

# Acerca de las fuerzas motrices involucradas en el crecimiento de grano bajo la acción de campos eléctricos durante la sinterización por chispa de plasma

José Antonio Bejarano Palma <sup>1,3</sup>, Bibi Malmal Moshtaghion <sup>2</sup>,  
Francisco Luis Cumbra <sup>1</sup> y Diego Gómez García <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Física de la Materia Condensada de la Universidad de Sevilla,

<sup>2</sup> Instituto de Ciencia de Materiales de Aragón, CSIC-Universidad de Zaragoza

<sup>3</sup> jbpalma@us.es

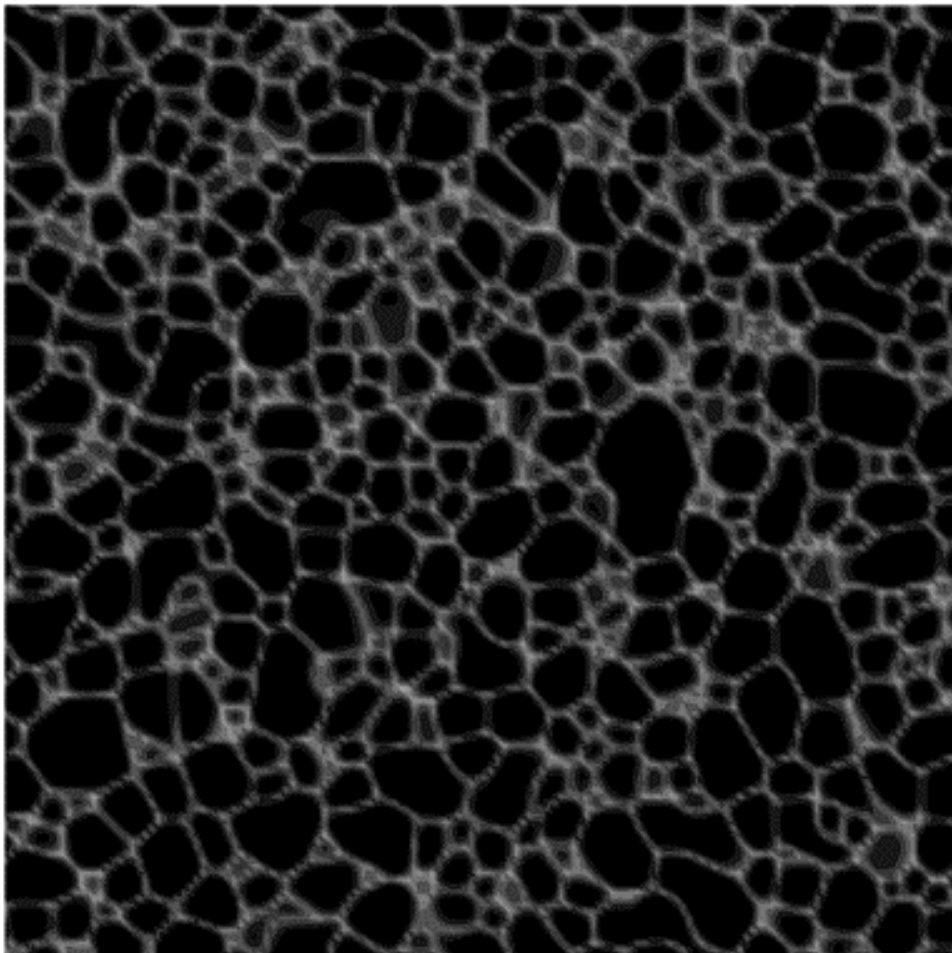


## INTRODUCCIÓN

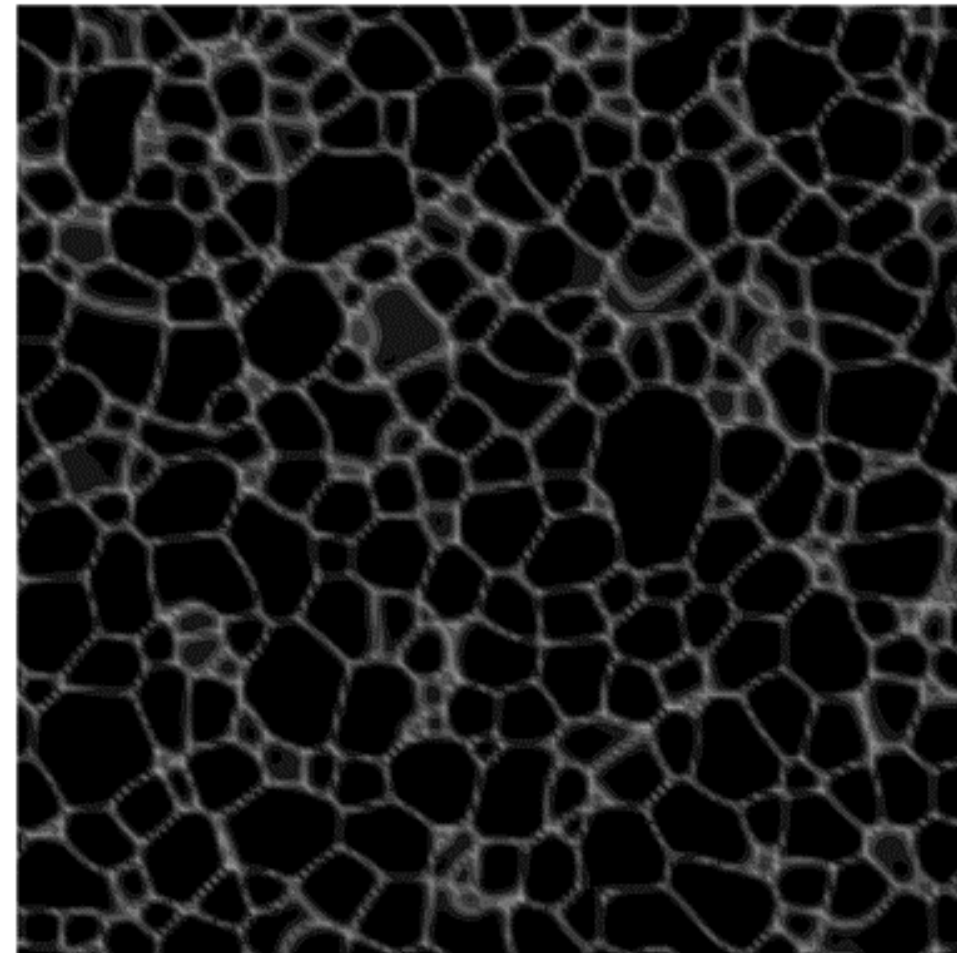
El crecimiento de grano implica el movimiento de la interfaz. El material logra así reducir su energía libre total. La sinterización asistida con campos eléctricos (SPS) consigue, por lo general, refinamientos del tamaño de grano respecto a otros métodos de procesado. Hemos realizado simulaciones mediante modelización de campo de fases (PFM) que contemplan la aplicación de estos campos [1]. Sus resultados muestran que el campo eléctrico aplicado contrarresta/inhíbe el efecto de la tensión superficial, dificultando/bloqueando la traslación de los límites de grano. En este trabajo se cuantifican las contribuciones de ambas fuerzas motrices.

Evolución a Baja Temperatura:  $L = 0,1$

$f_{01}: \alpha = \beta = \gamma = 1,0 / K = 0,25 / X = 75$



t = 500



t = 1020

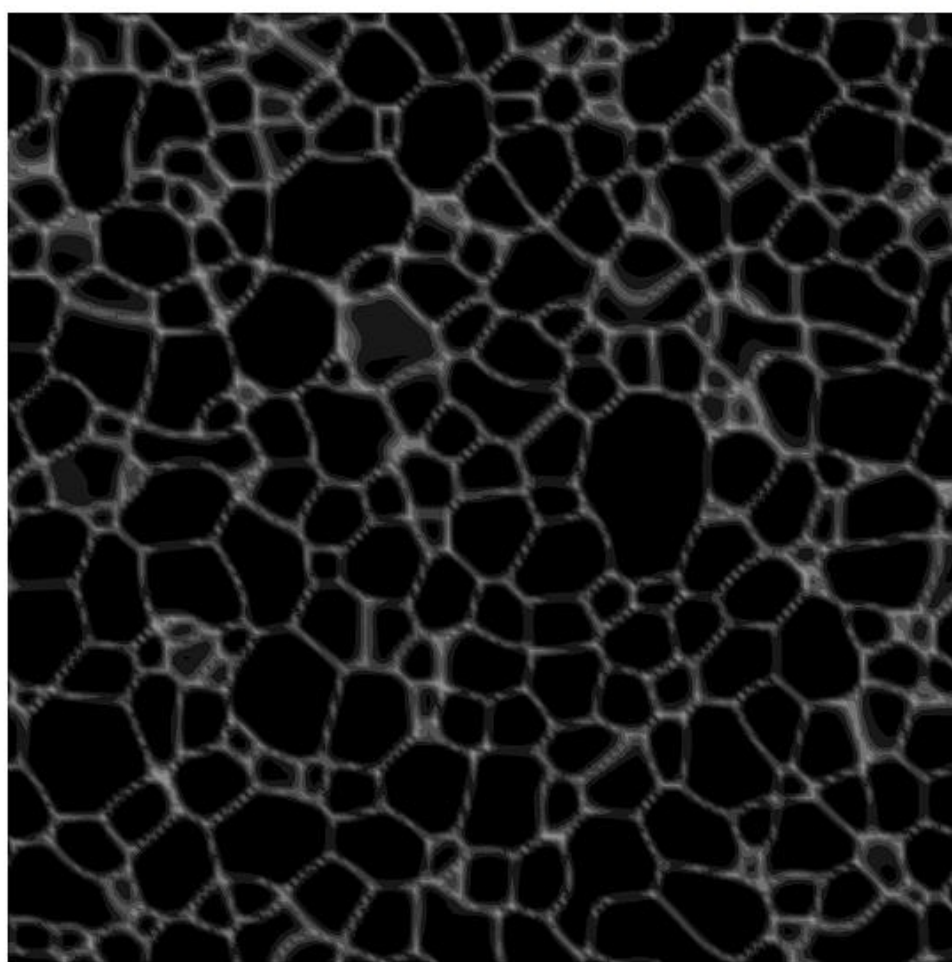
## SIMULACIONES

En la simulación de evolución a baja temperatura, coeficiente de movilidad de frontera de grano  $L=0,1$  –ecs. de Allen-Cahn [2]-, de una microestructura, desde un templado inicial –LQ Chen y W Yang [2]-, se produce un crecimiento relativo de grano  $\Delta D_{500}=23,7\%$  entre los instantes  $t=500$  y  $t=1020$ . Las frecuencias de tamaños se han ajustado a una distribución extrema –BM Moshtaghioun y col. [3].

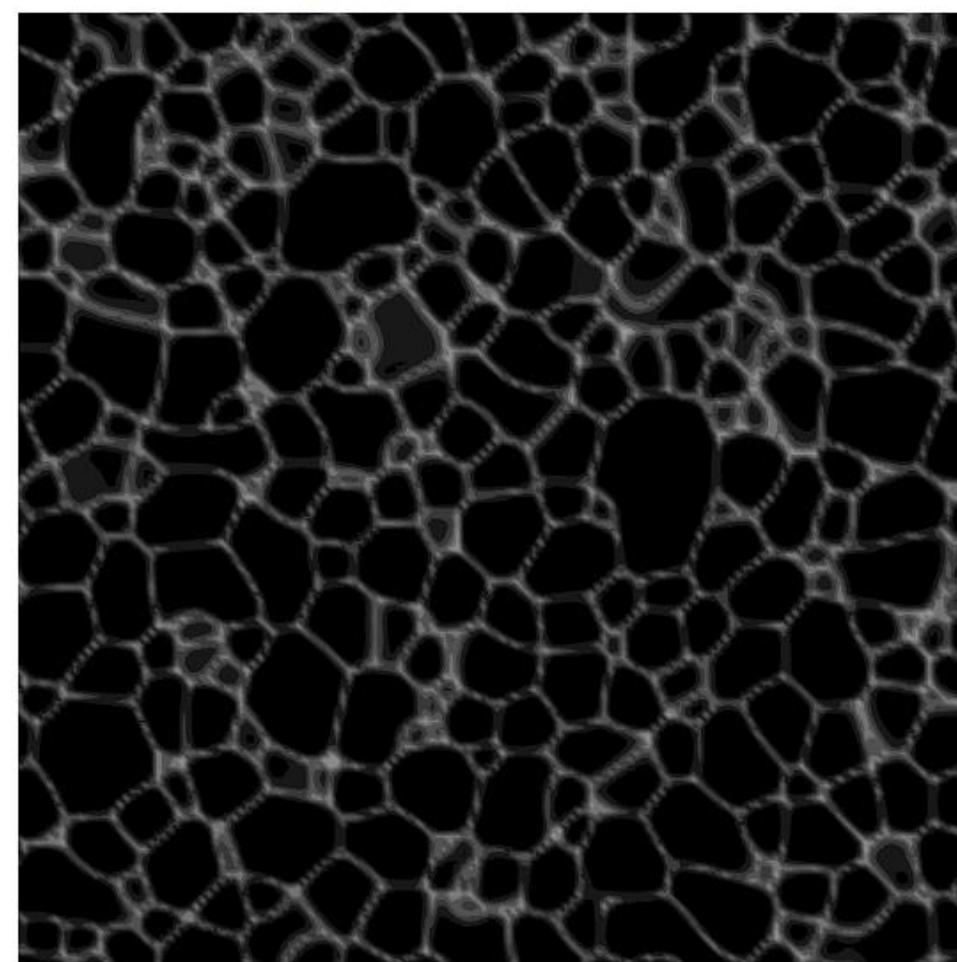
De igual forma se han realizado simulaciones contemplando un recocido, con aumento de la movilidad de frontera hasta  $L(R)=0,25$ . Se han empleado tres intervalos de tiempo diferentes a alta temperatura,  $t(R)=100, 300$  y  $500$ . Para analizar el efecto del campo eléctrico, se han duplicado estas últimas simulaciones incluyendo la interacción con un campo eléctrico  $E_y=1,0$  –dirigido según la horizontal en las micrografías.

Recocido:  $t(R) = t(E) = 100$  ;  $L(R) = 0,25$  / Muestras de  $t = 1020$

$f_{01}: \alpha = \beta = \gamma = 1,0 / L = 0,1 ; K = 0,25 ; e_1 = 1,0 / X = 75$



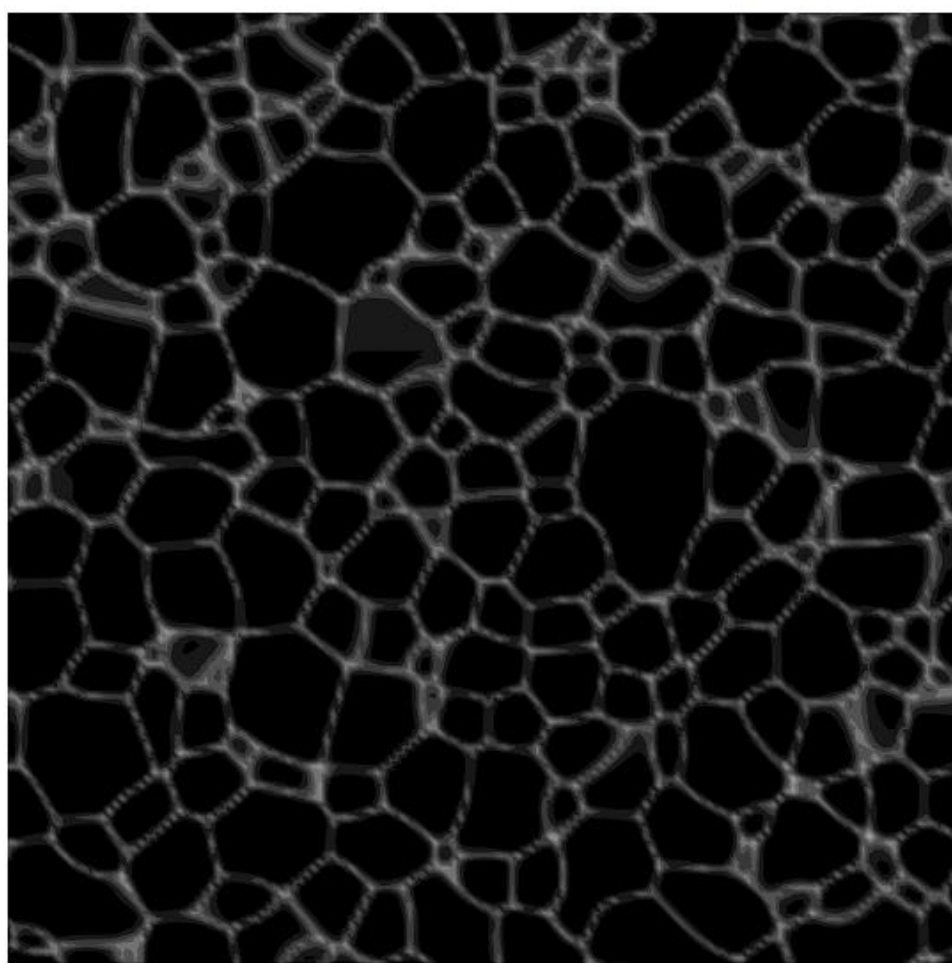
$E_y = 0$



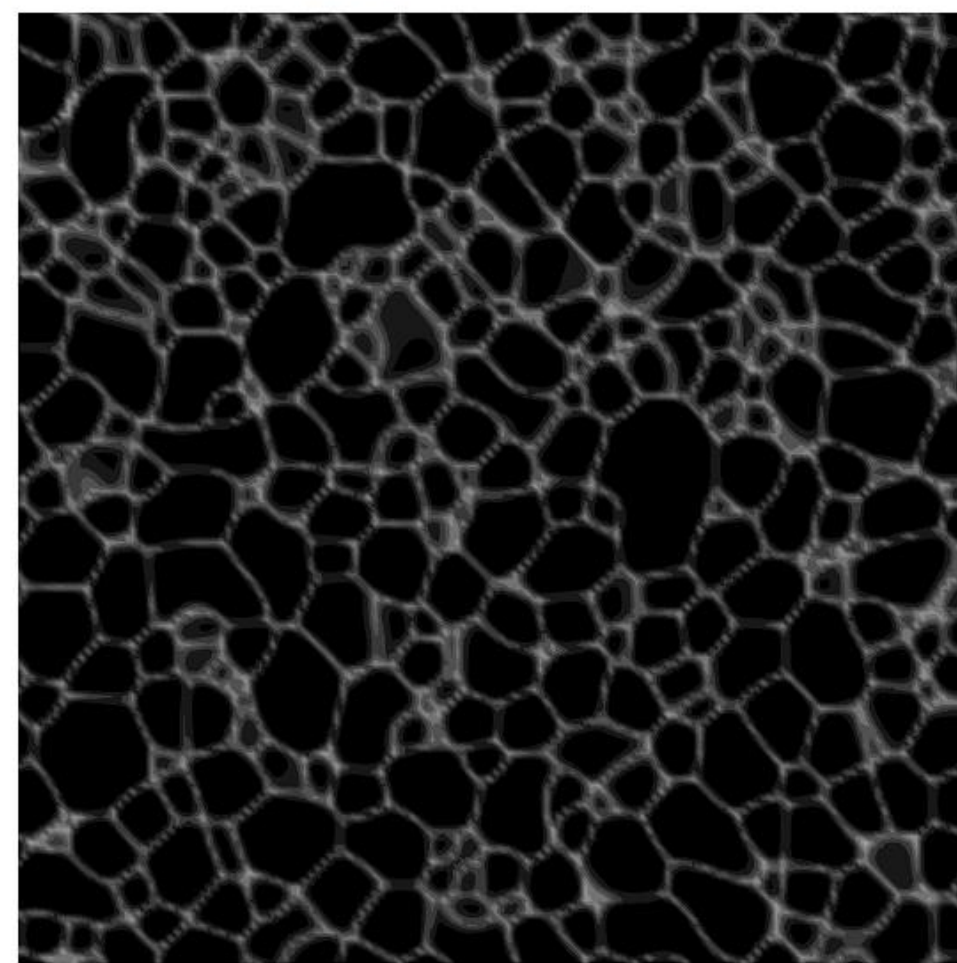
$E_y = 1,0$

Recocido:  $t(R) = t(E) = 300$  ;  $L(R) = 0,25$  / Muestras de  $t = 1020$

$f_{01}: \alpha = \beta = \gamma = 1,0 / L = 0,1 ; K = 0,25 ; e_1 = 1,0 / X = 75$



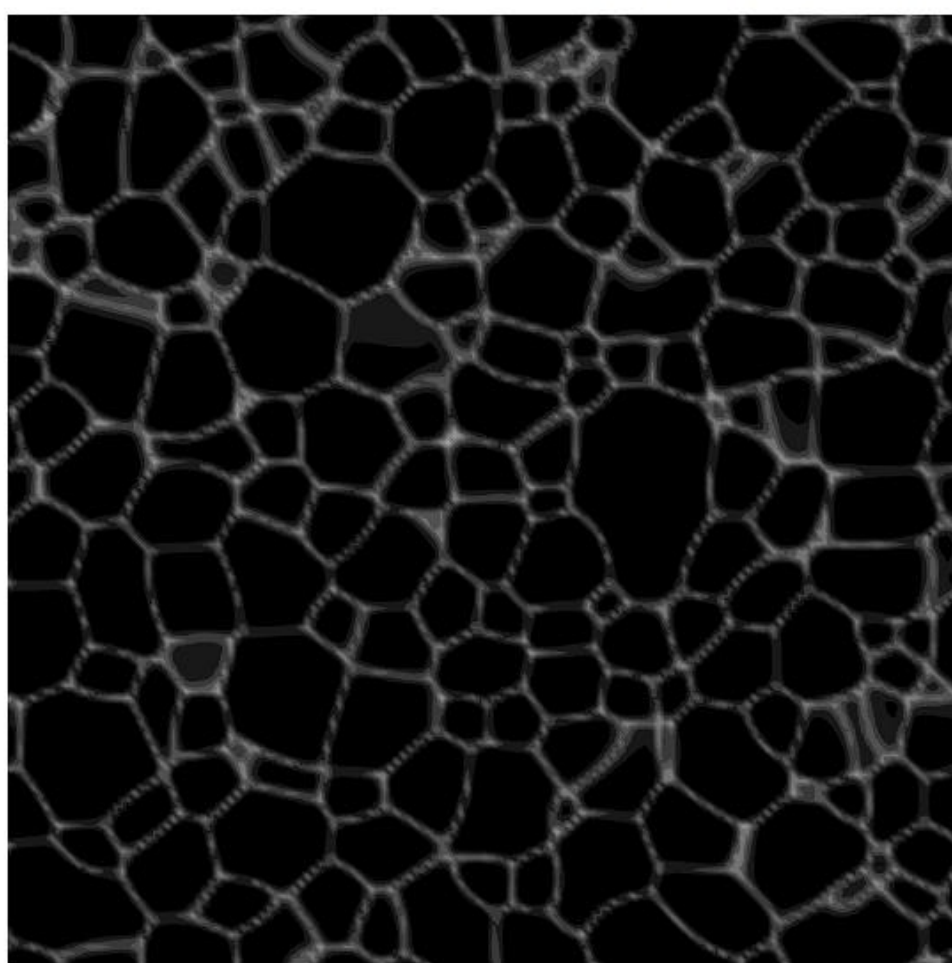
$E_y = 0$



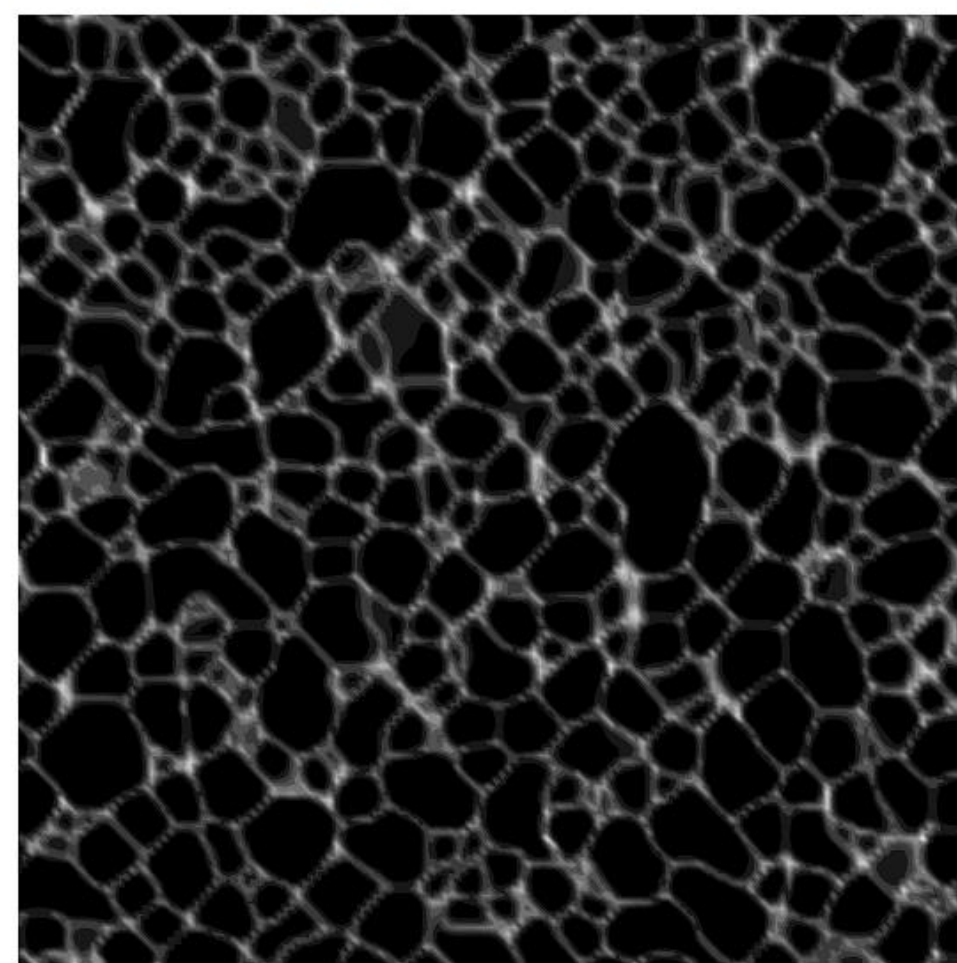
$E_y = 1,0$

Recocido:  $t(R) = t(E) = 500$  ;  $L(R) = 0,25$  / Muestras de  $t = 1020$

$f_{01}: \alpha = \beta = \gamma = 1,0 / L = 0,1 ; K = 0,25 ; e_1 = 1,0 / X = 75$



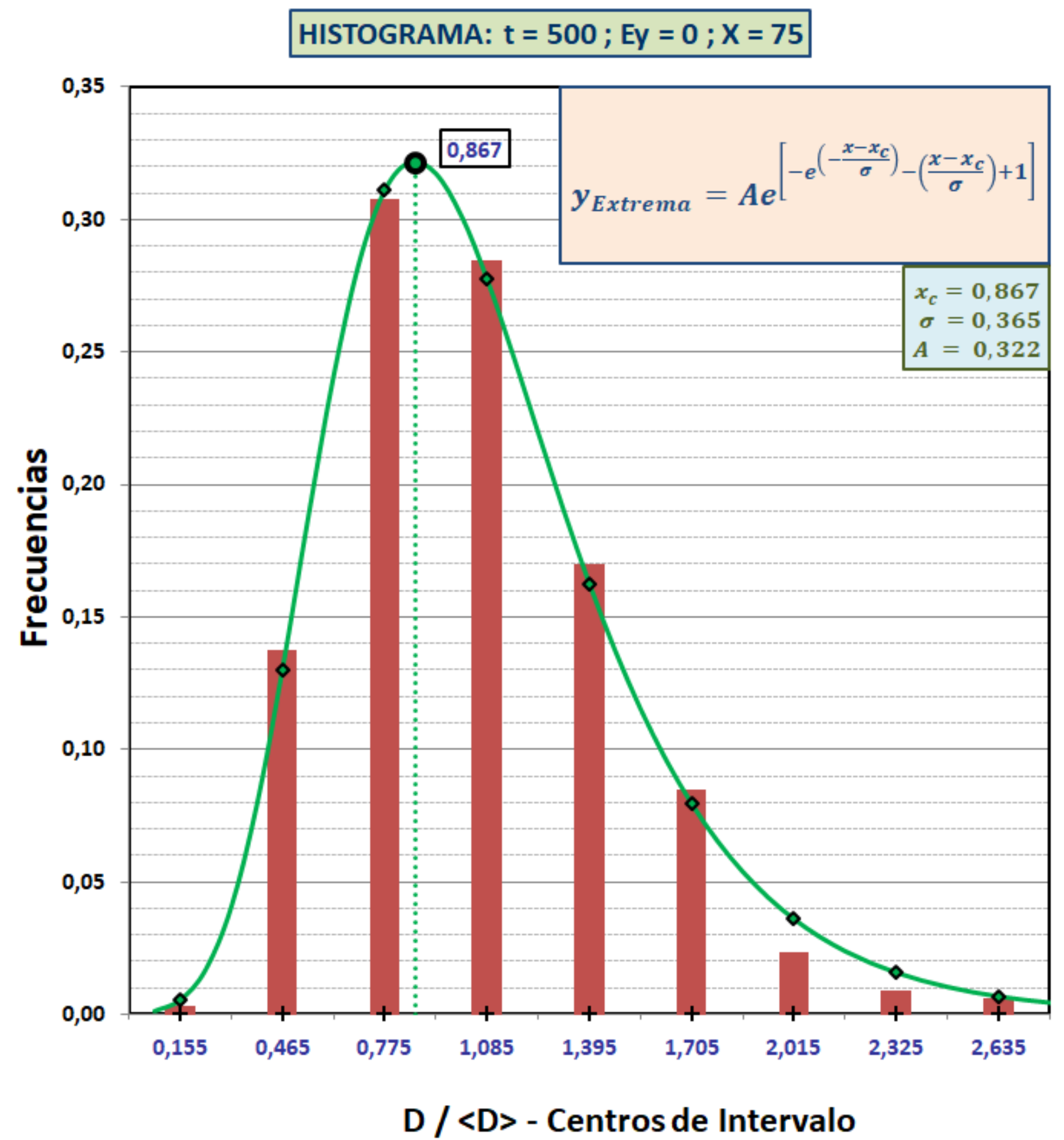
$E_y = 0$



$E_y = 1,0$

## RECONOCIMIENTOS

Este trabajo ha sido elaborado bajo la financiación del Ministerio de Ciencia e Innovación de España del Proyecto de Investigación MAT2015-71411-R.



## RESULTADOS

Con intervalos cortos de aplicación del campo eléctrico no se consiguen grandes refinamientos. Incluso para  $t(R)=t(E)=300$  el crecimiento relativo es  $\Delta D_{500}(300)=18,5\%$ , similar al  $\Delta D_{500}(0)=23,7\%$  del crecimiento a baja temperatura.

Hay que llegar a intervalos superiores,  $t(R)=t(E)=500$ , para que el campo eléctrico contrarreste prácticamente el crecimiento. Así  $\Delta D_{500}(500)=4,7\%$ , a pesar incluso de que el recocido sin campo produce un crecimiento del 51,0%.

Diámetros Característicos y Crecimientos Relativos en  $t = 1020$  respecto a  $D_c (t=500)$

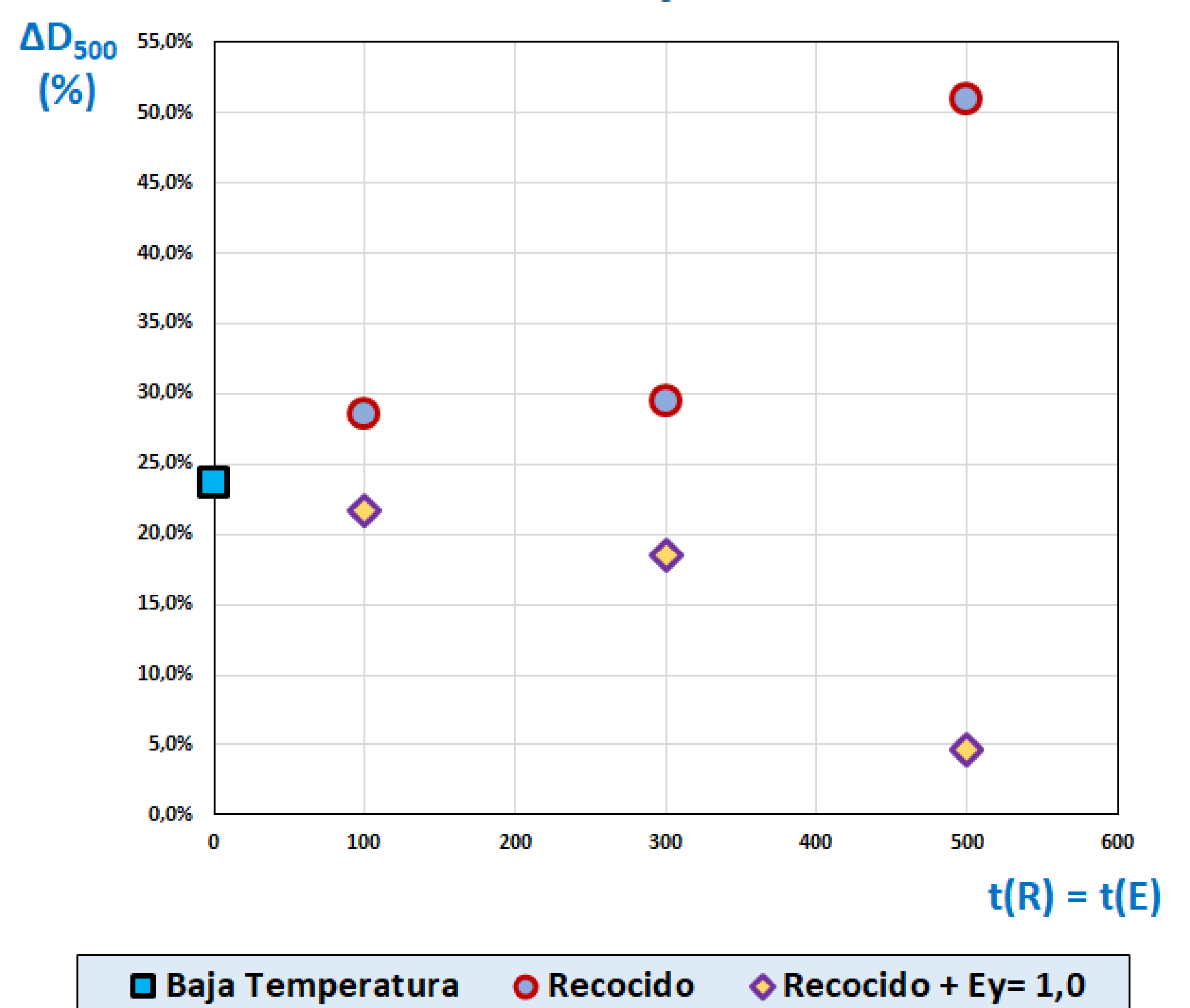
	Mediana ( $\mu$ )	$X_c$ ( $\mu$ )	$\Delta X_c$ ( $\mu$ )	$D_c$ ( $\mu$ )	$\Delta D_c$ ( $\mu$ )	$\Delta D_{500}$ (%)
t = 500	1,003	0,867	$\pm 0,010$	0,870	$\pm 0,010$	-
t = 1020	1,242	0,866	$\pm 0,018$	1,076	$\pm 0,022$	23,7%
t = 1020 ; t(R) = 100	1,30	0,86	$\pm 0,04$	1,12	$\pm 0,05$	28,6%
t = 1020 ; t(R) = 300	1,358	0,829	$\pm 0,051$	1,126	$\pm 0,069$	29,5%
t = 1020 ; t(R) = 500	1,490	0,881	$\pm 0,024$	1,313	$\pm 0,036$	51,0%
t = 1020 ; t(R) = t(E) = 100 ; $E_y = 1,0$	1,217	0,869	$\pm 0,016$	1,058	$\pm 0,019$	21,6%
t = 1020 ; t(R) = t(E) = 300 ; $E_y = 1,0$	1,168	0,882	$\pm 0,010$	1,030	$\pm 0,012$	18,5%
t = 1020 ; t(R) = t(E) = 500 ; $E_y = 1,0$	1,039	0,876	$\pm 0,013$	0,910	$\pm 0,014$	4,7%

## CONCLUSIONES

La modelización con PFM obtiene importantes refinamientos de grano con SPS para intervalos suficientemente prolongados a alta temperatura.

La intensidad de la interacción de cada material con el campo eléctrico –coef.  $E_i$  en las ecs. de evolución [1]- condiciona los intervalos de exposición requeridos para alcanzar un determinado refinamiento.

## Crecimientos Relativos en $t = 1020$ respecto a $D_c (t=500)$



## REFERENCIAS

- [1] Ponencia “Simulación mediante campo de fases de la sinterización por chispa de plasma” de los mismos autores en el presente congreso.
- [2] LQ Chen and W Yang, “Computer simulation of the domain dynamics of a quenched system with a large number of nonconserved order parameters: The grain-growth kinetics”; Physical Review B 50, 15 752, 1994.
- [3] B Malmal Moshtaghioun, D Gómez García, FL Cumbra Hernández, A Domínguez Rodríguez, “A phase-field model of 2D grain size distribution in ceramics”; Journal of the European Ceramic Society, Volume 34, Issue 11, pp 2731–2736, 2014.