



Ciencia Latina
Internacional

Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), mayo-junio 2024,
Volumen 8, Número 3.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i3

ESTUDIO DE LA SÍNTESIS DE TITANATO DE CALCIO Y MAGNESIO A PARTIR DE MINERAL DE DOLOMITA

**STUDY OF THE SYNTHESIS OF CALCIUM TITANATE AND
MAGNESIUM TITANATE FROM DOLOMITE ORE**

Ma. Gloria Rosales Sosa

Universidad Autónoma de Coahuila, México

Manuel García Yregoi

Universidad Autónoma de Coahuila, México

Claudia Verónica Reyes Guzman

Universidad Autónoma de Coahuila, México

Blanca Idalia Rosales Sosa

Universidad Autónoma de Coahuila, México

Gema Trinidad Ramos Escobedo

Universidad Autónoma de Coahuila, México

Yadira Marlen Rangel Hernández

Universidad Autónoma de Coahuila, México

Eber Manuel García Rosales

Universidad Autónoma de Coahuila, México

DOI: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i3.11642

Estudio de la Síntesis de Titanato de Calcio y Magnesio a Partir de Mineral de Dolomita

Ma. Gloria Rosales Sosa¹mroslaes@uadec.edu.mx<https://orcid.org/0000-0002-6654-3433>Universidad Autónoma de Coahuila
México**Manuel García Yregoi**manuel_garcia@uadec.edu.mx<https://orcid.org/0000-0002-8710-6750>Universidad Autónoma de Coahuila
México**Claudia Verónica Reyes Guzman**claudia_reyes_guzmán@uadec.edu.mx<https://orcid.org/0000-0001-5470-0510>Universidad Autónoma de Coahuila
México**Blanca Idalia Rosales Sosa**blancarosales@uadec.edu.mx<https://orcid.org/0000-0002-2114-7779>Universidad Autónoma de Coahuila
México**Gema Trinidad Ramos Escobedo**Gema_ramosa@uadec.edu.mx<https://orcid.org/0000-0002-6654-3433>Universidad Autónoma de Coahuila
México**Yadira Marlen Rangel Hernández**yarangelh@uadec.edu.mx<https://orcid.org/0000-0002-6654-3433>Universidad Autónoma de Coahuila
México**Eber Manuel García Rosales**ebergarcia@uadec.edu.mx<https://orcid.org/0000-0002-0945-6595>Universidad Autónoma de Coahuila
México

RESUMEN

Muestras de mineral de dolomita lavada con HCl al 8% y sin lavar, se mezclaron con óxido de titanio grado reactivo (TiO_2 , 99.78%) en cantidades estequiométricas y fueron puestas a reaccionar en un horno a una temperatura de 1150 °C con tiempos de permanencia de 8, 12 y 24 horas. El análisis químico de la dolomita se realizó con un equipo de fluorescencia de rayos x. Se hizo un estudio termodinámico para evaluar la factibilidad de obtener titanato de calcio y titanato magnesio. Los polvos obtenidos de la reacción de calcinación se caracterizaron empleando difracción de rayos x (DRX). El compuesto de titanato de calcio se formó con la dolomita lavada desde 8 horas de tratamiento, este presenta una estructura ortorrómbica. El titanato de magnesio es la fase predominante en las muestras de la dolomita sin lavar con un tratamiento de 12 horas de permanencia.

Palabras clave: dolomita, titanato, calcio, magnesio, perovskita

¹ Autor principal

Correspondencia: mroslaes@uadec.edu.mx

Study of the Synthesis of Calcium Titanate and Magnesium Titanate from Dolomite Ore

ABSTRACT

Samples of dolomite ore washed with 8% HCl and unwashed, were mixed with reagent grade titanium oxide (TiO₂, 99.78%) in stoichiometric amounts and were put to react in an oven at a temperature of 1150 °C with residence times of 8, 12 and 24 hours. The chemical analysis of dolomite was carried out with an x-ray fluorescence equipment. A thermodynamic study was carried out to evaluate the feasibility of obtaining calcium titanate and magnesium titanate. The powders obtained from the calcination reaction were characterized using X-ray diffraction (XRD). The calcium titanate compound was formed with the washed dolomite from 8 hours of treatment, it presents an orthorhombic structure. The magnesium titanate is the predominant phase in the samples of the unwashed dolomite with a treatment of 12 hours of permanence.

Keywords- dolomite, titanate, calcium, magnesium, perovskite

Artículo recibido 20 abril 2024

Aceptado para publicación: 28 mayo 2024

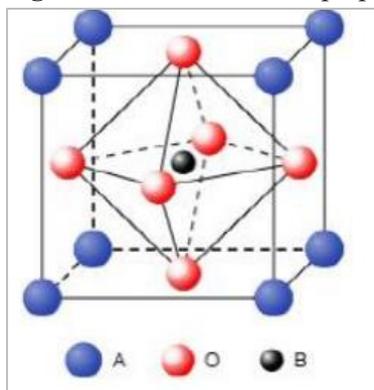


INTRODUCCIÓN

El mineral de dolomita es un carbonato doble de calcio y magnesio. Es un importante mineral formador de rocas, abundante en todo el mundo y con numerosos usos comerciales, (John W, 2003).

Los materiales cerámicos con estructura de tipo perovskita comprenden un gran número de compuestos químicos de gran importancia. El titanato de calcio, con fórmula química CaTiO_3 , es un material semiconductor que presenta una estructura tipo perovskita, la cual consiste en una estructura cúbica donde los átomos de calcio se sitúan en las esquinas de la misma, el átomo de titanio se ubica en el centro del cubo y los átomos de oxígeno están colocados en el centro de cada una de las 6 caras, de manera que se forman octaedros del tipo TiO_6 , como se muestra en el esquema de la Figura 1, (Lozano, 2013). El CaTiO_3 en su forma natural (mineral), puede encontrarse en la naturaleza, fue descubierto en Rusia en 1839 por el mineralogista y químico alemán Gustav Rose, y recibió su nombre en honor al mineralogista ruso Lev A. Perovski. A raíz de su nombramiento, se dio origen a un grupo de cristales que se identificaron como “perovskitas”, pero que hace referencia a materiales que poseen la misma estructura que el CaTiO_3 previamente descrita, y cuya fórmula química básica sigue el patrón ABO_3 , donde A y B son cationes de diferentes tamaños y O son aniones no metálicos, generalmente oxígeno.

Figura 1. Estructura del tipo perovskita



Lozano, 2013

Los perovskitas pertenecen a una importante categoría de compuestos con una amplia variedad de características útiles para aplicaciones científicas y tecnológicas. Los óxidos tienen la fórmula general ABO_3 , en la que 12 iones de oxígeno rodean al catión mayor A, y el catión menor B está coordinado por un anión octaedro. El CaTiO_3 muestra una estructura ortorrómbica por debajo de $1107\text{ }^\circ\text{C}$. A temperaturas entre $1107\text{ }^\circ\text{C}$ y $1227\text{ }^\circ\text{C}$ se produce una transición de fase y la estructura ortorrómbica se

convierte en una estructura "tetragonal". Por encima de 1307 °C, este material muestra una estructura "cúbica" (Samah K. et al., 2021).

El titanato de magnesio $MgTiO_3$ es un perovskita con estructura cristalina de ilmenita, se utiliza principalmente en dispositivos electrónicos, su alta constante dieléctrica le permite alta capacidad en un tamaño físico pequeño. También se usa en materiales cerámicos, y podría tener aplicaciones en la remediación ambiental y aplicaciones biomédicas. Las propiedades de estos materiales cerámicos dependen de la composición, la microestructura, las impurezas y las vías de procesamiento (Filipović S. et al., 2024).

El $MgTiO_3$, también llamado geikielite, se forma por encima de 600 °C y es estable en el intervalo que va desde la temperatura ambiente hasta su punto de fusión. El Mg_2TiO_4 (cúbico de tipo espinela inversa) se forma a temperaturas superiores a 1150 °C y sufre una transición de fase en el proceso de enfriamiento a ~ 1000 °C a una modificación tetragonal, (Filipović S. et al., 2013).

Los titanatos (perovskitas) tienen muy diversas aplicaciones, pero las más destacadas en los últimos años son las siguientes: Celdas solares de perovskita que producen hidrógeno a partir de agua: Los investigadores del Instituto Federal Suizo de Tecnología (ETH) han desarrollado un nuevo y eficiente proceso para "dividir" el agua en hidrógeno y oxígeno mediante la energía solar. El método utiliza celdas fotovoltaicas perovskita mineral y al utilizar energía solar (absorción de luz), puede representar una reducción en los costes comparándolo con las celdas de silicio. Paneles solares: Un grupo de investigadores de la Universidad de Sheffield (Reino Unido), ha creado una pintura en spray que puede convertir una superficie cualquiera en un panel de energía solar. Gracias al mineral perovskita. Piezoeléctricos: pueden convertir débiles señales de presión en señales eléctricas y viceversa.

METODOLOGÍA

En el desarrollo experimental de este trabajo se utilizó cristalería grado A (material volumétrico) y estándar de laboratorio. Todas las pruebas se realizaron utilizando agua destilada en la preparación de las soluciones. El reactivo utilizado fue óxido de titanio (TiO_2) marca fermont con una pureza del 99 %. también se usó ácido clorhídrico (HCl) de la marca Analytyka e hidróxido de amonio NH_4OH marca Fagalab. El mineral de dolomita ($CaMg(CO_3)_2$) tiene pureza del 66.99 %.

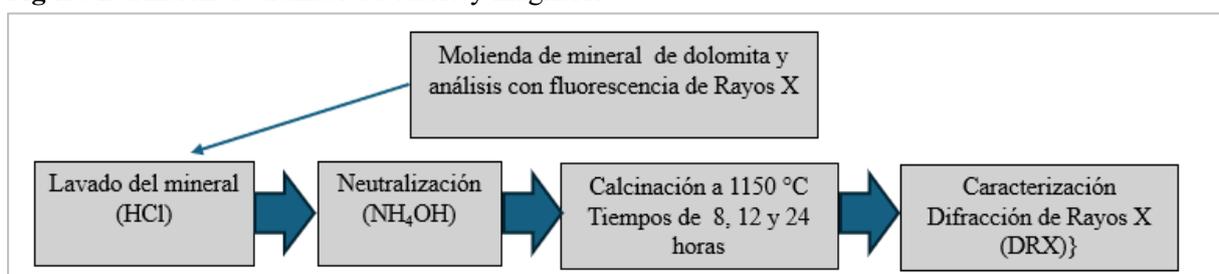
El análisis químico de la dolomita se realizó en un equipo de fluorescencia de rayos x marca Panalytical modelo Epsilon 1. Una vez preparados y homogenizados nuestros materiales se llevaron a una etapa de calcinación a 1150°C por diferentes tiempos, como se describe en la Tabla 1.

Tabla 1. Diseño de experimentos

Experimento	Dolomita más TiO ₂	Tiempo (horas)
A	Dolomita lavada con HCl al 8%	8, 12, 24
B	Dolomita sin lavar	8, 12, 24

Para llevar a cabo el proceso de fabricación de los titanatos, se realiza un proceso relativamente sencillo como en el que se muestra en la Figura 2.

Figura 2. Síntesis de titanato de calcio y magnesio



Estudio termodinámico

Para conocer el valor de las diferentes variables termodinámicas, se hizo un estudio utilizando software HSC CHEMISTRY VERSION 5.1, el cual fue muy útil para determinar las variables del proceso de síntesis de titanato de calcio y magnesio.

Reacción en estado sólido convencional (Calcinación)

El mineral de dolomita primeramente fue molido hasta un tamaño de 270 mallas y analizada con fluorescencia de rayo x para conocer su composición química. Posteriormente una parte de la dolomita se lavó con ácido clorhídrico al 8% para eliminar impurezas y se neutralizó con hidróxido de amonio, se lavó, se filtró y se dejó secar.

Otra parte de dolomita se manejó sin lavar y se llevó a reacción directamente de la molienda. Una vez preparados y homogenizados los materiales, se introdujeron al horno para llevar a cabo la reacción de síntesis por calcinación en estado sólido, a una temperatura de 1150°C por tiempos de 8, 12 y 24 horas. Esto se efectuó en un horno - mufla marca Felisa con capacidad de 1300 °C. Después, los productos obtenidos fueron caracterizados por difracción de rayos x (DRX).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis químico de la dolomita, efectuado con el equipo de fluorescencia, dio los siguientes resultados CaO 66.99%, MgO 30.30%, Fe₂O₃ 1.03%, SiO₂ 0.68%, Cl 0.46%, Al₂O₃ 0.39%. En la Tabla 2, se muestran los datos de entalpía, entropía, energía libre y constante de equilibrio para la reacción de carbonato de calcio con dióxido de titanio. Para la obtención de estos datos se utilizó el software HSC CHEMISTRY VERSION 5.1.

Se puede observar que la energía libre de la reacción empieza a ser negativa a partir de 400 °C y a medida que aumenta la temperatura sus valores van disminuyendo, de tal manera que, a 1200 °C, la energía libre muestra el valor más pequeño de la Tabla, es decir de -32.018 Kcal.

Tabla 2. Datos termodinámicos del titanato de calcio $\text{CaCO}_3 + \text{TiO}_2 \rightarrow \text{CaTiO}_3 + \text{CO}_2$

T °C	$\Delta H(\text{Kcal})$	$\Delta S (\text{Cal/K})$	$\Delta G(\text{Kcal})$	k
100	23.081	39.202	8.453	1.119E-005
200	22.845	38.645	4.561	7.820E-003
300	22.575	38.126	0.723	5.302E-001
400	22.288	37.665	-3.066	9.901E+000
500	21.989	37.251	-6.812	8.428E+001
600	21.675	36.870	-10.518	4.294E+002
700	21.341	36.508	-14.187	1.536E+003
800	20.981	36.156	-17.820	4.259E+003
900	20.591	35.809	-21.418	9.781E+003
1000	20.208	35.495	-24.983	1.945E+004
1100	19.781	35.173	-28.516	3.460E+004
1150	19.551	35.008	-30.271	4.457E+004
1200	19.372	34.884	-32.018	5.629E+004

Esto quiere decir que, aunque la reacción es factible de realizarse desde 400 °C, para este rango de temperaturas, la reacción es más estable a 1200 °C, sin embargo, se eligió la temperatura de 1150 °C para no dañar el horno al llevarlo a su máxima capacidad. Esta fue la razón principal por la que en este trabajo se eligió esta temperatura para estudiar la síntesis de titanato de calcio y magnesio.

Los valores de la entalpía indican que es una reacción donde se absorbe calor y estos permanecen muy similares. Se observa que al aumentar la temperatura la entalpía va disminuyendo. La entropía varía

desde 39.202 kcal hasta 34.884 kcal a 1150 °C. También se puede ver que disminuye conforme aumenta la temperatura.

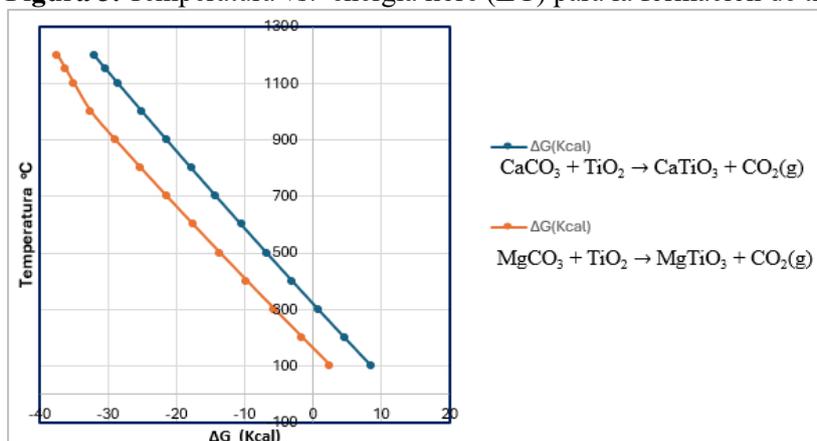
Por ser la dolomita un carbonato doble de calcio y magnesio, también se estudió termodinámicamente la reacción de síntesis de titanato de magnesio, el cual se puede apreciar en la Tabla 3. Se observa que el titanato de magnesio es estable desde la temperatura de 200°C, a diferencia del titanato de calcio el cual empieza a ser estable desde 400°C.

En todas las temperaturas planteadas, la energía libre para la formación de titanato de magnesio es menor (Figura 3).

Tabla 3. Datos termodinámicos del titanato de calcio $MgCO_3 + TiO_2 \rightarrow MgTiO_3 + CO_2(g)$

T °C	$\Delta H(Kcal)$	$\Delta S (Cal/K)$	$\Delta G(Kcal)$	k
100.000	17.785	41.143	2.433	3.758E-002
200.000	17.643	40.809	-1.665	5.878E+000
300.000	17.431	40.403	-5.726	1.527E+002
400.000	17.140	39.937	-9.744	1.458E+003
500.000	16.764	39.418	-13.712	7.522E+003
600.000	16.296	38.850	-17.626	2.583E+004
700.000	15.732	38.239	-21.481	6.676E+004
800.000	15.066	37.588	-25.272	1.403E+005
900.000	14.293	36.901	-28.997	2.526E+005
1000.000	-0.682	25.022	-32.538	3.855E+005
1100.000	-1.505	24.399	-35.008	3.736E+005
1150.000	-1.901	24.116	-36.221	3.655E+005
1200.000	-2.286	23.850	-37.420	3.564E+005

Figura 3. Temperatura vs. energía libre (ΔG) para la formación de titanato de calcio y magnesio



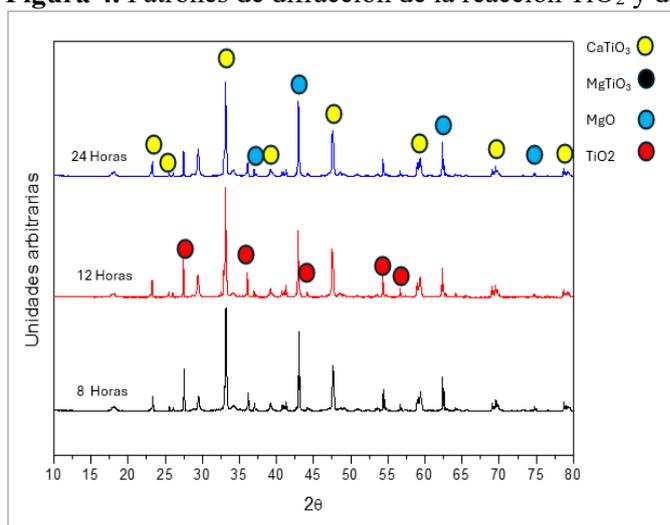
Por lo tanto se puede afirmar que si se tienen los dos carbonatos, el de calcio y el de magnesio, reaccionando con óxido de titanio, con las mismas condiciones de tiempos de permanencia y temperaturas de reacción, va a ocurrir más fácilmente la reacción para la formación de titanato de magnesio, debido a que su variable termodinámica de energía libre, en todas las temperaturas es menor que los valores de energía libre para la formación de titanato de calcio. Todo estado termodinámico es estable en las regiones de menor energía. La energía libre de Gibbs de estas reacciones de formación de titanatos representa un valor de la cantidad de energía que puede ser utilizada por dichos sistemas para poder realizar un trabajo. Esta energía brinda información necesaria para predecir la espontaneidad de las reacciones involucradas.

Análisis Cristalográfico

A continuación, se muestran los difractogramas de rayos x de compuestos obtenidos con las condiciones experimentales explicadas anteriormente, para la síntesis de titanato de calcio y titanato de magnesio. Las fases resultantes fueron identificadas utilizando software Match versión 1.10 .

En la Figura 4 se puede ver el patrón de difracción para la reacción del óxido de titanio con dolomita lavada con ácido clorhídrico (HCl al 8%), a la temperatura de 1150°C y un tiempo de permanencia de 8, 12 y 24 horas. El patrón que se presenta a 8 horas de reacción, es muy similar al de 12 y 24 horas, por lo que se determina que no hubo efecto del tiempo sobre esta reacción.

Figura 4. Patrones de difracción de la reacción TiO_2 y dolomita lavada a 1150°C, y 8, 12, 24 horas



La fase perovskita, titanato de calcio, tiene una estructura cristalina ortorrómbica con parámetros de red $a=5.3809 \text{ \AA}$, $b=5.4371 \text{ \AA}$ y $c=7.6421 \text{ \AA}$, según carta de entrada 96-901-3384 de software Match 1.10. Esta fase se encuentra en los ángulos 2θ ($^\circ$) de 23.47, 25.99, 33.24, 39.09, 47.45, 59, 69.65, 79.35.

Hinostroza J. y colaboradores (2024), formaron titanato de calcio, mezclando en etanol los precursores de la formación de titanato de calcio, con agitación magnética. Posteriormente calentaron a $1300 \text{ }^\circ\text{C}$. Encontraron la fase perovskita en los valores 2θ ($^\circ$) de: 23.27, 26.0, 32.9, 33.1, 37.0, 37.2, 39.0, 40.6, 40.9, 42.6, 44.3, 47.5, 49.0, 53.8, 54.7, 59.0, 59.3, 69.1, 69.6 y 79.3, los cuales son coincidentes con los resultados de este trabajo.

Lozano S. (2014), sintetizó titanato de calcio por método hidrotérmico asistido por microondas a partir de dióxido de titanio comercial y cloruro de calcio como precursores de titanio y calcio. El también encontró la perovskita del tipo ortorrómbica, como la encontrada en este estudio.

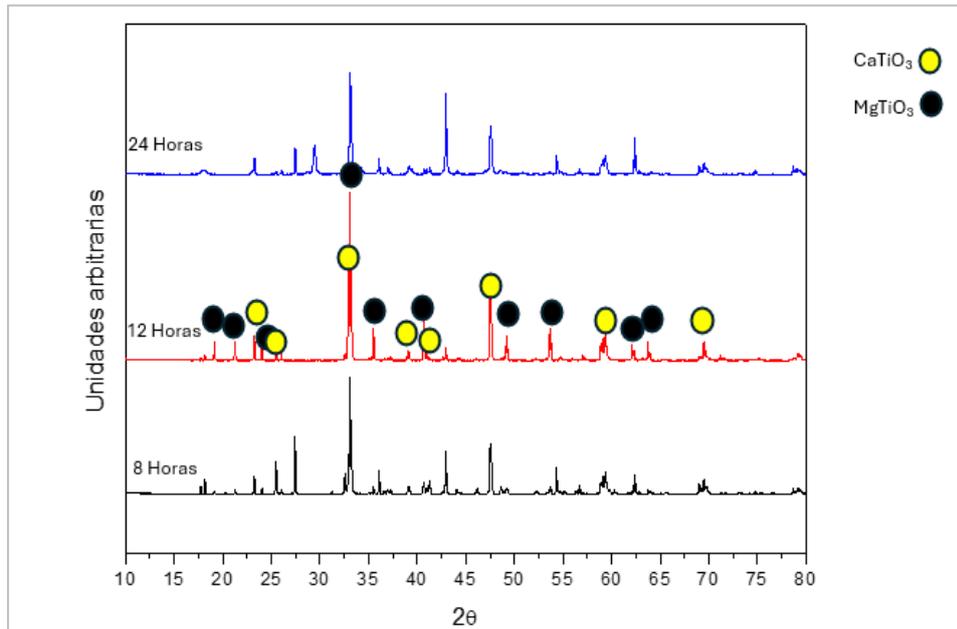
Samah K. et al., (2021), sintetizaron titanato de calcio usando el método de calcinación (reacción en estado sólido) con una relación molar estequiométrica de los precursores. El polvo lo calcinaron con temperaturas en el rango de $700\text{-}1200 \text{ }^\circ\text{C}$ durante dos horas. La fase titanato de calcio (CaTiO_3) en forma completa a $1200 \text{ }^\circ\text{C}/2\text{h}$, como producto puro de reacción. En este trabajo y en las condiciones planteadas no encontramos la perovskita de calcio como única fase, esto puede ser debido a que un mineral trae muchas impurezas.

En la Figura 5 se aprecian los patrones de difracción del óxido de titanio con dolomita sin lavar con tiempos de 8, 12 y 24 horas a la temperatura constante de 1150°C . Se observan picos atribuibles al compuesto titanato de calcio (CaTiO_3) y picos atribuibles a titanato de magnesio (MgTiO_3). La reacción de la dolomita cruda, sin lavar, en presencia de óxido de titanio a una temperatura de $1150 \text{ }^\circ\text{C}$ y con un tiempo de permanencia de 8, 12 y 24 horas, presenta la formación del compuesto de titanato de magnesio, los patrones de difracción son muy parecidos en los tres tiempos, sin embargo, se logró una mejor identificación del compuesto al tiempo de 12 horas.

La fase titanato de magnesio se puede apreciar en los ángulos 2θ ($^\circ$) de 19, 21.19, 23.62, 32.86, 35.53, 40.64, 49.54 y, 53.53, 61.66, 63.73. Este compuesto tiene una estructura hexagonal con parámetro de red $a= 5.054 \text{ \AA}$ y $c = 13.898 \text{ \AA}$. La identificación se hizo, con software match versión 1.10, con carta de entrada de 969003759. Un hallazgo interesante es que en ángulo 2θ ($^\circ$) de 32.86 se presenta la fase

titanato de calcio, junto al titanato de magnesio. Además en los ángulos 2θ ($^\circ$) de 23.25, 26.13, 32.94, 38.94, 40.64, 47.52, 59.29, 69.43, se puede identificar la presencia de titanato de calcio, por lo que resulta un logro bastante bueno poder tener los dos compuestos MgTiO_3 y CaTiO_3 . La fase titanato de calcio se identificó con la carta de entrada 969013694, la cual tiene una estructura ortorrómbica.

Figura 5. Patrones de difracción de la reacción TiO_2 y dolomita sin lavar a 1150°C , y 8, 12, 24 horas



En estas condiciones de reacción con la dolomita sin lavar, se forman los dos compuestos. Estos resultados respaldan el estudio termodinámico, el cual nos dice que es posible formar estas fases a la temperatura de 1150°C . En este caso la formación del titanato de magnesio fue favorecida por la presencia de carbonato de magnesio en el mineral, lo que puede decir que es mejor que la dolomita no sea lavada con HCl al 8% para favorecer la formación de este compuesto.

CONCLUSIONES

El estudio termodinámico, nos muestra que es posible obtener titanato de calcio a partir de carbonato de calcio y óxido de titanio, desde 400°C donde su energía libre es de -3.066 kcal. También es posible formar titanato de magnesio a partir de 200°C ya que tiene una energía libre de -1.665 kcal.

Con la dolomita lavada (con HCl al 8%) y TiO_2 grado reactivo a 1150°C , el único titanato que fue posible formar fue el de Calcio (CaTiO_3).

El titanato de calcio encontrado tiene un estructura ortorrómbica con parámetros de red $a=5.3809 \text{ \AA}$, $b=5.4371 \text{ \AA}$ y $c=7.6421 \text{ \AA}$, según carta de entrada 96-901-3384 de software Match 1.10. Esta fase se encuentra en los ángulos 2θ ($^\circ$) de 23.47, 25.99, 33.24, 39.09, 47.45, 59, 69.65, 79.35.

Con la dolomita sin lavar se forman ambas fases, titanato de magnesio y titanato de calcio. Aunque el comportamiento de la reacción es muy parecido para 8, 12 y 24 horas, en el tiempo de 12 horas es donde se obtuvieron los mejores resultados. La fase titanato de magnesio tiene estructura hexagonal parámetro de red $a= 5.054 \text{ \AA}$ y $c = a 13.898 \text{ \AA}$.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AD., L.-G., (2012). Polycrystalline Materials—Theoretical and Practical Aspects. Zakhariiev Z, editor.

Universidad de La Laguna. Spain: InTech; (Chapter 5.): p. 107-127.

[DOI 10.5772/1391](https://doi.org/10.5772/1391)

Atta, N. F., Galal, A., & El-Ads, E. H. (2016). Perovskite nanomaterials—synthesis, characterization, and applications. Perovskite Materials—Synthesis, Characterization, Properties, and Applications. 107-151. [DOI 10.5772/60469](https://doi.org/10.5772/60469)

Berbenni, V., Marini, A. Mechanical activation of calcium titanate formation from CaCO_3 — TiO_2 mixtures, (2004). *Journal of Materials Science* , 39, 5279–5282

<https://doi.org/10.1023/B:JMSC.0000039228.02104.63>

Ramírez C., D. Figueredo. Mesa J., Ríos A., “Propiedades físicas de estructuras tipo perovskita: Síntesis y aplicaciones”, Aibi revista de investigación, administración e ingeniería, Volumen 8, Número S1 de 2020 Pág. 307-314. [DOI: 10.15649/2346030X.2474](https://doi.org/10.15649/2346030X.2474)

C.N. Gopalakrishnan, (1986). New directions in Solid State Chemistry. Cambridge University Press,

Shimura, K., & Yoshida, H. (2010). Hydrogen production from water and methane over Pt-loaded calcium titanate photocatalyst. *Energy & Environmental Science*, 3(5), 615-617.

<https://doi.org/10.1039/B922793H>

Cavalcante, L. S., Marques, V. S., Sczancoski, J. C., Escote, M. T., Joya, M. R., Varela, J. A. & Longo,

E. (2008). Synthesis, structural refinement and optical behavior of CaTiO_3 powders: A comparative study of processing in different furnaces. *Chemical Engineering Journal*, 143(1-3),

299-307. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2008.05.017>



- Dubey, A. K., Tripathi, G., & Basu, B. (2010). Characterization of hydroxyapatite-perovskite (CaTiO₃) composites: Phase evaluation and cellular response. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, 95(2), 320-329.
<https://doi.org/10.1002/jbm.b.31716>
- Filipović S., N. Obradović, J. Krstić, M. Šćepanović, V. Pavlović, V. Paunović, M.M. Ristić,(2013), Structural characterization and electrical properties of sintered magnesium–titanate ceramics, *Journal of Alloys and Compounds*, Volume 555, 2013, Pages 39-44, ISSN 0925-8388,
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2012.12.040>
- Filipović S., N. Obradović, William G. Fahrenholtz, Steven Smith, Miljana Mirković, Adriana Peleš Tadić, Jovana Petrović, Antonije Dorđević,(2024) , Spark plasma sintering of magnesium titanate ceramics, *Ceramics International*, Volume 50, Issue 9, Part A,Pages 15283-15291, ISSN 0272-8842, <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.02.004>
- Han, Z., Bourget, L., Li, H., Ulla, M., Millman, W. S., Baum, H. P., ... & Tonner, B. P. (1988). Single-target sputter deposition, post-processing and electron spectroscopy of perovskite superconductor thin films. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 165, No. 1, pp. 66-70). American Institute of Physics. <https://doi.org/10.1063/1.37082>
- Hernández, J., Salinas, E., Blanco, A., Cerecedo, E., & Rodríguez, V. (2015). Carbonato de calcio en México. *Omnia*. ISBN: 978-849942118-6-7. DOI: [10.3926/oms.239](https://doi.org/10.3926/oms.239)
- Hinostrza J., B. Trujillo, R. Félix, F. Paraguay, J. Rodríguez, A. Ochoa, (2024), “Síntesis y caracterización de titanato de calcio (CaTiO₃) como potencial sensor electroquímico de contaminantes orgánicos en solución acuosa” . *Revista de Ciencias Tecnológicas (RECIT)*. Universidad Autónoma de Baja California ISSN 2594-1925 Volumen 7 (1): e312. Enero-Marzo, 2024. <https://doi.org/10.37636/recit.v7n1e312>.
- Holliday, S., & Stanishevsky, A. (2004). Crystallization of CaTiO₃ by sol–gel synthesis and rapid thermal processing. *Surface and Coatings Technology*, 188, 741-744.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.07.044>
- Jang, J. S., Borse, P. H., Lee, J. S., Lim, K. T., Jung, O. S., Jeong, E. D., ... & Kim, H. G. (2011). Photocatalytic hydrogen production in water-methanol mixture over iron-doped

CaTiO₃. Bulletin of the Korean Chemical Society, 32(1), 95-99.

<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.07.044>

John W. Anthony, Richard A. Bideaux, Kenneth W. Bladh, and Monte C. Nichols, Eds. (2003), Handbook of Mineralogy, Mineralogical Society of America, Chantilly, VA 20151-1110, USA. <http://www.handbookofmineralogy.org/>

Lozano Sánchez, L. M. (2013). Síntesis rápida y aplicación fotocatalítica de prismas rectangulares de perovskitaCaTiO₃

ipicyt.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1010/781/3/TMIPICYTM3S52013.pdf

Minería en Coahuila Outletminero; P. Leonel , marzo 2024,

<https://outletminero.org/mineria-en-coahuila>

Oates, J. (2007). Lime and limestone:chemistry and technology, production and uses. Weinheim: Wiley-VCH. ISBN 3-527-29527-5

Palaniandy, S., & Jamil, N. H. (2009). Influence of milling conditions on the mechanochemical synthesis of CaTiO₃ nanoparticles. Journal of Alloys and Compounds, 476(1-2), 894-902.

<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2008.09.133>

Park, K. H., & Kim, H. G. (2010). Improvement of the formation and the thermal properties of CaTiO₃ fabricated from a CaO-TiO₂ mixture by using the mechanochemical method. Journal of the Korean Physical Society, 56(2), 648-652. DOI: 10.3938/jkps.56.648

Patil, B. M., Srinivasa, R. S., & Dharwadkar, S. R. (2007). Synthesis of CaTiO₃ from calcium titanyl oxalate hexahydrate (CTO) as precursor employing microwave heating technique. Bulletin of Materials Science, 30, 225-229. <https://doi.org/10.1007/s12034-007-0040-7>

Puangpetch, T., Sommakettarin, P., Chavadej, S., & Sreethawong, T. (2010). Hydrogen production from water splitting over Eosin Y-sensitized mesoporous-assembled perovskite titanate nanocrystal photocatalysts under visible light irradiation. International Journal of Hydrogen Energy, 35(22), 12428-12442. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.08.138>

Rongsawat, S., Bunma, W., & Chanadee, T. (2020). In Situ Combustion Synthesis in Air of Calcium Titanate Powders Using Minerals as a Calcium Source. In Materials Science Forum (Vol. 982, pp. 20-25). Trans Tech Publications Ltd. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.982.20



Samah K. AbdulKareem, Sami A. Ajeel, (2021), Effect of annealing temperatures on the structural and crystalline properties of CaTiO₃ powder synthesized via conventional solid-state method; Materials Today: Proceedings Volume 42, Part 5, 2021, Pages 2674-2679
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.647>

Yang J., B. Geng B., Y. Ye, & X. Yu, (2012). Stick-like titania precursor route to MTiO₃ (M= Sr, Ba, and Ca) polyhedra, (2012) CrystEngComm, 14(8), 2959-2965.
<https://doi.org/10.1039/C2CE06532K>

Yang, X., Williams, I. D., Chen, J., Wang, J., Xu, H., Konishi, H., ... & Wu, M. (2008). Perovskite hollow cubes: morphological control, three-dimensional twinning and intensely enhanced photoluminescence. Journal of materials chemistry, 18(30), 3543-3546. DOI
<http://doi.org/10.039/B808396G>

