



## Cuantificación de la Textura en Capas Superconductoras de $YBa_2Cu_3O_7$

J.C. Gonzalez<sup>\*1</sup>, L. De Los Santos Valladares<sup>2,3</sup>, H. Sánchez Cornejo<sup>4</sup>, A. M. Osorio<sup>5</sup>, J. Albino Aguiar<sup>6</sup> y A. Bustamante D.<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Ciencia de Materiales de Sevilla – CSIC, Grupo de Investigación de Superficies, Intercaras y Láminas Delgadas. Calle Américo Vespucio 49, Isla de la Cartuja. Sevilla 41092 – España

<sup>2</sup> Northeastern University, Shenyang, Key Laboratory for Anisotropy and Texture of Materials (Ministry of Education), Liaoning 110819, People's Republic of China

<sup>3</sup> University of Cambridge, Cavendish Laboratory, Department of Physics, J.J. Thomson Ave. Cambridge CB3 0HE, United Kingdom

<sup>4</sup> Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ciencias Físicas, Laboratorio de Cerámicos y Nanomateriales, Lima, Perú

<sup>5</sup> Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Química e Ingeniería Química, Grupo Sol-Gel, Lima, Perú

<sup>6</sup> Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Física, Laboratório de Supercondutividade e Materiais Avançados, Recife 50670-901, Brasil

Recibido 25 abril 2020 – Aceptado 28 mayo 2020

### Resumen

Una capa superconductora epitaxial de  $YBa_2Cu_3O_7$  es el resultado de un óptimo proceso de crecimiento epitaxial de los granos superconductores. Además, la epitaxia del sustrato tiene una directa repercusión en la microestructura y las propiedades físicas de la capa. Por medio de técnicas de caracterización convencionales, tales como: microscopía electrónica de barrido, y difracción de rayos X, permiten realizar una rápida valoración de la calidad de la epitaxia por medio de la cuantificación de la textura de la capa. Presentamos los resultados de la cuantificación de la textura en capas superconductoras de  $YBa_2Cu_3O_7$ .

**Palabras clave:** Epitaxia, Textura, Microscopía electrónica de Barrido, difracción de rayos X.

### Texture Quantification in $YBa_2Cu_3O_7$ Superconducting Films

#### Abstract

$YBa_2Cu_3O_7$  epitaxial superconducting film is consequence of an optimum epitaxial growth process of superconducting grains. Also, the substrate's epitaxy has a direct repercussion on the film microstructure and its physical properties. Conventional characterization techniques such as: scanning electronic microscopy, and x ray diffraction, allowed us to obtain a quick assessment of epitaxy quality through of texture quantification of the film. We present the results of texture quantification in  $YBa_2Cu_3O_7$  superconducting films.

**Keywords:** Epitaxy, Texture, scanning electronic microscopy, X-ray diffraction.

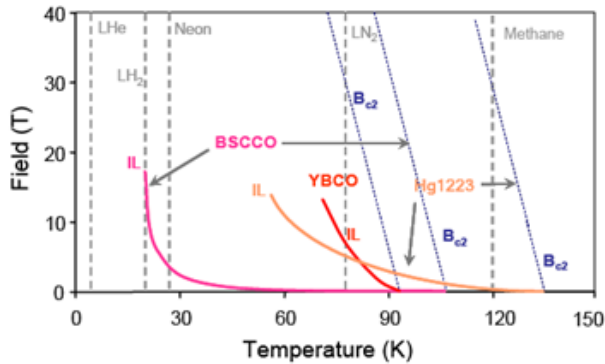
### Introducción

Desde el descubrimiento del compuesto  $YBa_2Cu_3O_7$  (YBCO) en 1987 [Hot04], se ha realizado progresos en la fabricación de capas superconductoras de YBCO de alta calidad [Yam15], por ejemplo, el crecimiento de ca-

pas epitaxiales de YBCO mediante la ruta de deposición mediante solución química [Obr06] emergió como una técnica muy competitiva para obtener capas superconductoras de alta calidad a bajo costo, así como la posibilidad de ser escaladas industrialmente. En particular, se ha demostrado que es posible crecer materiales

\* juanc.gonzalez@icmse.csic.es

superconductores de alta temperatura crítica ( $T_c$ ) sobre sustratos monocristalinos [Cas03] permitiendo diferentes aplicaciones donde la característica granular o textura de la capa superconductor necesita ser controlada. Las capas superconductoras de YBCO son uno de los candidatos más promisorios de los materiales superconductores de alta  $T_c$  con aplicaciones tecnológicas de potencia, a causa que las capas superconductoras de YBCO han demostrado propiedades superiores, tal como una alta densidad de corriente ( $J_c$ ) en campos magnéticos intensos (10 Teslas) [Lar01], como nos ilustra la Figura 1. Las aplicaciones tecnológicas son sólo posibles por debajo de la línea de irreversibilidad (IL). Este hecho cambió dramáticamente el prospecto de las aplicaciones eléctricas de potencia de los superconductores, debido al incremento significativo de la temperatura crítica con respecto a los superconductores de primera generación donde el empleo de un económico líquido criogénico tal como el nitrógeno ( $LN_2$ ) resulta ahora común.



**Figura 1:** Campos de inducción críticos superiores,  $B_{c2}$  (líneas discontinuas) y líneas de irreversibilidad,  $IL$  (líneas continuas) para algunos de los materiales superconductores de alta  $T_c$  (Imagen adaptada de la referencia [Lar01]).

Hoy en día, las capas superconductoras irrumpen en el mercado de los limitadores de corriente, transformadores, cables de potencia, motores, resonancia magnética nuclear, imágenes de resonancia magnética, etc. La producción industrial está enfocada en el crecimiento de capas de YBCO biaxialmente texturadas [Iij00]. Es necesario lograr una textura biaxial en una capa de YBCO para poder utilizarla en aplicaciones de alta potencia, pues los materiales superconductores con alta  $T_c$  están compuestos de complicadas secuencias de capas de óxidos.

Dicho apilamiento (Figura 2a) de bloques de óxidos conductores y de reserva de carga produce una anisotropía en la conducción eléctrica de la corriente superconductor. El factor de anisotropía ( $\gamma^2$ ) del YBCO relaciona la conductividad eléctrica en el plano  $a$ - $b$  con respecto a la dirección  $c$  en la celda unitaria, con un valor igual a 50 ( $\gamma^2 = (J_c^{ab})/(J_c^c)$ ) [Wel96]. Es debido al valor del factor de anisotropía que la corriente superconductor fluye a lo largo de los planos  $a$ - $b$  (Figura 2b). Por tanto, es una condición necesaria que los granos de YBCO crezcan con una orientación eje- $c$  perpendicular a la superficie del sustrato, como se presenta en la Figura 2c, denominada textura fuera del plano. Otra condición adicional, es que los granos presenten un ordenamiento en la superficie de la capa, denominada textura en el plano con respecto a la superficie del sustrato, como se muestran en las Figuras 2 y 7 de la referencia [Gon12], respectivamente.

La textura proporciona información sobre la distribución de la orientación de cristalitas en una capa de YBCO con respecto a la superficie del sustrato, además tiene una gran influencia en las intensidades de los perfiles de difracción de rayos X. Tres son las principales distribuciones de orientación: a) monocristal, b) preferencial o preferente, y c) aleatoria, como se muestran en la Figura 3. Por un lado, una capa monocristalina tiene una orientación señalando solamente una dirección cristalográfica determinada (figura 3a), por ejemplo, en los monocristales de YBCO sería el plano  $(00l)$  ó  $(h00)$ . Por otro lado, una muestra de polvo orientado aleatoriamente o policristalina tiene todas las orientaciones posibles para una dirección cristalográfica particular (Figura 3c), por ejemplo, en muestras policristalinas de YBCO sería un plano  $(hkl)$ . En muestras con orientación preferencial o preferente solo se puede encontrar alguna dirección cristalográfica específica para una orientación particular en la muestra (Figura 3b), por ejemplo, en las capas epitaxiales de YBCO donde los granos son altamente anisotrópicos, éstos se encuentran con sus planos  $(h00)$  ó  $(00l)$  paralelos a la superficie del sustrato.

Hemos realizado la cuantificación de la textura, fuera del plano y en el plano, en capas superconductoras de YBCO preparadas a través de la deposición mediante solución química sobre sustratos monocristalinos de estructura perovskita, tales como  $SrTiO_3$  (STO) y  $LaAlO_3$  (LAO), por medio de las técnicas de caracterización convencionales tales como; microscopía electrónica de barrido, y difracción de rayos X.

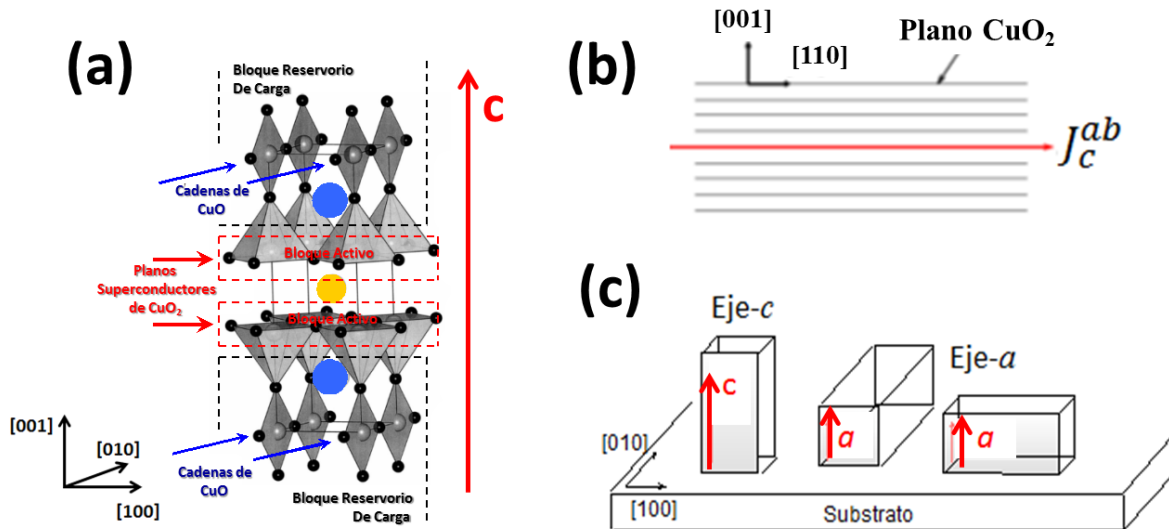


Figura 2: Esquemas de: a) la celda unitaria del YBCO, b) la circulación de la corriente en los planos superconductores de  $CuO_2$ , y c) los granos de YBCO orientados eje-c y eje-a perpendiculares a la superficie del sustrato.

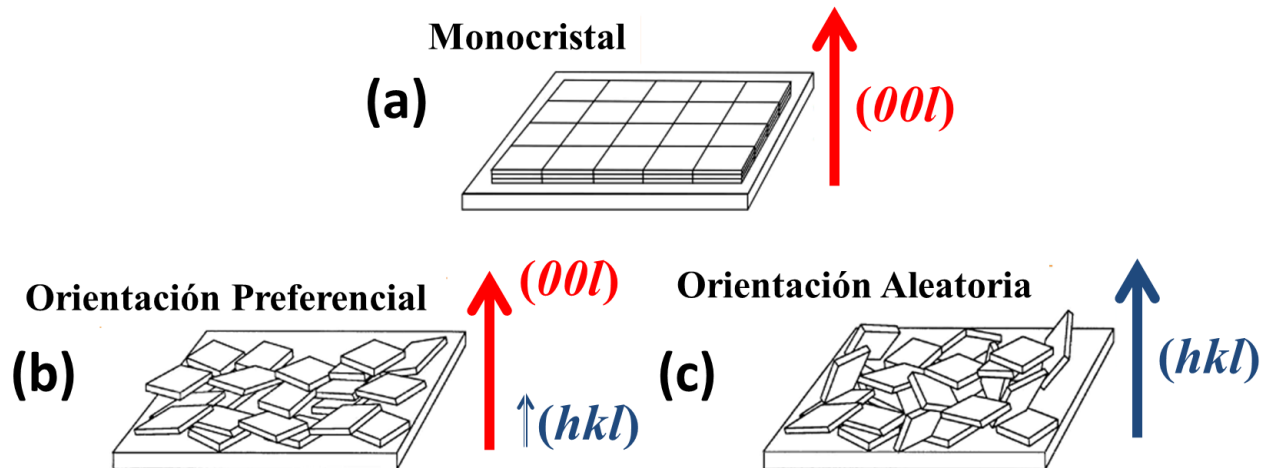


Figura 3: Orientación de los cristalitas en una capa delgada: a) muestra monocristalina con una determinada orientación cristalográfica  $(00l)$ , b) muestra con orientación preferencial  $(00l)$  mayoritaria que  $(hkl)$ , y c) muestra en polvo o policristalina con orientación cristalográfica aleatoria  $(hkl)$ . (Imagen adaptada de la referencia [Pan13]).

## Experimental

El crecimiento de las capas superconductoras de YBCO sobre sustratos monocristalinos de estructura perovskita, tales como STO y LAO, se prepararon mediante el método sol gel, las cuales se encuentran descritas en mayor detalle en las referencias [Gar12], [San14], [Bus12]. Las microimágenes fueron obtenidas en un microscopio electrónico de barrido *Phillips XL30 FEG-SEM*. Los difractogramas de rayos X fueron obtenidos en un equipo Panalytical X'Pert Pro MPD, utilizando la radiación  $Cu-K\alpha$  (1.54184 Å). En las Figuras 4a-d se muestran las representaciones esquemáticas de los barridos de DRX

realizados, los cuales fueron: a)  $\theta - 2\theta$  -scan, donde la fuente y el detector se mueven ambos barriendo los mismos ángulos de forma simétrica, b)  $\omega$  -scan, donde se fija el detector para un ángulo de Bragg particular,  $2\theta_{Bragg}$  ( $hkl$ ), luego se mueve la fuente barriendo un ángulo  $\omega = \omega_f - \omega_i$ , c)  $2\theta$  -scan, donde se fija la fuente en un ángulo  $\omega_0 < 10^\circ$  grados, posteriormente se mueve el detector barriendo ángulos  $2\theta_i$  y d)  $\varphi$  -scan, donde se fijan la fuente y el detector para un ángulo  $\omega_0$  y  $2\theta_{Bragg}$  ( $hkl$ ), respectivamente, después se gira la muestra un ángulo fijo  $\chi_0$ , finalmente se mueve el portamuestra barriendo un ángulo  $\varphi$  desde  $0^\circ$  a  $360^\circ$  grados.

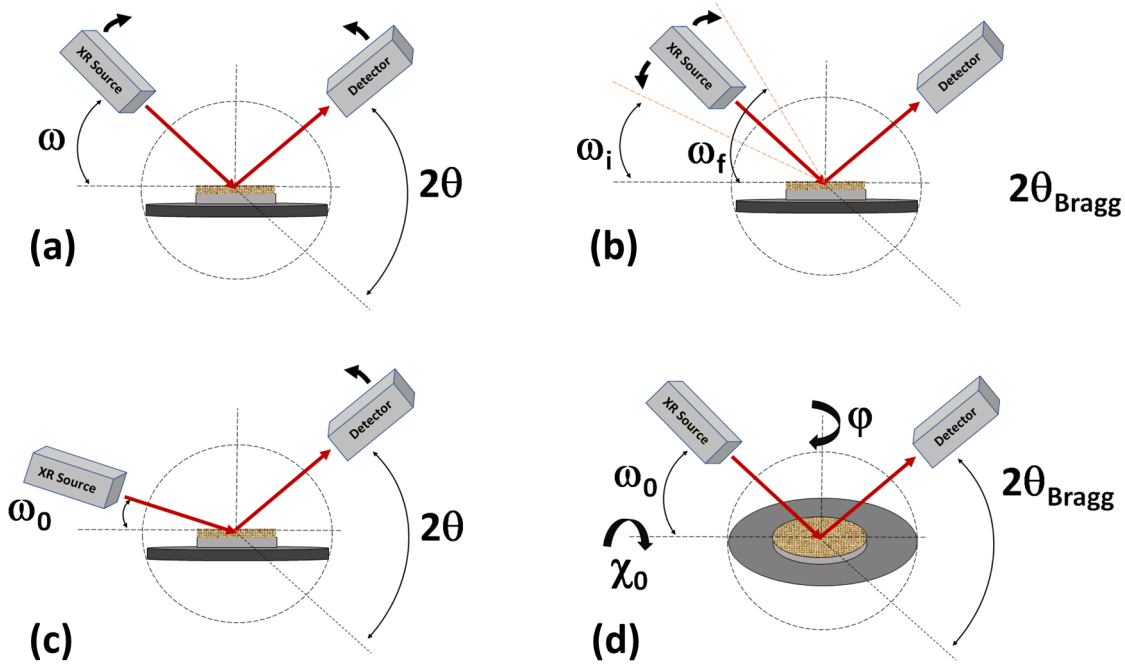


Figura 4: Representación esquemática de: a) barrido  $\theta$ - $2\theta$ -scan, b) barrido  $\omega$ -scan, c) barrido  $2\theta$ -scan, y d) barrido  $\varphi$ -scan.

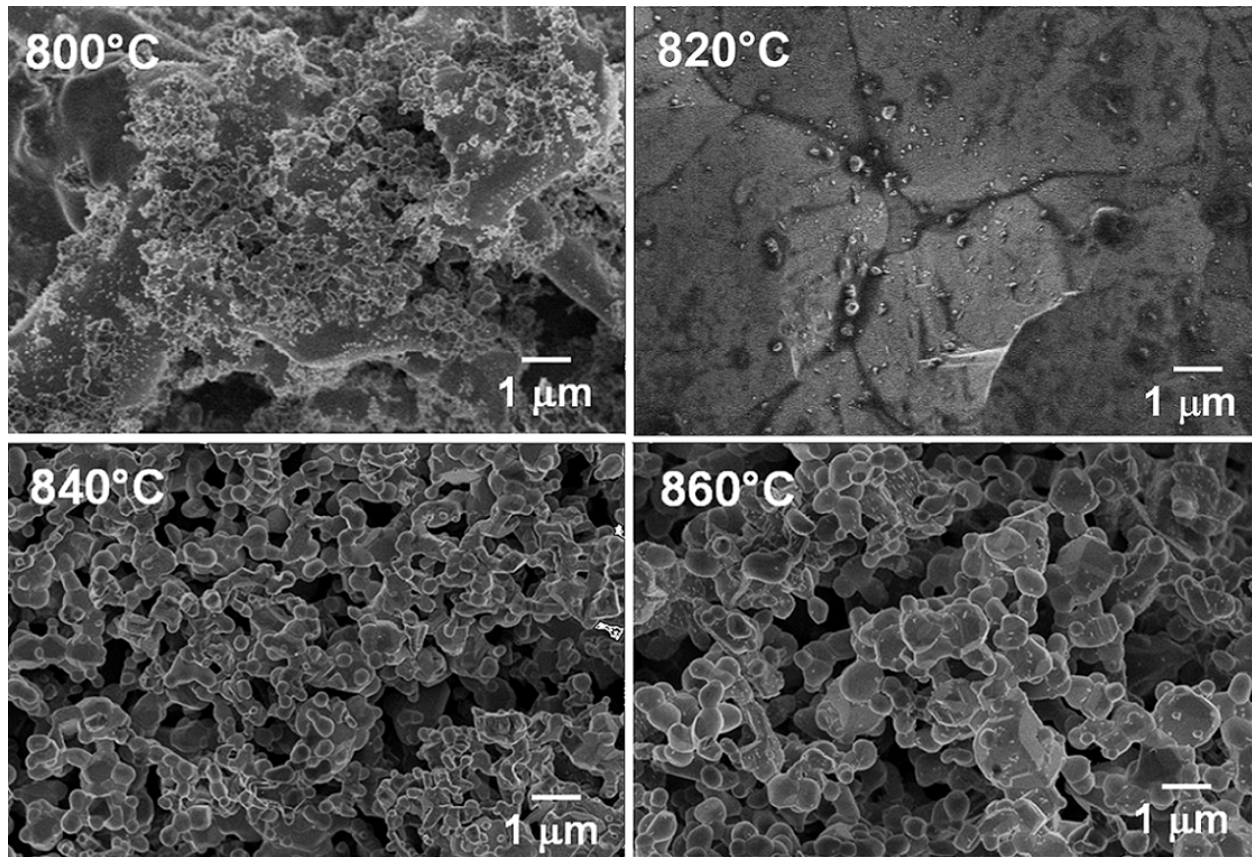
## Resultados y Discusión

La morfología superficial de las capas de YBCO depositadas sobre STO y LAO fue revelada a través de las microfotos de microscopía electrónica de barrido, las cuales se muestra en las Figuras 5 y 6, respectivamente. Por un lado, se observa una capa más compacta a la temperatura de  $860^\circ\text{C}$  en las películas de YBCO crecidas sobre LAO que sobre sustratos de STO. Aunque las capas crecidas sobre LAO presentan unos poros propios de la dinámica de crecimiento de los granos superconductores a través de la ruta de deposición mediante solución química [Cas03], la cantidad de poros observadas fueron en menor cantidad en comparación con las capas de YBCO crecidas sobre STO. Además, para temperaturas menores a  $820^\circ\text{C}$  grados hemos observado la formación de macro segregaciones, indicando que son temperaturas no óptimas para el crecimiento de capas de YBCO.

En la Figura 7 se presenta los difractogramas del barrido  $\theta$ - $2\theta$ -scan de las muestras representativas crecidas a  $860^\circ\text{C}$  revelan la presencia de los perfiles  $(003)$ ,  $(004)$ ,  $(005)$ ,  $(006)$  y  $(007)$ . Las reflexiones de los sustratos monocristalinos son denotadas como STO y LAO. Así también, se detectan las fases secundarias del YBCO como:  $\text{Y}_2\text{BaCuO}_5$  (Y211), CuO e  $\text{Y}_2\text{O}_3$ . Las reflexiones de la fase Y211 se presentan en  $2\theta_{\text{Y211}} = 25.92^\circ$ ,  $30.40^\circ$ ,  $40.96^\circ$  y  $61.52^\circ$  grados. La fase CuO se observa en  $2\theta_{\text{CuO}} = 27.72^\circ$  (muestra YBCO/STO) y  $35.56^\circ$  (ambos). Además, la presencia de la fase CuO podría deberse a

un exceso de este compuesto en el precursor inicial, pues los cationes del compuesto de YBCO están en una proporción Y:1, Ba:2, Cu:3. Las reflexiones de la fase  $\text{Y}_2\text{O}_3$  se encuentran en  $2\theta_{\text{Y}_2\text{O}_3} = 58.32^\circ$  y  $68.08^\circ$  grados. Por tanto, las muestras exhiben perfiles  $(00l)$  revelando un crecimiento epitaxial de los cristalitas de YBCO con el eje- $c$  perpendicular al sustrato, como se muestra en la Figura 2c. Así mismo, la presencia de la reflexión  $(200)$  indica la existencia de algunos cristalitas crecidos eje- $a$  perpendicular al sustrato. Así también, la cristalinidad de las capas se advierte a través de la intensidad y ancho de los perfiles de difracción, por lo cual se ha logrado obtener una buena cristalinidad en todas las capas de YBCO. Una buena cristalinidad en las capas no implica una buena textura. Para cuantificar la textura fuera del plano en las capas de YBCO necesitamos utilizar una razón entre la cantidad de granos orientados eje- $c$  relacionados con los planos  $(00l)$  y la cantidad de granos orientados eje- $a$ , o quizás eje- $b$  relacionados con los planos  $(h00)$  ó  $(0k0)$ , respectivamente. Entonces, integrando la intensidad de las reflexiones  $(00l)$ , y la intensidad de los perfiles de difracción  $(h00)$  ó  $(0k0)$ , obtenemos la fracción de granos orientados eje- $c$  denotado por  $f_c$  el cual fue obtenido utilizando los perfiles  $(005)$  y  $(200)$  en la siguiente ecuación [Cul56]:

$$\frac{I^{(005)}}{I^{(200)}} = \frac{f_c \cdot I_{\text{estandar}}^{(005)}}{(1 - f_c) \cdot I_{\text{estandar}}^{(200)}} \quad (1)$$



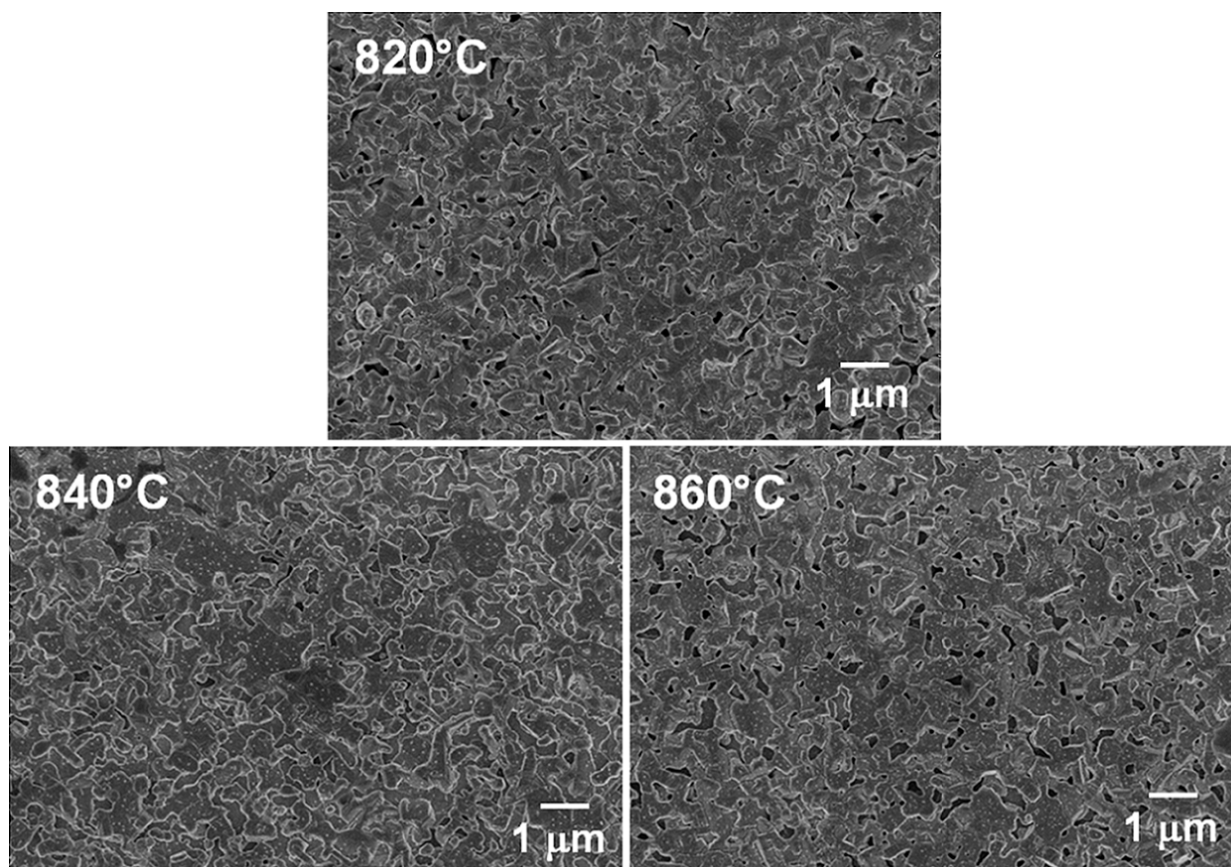
**Figura 5:** Imágenes de microscopía electrónica de capas de YBCO sobre STO.

donde  $I_{estandar}$  es la intensidad estándar obtenida de una muestra orientada aleatoriamente, es decir, los valores de intensidad que se encuentran en los PDF (Powder Diffraction File) de la muestra en forma de polvo. En el caso del  $YBa_2Cu_3O_7$  ortorrómbico utilizamos PDF 38-1433, para el  $YBa_2Cu_3O_6$  tetragonal PDF 39-1496.

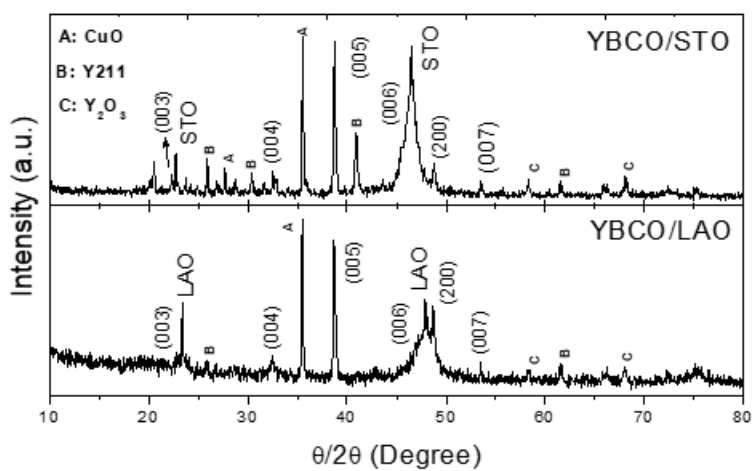
En caso que se presente una reflexión  $(103)$  en el difractograma, es posible calcular la cantidad de cristalitos crecidos aleatoriamente con respecto a la superficie del sustrato, para ello integramos también el perfil  $(103)$  y utilizamos la máxima intensidad estándar de dicha reflexión, comparándola, por ejemplo, con el perfil  $(00l)$ , posteriormente lo reemplazamos en la ecuación (1), obteniendo información de la cantidad de cristalitos eje- $c$  y la cantidad de granos orientados aleatoriamente con respecto a la superficie del sustrato. Los valores obtenidos de la fracción de cristalitos eje- $c$  utilizando la ecuación (1) para las reflexiones  $(005)$  y  $(200)$  fueron  $f_c = 0.88$  (YBCO/LAO) y  $f_c = 0.81$  (YBCO/STO) para los espec-

tros de la Figura 7. Entonces, en las capas crecidas por encima de los  $840^\circ\text{C}$  se logró obtener una buena textura fuera del plano por los valores de fracción de cristalitos eje- $c$  cercano al 90%, por lo cual, los cristalitos superconductores crecieron con la epitaxia proporcionada por el sustrato.

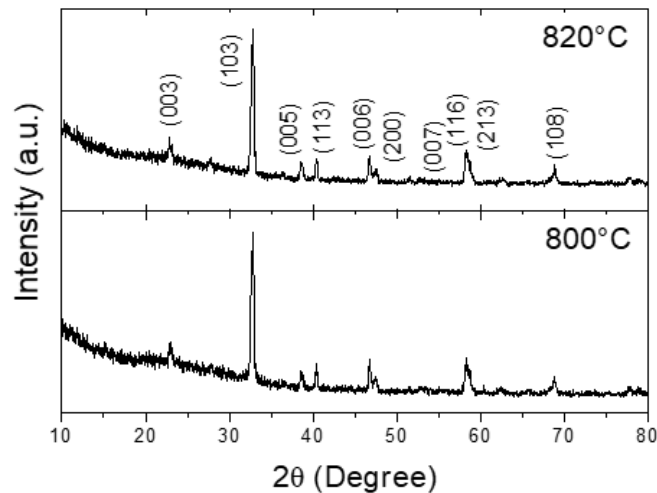
Por otro lado, la Figura 8 muestra los difractogramas de rayos X del barrido  $2\theta$ -scan para una temperatura de sintetizado menor a  $820^\circ\text{C}$ . Dichos difractogramas no presentan los perfiles del sustrato STO al incidir los haces de rayos X con un ángulo  $\omega_0 = 1.0^\circ$  grados sobre la capa. Los resultados ponen de manifiesto la degradación de la textura de la película delgada por la presencia de intensos perfiles  $(103)$  denotando un mayor crecimiento aleatorio que orientado  $(00l)$  de los cristalitos de YBCO, correlacionando éste hecho como consecuencia de una temperatura no adecuada para el crecimiento de los granos de YBCO, produciéndose en consecuencia la formación de macro segregaciones (Figura 5).



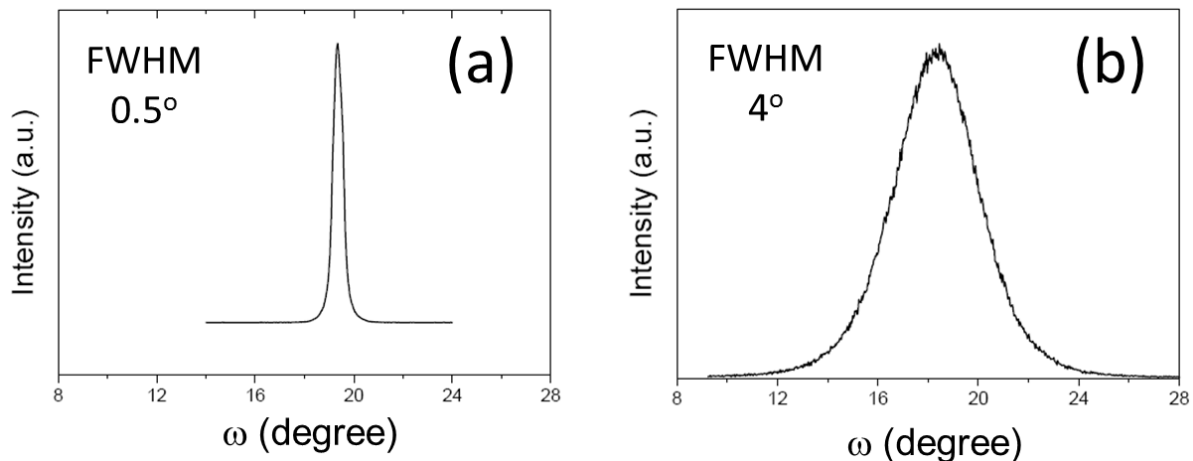
**Figura 6:** Imágenes de microscopía electrónica de capas de YBCO sobre LAO.



**Figura 7:** Difractogramas de DRX en barrido  $\theta - 2\theta$  -scan para capas de YBCO superconductoras crecidas a 860°C sobre: a) STO, y b) LAO.



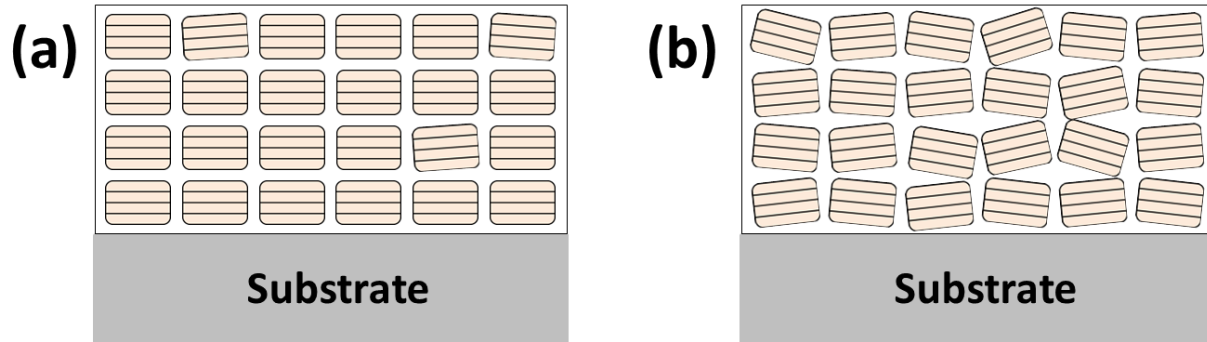
**Figura 8:** Espectros de difracción de rayos X del barrido  $2\theta$ -scan sobre el sustrato STO.



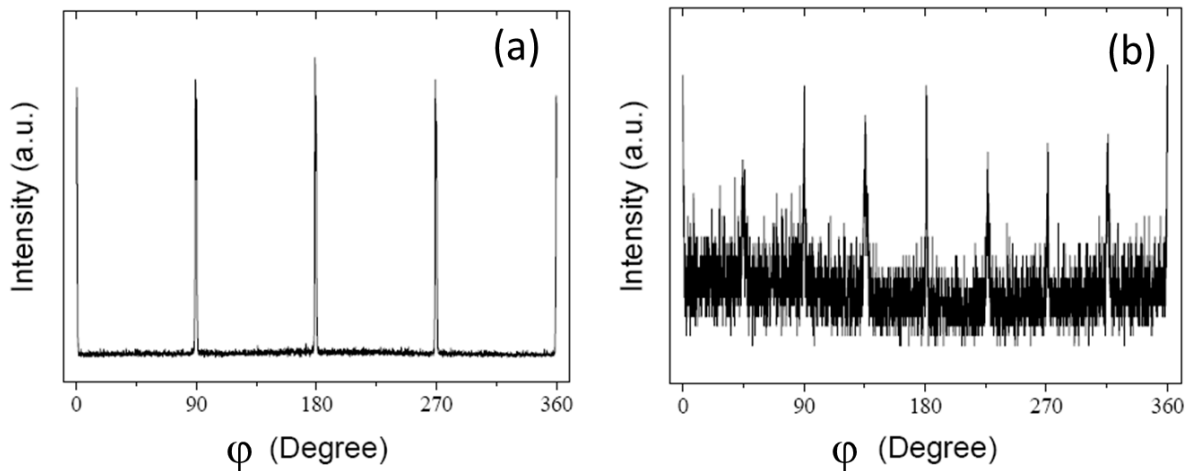
**Figura 9:** *Rocking curve* de una muestra con mosaicidad: a) cercana al valor de monocristal, y b) lejano al valor de monocristal.

Se muestra los resultados de difracción de rayos X del barrido  $\omega$ -scan (*rocking curve*) en la Figura 9 de capas delgadas representativas con mejor textura fuera de plano de la Figura 7. Recordando que una medida de *rocking curve* está ligada a una forma muy útil de estudiar la perfección de la mosaicidad de una capa epitaxial cuando sus planos no son paralelos a la superficie del sustrato. La mosaicidad es una medida de la propagación de las orientaciones del plano del cristal, pero un cristal de mosaico es un modelo idealizado consistiendo de numerosos cristalitas perfectos (Figura 10). La Figura 9a presenta el espectro de una capa epitaxial suponiendo una distribución gaussiana de las orientaciones de cristalitas centradas en la reflexión (005) con una anchura a media altura (*Full Width Half Maximum*, FWHM) igual a  $\Delta\omega = 0.5^\circ$ , encontrándose un valor cercano al

de monocristal. Un monocristal producirá un perfil de difracción muy agudo (monocristal de YBCO FWHM =  $0.007^\circ$  [Lia98]), mientras en la Figura 9b representa una muestra con un menor valor de mosaicidad igual a  $\Delta\omega = 4.0^\circ$ . Por tanto, a la luz de los resultados de *rocking curve* la temperatura de crecimiento por encima de los  $840^\circ\text{C}$  mejora la mosaicidad y la textura fuera del plano de una capa superconductora, así como una menor presencia de poros (Figura 6), por tanto, la epitaxia del sustrato puede transferirse a los granos superconductores hasta la superficie de la capa, pero para verificar la epitaxia del sustrato en el plano del sustrato es necesario que los rayos X incidan de una forma particular como lo verifica una medida de  $\varphi$ -scan como se describe en el siguiente párrafo a continuación.



**Figura 10:** *Rocking curve* de una muestra con mosaicidad: a) cercana al valor de monocristal, y b) lejano al valor de monocristal.

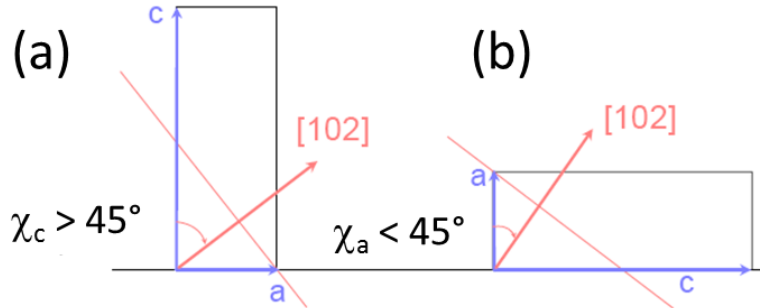


**Figura 11:** Espectros de  $\varphi$ -scan: a) colonia eje- $c$ , y b) colonias eje- $a$ .

En la Figura 11 se presentan los difractogramas de DRX del barrido  $\varphi$ -scan para la muestra de la Figura 7 la cual presenta una buena textura fuera del plano ( $f_c = 0.88$ ), donde se observaba perfiles de difracción ( $00l$ ), así como algunos ( $h00$ ). Un barrido  $\varphi$ -scan es una sección circular o polar de  $360^\circ$  de una figura de polos para un ángulo  $\chi_0$  constante [Gon12]. Esta configuración nos ayudó a caracterizar la dispersión de los granos de YBCO con textura en-el-plano, para determinar cuan bien alineados se encuentran con respecto al plano del sustrato. Se utilizó la reflexión ( $102$ ) del YBCO además de emplear los ángulos  $\omega_0 = 13.94^\circ$  grados y  $2\theta_{Bragg}(102) = 27.88^\circ$  grados. Como en la Figura 7 la capa presentaba perfiles ( $00l$ ) y ( $h00$ ), los cuales están directamente relacionados a la presencia de cristalitas de YBCO orientados con su eje- $c$  y eje- $a$  perpendicular al sustrato, respectivamente. Por tal razón, se realizaron dos barridos de  $\varphi$ -scan. Primero se giró el portamuestra un ángulo fijo  $\chi_c = 56.80^\circ$  y posteriormente  $\chi_a = 33.20^\circ$ , en ambos

ángulos exponemos la dirección  $[102]$  a los haces de rayos X para producir la correspondiente difracción, realizando luego un barrido de  $\varphi$ -scan de  $360^\circ$  grados, como se muestra esquemáticamente en la Figura 12. Un  $\varphi$ -scan proporciona información equivalente a una *rocking curve*, por un lado, los resultados proporcionados por la Figura 11a para  $\chi_c \approx 56.80^\circ$  permite exponer que existe una sola colonia de cristalitas de YBCO orientados eje- $c$  respecto al sustrato, con una distribución gaussiana con valor de FWHM igual a  $\Delta\varphi = 1.4^\circ$ , por otro lado, para la Figura 11b con un ángulo  $\chi_a \approx 33.20^\circ$  podemos expresar que existen dos colonias de cristalitas de YBCO orientados con su eje- $a$  perpendicular al sustrato, con una distribución también gaussiana con valor de FWHM igual a  $\Delta\varphi = 7.1^\circ$ , además éste par de colonias forman un ángulo de  $45^\circ$  grados, una respecto a la otra. Para cuantificar la textura en el plano, utilizamos la siguiente relación [Gon02]:





**Figura 12:** Esquema de la dirección  $[102]$  del YBCO.

$$F_c = \frac{I_{\varphi_c}}{I_{\varphi_c} + I_{\varphi_a}} \quad (2)$$

$$F_a = \frac{I_{\varphi_a}}{I_{\varphi_c} + I_{\varphi_a}} \quad (3)$$

donde  $F_c$  es la fracción de cristalitas eje- $c$  con textura en el plano,  $F_a$  es la fracción de cristalitas eje- $a$  con textura en el plano,  $I_{\varphi_c}$  es la intensidad integrada del espectro de la colonia de los cristalitas eje- $c$  e  $I_{\varphi_a}$  es la intensidad integrada del espectro de la colonia de los cristalitas eje- $a$ .

De la integración de los difractogramas de la Figura 11a - b se obtiene un valor de textura en el plano utilizando las ecuaciones (2) y (3) de  $F_c = 0.92$  y  $F_a = 0.08$ , para las colonias eje- $c$  y eje- $a$ , respectivamente. Entonces, la muestra presenta una buena textura fuera del plano con  $f_c = 0.88$ , así como una textura en el plano de valor  $F_c = 0.92$ . Para las capas de YBCO producidas mediante métodos químicos a temperaturas por encima de los  $840^\circ\text{C}$ , cuanto mayor sea la textura fuera y en el plano por encima de 0.90, podemos declarar que se ha logrado obtener una capa superconductora con una textura biaxial inducida por el sustrato monocristalino de estructura perovskita, como lo son las capas superconductoras de alta calidad, textura fuera y en el plano del orden de 0.97, producidas por métodos físicos [Won98]. Así, con una capa superconductora crecida con un alto valor de textura biaxial se obtendrá valores de corriente crítica superconductora cercana a  $1 \text{ MA/cm}^2$  para una temperatura de  $77^\circ\text{K}$  en campo externo nulo, pudiendo utilizarse en aplicaciones tecnológicas de potencia.

## Conclusiones

Las distintas configuraciones de difracción de rayos X utilizadas nos permitieron obtener información y cuan-

tificar la textura fuera y en el plano de capas superconductoras de YBCO crecidas por métodos químicos sobre sustratos monocristalinos de estructura perovskita con una resolución del orden de los milímetros. La temperatura de crecimiento tiene una directa influencia sobre los poros, la microestructura, y la textura fuera y en el plano de los cristalitas de YBCO como revelan las microfotos de microscopía electrónica de barrido y la difracción de rayos X. Temperaturas mayores de  $840^\circ\text{C}$  favorecen el crecimiento biaxial de los cristalitas de YBCO pudiendo utilizarse en aplicaciones tecnológicas de potencia, pero temperaturas menores a  $840^\circ\text{C}$  producen macro segregaciones de los granos sobre la superficie del sustrato destruyendo la textura. Una capa superconductora con textura biaxial puede considerarse como un cristal de mosaicos, un modelo idealizado consistiendo de numerosos cristalitas perfectos con sus planos paralelos a la superficie del sustrato.

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Vicerrectorado de Investigación de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, a través de los Proyectos 10130071 y 111301071. L. De Los Santos Valladares y A. Bustamante Domínguez agradecen al Programa de Incorporación de investigadores del CONCYTEC – FONDECYT - Banco Mundial (Contrato No. 012-2019-FONDECYT-BM-INC-INV). Finalmente, JC González agradece al Consejo Superior de Investigaciones Científicas (España) por su contrato JAE-Doc (2009-2012) en el Instituto de Ciencia de Materiales de Sevilla – Consejo Superior de Investigaciones Científicas - Universidad de Sevilla.

## Referencias

- [Bus12] Bustamante, A., Osorio, A., Leon, L., Garcia, J., Flores S., J., Pillaca, M., De Los Santos V., L., Lee, D. W., Gonzalez, J. C. (2012). *Phys. Proc.* **36**, 526.
- [Cul56] Cullity, B. D. (1956). *Elements of X-ray Diffraction*. USA: Addison Wesley Publishing Company Inc.
- [Cas03] Castano, O., Cavallaro, A., Palau, A., Gonzalez, J.C., Rossell, M., Puig, T., Sandiumenge, F., Mestres, N., Pinol, S., Pomar, A., Obradors, X. (2003). *Supercond. Sci. Technol.* **16**, 45.
- [Cas03] Castano, O., Cavallaro, A., Palau, A., Gonzalez, J.C., Rosell, M., Puig, T., Pinol, S., Mestres, N., Sandiumenge, F., Pomar, A., Obradors, X. (2003). *IEEE Trans. Supercond.* **13**, 2504.
- [Gar12] Garcia D, J., Bustamante, A., De Los Santos V., L., Gonzalez, J. C., Leon F., L., Flores S., J., Osorio, A. M., Albino A, J. (2012). *Rev.Inv. Fis.* **15**, 121502102.
- [Gon12] Gonzalez, J.C., De Los Santos Valladares, L., Osorio, Ana M., Albino Aguiar, J., Bustamante D., A. (2012). *Rev. Inv. Fis.* **15**, 121501104.
- [Gon02] Gonzalez, J.C. (2002). *Tesis de Maestría: Caracterización de Capas Superconductoras de YBCO mediante Espectroscopía micro-Raman*. Instituto de Ciencia de Materiales de Barcelona - CSIC - UAB. Barcelona - España.
- [Hot04] Hott, R. (2004) *Materials aspects of high-temperature superconductors for applications*. Page 1 in *High Temperature Superconductivity 1*. A.V. Narlikar Editor. Springer Verlag.
- [Iij00] Iijima, Y., Matsumoto, K. (2000). *Supercond. Sci. Technol.* **13**, 68.
- [Lar01] Larbalestier, D., Gurevich, A., Matthew Feldmann, D., Polyanskii, A.(2001). *Nature* **414**, 368.
- [Lia98] Liang, R., Bonn, D. A., Hardy, W. N. (1998). *Physica C* **304**, 105.
- [Obr06] Obradors, X., Puig, T., Pomar, A., Sandiumenge, F., Mestres, N., Coll, M., Cavallaro, A., Roma, N., Gazquez, J., Gonzalez, J.C., Castano, O., Gutierrez, J., Palau, A., Zalamova, K., Morlens, S., Hassini, A., Gibert, M., Ricart, S., Moreto, J.M., Pinol, m., Isfort, D ., Bock, J. (2006). *Supercond. Sci. Technol.* **19**, S13.
- [Pan13] Basic principles and data acquisition. (2013) *Basic XRD Course*. Panalytical. the Netherlands.
- [San14] Sanchez, H., Bustamante D., A., Osorio, A. M., De Los Santos V., L., Gonzalez, J.C., Barnes, C.H.W. (2014). *Rev. Per. Quim. Ing. Quim.* **17**, 15.
- [Wel96] Welp, U., Fendrich, J. A., Kwok, W. K., Crabtree, G. W., Veal, B. W.(1996). *Phys. Rev. Lett.* **76**, 4809.
- [Won98] Wondenweber, R. (1998). *Supercond. Sci. Technol.* **12**, R86.
- [Yam15] Yamamoto, H., Krockenberger, Y., Naito, M. (2015). *Epitaxial growth of superconducting oxides*. Chapter 5, page 95 in *Epitaxial Growth of Complex Metal Oxides*. Ed. G. Koster, M. Huijben and G. Rijnders. Woodhedd Publishing Series in Electronic and Optical Materials