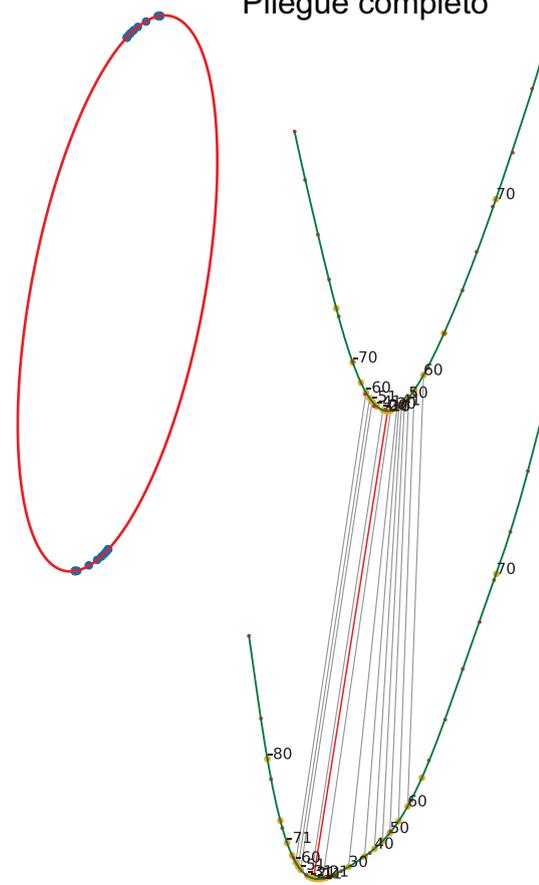
CAPA B  
Deformación de pliegue completo:  
Ecuación de la elipse:  $0.00114x^2 + -0.000201xy + 3.11e-05y^2 + -8.27e-18x + 7.51e-19y = 1$   
Ángulo de rotación de la elipse: 84.87  
Semiejes a, b: 212.64, 29.52  
Rf: 0.14  
Estiramiento s2 (por aplanamiento): 0.37  
Ángulo entre elipse de deformación y plano axial: -1.82

Buzamiento en charnela de techo: -3.44  
Buzamiento en charnela de base: -3.65  
Buzamiento de superficie axial: 86.69

CAPA A  
Deformación de pliegue completo:  
Ecuación de la elipse:  $0.000121x^2 + -4.11e-05xy + 1.56e-05y^2 + -2.24e-18x + 1.22e-19y = 1$   
Ángulo de rotación de la elipse: 79.35  
Semiejes a, b: 292.47, 89.5  
Rf: 0.31  
Estiramiento s2 (por aplanamiento): 0.55  
Ángulo entre elipse de deformación y plano axial: -1.65

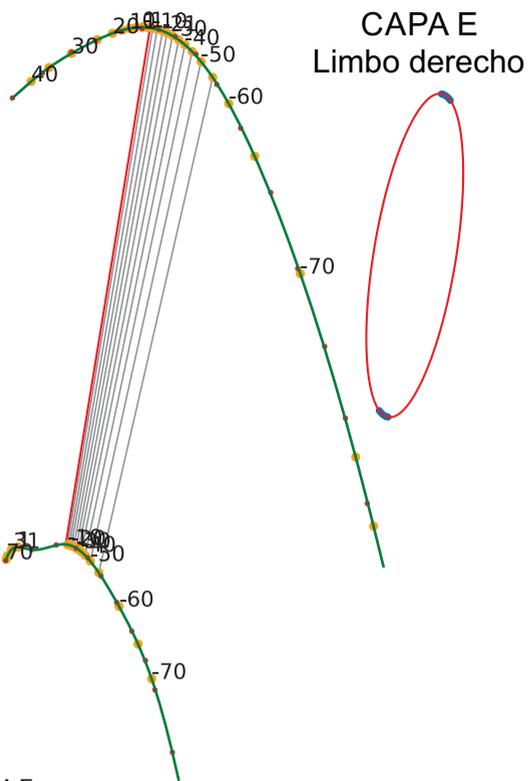
Buzamiento en charnela de techo: -1.8  
Buzamiento en charnela de base: -13.07  
Buzamiento de superficie axial: 81.0

CAPA A  
Pliegue completo





**CAPA E**  
Limbo derecho



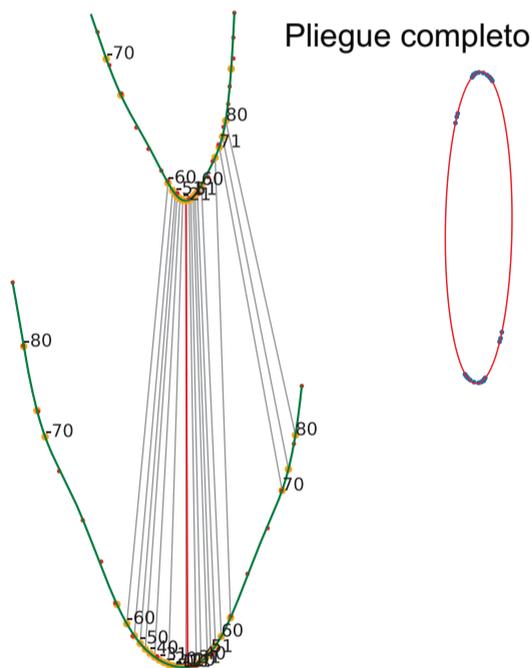
**CAPA E**  
Deformación de limbo izquierdo anticlinal, derecho sinclinal:  
Ecuación de la elipse:  $0.000327x^2 + -0.000156xy + 6.42e-05y^2 + 3.24e-17x + -7.94e-18y = 1$   
Ángulo de rotación de la elipse: 74.68  
Semiejes a, b: 152.69, 53.57  
Rf: 0.35  
Estiramiento s2 (por aplanamiento): 0.59  
Ángulo entre elipse de deformación y plano axial: -6.02

Deformación de limbo derecho anticlinal, izquierdo sinclinal:  
Ecuación de la elipse:  $0.000693x^2 + -0.000212xy + 6.24e-05y^2 + -8.43e-18x + 1.76e-18y = 1$   
Ángulo de rotación de la elipse: 80.69  
Semiejes a, b: 148.99, 37.52  
Rf: 0.25  
Estiramiento s2 (por aplanamiento): 0.5  
Ángulo entre elipse de deformación y plano axial: -0.01

Buzamiento en charnela de techo: -7.71  
Buzamiento en charnela de base: -6.11  
Buzamiento de superficie axial: 80.7

**CAPA F**

Pliegue completo

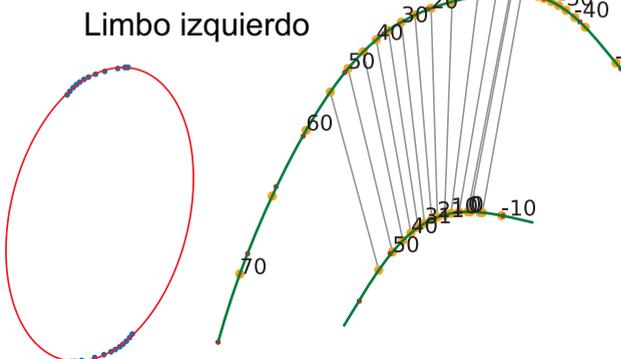


**CAPA F**  
Deformación de pliegue completo:  
Ecuación de la elipse:  $0.000518x^2 + -1.47e-05xy + 2.38e-05y^2 + 4.81e-18x + 3.72e-19y = 1$   
Ángulo de rotación de la elipse: 89.14  
Semiejes a, b: 205.35, 43.94  
Rf: 0.21  
Estiramiento s2 (por aplanamiento): 0.46  
Ángulo entre elipse de deformación y plano axial: 178.93

Buzamiento en charnela de techo: 2.44  
Buzamiento en charnela de base: 8.51  
Buzamiento de superficie axial: -89.78

**CAPA G**

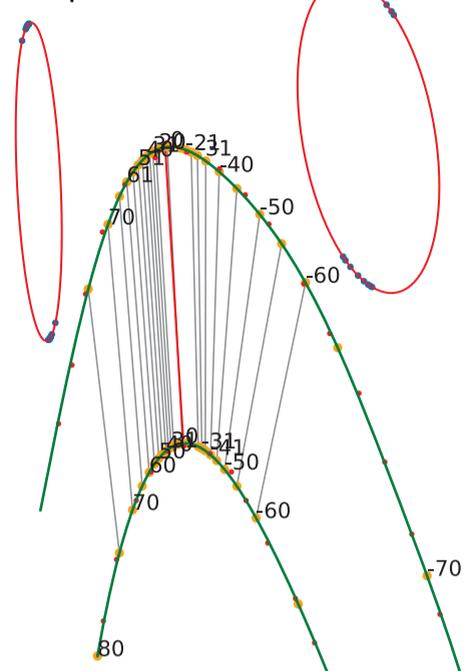
Limbo izquierdo



**CAPA G**  
Deformación de pliegue completo:  
Ecuación de la elipse:  $0.000147x^2 + -4.62e-05xy + 5.99e-05y^2 + -2.46e-18x + 2.84e-19y = 1$   
Ángulo de rotación de la elipse: 75.98  
Semiejes a, b: 135.88, 80.98  
Rf: 0.6  
Estiramiento s2 (por aplanamiento): 0.77  
Ángulo entre elipse de deformación y plano axial: 8.53

Buzamiento en charnela de techo: -14.82  
Buzamiento en charnela de base: 14.49  
Buzamiento de superficie axial: 67.45

**CAPA B**  
Limbo izquierdo Limbo derecho



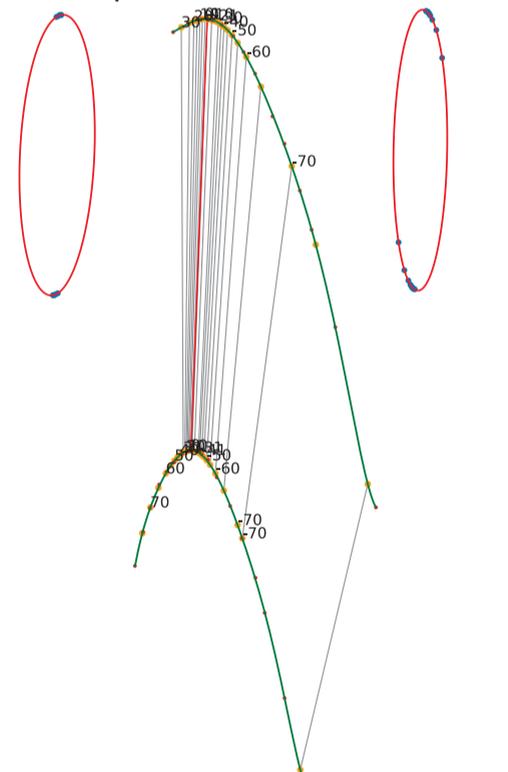
**CAPA B**  
Deformación de limbo izquierdo anticlinal, derecho sinclinal:  
Ecuación de la elipse:  $0.0146x^2 + 0.00136xy + 0.000308y^2 + 1.5e-16x + 1.04e-17y = 1$   
Ángulo de rotación de la elipse: 92.7  
Semiejes a, b: 60.16, 8.25  
Rf: 0.14  
Estiramiento s2 (por aplanamiento): 0.37  
Ángulo entre elipse de deformación y plano axial: 179.18

Deformación de limbo derecho anticlinal, izquierdo sinclinal:  
Ecuación de la elipse:  $0.00143x^2 + 0.000416xy + 0.000292y^2 + -8.7e-18x + 1.25e-18y = 1$   
Ángulo de rotación de la elipse: 100.05  
Semiejes a, b: 62.6, 26.12  
Rf: 0.42  
Estiramiento s2 (por aplanamiento): 0.65  
Ángulo entre elipse de deformación y plano axial: 186.52

Buzamiento en charnela de techo: 9.15  
Buzamiento en charnela de base: 3.86  
Buzamiento de superficie axial: -86.48

**CAPA D**

Limbo izquierdo Limbo derecho



**CAPA D**  
Deformación de limbo izquierdo anticlinal, derecho sinclinal:  
Ecuación de la elipse:  $0.000426x^2 + -3.62e-05xy + 3.09e-05y^2 + -8.45e-18x + 3.27e-19y = 1$   
Ángulo de rotación de la elipse: 87.38  
Semiejes a, b: 182.51, 48.42  
Rf: 0.27  
Estiramiento s2 (por aplanamiento): 0.52  
Ángulo entre elipse de deformación y plano axial: -0.45

Deformación de limbo derecho anticlinal, izquierdo sinclinal:  
Ecuación de la elipse:  $0.00081x^2 + -2.73e-05xy + 2.99e-05y^2 + 7.39e-18x + -9.42e-19y = 1$   
Ángulo de rotación de la elipse: 89.0  
Semiejes a, b: 183.69, 35.14  
Rf: 0.19  
Estiramiento s2 (por aplanamiento): 0.44  
Ángulo entre elipse de deformación y plano axial: 1.17

Buzamiento en charnela de techo: -5.35  
Buzamiento en charnela de base: -0.43  
Buzamiento de superficie axial: 87.83

Pliegue (foto)	capa	limbo	s2	ángulo elipse-plano axial
Pto Español Gardiner Cave P1090956		izquierdo sinclinal	0,58	-1,75
		derecho sinclinal	0,47	0,83
Pto Español Gardiner cave P1090969	A	izquierdo anticlinal	0,77	-16,49
	B	izquierdo anticlinal	0,65	1,17
		derecho anticlinal	0,63	-1,95
Pto Español Gardiner cave P1090982		izquierdo anticlinal	0,51	-1,72
		derecho anticlinal	0,53	0,34
Pto Español Gardiner cave P1090971	B	izquierdo anticlinal	0,84	22,51
		derecho anticlinal	0,77	-13,76
Pto Español Gardiner cave P1090991	A	izquierdo anticlinal	0,74	1
	C	izquierdo anticlinal	0,64	0,1
		derecho anticlinal	0,71	-8,3
	D	izquierdo anticlinal	0,61	-0,86
		derecho anticlinal	0,59	-3,15
	E	izquierdo anticlinal	0,68	-4,77
		derecho anticlinal	0,68	0,98
	F	izquierdo anticlinal	0,54	-0,61
derecho anticlinal		0,6	5,16	
Pto Español Gardiner cave P1090901	A	pliegue completo	0,66	-1,16
	C	pliegue completo	0,76	0,84
	F	pliegue completo	0,72	-4,67
	G	pliegue completo	0,82	-3,27
	H	izquierdo anticlinal	0,66	-3,34
		derecho anticlinal	0,74	0,92
I	izquierdo sinclinal	0,61	2,77	
Pto Español Gardiner cave P1090904	A	pliegue completo	0,55	-1,65
	B	pliegue completo	0,37	-1,82
	C	pliegue completo	0,32	-0,23
Pto Español Gardiner cave P1090905	B	izquierdo anticlinal	0,37	0,82
		derecho anticlinal	0,65	-6,52
	D	izquierdo anticlinal	0,52	-0,45
		derecho anticlinal	0,44	1,17
	E	derecho anticlinal	0,5	-0,01
	F	pliegue completo	0,46	1,07
	G	izquierdo anticlinal	0,77	0,8
<b>PROMEDIOS</b>			<b>0,61</b>	<b>-1,03</b>
<b>SD</b>			<b>0,13</b>	<b>5,89</b>
<b>MUESTRA</b>			<b>35</b>	
<b>M. ERROR 95%</b>			<b>0,04</b>	<b>2,0</b>
<b>MINIMO</b>			<b>0,32</b>	<b>-0,23</b>
<b>MAXIMO</b>			<b>0,84</b>	<b>22,51</b>