

Diseño químico en la síntesis directa de SrTiO₃ como material funcional para aplicaciones de generación de energía: del sol-gel a la perovskita

R. Avilés-Betanzos^{a*}, I. Lizama-Tzec^a, L.G. Daza^b, D. Meneses-Rodríguez^c, R. Castro-Rodríguez^a

^aCINVESTAV-IPN, Unidad Mérida, Departamento de Física Aplicada, Km. 6 Antigua carretera a Progreso Apdo. Postal 73, Cordemex, 97310, Mérida, Yucatán, México

^bUniversidad Autónoma de Yucatán, Facultad de Ingeniería, Industrias No Contaminantes S/N, Sin Nombre de Col 27, 97302, Mérida, Yucatán, México.

^cIxM Secihti-CINVESTAV, Departamento de Física Aplicada, Km. 6 Antigua carretera a Progreso Apdo. Postal 73, Cordemex, 97310, Mérida, Yucatán, México

Fecha de recepción: 16 de febrero de 2026 - Fecha de aceptación: 16 de abril de 2026

Resumen

El titanato de estroncio (SrTiO₃) es un material de gran interés en el campo de la generación y conversión de energía, debido a sus propiedades estructurales y electrónicas, que lo hacen relevante para aplicaciones como fotocatalisis, dispositivos optoelectrónicos, materiales funcionales y dispositivos fotovoltaicos. En este trabajo se presenta un novedoso enfoque para la transformación directa de SrTiO₃ a partir de dióxido de titanio (TiO₂) en estado amorfo e hidratado, basado en una estrategia de síntesis que combina el método sol-gel con un tratamiento hidrotermal. Este enfoque representa una ventaja significativa desde el punto de vista energético, al reducir tratamientos térmicos adicionales, y desde el punto de vista práctico, simplifica el proceso al evitar la necesidad de etapas previas de síntesis de TiO₂ en fase cristalina de anatasa. El material obtenido fue caracterizado por difracción de rayos X para corroborar la fase cristalina de perovskita, con el cual se calculó un tamaño promedio de cristalito de 31.2 nm. También, se realizó la caracterización por microscopía electrónica de barrido con lo cual se confirmó una morfología cúbica con un tamaño de partícula promedio de 80 nm. Los resultados sugieren que el SrTiO₃ obtenido presenta características estructurales adecuadas que podrían ser de interés para aplicaciones en el área de generación de energía.

Palabras clave:

SrTiO₃, TiO₂, Sol-gel hidrotermal, Perovskita, Materiales funcionales.

*roberto.aviles@cinvestav.mx

Chemical design in the direct synthesis of SrTiO₃ as a functional material for energy generation applications: from sol-gel to perovskite

Abstract

Strontium titanate (SrTiO₃) is a material of significant interest in the field of energy generation and conversion due to its structural and electronic properties, which make it relevant for applications such as photocatalysis, optoelectronic devices, functional materials, and photovoltaic technologies. This work presents a novel approach for the direct transformation of SrTiO₃ from amorphous, hydrated titanium dioxide (TiO₂), based on a synthesis strategy that combines the sol-gel method with a hydrothermal treatment. This approach offers a notable energetic advantage by reducing the need for additional thermal treatments, while also providing practical benefits by eliminating the requirement for preliminary synthesis steps to obtain crystalline anatase TiO₂. The obtained material was characterized by X-ray diffraction to confirm the formation of the perovskite crystalline phase, from which an average crystallite size of 31.2 nm was calculated. Scanning electron microscopy analysis was also performed, revealing a characteristic cubic morphology with an average particle size of approximately 80 nm. The results suggest that the obtained SrTiO₃ exhibits suitable structural characteristics that could be of interest for applications in the field of energy generation.

Keywords:

SrTiO₃, TiO₂, Sol-gel hydrothermal, Perovskite, Functional materials.

1. Introducción

El SrTiO₃ (titanato de estroncio) es un óxido metálico con estructura cristalina tipo perovskita, que ha despertado un notable interés en el ámbito de los materiales funcionales debido a la combinación de sus propiedades estructurales, electrónicas y químicas (Figura 1). Este material se comporta como un semiconductor, con un band gap del orden de ~3.2 eV, lo que lo hace especialmente relevante para aplicaciones de generación y conversión de energía. Entre estas aplicaciones destacan la fotocatalisis, fotoelectrólisis, celdas de combustible de óxido sólido, y celdas fotovoltaicas (González et al. 2024; Jiang et al.

2020; Mahmood et al. 2024; Rahman et al. 2019; Siebenhofer et al. 2021). Una de las principales ventajas del SrTiO₃ es su alta estabilidad química y térmica, así como la posibilidad de modificar y optimizar sus propiedades mediante el control de su estructura cristalina, tamaño de partícula, morfología y pureza lo cual permite adaptar el material a sus distintas aplicaciones (Putri et al. 2022; Valdés 2023). El desempeño del SrTiO₃ en estas aplicaciones depende de manera crítica de su grado de cristalinidad, de la presencia de fases secundarias y del control de su microestructura. Por esta razón, la forma en que el material es sintetizado juega un papel fundamental en la definición de sus

propiedades finales (Atkinson et al. 2019; Kuspanov et al. 2023).

La síntesis de SrTiO₃ ha sido abordada mediante una amplia variedad de métodos, entre los que se incluyen rutas hidrotermales, solvotermales, precipitación/co-precipitación, reacciones en estado sólido, técnicas asistidas por ultrasonido, entre otras. La elección del método de síntesis influye de manera directa en las propiedades finales del material, dando lugar a diferencias en la morfología, el grado de

cristalinidad y el tamaño de las nanopartículas obtenidas (Chen 2024; De Oliveira et al. 2013; Leite y Vichi, 2013; Mojed et al. 2023; Peczak et al. 2023; Vivoni et al. 2001; Youssef et al. 2018; Zheng et al. 2001; Živojinović et al. 2017). De entre todos, el método sol-gel es ampliamente utilizado debido a las múltiples ventajas que ofrece, entre las que destaca la posibilidad de controlar con gran precisión la morfología, el tamaño de partícula, la porosidad y la textura del producto final, así como sus propiedades químicas (da Fonseca et al. 2021; Dar et al. 2024; Zarkov 2024).

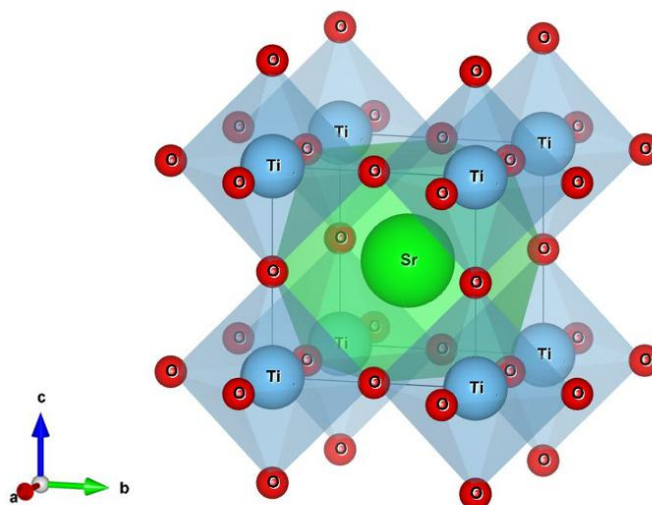


Figura 1. Estructura de perovskita del SrTiO₃, generada con el software VESTA. La imagen muestra los octaedros de TiO₆ formados por la coordinación entre titanio (Ti, azul) y oxígeno (O, rojo), mientras que los iones de estroncio (Sr, verde) ocupan posiciones centrales dentro de la red cristalina.

El proceso sol-gel inicia con la disolución de precursores metálicos, como alcóxidos o sales metálicas, en un solvente adecuado, como el agua. Al entrar en contacto con el agua, estos precursores sufren reacciones de hidrólisis, en las que se rompen enlaces originales y se forman grupos hidroxilo (–OH) asociados al metal (figura 2, a)). Posteriormente, dichos grupos reaccionan entre sí mediante procesos de condensación, dando lugar a enlaces metal–

oxígeno–metal (M–O–M) y generando progresivamente una red inorgánica que, con el tiempo, crece hasta formar un gel (figura 2, b) y c)) (Voon et al. 2020; Singh y Dutta, 2018) (Abdullahi et al. 2025; Rafatmah y Hemmateenejad 2023). Este método suele requerir un postratamiento, llamado hidrotermal, a temperaturas y presiones elevadas, la cual es fundamental para promover la completa cristalización del material e

incrementar el tamaño de nanopartícula (Figura 3) (Abdel-Hady et al. 2024; Grabowska 2016;

He et al. 2008; Naeem et al. 2025; Zlobin et al. 2024).

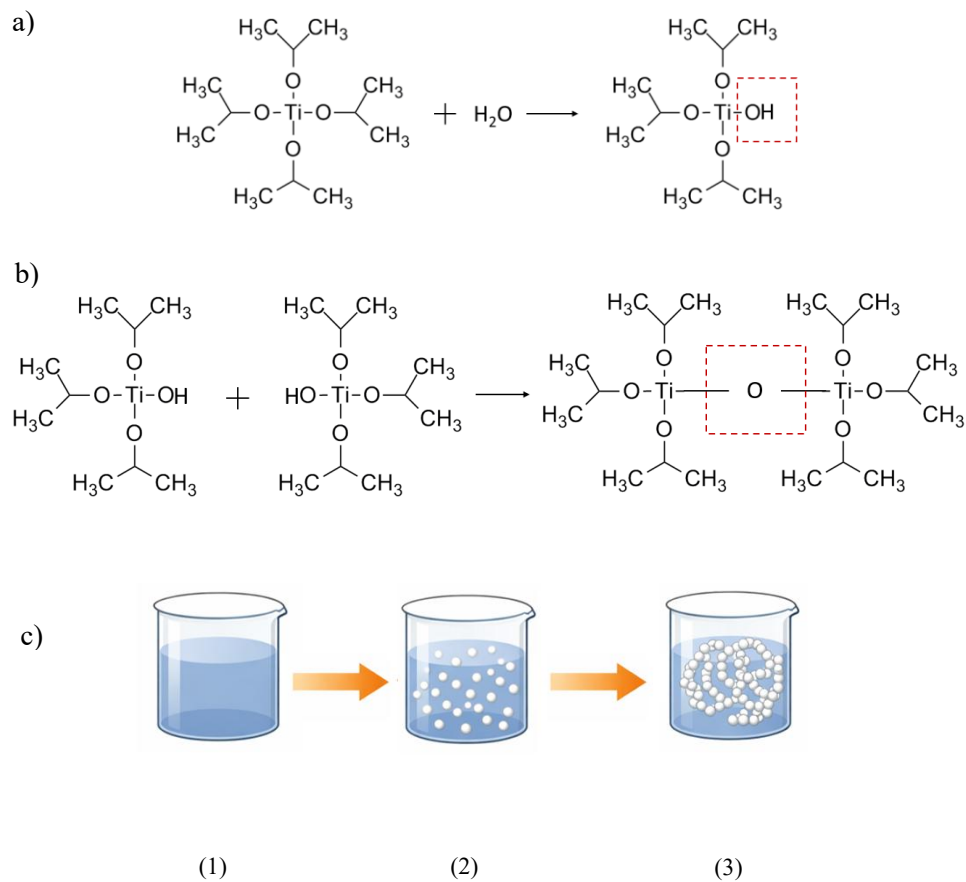


Figura 2. Representación esquemática del proceso de sol-gel. a) Reacción de hidrólisis de una molécula de isopropóxido de titanio (TTIP) con agua y formación de grupos hidroxilo. b) Reacción de condensación y formación de enlace M-O-M, donde M=Ti. c, (1) solución precursora (TTIP + H₂O), (2) condensación y formación de sol y, (3) formación de gel.

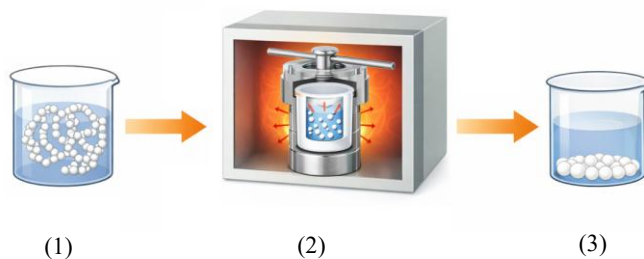


Figura 3. Representación esquemática del proceso de síntesis por hidrotermal. El sol gel inicial (1) es introducido en el reactor autoclave, a su vez colocado dentro de una mufla, donde la acción combinada de la temperatura y presión (2) promueven la reorganización y crecimiento de las partículas de interés (3).

De acuerdo a la literatura, la síntesis de SrTiO₃ mediante el método sol-gel e hidrotermal parte típicamente del uso de TiO₂ en fase cristalina anatasa y un precursor de estroncio, ambos dispersos en una solución fuertemente alcalina (Din et al. 2016; Gao et al. 2018; Grabowska et al. 2017; Peng et al. 2024). Este medio desempeña un papel determinante, ya que una fuerte alcalinidad es necesaria para que el TiO₂ sea progresivamente atacado por iones hidroxilo. Esto favorece la ruptura de enlaces Ti-O, promoviendo la formación de complejos solubles de titanio [Ti(OH)₆]²⁻. Estas especies

resultan fundamentales para la formación de la estructura perovskita del SrTiO₃ debido a que presentan una coordinación octaédrica alrededor del titanio (figura 4). Esta disposición geométrica proporciona la configuración espacial adecuada para la formación de los octaedros TiO₆, que constituyen la unidad básica de la red cristalina tipo perovskita. De esta manera, la alcalinidad del medio no solo facilita la reacción, sino que condiciona directamente la formación de la fase cristalina final (Yalini Devi et al. 2020; Zhang et al. 2015).

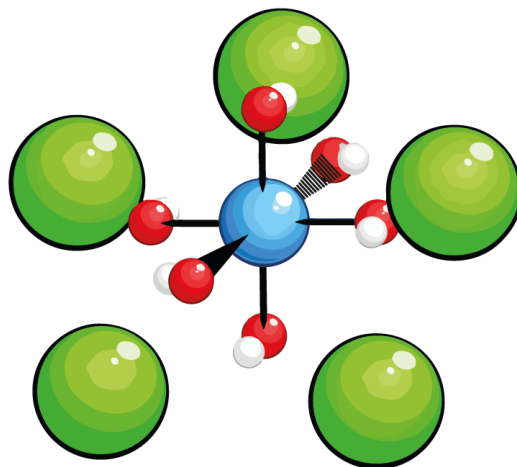


Figura 4. Representación del complejo de coordinación [Ti(OH)₆]²⁻ con geometría octaédrica rodeada por iones de estroncio. La esfera azul corresponde al átomo central de titanio, las esferas rojas representan átomos de oxígeno, las esferas blancas representan átomos de hidrógenos y las esferas verdes representan iones Sr²⁺.

Una vez que los complejos [Ti(OH)₆]²⁻ y iones Sr²⁺ se encuentran disponibles en solución, las condiciones de temperatura y presión del tratamiento hidrotermal promueven su interacción, dando lugar a la nucleación de la fase SrTiO₃ (figura 5, a)). A medida que el proceso hidrotermal continúa, el TiO₂ inicial se

disuelve gradualmente, mientras que los núcleos de SrTiO₃ crecen hasta que el precursor de titanio se consume completamente, formando partículas cristalinas (figura 5, b)) (Canu y Buscaglia, 2017; Huamán et al. 2022; Moreira et al. 2012; Phoon et al. 2019)

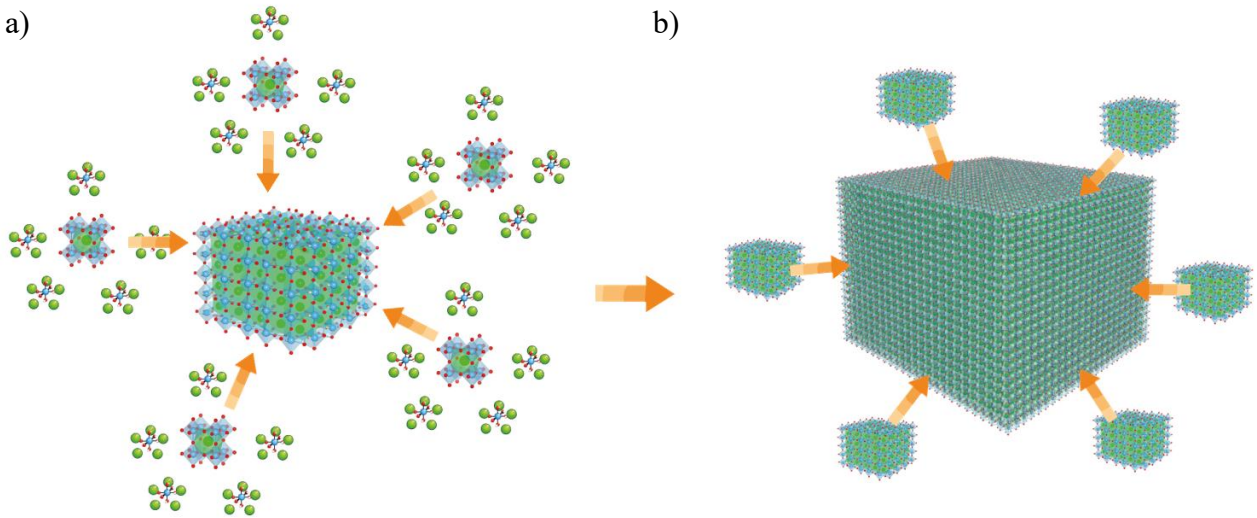


Figura 5. Proceso de la reacción hidrotérmica para la síntesis de SrTiO₃

La anatasa es la fase preferida en este proceso debido a que presenta una red cristalina más abierta y una mayor cantidad de sitios de titanio subcoordinados en comparación con el rutilo, lo que incrementa su reactividad y facilita la formación de SrTiO₃. En contraste, el rutilo, al ser la fase termodinámicamente más estable y poseer una estructura más densa es menos reactivo. Por otra parte, la fase brookita, aunque metaestable, es difícil de obtener de manera controlada en rutas sol-gel, lo que limita su uso como precursor para la síntesis de SrTiO₃ (Lai et al. 2015; Lazzeri et al. 2001; Lee et al. 2001; You et al. 2014; Bokhimi et al. 2001).

Este enfoque típico implica una serie de limitaciones que impactan tanto en la eficiencia del proceso como en su complejidad. En particular, el uso de TiO₂ en fase cristalina anatasa requiere, en muchos casos, una etapa previa de síntesis y/o tratamiento térmico para

su obtención, lo que incrementa el consumo energético y el número de pasos involucrados. En otros casos, se recurre al uso de TiO₂ comercial (por ejemplo, P25), lo que puede simplificar el proceso, pero introduce costos adicionales asociados al material precursor, puede dificultar el control del proceso y limitar su versatilidad. En este contexto, resulta de interés explorar estrategias alternativas que permitan simplificar la ruta de síntesis y reducir tanto etapas intermedias como la energía requerida para el proceso.

En este trabajo se propone un enfoque distinto basado en el uso de TiO₂ en estado amorfo e hidratado, el cual, debido a su menor grado de orden estructural, se espera que facilite la formación de especies reactivas sin requerir la ruptura de una red cristalina previamente establecida, ofreciendo así una vía directa para la obtención de SrTiO₃. Además, al evitar etapas adicionales de tratamiento térmico y

reducir la dependencia de materiales comerciales, este enfoque contribuye tanto a la disminución del consumo energético como a la reducción de costos asociados al proceso, posicionándose como una alternativa más eficiente y sustentable.

Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es evaluar la viabilidad de esta estrategia y analizar su impacto en la formación estructural del SrTiO₃, con el fin de determinar si el material presenta un grado de cristalinidad, pureza y morfología adecuados para su potencial aplicación en sistemas de generación de energía.

2. Metodología

2.1. Consideraciones iniciales: reactor hidrotermal

Para la síntesis realizada en este trabajo se empleó un contenedor de teflón con una capacidad total de 45 mL, por lo que el volumen máximo de reacción se limitó a tres cuartos de su capacidad. Esta restricción resulta particularmente relevante en el diseño experimental, ya que el volumen máximo admisible condiciona directamente los cálculos de concentración y las cantidades de reactivos utilizadas en la preparación de las soluciones precursoras.

2.2. Precursores, medio alcalino y estequiometría

En este trabajo se propone una estrategia de síntesis de SrTiO₃ basada en la combinación

del método sol-gel con un postratamiento hidrotermal. La formación de este material requiere la presencia de iones de Ti⁴⁺, Sr²⁺ y O²⁻ en un medio líquido adecuado. Para este propósito, se seleccionaron como precursores de dichos iones el cloruro de estroncio hexahidratado (SrCl₂·6H₂O, ASC reagent, 99%, Sigma-Aldrich), el tetra isopropóxido de titanio (Ti[OCH(CH₃)₂]₄, 97 %, Sigma-Aldrich) (TTIP) y agua desionizada (resistividad ≥16 MΩ·cm) como solvente, respectivamente. Para favorecer la formación adecuada del SrTiO₃, se establece una relación molar estequiométrica de 1:1 entre los iones Sr²⁺ y Ti⁴⁺, ya que la equivalencia en la cantidad de ambos cationes constituye un requisito fundamental para la construcción completa de la red cristalina tipo perovskita. En este trabajo se eligió hidróxido de sodio (NaOH, ACS reagent, ≥ 97%, pellets) como agente alcalino ya que se trata de una base fuerte que se disocia completamente en solución acuosa, introduce un entorno químico simple sin generar interacciones complejas con el titanio, lo que facilita la formación de especies solubles [Ti(OH)₆]²⁻.

2.3. Preparación del sol-gel

El sistema sol-gel empleado en este trabajo se preparó a partir de dos soluciones independientes. En una primera etapa, se preparó una solución que contiene el precursor de estroncio en un medio fuertemente alcalino (solución A). De manera paralela, se preparó una solución que contiene el precursor de titanio en el mismo medio alcalino (solución B).

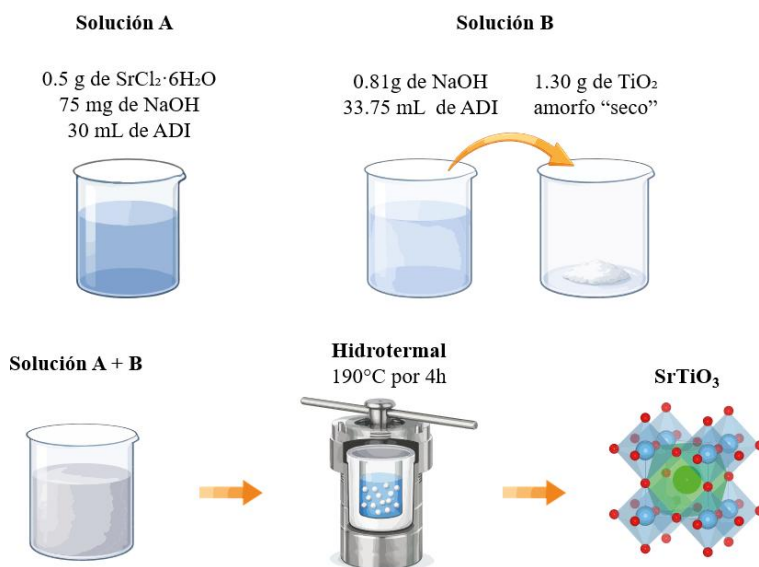


Figura 6. Resumen esquemático del proceso de síntesis de SrTiO₃

2.3.1. Solución A

La solución A se preparó disolviendo 0.5 g de SrCl₂·6H₂O en 30 mL de agua desionizada equivalentes a 1.875 mmol de iones Sr²⁺ disueltos en el agua desionizada calculado mediante la relación $n = \frac{m}{M}$, donde n representa el número de moles, m la masa del compuesto empleada y M su peso molecular. La cantidad de NaOH empleada se estableció de manera que la concentración de OH⁻ fuera inferior a la requerida para la precipitación de Sr(OH)₂, asegurando que el Sr²⁺ se mantuviera en solución y participe en la formación de SrTiO₃. Para incrementar el pH de la solución se usaron 75 mg de NaOH. El pH de la solución fue de 13 a 22 °C.

2.3.2. Solución B

Para la solución B, primero se prepara el medio acuoso alcalino que serviría como entorno químico para la activación del precursor de titanio de las etapas posteriores. Para ello, se preparó una solución 0.6 M de NaOH (0.81 g)

en 33.75 mL de agua desionizada, obteniéndose un pH de 13 a 22 °C. Esta solución se mantiene en agitación durante 15 minutos para permitir la disolución de NaOH.

En paralelo, se prepara el TiO₂ amorfo que servirá como precursor para la formación de SrTiO₃. Una de las rutas más sencillas para obtener TiO₂ amorfo consiste en la hidrólisis de un alcóxido de titanio en medio acuoso. En este trabajo, el TiO₂ se obtuvo mediante la adición de 10.8 mL de TTIP a 19.3 mL de agua desionizada. Esta solución se mantiene en agitación durante 15 minutos. Al entrar en contacto con el agua, el TTIP sufre una hidrólisis inmediata, en la cual las moléculas de agua rompen los enlaces Ti-OR del precursor, dando lugar a la formación de grupos hidroxilo asociados al titanio. Posteriormente, estos grupos reaccionan entre sí mediante procesos de condensación, generando enlaces Ti-O-Ti (figura 2). Como resultado de la hidrólisis del TTIP, se obtiene un sol coloidal en donde el titanio se encuentra coordinado a oxígeno principalmente en forma de grupos hidroxilo (-

OH), enlaces Ti–O–Ti y moléculas de agua, dando lugar a una red amorfa e hidratada.

El material obtenido se sometió a un ciclo de centrifugación (4500 RPM durante 15 minutos) con el fin de separar el TiO_2 del exceso de solvente. El sobrenadante fue retirado y el sedimento húmedo restante se utilizó para preparar una solución stock de TiO_2 0.5 M en el medio acuoso alcalino previamente preparado. Para ello, se estimó la cantidad de TiO_2 en peso seco contenida en el sedimento húmedo. Este cálculo se realizó mediante el siguiente procedimiento gravimétrico: 1) se pesó un recipiente de vidrio, 2) se añadió una cantidad conocida del sedimento húmedo de TiO_2 sobre el vidrio y, 3) la muestra de TiO_2 húmedo se secó sobre una placa calefactora a $120\text{ }^\circ\text{C}$ hasta obtener un polvo, 4) tras el enfriamiento, el sistema (TiO_2 más el vidrio) se pesaron nuevamente y, a partir de la diferencia de masas, se estableció la relación entre el peso húmedo y el peso seco del TiO_2 . Este procedimiento gravimétrico se realizó tres veces para verificar la reproducibilidad de la medición. Finalmente, con base en esta relación, 1.3 g de TiO_2 (peso seco equivalente) fueron dispersados en 33.75 mL de agua

desionizada y se mezclaron con la solución alcalina bajo agitación hasta obtener una dispersión homogénea.

2.4. Síntesis hidrotérmal de SrTiO_3

A continuación, se tomaron 3.75 mL de la solución B, equivalentes a 1.875 mmol de TiO_2 , y se añadieron a los 30 mL de la solución A, que contienen 1.875 mmol de iones Sr^{2+} , estableciendo así la relación estequiométrica 1:1 requerida. La mezcla se sometió a ultrasonido durante 5 minutos, seguido de agitación por 10 minutos, con el fin de obtener un sistema disperso y homogéneo. Posteriormente, la suspensión resultante se transfirió a la copa de teflón de 45 mL y se introdujo en el reactor autoclave para el tratamiento hidrotérmal, el cual se llevó a cabo a $190\text{ }^\circ\text{C}$ durante 4.5 horas, utilizando la rampa de calentamiento mostrada en la figura 7. Al finalizar el tratamiento, se obtuvo una suspensión que presenta un material blanco precipitado en el fondo del recipiente, el cual fue recuperado y almacenado en un contenedor adecuado para su posterior purificación.

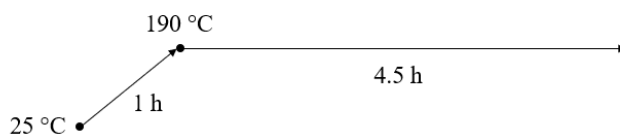


Figura 7. Rampa de temperatura para el proceso de síntesis hidrotérmal.

2.5. Eliminación de impurezas

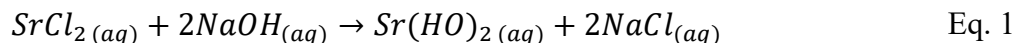
Debido a la estequiometría de la reacción y a las condiciones químicas del medio alcalino, es posible anticipar la formación de dos subproductos principales durante el proceso de síntesis: 1) cloruro de sodio (NaCl) y 2)

carbonato de estroncio (SrCO_3). En consecuencia, para asegurar la obtención de SrTiO_3 con alta pureza, resulta necesario eliminar estos compuestos mediante tratamientos de lavado adecuados. A continuación, se describen los dos procedimientos de lavado diseñados para

remover de manera selectiva los subproductos formados durante el proceso de síntesis.

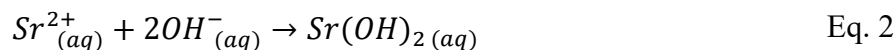
2.5.1. Formación y eliminación de cloruro de sodio (NaCl)

Al mezclar la solución que contiene $SrCl_2 \cdot 6H_2O$ con la solución alcalina de NaOH, ocurre un intercambio iónico en el medio acuoso, que puede representarse mediante la siguiente reacción simplificada:



Desde un punto de vista iónico, la interacción química relevante corresponde a la asociación de los iones Sr^{2+} con OH^- , mientras que los

iones Na^+ y Cl^- permanecen en solución como especies acompañantes:



Los iones Na^+ y Cl^- presentes en el medio pueden permanecer disueltos bajo condiciones acuosas diluidas; sin embargo, durante el tratamiento hidrotermal, las altas temperaturas

y presiones dentro del autoclave, así como los procesos de concentración local y posterior secado, favorecen la cristalización del NaCl como fase secundaria:



Para la eliminación de este compuesto, la solución obtenida después del tratamiento hidrotermal siguió tres ciclos de lavado con agua desionizada a $70^{\circ}C$, posterior centrifugación a 4500 RPM durante 15 minutos y retiro de sobrenadante. Finalmente, una muestra del sedimento fue recuperado y almacenado en un contenedor adecuado para su posterior caracterización.

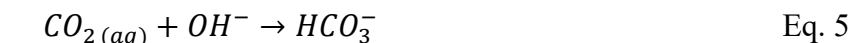
2.5.2. Formación y eliminación de carbonato de estroncio ($SrCO_3$)

El carbonato de estroncio ($SrCO_3$) se nuclea fácilmente en sistemas alcalinos abiertos al aire. El agua puede contener CO_2 disuelto proveniente del aire aunque la disolución de CO_2 en el agua también puede ocurrir durante la preparación de las disoluciones, la agitación y enfriamiento del hidrotermal:



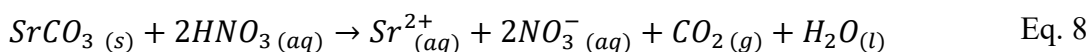
Trazas de CO₂ disuelto en agua en un medio alcalino generan SrCO₃ en presencia con los

iones Sr²⁺ como se muestra en las ecuaciones 5 a 7.



En esta ocasión, para una disolución selectiva de SrCO₃ se preparó una solución acuosa al 25 mM de HNO₃ (70%, Sigma -Aldrich). En este proceso, el HNO₃ actúa como agente protonante del ion carbonato, promoviendo su

conversión en CO₂ gaseoso, lo que conduce a la ruptura de la red iónica del SrCO₃ y a la liberación de iones Sr²⁺ en solución. La reacción general que ocurre durante el lavado ácido es la siguiente:



El sedimento obtenido posterior al lavado con agua caliente es dispersado en la solución ácida preparada. Posteriormente, la solución fue centrifugada a 6000 RPM por 15 minutos. Finalmente, el sobrenadante fue retirado y una muestra del sedimento fue recuperado y almacenado en un contenedor adecuado para su posterior caracterización.

segundo lavado, destinado a la eliminación de trazas de SrCO₃. Previo a la caracterización, todas muestras fueron calentadas a 200 °C durante 40 minutos sobre una parrilla de calentamiento para eliminar el agua contenida y finalmente el material seco fue molido finamente utilizando un mortero hasta obtener un polvo homogéneo.

2.6. Caracterización estructural

Con el fin de evaluar la estructura cristalina y la morfología del material obtenido, se realizó la caracterización de cuatro etapas representativas del proceso: 1) una muestra de TiO₂ previa a la síntesis del material, 2) una muestra recuperada directamente después del tratamiento hidrotermal, 3) una muestra posterior al primer lavado, orientado a la eliminación de NaCl, y 4) una muestra tras el

2.6.1. Difracción de rayos X (DRX)

La confirmación de la estructura cristalina de las muestras se realizó mediante difracción de rayos X (DRX) utilizando un difractómetro Bruker D8 ADVANCE. Las mediciones de DRX se llevaron a cabo empleando radiación Cu K α , con una longitud de onda de $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$. A partir de los difractogramas obtenidos, el tamaño de cristalito se estimó mediante la ecuación de Debye-Scherrer (ecuación 9):

$$d = \frac{k\lambda}{\beta \cos\theta} \quad \text{Eq. 9}$$

Donde λ es la longitud de onda de los rayos X (1.5406 Å), β es el ancho completo a la mitad

del máximo (FWHM), θ es el ángulo de difracción y k una constante (0.9). La

corroboración de la fase cristalina se realizó mediante la comparación de los patrones de difracción obtenidos con las cartas de referencia JCPDS correspondientes.

2.6.2. Microscopio Electrónica de Barrido (SEM) /Espectroscopía de energía dispersiva de rayos X (EDS)

La caracterización morfológica y de composición de las muestras de SrTiO₃ se llevó a cabo en un FE-SEM-JEOL JSM-7600F. Para este análisis, se adquirieron micrografías de la superficie de las muestras antes y después de los lavados en diferentes regiones, con el objetivo de observar de manera visual el cambio ocurrido y de obtener una representación adecuada de la morfología y el tamaño promedio de partícula. A partir de las imágenes obtenidas, se llevó a cabo un análisis estadístico para determinar los valores promedio del tamaño de partícula, utilizando el software ImageJ para el procesamiento y medición de las micrografías (Schneider et al. 2012).

La composición elemental se evaluó mediante espectroscopía de energía dispersiva de rayos X (EDS, por sus siglas en inglés) para corroborar la presencia de los elementos constituyentes del material, así como evidenciar la presencia y posterior desaparición de fases secundarias e impurezas derivadas del proceso de síntesis y de los tratamientos de lavado. En la muestra previa a los tratamientos de lavado, el análisis por EDS se realizó de manera puntual sobre regiones específicas con morfologías no asociadas a la esperada para el SrTiO₃, con el objetivo de identificar posibles fases secundarias. Por otro lado, en la muestra

posterior a los lavados se llevó a cabo un mapeo elemental, con el fin de evaluar la distribución espacial de los elementos y verificar la homogeneidad composicional del SrTiO₃. Esta combinación de análisis puntual y mapeo elemental permite, por un lado, confirmar la presencia de impurezas en etapas iniciales y, por otro, evidenciar su eliminación y la formación de un material homogéneo tras los tratamientos de purificación.

3. Resultados y Discusión.

3.1. DRX

La Figura 8 muestra los difractogramas correspondientes a las muestras analizadas en cada una de las etapas del proceso, desde el precursor inicial hasta el material final purificado. En esta figura se incluyen a) el patrón asociado al TiO₂ amorfo en color rojo, b) la muestra obtenida directamente después del tratamiento hidrotermal en color verde, así como las muestras posteriores al primer y segundo lavado en c) color azul y d) color rojo, respectivamente. En la figura se señalan los picos característicos del compuesto cristalino de NaCl, SrCO₃ y SrTiO₃ con cuadrados, círculos y asteriscos, respectivamente. En una primera etapa, el precursor de titanio obtenido a partir de la hidrólisis del alcóxido se presenta como un óxido de titanio amorfo e hidratado, cuyo patrón de difracción se caracteriza por la ausencia de picos definidos asociado a la falta de orden cristalino (Figura 8, a)). Este comportamiento confirma que el sistema no parte de una fase cristalina como la anatasa, sino de una red amorfa reactiva.

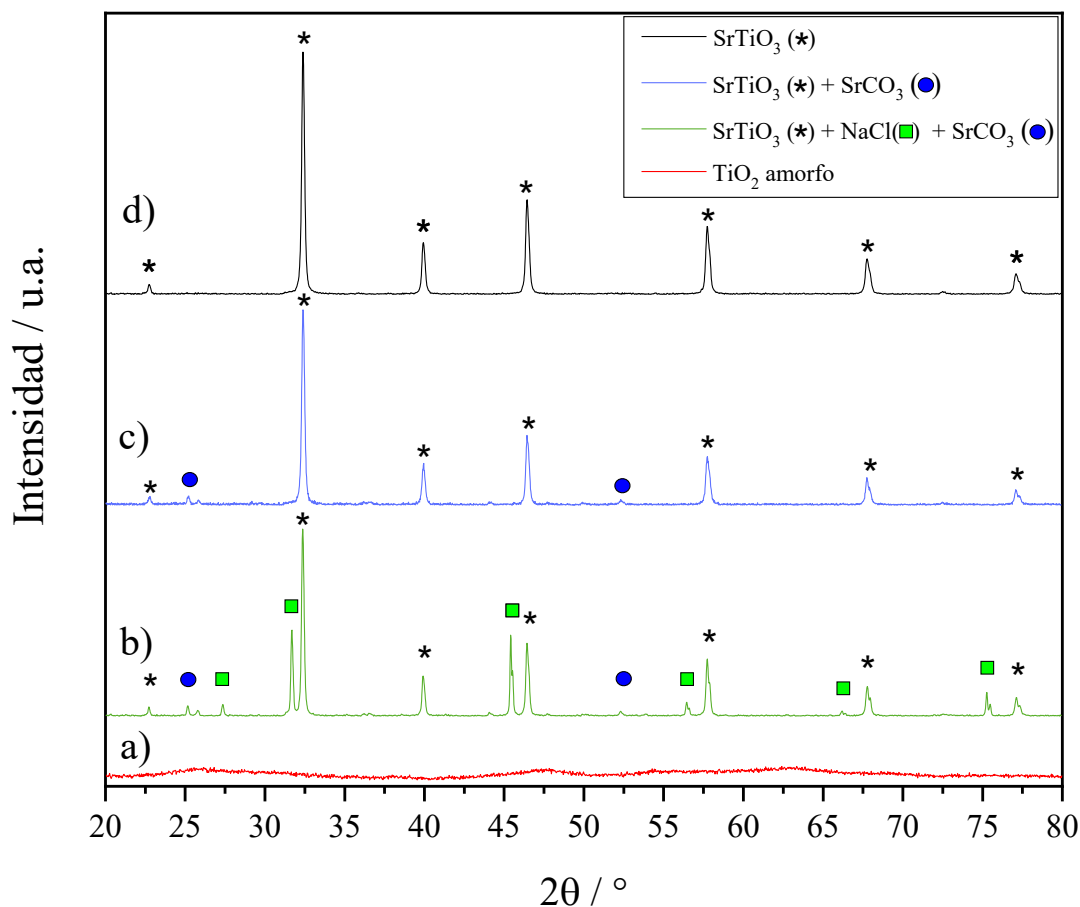


Figura 8. Patrón de difracción de rayos X de cada etapa del proceso de síntesis de SrTiO₃. Picos característicos de las fases cristalinas de perovskita (JCPDS #35-0734), halita (JCPDS #00-005-0628), y estroncianita (JCPDS #00-005-0418) son señalados con asteriscos negros, cuadros verdes, y círculos azules, respectivamente.

Tras el tratamiento hidrotérmal (Figura 8, b)), el difractograma del material recuperado evidencia picos principales alrededor del ángulo 2θ : 32.96°, 39.94°, 46.46°, 57.77° y 67.79° característicos de la fase cristalina perovskita, del SrTiO₃ de acuerdo con la ficha JCPDS #35-0734, señalados con asteriscos negros. Sin embargo, se observan fases secundarias cuya presencia resulta coherente con la estequiometría de los reactivos empleados y con las condiciones químicas del medio alcalino, como se mencionó anteriormente. Picos adicionales correspondientes a NaCl se observan alrededor

de los ángulos 2θ : 27.34°, 31.64°, 45.41°, 56.48°, 66.27°, 75.19° característicos de la fase cristalina de halita de acuerdo con la ficha JCPDS #00-005-0628, señalados con cuadros verdes. Además, también se pueden observar picos que corresponden a trazas de SrCO₃ alrededor de los ángulos 2θ : 25.19° y 52.35° que corresponden a la fase cristalina de estroncianita de acuerdo a la ficha JCPDS #00-005-0418, señalado con círculos azules. Este resultado refleja el estado inicial del sistema tras la síntesis, donde el compuesto objetivo ya se ha formado, pero coexiste con subproductos generados de manera esperable durante el

proceso. Posteriormente, tras la aplicación del primer lavado (Figura 8, c)), las señales asociadas al NaCl desaparecen completamente debido a la disociación de los cristales en sus iones Na^+ y Cl^- por su interacción con el agua. No obstante, en esta etapa aún se detectan señales de SrCO_3 , lo que pone de manifiesto la necesidad de un tratamiento adicional para su remoción. Finalmente, después del segundo lavado en medio ácido diluido (Figura 8, d)), el difractograma resultante exhibe

exclusivamente los picos característicos del SrTiO_3 , sin evidencia de fases secundarias. La desaparición total de las señales asociadas al SrCO_3 confirma la efectividad del tratamiento ácido para eliminar esta impureza, dando lugar al material cristalino deseado. El tamaño de cristalito obtenido para el SrTiO_3 obtenido fue de aproximadamente 31.2 nm. En la tabla 1 se muestra el cálculo del tamaño promedio de cristalito realizado para cada ángulo.

Tabla 1. Cálculo de tamaño de cristalito promedio

| SrTiO₃ | | | |
|--------------------------|-----------------|--------------------|----------------------|
| 2θ / ° | FWHM / ° | Tamaño / nm | Promedio / nm |
| 32.96 | 0.23 | 36.04 | 31.2 ± 3.3 |
| 39.94 | 0.25 | 34.11 | |
| 46.46 | 0.26 | 32.76 | |
| 57.77 | 0.31 | 29.09 | |
| 67.79 | 0.34 | 28.02 | |

3.2. SEM

En las figuras 9 a) y b) se muestran micrografías SEM obtenidas con una magnificación de 50,000x, correspondientes a las muestras antes y después de los lavados, respectivamente. En la Figura 9 a) se observa la morfología típica del SrTiO_3 , caracterizada por partículas de forma cúbica (indicadas con flechas azules). No obstante, también se identifican estructuras alargadas y regiones compactas sin morfología definida que no

corresponden a la morfología esperada del SrTiO_3 (flecha roja). Tras la aplicación de los lavados, la micrografía mostrada en la figura 9 b) permite observar con mayor claridad partículas de SrTiO_3 con morfología cúbica bien definida y una distribución de tamaños heterogénea, con un tamaño promedio aproximado de 80 nm. En esta etapa, se evidencia la desaparición total de las estructuras alargadas y de las pequeñas regiones rugosas observadas previamente en la Figura 9 a).

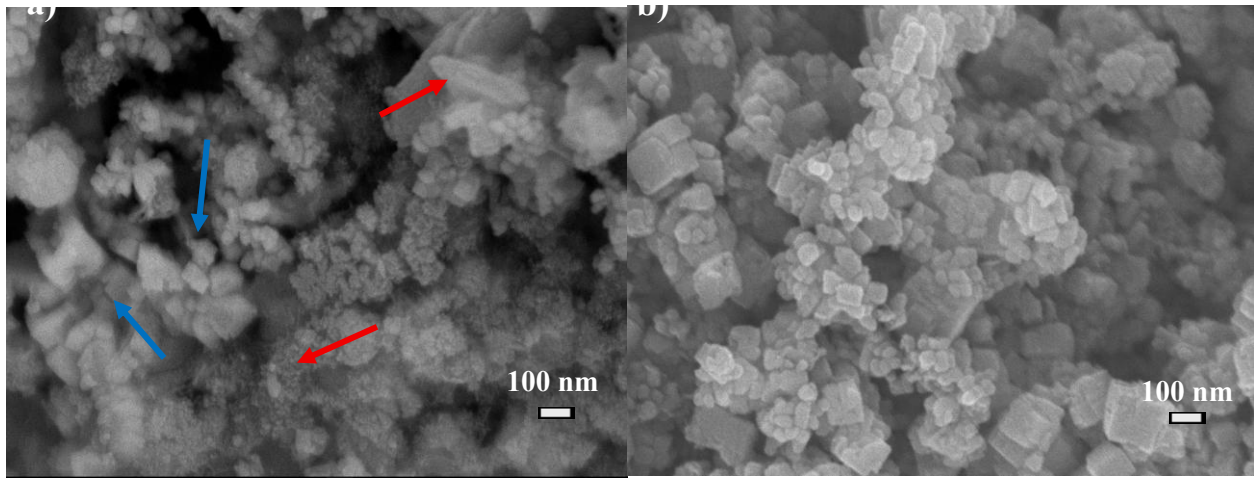


Figura 9. Imágenes de SEM obtenidas de muestras de SrTiO₃ con y sin tratamientos de lavado, a) y b), respectivamente.

3.3. EDS

La tabla 2 muestra el análisis elemental puntual obtenido sobre la región señalada con la flecha roja sobre una estructura alargada en una zona de la muestra previa a los tratamientos de lavado (figura 10). Se revela una composición dominada por sodio y cloro, con una relación atómica consistente con la formación de NaCl (Tabla 2). La señal correspondiente a estroncio resulta mínima, lo que descarta que dichas

estructuras correspondan al SrTiO₃. Asimismo, el bajo contenido relativo de oxígeno es característico de una fase correspondiente a una sal y no de un óxido metálico. Estos resultados confirman que estas morfologías observadas se asocian a residuos de NaCl generados durante la síntesis, confirmando la presencia de NaCl en la muestra previa a los lavados en concordancia con la estequiometría esperada del sistema químico y consistente con los datos obtenidos por DRX (figura 9, b)).

Tabla 2. Análisis elemental obtenido sobre la muestra de SrTiO₃ previa a los lavados.

| Elemento | Porcentaje atómico / % |
|----------|------------------------|
| C | 29.81 |
| O | 6.20 |
| Na | 20.94 |
| Al | 0.52 |
| Cl | 42.19 |
| Sr | 0.34 |

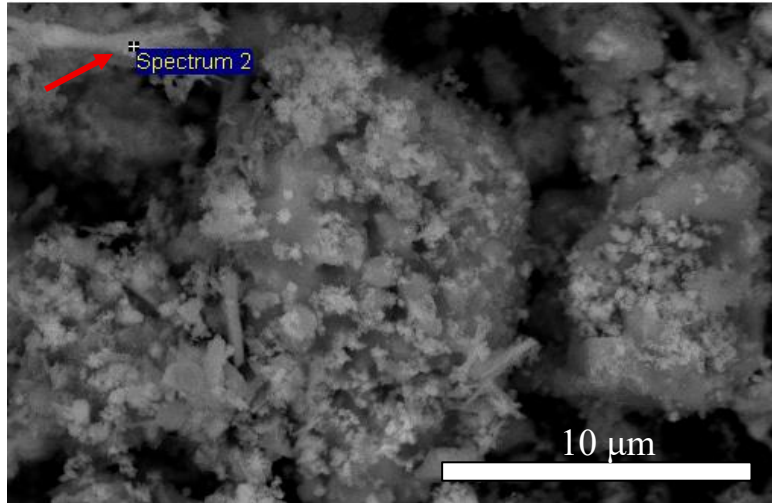


Figura 10. Análisis elemental puntual (flecha roja) sobre una muestra de SrTiO₃ previo a tratamientos de lavado.

La figura 11 muestra la zona en la cual se realizó el mapeo elemental por EDS sobre una muestra de SrTiO₃ posterior a los tratamientos de lavado. El mapeo se muestra el oxígeno en color verde, el estroncio en azul y el titanio en rojo, lo que permite visualizar su distribución espacial dentro de la región analizada. Esta distribución homogénea de Sr, Ti y O respalda la formación de SrTiO₃ con una composición consistente.

La tabla 3 muestra el análisis elemental obtenido sobre el mapeo realizado en la figura 11. Se observa la presencia predominante de estroncio, titanio y oxígeno. La relación atómica entre Sr y Ti se mantiene cercana a la unidad, en concordancia con la estequiometría esperada del SrTiO₃. La abundante señal de oxígeno es coherente con la naturaleza oxidada

del material y respalda la formación del óxido mixto. En particular, es bien conocido que el EDS puede sobreestimar el contenido de oxígeno cuando existen señales intensas de carbono y efectos de matriz, por lo que estos valores deben interpretarse principalmente de manera cualitativa. No se detectaron trazas de sodio y cloro, lo que indica que el NaCl residual fue eliminado de manera efectiva. Se observaron además señales elevadas de carbono, fenómeno común en este tipo de mediciones debido a contribuciones superficiales y a limitaciones propias de la técnica. La identificación del SrCO₃ mediante SEM y EDS no resulta concluyente debido a limitaciones inherentes de la técnica para la detección y cuantificación del carbono. Por esta razón, la presencia y eliminación del SrCO₃ se evaluó principalmente a través de los resultados de difracción de rayos X.

Tabla 3. Análisis elemental obtenido sobre la muestra de SrTiO₃ después de los lavados.

| Elemento | Porcentaje atómico / % |
|----------|------------------------|
| C | 43.20 |
| O | 43.43 |
| Al | 1.33 |
| Ti | 5.35 |
| Sr | 5.13 |
| Cu | 1.56 |

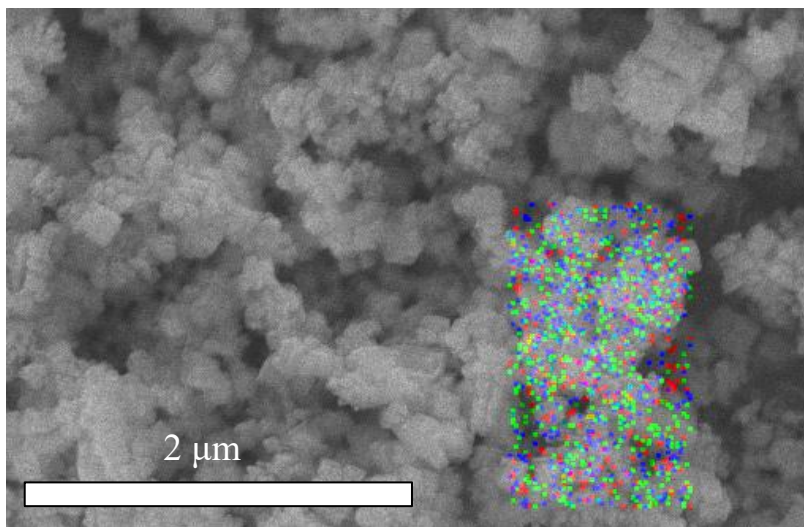


Figura 11. Mapeo elemental (mapeo) sobre una muestra de SrTiO₃ posterior a los tratamientos de lavado.

En el análisis realizado también se detectaron señales débiles correspondientes al aluminio y cobre. La presencia de estos elementos en concentraciones mínimas es un fenómeno habitual en análisis por microscopía electrónica y generalmente no se asocia a la composición real de la muestra. Estas señales pueden originarse a partir del porta muestras, componentes metálicos de la cámara del microscopio o interacciones secundarias de los electrones con el entorno instrumental. Debido a su baja intensidad y a su aparición esporádica, dichas contribuciones se consideran artefactos experimentales sin relevancia química para el sistema SrTiO₃.

4. Conclusiones

En este trabajo se desarrolló una estrategia para la síntesis directa de SrTiO₃ mediante la combinación del método sol-gel y un tratamiento hidrotérmal empleando TiO₂ amorfo e hidratado como intermediario reactivo, evitando el uso de anatasa comercial o de etapas previas de síntesis de TiO₂. La síntesis realizada presenta ventajas desde el punto de vista económico y energético al disminuir costos, reducir el número de etapas del proceso y el consumo energético asociado. De esta manera, la estrategia propuesta representa una alternativa práctica, eficiente y sustentable para la síntesis de SrTiO₃.

El material obtenido presentó estructura perovskita confirmada por difracción de rayos

X, con un tamaño promedio de cristalito de 31.2 nm. El análisis por microscopía electrónica de barrido evidenció una morfología cúbica con un tamaño de partícula promedio de aproximadamente 80 nm. Asimismo, el análisis elemental reveló que, tras los lavados selectivos, el material obtenido presenta una composición predominante de estroncio, titanio y oxígeno, con una relación atómica Sr:Ti cercana a la unidad, en concordancia con la estequiometría esperada del SrTiO₃.

La fase cristalina y el tamaño de partícula obtenido sugiere gran potencial para ser utilizado como material semiconductor en aplicaciones de generación de energía. Además, La obtención de SrTiO₃ libre de impurezas es un aspecto particularmente relevante, ya que la presencia de fases secundarias puede afectar de manera significativa las propiedades electrónicas y ópticas del material. No obstante, se requieren estudios adicionales de sus propiedades funcionales para confirmar su desempeño en este tipo de aplicaciones.

Como perspectiva futura, resulta de gran interés explorar de manera sistemática la influencia del tiempo de tratamiento hidrotermal sobre el grado de cristalinidad, la morfología y el tamaño de partícula del SrTiO₃.

Asimismo, la variación controlada de la relación estequiométrica entre los precursores de estroncio y titanio podría aportar información relevante sobre la formación de fases, defectos estructurales y posibles modificaciones en las propiedades del material. Estos estudios permitirían ampliar la comprensión del sistema y optimizar aún más las características del SrTiO₃ con miras a su posible aplicación en procesos de conversión de energía.

5. Reconocimientos

El autor R. Avilés-Betanzos agradece al SECIHTI por la estancia postdoctoral 2024 (1). El autor L.G. Daza agradece a SECIHTI por la estancia postdoctoral 2022 (2) bajo la convocatoria Estancias Postdoctorales en México para la Formación y Consolidación de Investigadores en México. Los autores agradecen a la Dra. Patricia Quintana por el apoyo en las caracterizaciones realizadas en el Laboratorio Nacional de Nano y Biomateriales (LANNBIO), Depto. de Física Aplicada, Cinvestav-Unidad Mérida. Se agradece al M.C. Daniel Aguilar por la obtención y el análisis de los difractogramas, al M.C. Mario Herrera, Ing. Oswaldo Gómez por labores de mantenimiento correctivo del difractómetro y a la I.S.C. Georgina Espinoza por mantenimiento correctivo de la PC de análisis.

Referencias

- Abdel-Hady, N. A., Badawy, M. I., Attia, M. S., & Gad-Allah, T. A. (2024). Magnetic self-doped TiO_{2-x}/Fe₃O₄@g-C solar-driven photocatalytic composite for water decontamination. *RSC Advances*, *14*, 33666–33680. <https://doi.org/10.1039/d4ra05990e>
- Abdullahi, I. M., Haruna, A., Zango, Z. U., Usman, A., Aljunid Merican, Z. M., Abdulkadir, I., Ekeoma, B. C., & Saleh, T. A. (2025). Advances in perovskite nanomaterials: Synthesis and catalytic applications in energy and environmental remediation. *International Journal of Hydrogen Energy*, *130*, 560–594. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.04.112>

- Atkinson, I., Parvulescu, V., Cusu, J. P., Anghel, E. M., Voicescu, M., Culita, D., Somacescu, S., Munteanu, C., Šćepanović, M., Popovic, Z. V., & Fruth, V. (2019). Influence of preparation method and nitrogen (N) doping on properties and photocatalytic activity of mesoporous SrTiO₃. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 368, 41–51. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2018.09.019>
- Bokhimi, X., Morales, A., Aguilar, M., Antonio-Toledo, J.A., Pedraza, F. (2001) Local order in titania polymorphs. *International Journal of Hydrogen Energy*, 26, 1279-1287. [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(01\)00063-5](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(01)00063-5).
- Canu, G., & Buscaglia, V. (2017). Hydrothermal synthesis of strontium titanate: Thermodynamic considerations, morphology control and crystallisation mechanisms. *CrystEngComm*, 19, 3867–3891. <https://doi.org/10.1039/c7ce00834a>
- Chen, K. (2024). Research progress on synthesis of nano strontium titanate for photocatalytic applications. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Nano Sciences, Chemical and Biological Materials (NSCBM 2024)* (Vol. 4, pp. 144–150). <https://doi.org/10.62051/nrb7zq72>
- Dar, M. A., Majid, S. R., Satgunam, M., Siva, C., Ansari, S., Arusalan, P., & Rafi Ahamed, S. (2024). Advancements in supercapacitor electrodes and perspectives for future energy storage technologies. *International Journal of Hydrogen Energy*, 70, 10–28. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.05.191>
- De Oliveira, A. L. M., Silva, M. R. S., Sales, H., Longo, E., Maia, A. S., Souza, A. G., & Santos, I. M. G. (2013). Effect of the composition on the thermal behaviour of the SrSn_{1-x}Ti_xO₃ precursor prepared by the polymeric precursor method. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 114, 565–572. <https://doi.org/10.1007/s10973-013-3051-1>
- Devi, N. Y., Rajasekaran, P., Vijayakumar, K., Alagar Nedunchezian, A. S., Sidharth, D., Anbalagan, G., Arivanandhan, M., & Jayavel, R. (2020). Enhancement of thermoelectric power factor of hydrothermally synthesised SrTiO₃ nanostructures. *Materials Research Express*, 7, 015094. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab6c96>
- Din, U. K. N., Aziz, T. H. T., Salleh, M. M., & Umar, A. A. (2016). Synthesis of crystalline perovskite-structured SrTiO₃ nanoparticles using an alkali hydrothermal process. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 23, 109–115. <https://doi.org/10.1007/s12613-016-1217-0>
- Voon, C. H., Foo, K. L., Lim, B. Y., Gopinath S.C.B., & Al-Douri, Y. (2020). Synthesis and preparation of metal oxide powders. En “Metal Oxide Powder Technologies: Fundamentals, Processing Methods and Applications”, Chapter 3. Al-Douri Y. (ed.), 31–65. Elsevier, Amsterdam, Holanda. <https://doi.org/10.1016/C2018-0-02252-5>
- Gao, H., Yang, H., & Wang, S. (2018). Hydrothermal synthesis, growth mechanism, optical properties and photocatalytic activity of cubic SrTiO₃ particles for the degradation of cationic and anionic dyes. *Optik*, 175, 237–249. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2018.09.027>

- González, L. A., Cano-Valencia, M. J., & Vento-Lujano, E. (2024). Visible-light photocatalytic performance of SrTiO₃ nanoparticles modified with cobalt. *Optical Materials*, 157, 116231. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2024.116231>
- Grabowska, E. (2016). Selected perovskite oxides: Characterization, preparation and photocatalytic properties—A review. *Applied Catalysis B: Environmental*, 186, 97–126. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2015.12.035>
- Grabowska, E., Marchelek, M., Klimczuk, T., Lisowski, W., & Zaleska-Medynska, A. (2017). TiO₂/SrTiO₃ and SrTiO₃ microspheres decorated with Rh, Ru or Pt nanoparticles: Highly UV–vis responsible photoactivity and mechanism. *Journal of Catalysis*, 350, 159–173. <https://doi.org/10.1016/j.jcat.2017.04.005>
- Gupta, S., & Katiyar, R. S. (2001). Temperature-dependent structural characterization of sol–gel deposited strontium titanate (SrTiO₃) thin films using Raman spectroscopy. *Journal of Raman Spectroscopy*, 32, 885–891. <https://doi.org/10.1002/jrs.752>
- He, P., Cheng, H. R., Le, Y., & Chen, J. F. (2008). Preparation and characterization of nano-sized Sr_{0.7}Ca_{0.3}TiO₃ crystallines by low temperature aqueous synthesis method. *Materials Letters*, 62, 2157–2160. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2007.11.040>
- Huamán, J. L. C., Sezancoski, J. C., Marega, E., Jr., & Pinto, A. H. (2023). Methods for the synthesis of ceramic materials with perovskite structure, Chapter 2. En “Perovskite Ceramics: Recent Advances and Emerging Applications”, Huamán J. L. C., Garcia Rivera V. A. (eds.), 31-75. Elsevier, Amsterdam, Holanda.
- Jiang, J., Kato, K., Fujimori, H., Yamakata, A., & Sakata, Y. (2020). Investigation on the highly active SrTiO₃ photocatalyst toward overall H₂O splitting by doping Na ion. *Journal of Catalysis*, 390, 81–89. <https://doi.org/10.1016/j.jcat.2020.07.025>
- Kuspanov, Z., Umirzakov, A., Serik, A., Baimenov, A., Yeleuov, M., & Daulbayev, C. (2023). Multifunctional strontium titanate perovskite-based composite photocatalysts for energy conversion and other applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48, 38634–38654. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.06.168>
- Lai, C.-L., Huang, H.-L., Shen, J.-H., Wang, K.-K., & Gan, D. (2015). The formation of anatase TiO₂ from TiO nanocrystals in sol-gel process. *Ceramics International*. 41, 5041-5048. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.12.072>
- Lazzeri, M., Vittadini, A., & Selloni, A. (2001). Structure and energetics of stoichiometric TiO₂ anatase surfaces. *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*. 63, 155409. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.63.155409>
- Lee, S., Jun, Y., Kim, K.-J., & Kim, D. (2001). Modification of electrodes in nanocrystalline dye-sensitized TiO₂ solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 65, 193-200. [https://doi.org/10.1016/S0927-0248\(00\)00095-7](https://doi.org/10.1016/S0927-0248(00)00095-7)
- Leite, M. M., & Vichi, F. M. (2013). Influence of synthesis route on the morphology of SrTiO₃ particles. *MRS Online Proceedings Library*, 1552, 51–57. <https://doi.org/10.1557/opl.2013.967>

- Mahmood, M., Islam, M. T., Sadek, M. S., Noor, K., Baharuddin, M. H. B., Ibrahim, M., Sheikh, G. U. A., Ibrahim, M. A., Soliman, M. S., & Sobayel, K. (2024). Advancing perovskite solar cells: Unveiling the superior efficiency of copper-doped strontium titanate as a novel ETL. *Solar Energy*, 279, 112806. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.112806>
- Mojed, S. A., Ashiri, R., & Shafyei, A. (2023). A mechanistic study on efficient room temperature sonocolloidal obtainment of SrTiO₃ nanocrystals. *Ultrasonics Sonochemistry*, 99, 106568. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2023.106568>
- Moreira, M. L., Longo, V. M., Avansi, W., Jr., Ferrer, M. M., Andrés, J., Mastelaro, V. R., Varela, J. A., & Longo, É. (2012). Quantum mechanics insight into the microwave nucleation of SrTiO₃ nanospheres. *The Journal of Physical Chemistry C*, 116, 24792–24808. <https://doi.org/10.1021/jp306638r>
- Naeem, U., Li, H., Alshoaibi, A., Wang, D., Theerthagiri, J., Choi, M. Y., Kheawhom, S., & Mohamad, A. A. (2025). Synthesis of SrTiO₃ perovskite structure for batteries, supercapacitors and fuel cells applications: A review. *Inorganic Chemistry Communications*, 182, 115293. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2025.115293>
- Peczak, S. I. L., Kennedy, R. M., Simpson, A. M., Delferro, M., & Poepelmeier, K. R. (2023). Microwave-assisted synthesis of SrTiO₃ nanocuboids without TiCl₄. *Small Science*, 3, 202200107. <https://doi.org/10.1002/smsc.202200107>
- Peng, K., Yu, S., Luo, Y., Zhang, A., Xie, Y., Luo, Y., Ling, Y., & Zhao, J. (2024). Enhancement of TiO₂ photocatalytic hydrogen production via using ABO₃ to construct heterojunctions. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 682, 132822. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2023.132822>
- Phoon, B. L., Lai, C. W., Juan, J. C., Show, P. L., & Chen, W. H. (2019). A review of synthesis and morphology of SrTiO₃ for energy and other applications. *International Journal of Energy Research*, 43, 5151–5174. <https://doi.org/10.1002/er.4505>
- Putri, Y. E., Wendari, T. P., Rahmah, A. A., Refinel, Said, S. M., Sofyan, N., & Wellia, D. V. (2022). Tuning the morphology of SrTiO₃ nanocubes and their enhanced electrical conductivity. *Ceramics International*, 48, 5321–5326. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.11.075>
- Rafatmah, E., & Hemmateenejad, B. (2023). Metal nanoparticles for sensing applications. En A. Barhoum & Z. Altintas (Eds.), *Fundamentals of Sensor Technology: Principles and Novel Designs* (pp. 311–366). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2020-0-03445-6>
- Rahman, M. Y. A., Samsuri, S. A. M., & Umar, A. A. (2019). TiO₂–SrTiO₃ composite photoanode: Effect of strontium precursor concentration on the performance of dye-sensitized solar cells. *Applied Physics A*, 125. <https://doi.org/10.1007/s00339-018-2344-4>.
- Schneider, C., Rasband, W., & Eliceiri, K. (2012). NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. *Nature Methods*, 9, 671–675. <https://doi.org/10.1038/nmeth.2089>

- Siebenhofer, M., Viernstein, A., Morgenbesser, M., Fleig, J., & Kubicek, M. (2021). Photoinduced electronic and ionic effects in strontium titanate. *Materials Advances*, 2, 7583–7619. <https://doi.org/10.1039/d1ma00906k>
- Singh, R., & Dutta, S. (2018). A review on H₂ production through photocatalytic reactions using TiO₂/TiO₂-assisted catalysts. *Fuel*, 220, 607–620. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.02.068>
- Teixeira da Fonseca, S. B., D’Elia, E., Siqueira Júnior, J. M., Massafra de Oliveira, S., Leite dos Santos Castro, K., & Schwingel Ribeiro, E. (2021). Study of the characteristics and properties of the SiO₂/TiO₂/Nb₂O₅ material obtained by the sol–gel process. *Scientific Reports*, 11, 1106. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-80310-4>
- Valdés Hernández, J. (2023). “Catálisis fotoplasmónica para la reducción de CO₂”. Tesis de doctorado. Universidad Autónoma de Querétaro, Santiago de Querétaro, México.
- You, Y.F., Xu, C.H., Xu, S.S., Cao, S., Wang, J.P., Huang, Y.B., & Shi, S.Q. (2014). Structural characterization and optical property of TiO₂ powders prepared by the sol-gel method. *Ceramics International*, 40, 8659-8666. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.01.083>
- Youssef, A. M., Farag, H. K., El-Kheshen, A., & Hammad, F. F. (2018). Synthesis of nano-structured strontium titanate by sol–gel and solid state routes. *Silicon*, 10, 1225–1230. <https://doi.org/10.1007/s12633-017-9596-z>
- Zarkov, A. (2024). Sol–gel technology applied to materials science: Synthesis, characterization and applications. *Materials*, 17, 462. <https://doi.org/10.3390/ma17020462>
- Zhang, Y., Zhong, L., & Duan, D. (2015). Single-step hydrothermal synthesis of strontium titanate nanoparticles from crystalline anatase titanium dioxide. *Ceramics International*, 41, 13516–13524. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.07.145>
- Zheng, H., Liu, X., Meng, G., & Toft Sørensen, O. (2001). Fine SrTiO₃ and Sr(Mg_{0.4}Ti_{0.6})O_{3-δ} perovskite ceramic powders prepared by a sol–precipitation process. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 12, 629–635. <https://doi.org/10.1023/A:1012841816099>
- Živojinović, J., Pavlović, V. P., Kosanović, D., Marković, S., Krstić, J., Blagojević, V. A., & Pavlović, V. B. (2017). The influence of mechanical activation on structural evolution of nanocrystalline SrTiO₃ powders. *Journal of Alloys and Compounds*, 695, 863–870. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.10.159>
- Zlobin, V., Nevedomskiy, V., Tomkovich, M., Ugolkov, V., & Almjasheva, O. (2024). Influence of heterogeneous inclusions on the process of formation, structural transformations, and growth of TiO₂ nanocrystals. *Nano-Structures & Nano-Objects*, 37, 101076. <https://doi.org/10.1016/j.nanoso.2023.101076>