

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Escuela de Posgrado

**MAESTRÍA EN CIENCIAS CON MENCIÓN EN GESTIÓN
AMBIENTAL Y DESARROLLO SOSTENIBLE**

**ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES TÉRMICAS DEL
COMPUESTO PARAFINA Y DIATOMITA
DE JALORAPAMPA PARA EL
ALMACENAMIENTO
DE ENERGÍA**

TESIS

PRESENTADA POR:

JORGE ARMANDO CHOQUE CHACOLLA

Para optar el Grado Académico de:

**MAESTRO EN CIENCIAS (*MAGISTER SCIENTIAE*) CON MENCIÓN EN
GESTIÓN AMBIENTAL Y DESARROLLO SOSTENIBLE**


TACNA – PERÚ


2025


UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
ESCUELA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN GESTIÓN AMBIENTAL Y DESARROLLO SOSTENIBLE

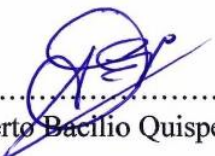
ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES TÉRMICAS DEL COMPUESTO
PARAFINA Y DIATOMITA DE JALORAPAMPA PARA EL
ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA

Tesis sustentada y aprobada el 18 de marzo del 2025; estando el jurado calificador integrado por:

PRESIDENTE : 
Dr. Nataniel Mario Linares Gutiérrez

SECRETARIO : 
Dr. Henry Edgardo Nina Mendoza

MIEMBRO : 
Dr. Alberto Bacilio Quispe Cohaila

ASESOR : 
Dr. Alberto Bacilio Quispe Cohaila

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, Dr Alberto Bacilio Quispe Cohaila, en mi condición de asesor acreditado con Resolución de Escuela de Posgrado N° 13759-2024-ESPG/UNJBG del 01 de abril del 2024, del trabajo de tesis titulado: "**ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES TÉRMICAS DEL COMPUESTO PARAFINA Y DIATOMITA DE JALORAPAMPA PARA EL ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA**", presentado por el Sr. Jorge Armando Choque Chacolla, para optar el Grado Académico de Maestro en Ciencias (*Magister Scientiae*) con mención en Gestión Ambiental y Desarrollo Sostenible.

Habiendo cumplido con lo establecido en el reglamento de originalidad y de similitud de trabajo de investigación y producción intelectual, considerando que según la revisión, evaluación y análisis realizado a través del software de similitud textual TURNITIN, cuenta con el nivel de similitud permitido cuyo porcentaje es 8%.

Por lo que CERTIFICO LA SIMILARIDAD de la tesis y está de acuerdo al nivel PERMITIDO, para continuar con los trámites correspondientes y para su publicación en el repositorio institucional.

Se emite el presente certificado a solicitud del interesado con fines de continuar con los trámites respectivos para la obtención del Grado Académico de Maestro en Ciencias (*Magister Scientiae*) con mención en Gestión Ambiental y Desarrollo Sostenible.


Tacna, 30 enero 2025

FIRMA ASESOR
Nombres y apellidos


.....
Alberto Bacilio Quispe Cohaila
DNI N° 00419682



FIRMA TESISTA
Nombres y apellidos


.....
Sr. Jorge Armando Choque Chacolla
DNI N° 40364333



DEDICATORIA

*A mis padres Elisban y Basilia por alentarme a seguir creciendo
profesionalmente y a culminar la presente tesis.
A mi esposa Jaqueline y mis hijas Valeria, Andrea y Rebeca por el ser el motor para
culminar esta investigación...
Gracias.*

AGRADECIMIENTOS

A Dios por guiar siempre mis pasos.

Mi sincero agradecimiento a mi asesor, al Dr. Alberto Quispe Cohaila, responsable del Proyecto de Investigación "GENERACIÓN FOTOCATALÍTICA Y FOTO-ELECTROCATALÍTICA DE HIDRÓGENO EN LA REGIÓN TACNA EMPLEANDO NANOPARTÍCULAS DE NiTiO₃ PURAS Y DOPADAS", aprobado con Resolución Rectoral N° 9155-2021-UNJBG, por su invaluable apoyo en la caracterización de los materiales desarrollados en esta tesis. Asimismo, agradezco al MSC Elisban Juani Sacari Sacari y al Laboratorio de Nanotecnología de la UNJBG, cuyas instalaciones y equipamiento especializado fueron fundamentales para llevar a cabo los análisis necesarios que permitieron validar los resultados obtenidos en este trabajo de investigación.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTOS	v
RESUMEN	xi
ABSTRACT.....	xii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
1.1. Descripción del problema	3
1.2. Formulación del problema	4
1.2.1. Pregunta principal de investigación	4
1.2.2. Subpreguntas de investigación.....	5
1.3. Justificación e importancia	5
1.3.1. Relevancia ambiental	5
1.3.2. Relevancia económica.....	6
1.3.3. Relevancia social.....	6
1.4. Alcances y limitaciones	7
1.4.1. Alcances	7
1.4.2. Limitaciones del estudio	7
1.5. Objetivos.....	8
1.5.1. Objetivo general.....	8
1.5.2. Objetivos específicos	8
1.6. Hipótesis	9
1.6.1. Hipótesis general.....	9
1.6.2. Hipótesis específicas	9
1.7. Variables	10
1.7.1. Variables involucradas en el estudio.....	10
1.7.2. Operacionalización de las variables	11
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	14
2.1. Revisión de la Literatura.....	14
2.1.1. Diatomita como material de soporte	14
2.1.2. Materiales de cambio de fase (PCM) y su importancia	15
2.1.3. Aplicación de la diatomita en sistemas de almacenamiento de energía ...	16

2.1.4. Encapsulación y mejora de propiedades térmicas.....	17
2.1.5. Diatomita de Jalorapampa.....	17
2.1.6. Parafina	18
2.1.7. Combinación parafina-diatomita.....	18
2.2. Técnicas de caracterización	19
2.2.1. Difracción de rayos X (DRX) para el análisis estructural	19
2.2.2. Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) para el análisis morfológico	19
2.2.3. Espectroscopía de Energía Dispersiva (EDS) para la composición elemental	20
2.2.4. Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC) para la evaluación de las propiedades térmicas.....	20
2.3. Conceptos clave	21
2.3.1. Porosidad.....	21
2.3.2. Capacidad Térmica	21
2.3.3. Encapsulación	22
2.4. Estado del Arte.....	23
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	27
3.1. Tipo, nivel y diseño de la investigación	27
3.1.1. Tipo de investigación	27
3.1.2. Nivel de investigación.....	27
3.1.3. Diseño de investigación	27
3.2. Materiales y equipos	28
3.3. Procedimiento experimental	30
3.3.1. Preparación de la diatomita.....	30
3.3.2. Encapsulación de la parafina en la diatomita.....	31
3.3.3. Almacenamiento y preparación de muestras para caracterización	32
CAPÍTULO IV: RESULTADOS	33
4.1. Resultados de DRX.....	33
4.1.1. Análisis estructural de diatomita (DT).....	33
4.1.2. Análisis estructural de diatomita - parafina	34
4.2. Resultados de SEM y EDS	36
4.2.1. Análisis estructural y elemental DT.....	36
4.2.2. Análisis estructural y elemental P:0,5-D:1,5	39

4.2.3. Análisis estructural y elemental de P:1,6-D:2.....	40
4.2.4. Análisis estructural y elemental de P:1,8-D:2.....	43
4.2.5. Análisis estructural y elemental de P:2-D:2.....	45
4.2.6. Análisis estructural y elemental de P:2,4-D:2.....	47
4.2.7. DT y DT- Parafina	49
4.3. Resultados de DSC	50
DISCUSIONES	54
CONCLUSIONES	59
RECOMENDACIONES.....	61
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63
ANEXOS	67

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Proporciones de parafina y diatomita en las muestras.....	11
Tabla 2	Composición elemental de las muestras DT pura en diferentes puntos de análisis.....	38
Tabla 3	Composición elemental de las muestras P:0,5-D:1,5 en diferentes puntos de análisis.....	40
Tabla 4	Composición elemental consolidada de P:1,6-D:2 en diferentes puntos de análisis.....	42
Tabla 5	Composición elemental consolidada de P:1,8-D:2 en puntos de análisis...	45
Tabla 6	Composición elemental de P:2-D:2 en puntos de análisis.....	47
Tabla 7	Composición elemental de P:2,4-D:2 en puntos de análisis.....	49

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Difractograma de diatomita lavada y calcinada a 600 °C.....	34
Figura 2	Difractograma del compuesto parafina-diatomita en distintas proporciones.....	35
Figura 3	Imagen SEM de las DT	37
Figura 4	Imagen SEM de la muestra P:0,5-D:1,5.....	39
Figura 5	Imagen SEM de la muestra P:1,6-D:2.....	41
Figura 6	Imagen SEM de la muestra P:1,8-D:2.....	44
Figura 7	Imagen SEM de la muestra P:2-D:2.....	46
Figura 8	Imagen SEM de la muestra P:2,4-D:2.....	48
Figura 9	Curvas de calor específico en función de la temperatura para diferentes proporciones de parafina y diatomita.....	51

RESUMEN

Este estudio evaluó las propiedades térmicas y estructurales del compuesto parafina-diatomita, optimizando su capacidad de almacenamiento de energía térmica para aplicaciones industriales. Utilizando diatomita proveniente de Jalorapampa, Tacna, se llevaron a cabo análisis mediante técnicas como la Difracción de Rayos X (DRX), Microscopía Electrónica de Barrido (SEM), Espectroscopía de Energía Dispersiva (EDS) y Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC). El objetivo principal fue mejorar la eficiencia térmica y estabilidad estructural del compuesto en comparación con la parafina pura. Los resultados indicaron que las muestras con mayores proporciones de parafina, como P:2-D:2 y P:2,4-D:2, lograron una alta capacidad de almacenamiento térmico, alcanzando valores de hasta $30 \text{ J/g} \cdot ^\circ\text{C}$. Sin embargo, la muestra P:1,8-D:2 demostró una combinación óptima entre capacidad de almacenamiento y estabilidad térmica, lo que sugiere que, si bien un mayor contenido de parafina mejora el almacenamiento de calor, existe una proporción ideal que maximiza tanto la eficiencia como la durabilidad. Estos hallazgos respaldan la viabilidad del compuesto para aplicaciones de almacenamiento térmico en sistemas de energía solar y climatización pasiva, donde la capacidad calorífica y la estabilidad térmica son esenciales para ciclos de uso prolongado. Además, la encapsulación homogénea de la parafina en la matriz porosa de la diatomita, proporciona estabilidad térmica adicional, confirmando su potencial como alternativa viable y sostenible en el ámbito de la energía renovable.

Palabras clave: Diatomita, materiales de cambio de fase (PCM), almacenamiento de energía térmica, encapsulación, calorimetría diferencial de barrido (DSC).

ABSTRACT

This study evaluated the thermal and structural properties of the paraffin-diatomite composite, optimizing its thermal energy storage capacity for industrial applications. Using diatomite from Jalorapampa, Tacna, analyses were conducted through techniques such as X-ray Diffraction (XRD), Scanning Electron Microscopy (SEM), Energy Dispersive Spectroscopy (EDS), and Differential Scanning Calorimetry (DSC). The primary goal was to improve the thermal efficiency and structural stability of the composite compared to pure paraffin. Results indicated that samples with higher paraffin proportions, such as P:2-D:2 and P:2,4-D:2, achieved high thermal storage capacity, reaching values up to 30 J/g· °C. However, the P:1,8-D:2 sample demonstrated an optimal balance between storage capacity and thermal stability, suggesting that while increasing paraffin content enhances heat storage, an ideal ratio maximizes both efficiency and durability. These findings support the composite's feasibility for thermal storage applications in solar energy systems and passive cooling, where heat capacity and thermal stability are essential for extended use cycles. Furthermore, the homogeneous encapsulation of paraffin within the diatomite's porous matrix provides additional thermal stability, confirming its potential as a viable and sustainable alternative in the renewable energy sector.

Keywords: Diatomite, phase change materials (PCM), thermal energy storage, encapsulation, differential scanning calorimetry (DSC).

INTRODUCCIÓN

El almacenamiento de energía térmica se ha convertido en un componente fundamental para mejorar la eficiencia de los sistemas de energía renovable, especialmente en aplicaciones solares y otras fuentes de energía intermitentes. Los materiales de cambio de fase (PCM), han demostrado ser una solución eficaz en este contexto, debido a su capacidad para almacenar y liberar grandes cantidades de calor durante sus transiciones de fase. Esta capacidad, permite optimizar el uso de la energía capturada, mejorando la estabilidad de los sistemas energéticos. Sin embargo, materiales como la parafina, aunque ampliamente utilizados como PCM, presentan limitaciones importantes, como su baja conductividad térmica y la disminución de su efectividad tras múltiples ciclos térmicos, lo que compromete su eficiencia a largo plazo.

La presente investigación, se enfoca en mejorar la eficiencia de los sistemas de almacenamiento de energía térmica, mediante el estudio sistemático del compuesto parafina-diatomita. La diatomita, un material poroso de origen natural, se propone como soporte estructural para mejorar las propiedades térmicas de la parafina. Al incorporar diatomita en la parafina, se busca optimizar tanto la capacidad de absorción y liberación de calor, como la estabilidad del sistema durante ciclos prolongados de uso. Este enfoque podría permitir que los sistemas de almacenamiento basados en PCM sean sustancialmente más eficientes y duraderos, superando las limitaciones que presenta la parafina cuando se utiliza aisladamente.

La diatomita de Jalorapampa, en Tacna, Perú, representa un material especialmente idóneo para esta investigación, debido a su abundancia y sus excepcionales propiedades físicas. Este material poroso tiene la capacidad de encapsular eficientemente la parafina, mejorando notablemente su rendimiento térmico en aplicaciones de almacenamiento energético. Además, la utilización de este recurso local no solo constituye una solución económicamente viable, sino que también contribuye significativamente a la sostenibilidad ambiental, al reducir la dependencia de materiales sintéticos y de alto costo de producción. Por consiguiente, este estudio explora el potencial de la combinación parafina-diatomita, como una alternativa eficaz y sostenible para mejorar los sistemas de almacenamiento de energía térmica.

El objetivo general de este estudio, es evaluar exhaustivamente las propiedades térmicas del compuesto parafina-diatomita, proveniente de Jalorapampa, Tacna, y determinar su potencial para mejorar la capacidad de almacenamiento de energía térmica. Para cumplir con este propósito, se establecen tres objetivos específicos: primero, caracterizar la estructura del compuesto mediante técnicas avanzadas de análisis, como la Difracción de Rayos X (DRX) y la Microscopía Electrónica de Barrido (SEM); segundo, evaluar la capacidad de almacenamiento térmico del compuesto utilizando Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC), determinando con precisión su eficiencia en la absorción y liberación de calor durante los ciclos térmicos; y, finalmente, comparar sistemáticamente el rendimiento térmico del compuesto parafina-diatomita, con el de la parafina pura y otros materiales de cambio de fase (PCM), identificando sus ventajas competitivas en términos de estabilidad estructural y capacidad de almacenamiento energético.

Esta investigación no solo busca mejorar la eficiencia térmica de los PCM, sino que también tiene importantes implicaciones en la sostenibilidad económica y ambiental, dado el uso de un recurso natural local como la diatomita. Al optimizar la interacción entre la parafina y la diatomita, se espera que esta investigación contribuya significativamente al desarrollo de sistemas más eficientes y sostenibles, para el almacenamiento de energía térmica, especialmente en regiones con acceso a diatomita como recurso natural.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción del problema

El almacenamiento eficiente de energía térmica se ha consolidado como uno de los principales desafíos en la transición hacia el uso masivo de energías renovables, particularmente, la energía solar, cuya intermitencia representa un obstáculo significativo para su implementación continua. En este contexto, los sistemas de almacenamiento de energía térmica, que permiten la acumulación y liberación controlada del calor, son esenciales para aprovechar esta fuente de energía renovable, de manera constante y eficiente (Farid et al., 2021). Los materiales de cambio de fase (PCM) han sido ampliamente investigados, debido a su excepcional capacidad de almacenar grandes cantidades de energía, a través de la absorción y liberación de calor latente durante sus transiciones de fase, lo que los posiciona como candidatos ideales para sistemas de almacenamiento térmico (Kalaiselvam & Parameshwaran, 2014). Entre estos materiales, la parafina ha mostrado un gran potencial debido a su elevado calor latente y su disponibilidad comercial, aunque presenta limitaciones significativas, como una baja conductividad térmica y la tendencia a degradarse con el tiempo, lo que restringe su aplicabilidad en soluciones industriales de largo plazo (Cabeza, 2014).

Para superar estas limitaciones, se ha propuesto el uso de materiales porosos que funcionen como soportes estructurales, mejorando significativamente las propiedades térmicas de los PCM. Entre estos materiales, la diatomita ha emergido como una opción particularmente prometedora, debido a su estructura altamente porosa, que facilita una distribución óptima de la parafina, y su excepcional estabilidad térmica (Moreno-Maroto et al., 2022). La diatomita es una roca sedimentaria compuesta principalmente por sílice amorfa, formada a partir de la fosilización de microalgas diatomeas. Su porosidad intrínseca la convierte en un material ideal para la encapsulación de PCM, optimizando tanto la conductividad térmica como la estabilidad del material compuesto en aplicaciones industriales (Zuo & Li, 2014). Adicionalmente, estudios recientes han demostrado que la combinación de PCM con diatomita, no solo incrementa la capacidad

de almacenamiento de energía térmica, sino que también mejora significativamente la durabilidad del material, extendiendo su ciclo de vida útil en condiciones industriales exigentes (Farid et al., 2021).

En Perú, específicamente en la región de Jalorapampa, Tacna, se encuentra un depósito significativo de diatomita de alta pureza que ha sido objeto de investigaciones por su extraordinario potencial en diversas aplicaciones industriales, incluyendo su uso como soporte para PCM (Sacari Sacari, 2023; Tejada Bedoya, 2019). Este yacimiento no solo representa una solución local para el desarrollo de tecnologías avanzadas de almacenamiento térmico, sino que también constituye una oportunidad económica significativa al reducir la dependencia de materiales importados. La explotación sostenible de recursos locales, como la diatomita, permite el desarrollo de soluciones tecnológicas con menor impacto ambiental y costos sustancialmente reducidos, lo que resulta crucial en regiones con acceso limitado a tecnologías avanzadas (Tejada Bedoya, 1996).

La problemática central de esta investigación, radica en evaluar sistemáticamente si la combinación de parafina y diatomita de Jalorapampa, puede mejorar significativamente la capacidad de almacenamiento de energía térmica, en comparación con la parafina pura. Este enfoque, no solo busca incrementar la eficiencia térmica del sistema, sino también, reducir los costos de producción y mejorar la estabilidad a largo plazo de los materiales compuestos (Cabeza, 2014). A pesar de los estudios previos, que han explorado el uso de materiales porosos como la diatomita en combinación con PCM, la investigación específica sobre la utilización de la diatomita de Jalorapampa para potenciar las propiedades térmicas de la parafina, es limitada, lo que justifica plenamente la necesidad de un análisis más exhaustivo y detallado (Sacari Sacari, 2023; Tejada Bedoya, 2019).

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Pregunta principal de investigación

¿Cómo afectan las propiedades térmicas y estructurales del compuesto parafina-diatomita, proveniente de Jalorapampa, Tacna, a su capacidad de mejorar el almacenamiento de energía térmica, en comparación con la parafina pura?

1.2.2. Subpreguntas de investigación

- a) ¿Cuál es la efectividad del proceso de purificación de la diatomita de Jalorapampa para garantizar su idoneidad en la encapsulación de parafina?
- b) ¿Cuál es la proporción óptima de parafina y diatomita que maximiza la capacidad de absorción y liberación de calor del compuesto, según los análisis de DSC?
- c) ¿Cómo se comporta la estabilidad térmica y estructural del compuesto parafina-diatomita en distintas proporciones de parafina, evaluada a través de análisis de DRX y SEM?
- d) ¿Cómo se comparan las propiedades térmicas del compuesto parafina-diatomita con las de la parafina pura, para evaluar su desempeño en aplicaciones de almacenamiento de energía?

1.3. Justificación e importancia

1.3.1. Relevancia ambiental

El desafío global de mitigar el cambio climático y reducir la dependencia de los combustibles fósiles, ha impulsado la búsqueda intensiva de soluciones más eficientes y sostenibles para el almacenamiento de energía. El almacenamiento térmico mediante materiales de cambio de fase (PCM), como la parafina, representa una opción particularmente prometedora para mejorar la eficiencia de las energías renovables (Nazir et al., 2019). La integración de materiales porosos naturales y sostenibles, resulta crucial para minimizar el impacto ambiental y respaldar los objetivos globales de sostenibilidad. Según Cabeza et al. (2021), la utilización de materiales como la diatomita, ofrece un enfoque altamente sostenible para potenciar las propiedades de los PCM y reducir significativamente la huella de carbono, asociada a los sistemas de almacenamiento energético.

En este contexto, la diatomita de Jalorapampa, ubicada en Tacna, Perú, se presenta como un material excepcionalmente viable, debido a su abundancia natural y sus propiedades físico-químicas, que la hacen adecuada para aplicaciones en almacenamiento térmico. La diatomita no solo potencia las propiedades térmicas de la parafina, sino que también contribuye sustancialmente a la reducción del impacto ambiental, al evitar la síntesis de materiales costosos o con una elevada huella ecológica (Moreno-Maroto et al.,

2022; Sacari Sacari, 2023). Además, la utilización de diatomita local contribuye significativamente a reducir las emisiones de carbono asociadas con su procesamiento y transporte, alineándose perfectamente con los principios fundamentales de la economía circular y la sostenibilidad (Dincer & Ezan, 2018).

1.3.2. Relevancia económica

El costo elevado de los sistemas de almacenamiento de energía térmica, ha constituido un obstáculo significativo para su adopción masiva, tanto en aplicaciones industriales como residenciales (Xu & Li, 2013). La diatomita de Jalorapampa, al ser un recurso local abundante y de bajo costo de extracción y procesamiento, ofrece una solución económicamente viable para encapsular parafina. Su utilización puede reducir significativamente los costos de producción de PCM, en comparación con materiales sintéticos o importados, con reducciones estimadas entre el 30 % y el 40 % (Moreno-Maroto et al., 2022; Cabeza et al., 2021).

Adicionalmente, el aprovechamiento de recursos locales como la diatomita, genera importantes beneficios económicos, al fomentar la innovación tecnológica y crear empleos cualificados en las industrias de minería y procesamiento de minerales, impulsando así, el desarrollo económico regional y reduciendo la dependencia de importaciones (Sacari Sacari, 2023). El establecimiento de una cadena de valor local para estos materiales, también contribuye a la diversificación económica en regiones tradicionalmente dependientes de actividades extractivas, con menor valor agregado.

1.3.3. Relevancia social

El desarrollo de tecnologías de almacenamiento térmico más eficientes y económicamente accesibles, tiene un impacto directo y positivo en las comunidades, especialmente, en aquellas que no disponen de acceso constante a la red eléctrica convencional. La utilización del compuesto parafina-diatomita, no solo puede reducir significativamente los costos energéticos para los usuarios finales, sino que también facilita la adopción de sistemas de almacenamiento térmico, en zonas rurales o de difícil acceso, mejorando sustancialmente la calidad de vida de sus habitantes, mediante el acceso a energía más estable y asequible (Cabeza et al., 2021; Farid et al., 2021).

Al promover el uso de recursos naturales locales como la diatomita, se fomenta activamente la economía circular y la gestión sostenible de los recursos naturales. Este enfoque puede servir como modelo ejemplar para otras regiones que posean recursos similares, promoviendo el desarrollo de tecnologías locales que respeten el medio ambiente y beneficien directamente a las comunidades circundantes, creando oportunidades de desarrollo socioeconómico sostenible (Dincer & Ezan, 2018; Sacari Sacari, 2023).

1.4. Alcances y limitaciones

1.4.1. Alcances

El presente estudio comprende la caracterización exhaustiva del compuesto parafina-diatomita de Jalorapampa, empleando técnicas analíticas avanzadas, como Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC), Microscopía Electrónica de Barrido (SEM), Difracción de Rayos X (DRX) y Espectroscopía de Energía Dispersiva (EDS). Esta caracterización incluye la evaluación sistemática de la capacidad de almacenamiento térmico del compuesto parafina-diatomita, en diferentes proporciones controladas, permitiendo determinar la formulación óptima para aplicaciones específicas.

Adicionalmente, el estudio proporciona un marco conceptual y metodológico sólido, para futuras investigaciones sobre la aplicabilidad del compuesto en diversos sistemas de almacenamiento de energía térmica, desde aplicaciones residenciales hasta industriales. Aunque los ensayos experimentales se realizaron a escala de laboratorio, bajo condiciones controladas, los resultados obtenidos constituyen una base científica robusta, para su potencial implementación en sistemas de energía renovable, particularmente, en aplicaciones solares térmicas y climatización pasiva.

1.4.2. Limitaciones del estudio

El estudio se circunscribe específicamente a la diatomita proveniente de Jalorapampa, Tacna. Es importante señalar que las propiedades físico-químicas y la pureza del material pueden presentar variaciones significativas en otras regiones geográficas, lo que podría influir en la replicabilidad exacta de los resultados en diferentes contextos. Esta variabilidad natural del material, debe considerarse al extrapolar los hallazgos a diatomitas de otros orígenes.

Si bien el estudio demostró convincentemente la viabilidad técnica del compuesto a escala de laboratorio, no se evaluó exhaustivamente la escalabilidad para la producción industrial masiva. Serían necesarias investigaciones adicionales y proyectos piloto, para determinar con precisión los factores económicos, técnicos y logísticos, asociados a su producción a gran escala, incluyendo optimización de procesos, automatización y control de calidad.

La investigación evaluó la estabilidad térmica del compuesto a corto plazo, pero no incluyó ensayos prolongados para analizar su durabilidad bajo condiciones industriales reales o múltiples ciclos de calentamiento y enfriamiento (>1000 ciclos). Esta información sería esencial para determinar la vida útil real del material, en aplicaciones comerciales que requieren operación continua durante años.

Las pruebas térmicas se efectuaron bajo condiciones controladas de laboratorio, con parámetros cuidadosamente regulados. Para extrapolar los resultados a condiciones industriales o de campo, donde existen fluctuaciones ambientales significativas, será necesario realizar estudios complementarios, que evalúen el comportamiento del compuesto en diversos entornos operativos y situaciones prácticas, incluyendo su respuesta a cambios bruscos de temperatura, humedad y presión.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

Estudiar sistemáticamente las propiedades térmicas y estructurales del compuesto parafina-diatomita proveniente de Jalorapampa, Tacna, y evaluar su potencial para mejorar significativamente la capacidad de almacenamiento de energía térmica en aplicaciones industriales y residenciales.

1.5.2. Objetivos específicos

- a) Verificar la efectividad de los procesos de purificación y acondicionamiento de la diatomita para garantizar su idoneidad como matriz de encapsulación para la parafina, evaluando sus propiedades estructurales y composición química antes y después del tratamiento.

- b) Determinar la proporción óptima de parafina y diatomita que asegure la máxima capacidad de absorción y liberación de calor, evaluada mediante análisis de Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC), considerando diferentes formulaciones con variaciones controladas en su composición.
- c) Analizar la estabilidad estructural y térmica del compuesto en diferentes proporciones de parafina, utilizando Difracción de Rayos X (DRX) y Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) para confirmar la integridad del material y evaluar la distribución del PCM en la matriz porosa.
- d) Comparar cuantitativamente las propiedades térmicas del compuesto parafina-diatomita con las de la parafina pura para evaluar objetivamente su desempeño en aplicaciones prácticas de almacenamiento de energía, considerando parámetros como capacidad calorífica y estabilidad térmica.

1.6. Hipótesis

1.6.1. Hipótesis general

La incorporación de la diatomita de Jalorapampa como material de soporte en la parafina, mejora significativamente las propiedades térmicas del sistema, aumentando su capacidad de almacenamiento de energía y estabilidad térmica, en comparación con la parafina pura, lo que lo convierte en una solución más eficiente y sostenible, para aplicaciones de almacenamiento de energía térmica en sistemas renovables.

1.6.2. Hipótesis específicas

- a) La purificación y acondicionamiento térmico de la diatomita de Jalorapampa, es efectiva para mejorar su idoneidad en la encapsulación de parafina, garantizando una estructura porosa adecuada, que favorece la absorción y liberación controlada de calor durante los ciclos térmicos.
- b) Existe una proporción óptima específica de parafina y diatomita, que maximiza la capacidad de almacenamiento de energía térmica del compuesto, tal como se verifica en los análisis de DSC, donde el equilibrio entre contenido de PCM y matriz porosa, permite la máxima eficiencia térmica.

- c) El compuesto parafina-diatomita mantiene su estabilidad térmica y estructural en distintas proporciones de parafina, confirmado mediante análisis de DRX y SEM, demostrando resistencia a la degradación.
- d) El rendimiento térmico del compuesto parafina-diatomita es comparable o superior al de la parafina pura, en términos de capacidad de almacenamiento de energía, debido a la mejora en la transferencia térmica y estabilidad estructural, derivada de la estructura micro-porosa de la diatomita.

1.7. Variables

1.7.1. Variables involucradas en el estudio

En este estudio se analizaron varias variables clave relacionadas con las propiedades térmicas y estructurales del compuesto parafina-diatomita. A continuación, se detallan las variables dependientes, independientes y controlada, que se consideraron durante los experimentos:

Variable dependiente:

- **Capacidad de almacenamiento de energía térmica (J/g):** Esta variable cuantifica la cantidad de energía térmica que el compuesto parafina-diatomita puede almacenar y liberar eficientemente, durante el cambio de fase de la parafina. Se evaluó mediante Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC), comparando sistemáticamente el desempeño del compuesto con la parafina pura bajo condiciones idénticas de ensayo.

Variables independientes:

- **Proporción de parafina en el compuesto:** Esta variable fundamental evalúa la cantidad relativa de parafina incorporada en el compuesto, utilizando proporciones definidas y controladas (P:0,5-D:1,5, P:1,6-D:2, P:1,8-D:2, P:2-D:2, P:2,4-D:2), como se muestra detalladamente en la Tabla 1. Esta variable resulta esencial para determinar el impacto preciso de la concentración de parafina, en la capacidad de almacenamiento térmico y la estabilidad estructural del sistema compuesto.

Tabla 1

Proporciones de parafina y diatomita en las muestras

Muestra	Parafina (g)	Diatomita (g)	Etiqueta 1	Etiqueta 2
DT	0	2	DT1 Puro	DT1 Puro
P:0,5-D:1,5	0,5	1,5	0,5:1,5DT2	DT2
P:1,6-D:2	1,6	2	1,6:2DT3	DT3
P:1,8-D:2	1,8	2	1,8:2DT4	DT4
P:2-D:2	2	2	2:2DT5	DT5
P:2,4-D:2	2,4	2	2,4:2DT6	DT6

Nota. P representa la cantidad de parafina, y D representa la cantidad de diatomita en las muestras. Las muestras fueron preparadas con las siguientes proporciones: DT (diatomita pura), P:0,5-D:1,5, P:1,6-D:2, P:1,8-D:2, P:2-D:2, y P:2,4-D:2.

- **Encapsulación de la parafina en la estructura porosa de la diatomita:** Esta variable mide cuantitativamente el grado de penetración y retención de la parafina en los microporos de la diatomita, evaluado mediante Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) y Espectroscopía de Energía Dispersiva (EDS). Este análisis resulta fundamental para verificar la eficacia de la diatomita como material de encapsulación y determinar la homogeneidad de la distribución del PCM en la matriz porosa.

Variable controlada:

- **Temperatura de fusión de la parafina:** Esta variable monitorea con precisión la temperatura a la cual la parafina experimenta un cambio de fase (de sólido a líquido). Se controla rigurosamente mediante DSC para analizar sistemáticamente cómo las diferentes proporciones de parafina y el efecto de la matriz porosa afectan el proceso de fusión y solidificación, incluyendo posibles desplazamientos en los rangos de temperatura de transición.

1.7.2. Operacionalización de las variables

Se definieron las siguientes operacionalizaciones:

Capacidad de almacenamiento de energía térmica:

- Definición conceptual: Propiedad que determina la cantidad de energía térmica que un material puede absorber, almacenar y liberar por unidad de masa durante procesos de calentamiento, cambio de fase y enfriamiento.
- Definición operacional: Se mide cuantitativamente en julios por gramo (J/g) utilizando Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC), evaluando precisamente la

cantidad de energía térmica almacenada durante los procesos de fusión y solidificación de la parafina en el compuesto.

- Instrumento de medición: Calorímetro Diferencial de Barrido (DSC), operando en un rango de temperaturas controlado de 30°C a 80°C, con velocidad de calentamiento/enfriamiento de 5°C/min.
- Indicador: Energía almacenada (J/g).

Proporción de parafina:

- Definición conceptual: Relación másica entre la cantidad de parafina (PCM) y la cantidad total de material compuesto.
- Definición operacional: Se expresa como porcentaje del peso total del compuesto parafina-diatomita, o como relación másica directa, considerando proporciones de parafina que varían entre P:0,5-D:1,5 y P:2,4-D:2 para determinar la concentración óptima.
- Instrumento de medición: Balanza analítica de precisión (± 0.0001 g) para obtener la masa exacta de parafina y diatomita en cada muestra experimental.
- Indicador: Porcentaje en peso (%), relación másica parafina.

Encapsulación de la parafina:

- Definición conceptual: Proceso por el cual la parafina se incorpora y distribuye dentro de la estructura porosa de la diatomita, quedando retenida en los microporos del material.
- Definición operacional: Se mide mediante análisis combinado de Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) y Espectroscopía de Energía Dispersiva (EDS), para cuantificar y visualizar la distribución espacial de la parafina en los poros de la diatomita.
- Instrumento de medición: SEM y EDS para la caracterización morfológica y elemental de la encapsulación.
- Indicador: Distribución de parafina en los poros.

Temperatura de fusión de la parafina:

- Definición conceptual: Temperatura a la cual la parafina cambia de estado sólido a líquido, absorbiendo energía en forma de calor latente.
- Definición operacional: Se mide como el punto o rango de temperatura en que la parafina experimenta su cambio de fase desde estado sólido a líquido, identificado mediante el pico endotérmico en el análisis de DSC.
- Instrumento de medición: Calorímetro Diferencial de Barrido (DSC), operando en el rango de temperaturas de 30 °C a 80 °C, con velocidad de calentamiento controlada de 5 °C/min para garantizar equilibrio térmico.
- Indicador: Temperatura de fusión (°C).

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Revisión de la Literatura

2.1.1. Diatomita como material de soporte

La diatomita es una roca sedimentaria formada principalmente por restos fosilizados de diatomeas, microorganismos unicelulares acuáticos cuyos esqueletos de sílice amorfa se depositan progresivamente en el fondo de cuerpos de agua. Este material excepcional se caracteriza por su elevada porosidad, baja densidad y extensa superficie específica, propiedades que le confieren una extraordinaria capacidad de absorción y adsorción. Estas características distintivas han convertido a la diatomita en un material ampliamente utilizado en diversas aplicaciones industriales, incluyendo filtración avanzada, producción de productos químicos especializados y agricultura tecnificada. Además, ha demostrado ser un soporte excepcionalmente eficaz en el almacenamiento de energía térmica cuando se combina con materiales de cambio de fase (PCM) como la parafina (Moreno-Maroto et al., 2022; Zuo & Li, 2014).

En aplicaciones de almacenamiento térmico, la estructura microporosa de la diatomita facilita una encapsulación óptima de los PCM, promoviendo una distribución homogénea del material y mejorando significativamente la transferencia de calor, lo que incrementa notablemente la eficiencia energética del sistema. Esta capacidad de optimizar las propiedades térmicas del PCM ha sido corroborada por múltiples estudios que demuestran cómo la extensa área superficial de la diatomita potencia la interacción térmica y aumenta la durabilidad del sistema, previniendo eficazmente la fuga de material durante los repetidos ciclos de fusión y solidificación (Alyosef et al., 2014; Aw et al., 2012).

Las propiedades que hacen a la diatomita un material idóneo para el almacenamiento térmico incluyen:

- Alta porosidad interconectada (60-85 %), que facilita la encapsulación eficiente y estable de los PCM (Moreno-Maroto et al., 2022).

- Extensa superficie específica (20-200 m²/g), que retiene el PCM de manera eficaz, mejorando la capacidad de almacenamiento térmico (Farid et al., 2021).
- Baja densidad aparente (0,2-0,5 g/cm³), que reduce considerablemente los costos de procesamiento y transporte, mejorando la viabilidad económica (Li et al., 2014).
- Excepcional estabilidad térmica y química, que garantiza la durabilidad durante múltiples ciclos térmicos, incluso en condiciones operativas exigentes (Alyosef et al., 2014).

La diatomita también destaca por su amplia disponibilidad y bajo costo relativo, lo que la convierte en una opción particularmente viable para aplicaciones a gran escala. En Perú, la diatomita de Jalorapampa ha sido reconocida por su extraordinaria pureza y disponibilidad, lo que refuerza su potencial para optimizar la eficiencia en sistemas de almacenamiento de energía térmica destinados a aplicaciones tanto industriales como residenciales (Sacari Sacari, 2023; Tejada Bedoya, 2019).

2.1.2. Materiales de cambio de fase (PCM) y su importancia

Los PCM son sustancias especializadas que almacenan y liberan grandes cantidades de energía térmica al experimentar cambios de fase, generalmente entre estado sólido y líquido. Esta propiedad los convierte en una solución estratégica para aplicaciones de almacenamiento de energía térmica, particularmente en sistemas solares y de climatización pasiva. La parafina destaca como uno de los PCM más ampliamente utilizados, debido a su excepcional capacidad para absorber calor durante el proceso de fusión y liberarlo controladamente durante la solidificación, lo que la hace particularmente efectiva, para equilibrar las fluctuaciones de temperatura y proporcionar una fuente estable y confiable de energía térmica (Sharma et al., 2009; Nazir et al., 2019).

Sin embargo, los PCM orgánicos como la parafina presentan una limitación significativa: su baja conductividad térmica intrínseca (típicamente 0,2-0,4 W/m·K). Para superar esta restricción y optimizar su eficiencia, se ha investigado extensamente la encapsulación en materiales porosos como la diatomita, estrategia que incrementa significativamente la transferencia de calor y mejora la durabilidad de los sistemas de almacenamiento (Xu & Li, 2013). Esta encapsulación, no solo potencia el rendimiento

térmico del PCM, sino que también prolonga considerablemente su vida útil operativa, haciéndolo sustancialmente más adecuado para aplicaciones industriales y sistemas solares que requieren operación continua durante largos periodos (Farid et al., 2021; Li et al., 2014).

2.1.3. Aplicación de la diatomita en sistemas de almacenamiento de energía

La diatomita ha demostrado ser un material de soporte excepcionalmente eficaz en sistemas de almacenamiento de energía térmica. Su estructura altamente porosa y extensa superficie específica facilitan significativamente la encapsulación óptima de PCM, como la parafina, mejorando notablemente la transferencia de calor y aumentando la estabilidad térmica del sistema compuesto (Moreno-Maroto et al., 2022; Zuo & Li, 2014).

Un estudio pionero realizado por Li et al. (2014) evidenció cómo la encapsulación controlada de parafina en diatomita incrementaba significativamente la eficiencia térmica del sistema resultante. La estructura microporosa interconectada de la diatomita permite una absorción y liberación de calor sustancialmente mejoradas, prolongando simultáneamente la vida útil operativa del material. Investigaciones complementarias, como las realizadas por Qian et al. (2015), confirman que la incorporación estratégica de diatomita, no solo optimiza la capacidad de almacenamiento energético, sino que también reduce considerablemente la fuga del PCM durante los ciclos térmicos, aumentando significativamente la durabilidad y confiabilidad del sistema (Nazir et al., 2019).

La diatomita de Jalorapampa, en particular, ha demostrado ser un recurso estratégico en Perú, proporcionando una opción económicamente viable y ambientalmente sostenible para diversas aplicaciones industriales, con especial potencial en sistemas solares térmicos de baja y media temperatura (Tejada Bedoya, 2019).

2.1.4. Encapsulación y mejora de propiedades térmicas

La encapsulación eficiente de PCM constituye un factor crítico para optimizar la estabilidad térmica y prevenir la fuga del material durante los repetidos ciclos de cambio de fase. La microencapsulación representa una técnica ampliamente implementada para mejorar significativamente la durabilidad y la eficiencia térmica de los PCM al confinarlos en una matriz porosa, como la diatomita, o en estructuras poliméricas especialmente diseñadas (Farid et al., 2021; Khan et al., 2019).

Investigaciones recientes han demostrado convincentemente que la microencapsulación de parafina en materiales microporosos, como la diatomita, no solo mejora sustancialmente la conductividad térmica efectiva, sino que también reduce significativamente la degradación del material encapsulado, incrementando su eficiencia para aplicaciones de almacenamiento energético a largo plazo en condiciones operativas reales (Li et al., 2014; Nazir et al., 2019).

2.1.5. Diatomita de Jalorapampa

La diatomita de Jalorapampa, ubicada en la región de Tacna, Perú, se caracteriza por su extraordinaria pureza y estructura microporosa altamente desarrollada, lo que la convierte en un material particularmente idóneo para la encapsulación efectiva de PCM como la parafina (Tejada Bedoya, 2019). Su excepcional capacidad para optimizar la transferencia de calor y estabilizar el sistema durante repetidos ciclos térmicos, ha sido documentada extensamente, posicionándola como un material estratégico para aplicaciones de almacenamiento de energía térmica en sectores diversos, como la energía solar y la climatización pasiva de edificaciones (Sacari Sacari, 2023; Moreno-Maroto et al., 2022).

La utilización de este recurso local no solo reduce significativamente los costos de producción, sino que también promueve activamente la sostenibilidad ambiental, al minimizar la necesidad de materiales sintéticos costosos y de elevado impacto ecológico, contribuyendo simultáneamente al desarrollo económico regional (Farid et al., 2021).

2.1.6. Parafina

La parafina representa uno de los PCM más ampliamente implementados, debido a su excepcional capacidad para almacenar y liberar grandes cantidades de energía térmica durante los procesos de fusión y solidificación. En este estudio, se utilizó parafina de grado industrial con una temperatura de fusión controlada en torno a los 54 °C, característica que la hace particularmente adecuada para aplicaciones de climatización pasiva y sistemas de energía solar térmica de media temperatura (Sharma et al., 2009).

La parafina presenta ventajas significativas en términos de capacidad de almacenamiento de energía latente (aproximadamente 200-250 J/g) y estabilidad química durante ciclos prolongados, pero su relativamente baja conductividad térmica (0,2-0,4 W/m·K) continúa representando un desafío técnico relevante. La encapsulación estratégica de la parafina en materiales microporosos, como la diatomita, ha demostrado ser una solución particularmente efectiva para mejorar significativamente la transferencia de calor y la estabilidad durante los ciclos térmicos repetitivos (Xu & Li, 2013; Farid et al., 2021).

2.1.7. Combinación parafina-diatomita

La integración sinérgica de parafina y diatomita ha demostrado ser una solución excepcionalmente eficaz para superar las limitaciones inherentes a la baja conductividad térmica característica de la parafina. La encapsulación controlada de la parafina en la estructura microporosa de la diatomita, mejora simultáneamente la transferencia de calor y la estabilidad del sistema compuesto, reduciendo significativamente la fuga del material activo y prolongando considerablemente la vida útil operativa del PCM (Li et al., 2014; Qian et al., 2015).

Estudios recientes, han evidenciado que la combinación parafina-diatomita resulta particularmente efectiva en aplicaciones de energía solar térmica y climatización pasiva, donde la eficiencia y durabilidad del sistema son parámetros fundamentales para garantizar su rendimiento óptimo a largo plazo en condiciones operativas reales (Nazir et al., 2019; Farid et al., 2021).

2.2. Técnicas de caracterización

2.2.1. Difracción de rayos X (DRX) para el análisis estructural

La Difracción de Rayos X (DRX) constituye una técnica analítica fundamental en la caracterización de materiales sólidos cristalinos y semicristalinos, permitiendo determinar con precisión la estructura cristalográfica de un compuesto al medir la distribución angular de la radiación dispersada por los átomos que componen la muestra. Esta técnica avanzada se fundamenta en la ley de Bragg, que establece una relación matemática entre el ángulo de difracción, la longitud de onda de los rayos X incidentes y la distancia interplanar en la red cristalina del material analizado. Por consiguiente, la DRX resulta crucial para la identificación inequívoca de fases cristalinas y la evaluación precisa de parámetros de celda unitaria (Cullity & Stock, 2014). En el caso específico de la diatomita, la DRX permite confirmar la presencia de fases cristalinas de sílice y evaluar sistemáticamente cómo la parafina se incorpora en la matriz porosa, información fundamental para comprender la interacción estructural entre ambos materiales (Li et al., 2014; Moreno-Maroto et al., 2022).

2.2.2. Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) para el análisis morfológico

La Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) representa una técnica de caracterización ampliamente implementada para analizar detalladamente la morfología superficial de los materiales a escala micro y nanométrica. Esta tecnología utiliza un haz focalizado de electrones de alta energía que interactúa con la superficie de la muestra, generando imágenes de extraordinaria resolución que revelan información topográfica y estructural con precisión nanométrica. El SEM permite observar con gran detalle el tamaño, forma y distribución de las partículas, así como las texturas superficiales y microestructuras internas cuando se combina con técnicas de preparación específicas (Goldstein et al., 2018). Esta técnica resulta esencial para examinar minuciosamente la estructura microporosa característica de la diatomita y la distribución espacial de la parafina encapsulada en sus poros, confirmando la efectividad de la encapsulación y verificando la distribución homogénea del PCM dentro de la matriz porosa. Adicionalmente, el SEM permite identificar potenciales aglomeraciones, defectos

estructurales o discontinuidades en el material compuesto que podrían afectar negativamente su desempeño térmico en aplicaciones prácticas (Zuo & Li, 2014; Farid et al., 2021).

2.2.3. Espectroscopía de Energía Dispersiva (EDS) para la composición elemental

La Espectroscopía de Energía Dispersiva (EDS) constituye una técnica analítica complementaria al SEM, que permite realizar análisis cualitativos y cuantitativos precisos de los elementos químicos presentes en una muestra. Durante la interacción del haz de electrones del SEM con la muestra analizada, se generan rayos X característicos cuya energía es específica de los elementos presentes en la zona irradiada. Estos rayos X son detectados y analizados por el espectrómetro EDS, proporcionando información detallada sobre la composición elemental y su distribución espacial. Esta técnica resulta fundamental en estudios de materiales, especialmente para la identificación de impurezas y la caracterización de la distribución de elementos en diversas fases (Echlin, 2009). En el contexto específico de esta investigación, el EDS es particularmente útil para verificar la pureza de la diatomita de Jalorapampa y confirmar que la composición del compuesto parafina-diatomita presenta la homogeneidad requerida, descartando la presencia de contaminantes que pudieran comprometer sus propiedades térmicas en aplicaciones prácticas (Aw et al., 2012; Khan et al., 2019).

2.2.4. Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC) para la evaluación de las propiedades térmicas

La Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC) representa una técnica termoanalítica avanzada, ampliamente utilizada para evaluar con precisión las propiedades térmicas de diversos materiales. Esta metodología mide la diferencia en el flujo de calor hacia una muestra en comparación con una referencia inerte, en función de la temperatura programada. Resulta particularmente valiosa para estudiar transiciones de fase como fusión, cristalización y transiciones vítreas, así como para determinar cuantitativamente la capacidad calorífica específica de los materiales analizados (He & Wang, 2024). El DSC permite cuantificar con exactitud la cantidad de energía absorbida y liberada durante los procesos de cambio de fase, información crucial para evaluar la

eficacia de los compuestos como materiales de almacenamiento de energía térmica. Esta técnica reviste especial importancia para determinar la capacidad real de almacenamiento energético del compuesto parafina-diatomita y evaluar su viabilidad para aplicaciones específicas en energía solar y climatización pasiva (Nazir et al., 2019; Sharma et al., 2009).

2.3. Conceptos clave

2.3.1. Porosidad

La porosidad se define como la capacidad intrínseca de un material para contener espacios vacíos o poros en su estructura tridimensional, que facilitan la absorción y retención de otros materiales. En el caso específico de la diatomita, su elevada porosidad (típicamente 60-85 %) constituye una de sus propiedades más relevantes y distintivas, ya que facilita significativamente la encapsulación efectiva de materiales de cambio de fase (PCM) como la parafina. Esta característica estructural permite una distribución homogénea del PCM dentro de los microporos interconectados, lo que optimiza la absorción y liberación de calor durante los ciclos térmicos, incrementando notablemente la eficiencia de los sistemas de almacenamiento energético (Moreno-Maroto et al., 2022). Investigaciones recientes han demostrado convincentemente que esta microporosidad también mejora significativamente la transferencia térmica al aumentar sustancialmente el área de contacto efectiva entre el PCM y el entorno circundante, lo que incrementa la velocidad de absorción y liberación de energía térmica (Li et al., 2014). Adicionalmente, la porosidad controlada resulta fundamental para prevenir eficazmente la fuga del PCM durante los repetidos ciclos de cambio de fase, garantizando la estabilidad estructural y funcional del sistema a largo plazo (Zuo & Li, 2014).

2.3.2. Capacidad Térmica

La capacidad térmica es la cantidad de energía que un material puede almacenar o liberar por unidad de temperatura, lo que resulta esencial en aplicaciones de almacenamiento de energía térmica. Los materiales de cambio de fase (PCM), como la parafina, son reconocidos por su alta capacidad térmica. Este material puede almacenar grandes cantidades de energía latente durante el proceso de fusión y liberar dicha energía

cuando se solidifica, lo que lo convierte en un componente clave para la eficiencia de sistemas de almacenamiento térmico (Sharma et al., 2009). La capacidad térmica de los PCM permite equilibrar las fluctuaciones de temperatura en aplicaciones como la energía solar y la climatización, asegurando una fuente estable de energía térmica (Farid et al., 2021). En estudios de encapsulación con diatomita, se ha observado que la combinación de la alta porosidad de la diatomita con la elevada capacidad térmica de la parafina optimiza significativamente la eficiencia de los sistemas de almacenamiento térmico (Xu & Li, 2013).

2.3.3. Encapsulación

La encapsulación constituye un proceso tecnológico mediante el cual un material activo, como la parafina, es confinado estratégicamente dentro de otro material, como la diatomita, con el objetivo primordial de optimizar sus propiedades térmicas y estructurales para aplicaciones específicas. En el contexto particular del almacenamiento de energía térmica, la encapsulación controlada de PCM mejora significativamente la transferencia de calor al incrementar sustancialmente el área de contacto efectiva entre el PCM y su entorno (Li et al., 2014). Adicionalmente, la encapsulación en materiales microporosos, como la diatomita, contribuye decisivamente a estabilizar el PCM, previniendo eficazmente su fuga durante los ciclos térmicos repetitivos y prolongando considerablemente la vida útil operativa del sistema (Farid et al., 2021). Este proceso no solo optimiza la conductividad térmica efectiva, sino que también protege el PCM contra la degradación química y térmica, factor crucial para aplicaciones que requieren operación continua durante periodos prolongados (Nazir et al., 2019). Múltiples investigaciones han evidenciado que técnicas avanzadas, como la microencapsulación controlada, incrementan sustancialmente la estabilidad y eficiencia del sistema compuesto, posicionando este enfoque como una solución tecnológicamente viable y económicamente factible para aplicaciones industriales de almacenamiento de energía térmica en diversos sectores (Xu & Li, 2013; Khan et al., 2019).

2.4. Estado del Arte

El almacenamiento eficiente de energía térmica ha adquirido una relevancia estratégica en el contexto global de la transición hacia sistemas energéticos basados predominantemente en fuentes renovables, con particular énfasis en aplicaciones solares térmicas y sistemas de climatización pasiva. Los materiales de cambio de fase (PCM) han emergido como una solución particularmente prometedora para estos sistemas, debido a su extraordinaria capacidad para almacenar y liberar grandes cantidades de energía térmica durante sus transiciones de fase, típicamente entre estados sólido y líquido. Sin embargo, uno de los principales desafíos técnicos que enfrentan los PCM convencionales es su relativamente baja conductividad térmica intrínseca (generalmente 0,2-0,4 W/m·K), característica que limita su capacidad para transferir rápida y eficientemente el calor, comprometiendo potencialmente su eficiencia en aplicaciones industriales a gran escala que requieren respuesta térmica rápida (Nazir et al., 2019; Sharma et al., 2009).

Para superar esta limitación fundamental, se han desarrollado y optimizado diversas técnicas avanzadas de encapsulación que buscan mitigar eficazmente estos inconvenientes operativos. La encapsulación estratégica de PCM en materiales microporosos, como la diatomita, ha demostrado ser una aproximación particularmente efectiva para mejorar simultáneamente la transferencia térmica y la estabilidad estructural de estos materiales compuestos. La diatomita, un material natural constituido principalmente por sílice amorfa procedente de microorganismos fosilizados, presenta una estructura microporosa altamente desarrollada que facilita significativamente la distribución homogénea de PCM en sus numerosos poros interconectados. Esta característica no solo optimiza la conductividad térmica efectiva del sistema, sino que también prolonga considerablemente su vida útil operativa al reducir la degradación del PCM durante repetidos ciclos térmicos (Li et al., 2014; Qian et al., 2015). En el ámbito específico del almacenamiento térmico, estas propiedades sinérgicas convierten a la combinación parafina-diatomita en un enfoque particularmente eficaz para incrementar la eficiencia del almacenamiento energético en aplicaciones prácticas diversas.

Estudios detallados realizados por Moreno-Maroto et al. (2022) y Alyosef et al. (2014) han demostrado convincentemente que la encapsulación controlada de PCM en

diatomita no solo mejora significativamente la transferencia térmica, sino que también reduce sustancialmente la fuga de material activo, uno de los problemas recurrentes en sistemas basados exclusivamente en PCM puros sin encapsulación. La microporosidad característica de la diatomita actúa como una barrera física efectiva que impide la fuga del PCM durante los repetidos ciclos de fusión y solidificación, lo que mejora considerablemente la durabilidad y confiabilidad del sistema en aplicaciones de largo plazo, como plantas solares térmicas y sistemas avanzados de climatización. Esta encapsulación estratégica también favorece la absorción y liberación controlada de calor, optimizando el rendimiento térmico integral y minimizando significativamente las pérdidas energéticas durante la operación (Moreno-Maroto et al., 2022).

Otro aspecto clave en la investigación contemporánea es la viabilidad económica de utilizar recursos locales, como la diatomita de Jalorapampa en Tacna, Perú, para la encapsulación eficiente de PCM. La diatomita de esta región ha sido estudiada exhaustivamente por su extraordinaria pureza y su estructura microporosa altamente desarrollada, características que la convierten en un material particularmente idóneo para encapsular parafina y otros PCM similares. Según Tejada Bedoya (2019), la utilización de diatomita local no solo resulta económicamente viable, sino que también reduce significativamente la huella de carbono asociada a los sistemas de almacenamiento de energía térmica, alineándose perfectamente con los principios fundamentales de la sostenibilidad y la economía circular. El aprovechamiento estratégico de recursos naturales disponibles localmente no solo reduce considerablemente los costos de transporte, sino que también contribuye decisivamente a la independencia energética de las regiones productoras, generando simultáneamente oportunidades de desarrollo económico regional (Sacari Sacari, 2023).

Las investigaciones sobre la encapsulación optimizada de PCM también han explorado sistemáticamente materiales alternativos como la sílice sintética y diversos polímeros especializados, buscando mejorar simultáneamente la conductividad térmica efectiva y la estabilidad estructural a largo plazo. La microencapsulación avanzada, en particular, ha demostrado ser una técnica excepcionalmente eficaz para optimizar las propiedades térmicas de los PCM en aplicaciones específicas. Nazir et al. (2019) señalan

que la microencapsulación permite confinar el PCM en partículas de tamaño micrométrico controlado, lo que incrementa sustancialmente el área de contacto térmico efectiva y mejora significativamente la transferencia de calor, reduciendo simultáneamente la fuga de material activo durante la operación. Esta técnica ha sido aplicada exitosamente tanto con materiales microporosos naturales como con polímeros sintéticos especializados, mostrando resultados particularmente prometedores en aplicaciones solares térmicas y sistemas de climatización pasiva (Nazir et al., 2019).

Li et al. (2014) y Qian et al. (2015) han destacado que la combinación sinérgica de parafina con diatomita no solo optimiza la capacidad de almacenamiento energético, sino que también incrementa significativamente la durabilidad del sistema compuesto al reducir la degradación del PCM y mejorar su estabilidad estructural durante la operación prolongada. Estos estudios también han subrayado la importancia estratégica de la encapsulación optimizada para maximizar la eficiencia de los sistemas de almacenamiento de energía solar térmica, donde la fluctuación inherente de la energía generada durante el ciclo diurno puede ser gestionada eficazmente mediante un almacenamiento térmico de alta eficiencia, permitiendo una liberación controlada y predecible de energía durante periodos nocturnos o en condiciones de baja irradiación solar.

Además de las mejoras significativas en la eficiencia térmica y la durabilidad operativa, la utilización de diatomita como matriz de encapsulación también tiene un impacto positivo relevante en la sostenibilidad ambiental del sistema. Al ser un material natural, abundante y de costo relativamente bajo, la diatomita se posiciona como una solución particularmente atractiva para reducir el impacto ecológico de los sistemas de almacenamiento de energía en diversas aplicaciones. Según Farid et al. (2021), la utilización de materiales como la diatomita en combinación estratégica con PCM ofrece una alternativa significativamente más sostenible frente a otros materiales sintéticos que presentan mayor costo de producción y superior impacto ambiental durante su ciclo de vida. El aprovechamiento racional de la diatomita no solo reduce la dependencia de materiales importados, sino que también refuerza la independencia energética de las

regiones que cuentan con este recurso natural estratégico (Tejada Bedoya, 2019; Sacari Sacari, 2023).

La investigación actual sobre el uso optimizado de PCM y su encapsulación en materiales microporosos ha mostrado avances significativos hacia el desarrollo de sistemas de almacenamiento de energía progresivamente más eficientes, duraderos y sostenibles. Estos desarrollos no solo han permitido mejorar sustancialmente el rendimiento térmico de los PCM convencionales, sino que también han establecido bases sólidas para la implementación de tecnologías energéticas más responsables desde perspectivas ambientales y económicas. La combinación sinérgica de parafina y diatomita ha demostrado consistentemente ser una solución particularmente eficaz para aplicaciones solares térmicas y sistemas de climatización pasiva, donde la eficiencia energética y la sostenibilidad ambiental constituyen factores críticos para el éxito a largo plazo de los sistemas de almacenamiento térmico en contextos reales de operación (Farid et al., 2021; Nazir et al., 2019; Qian et al., 2015).

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Tipo, nivel y diseño de la investigación

3.1.1. Tipo de investigación

La presente investigación se clasifica como experimental, ya que se manipuló deliberadamente la variable independiente —la proporción de parafina incorporada en la diatomita— para observar su efecto sobre las propiedades térmicas y estructurales del material compuesto. Este enfoque permite establecer relaciones de causalidad bajo condiciones controladas, característica fundamental de los estudios experimentales en ingeniería (Montgomery, 2012).

Además, se adoptó un enfoque cuantitativo, dado que se recolectaron y analizaron datos numéricos mediante técnicas instrumentales como la Difracción de Rayos X (DRX), Microscopía Electrónica de Barrido (SEM), Espectroscopía de Energía Dispersiva (EDS) y Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC), lo que permitió una evaluación objetiva y precisa de las propiedades del material.

3.1.2. Nivel de investigación

El estudio se enmarca en el nivel explicativo, ya que busca identificar las causas que originan los cambios observados en las propiedades térmicas y estructurales del compuesto parafina-diatomita. Este nivel de investigación no solo describe y correlaciona fenómenos, sino que profundiza en la comprensión de los mecanismos subyacentes que los generan, siendo esencial en el desarrollo de soluciones ingenieriles fundamentadas (Creswell, 2014).

3.1.3. Diseño de investigación

Se empleó un diseño preexperimental, específicamente de un solo grupo con medición posterior. Este diseño implica la aplicación de un tratamiento a un único grupo y la evaluación de sus efectos sin la comparación con un grupo control. Aunque presenta

limitaciones en términos de control de variables externas, es adecuado para estudios exploratorios donde se busca obtener evidencia preliminar sobre la efectividad de una intervención o tratamiento (Campbell & Stanley, 1963).

En este contexto, se prepararon diferentes formulaciones de parafina-diatomita y se evaluaron sus propiedades térmicas y estructurales después del tratamiento, lo que permitió analizar la viabilidad técnica del material compuesto en condiciones controladas de laboratorio.

3.2. Materiales y equipos

En este estudio se utilizaron dos materiales principales como base para la preparación de los compuestos:

- a) **Diatomita de Jalorapampa:** La diatomita natural fue recolectada directamente en la localidad de Jalorapampa, ubicada específicamente en las coordenadas geográficas 17°30'17,3"S 69°29'28,6"W, dentro del distrito de Palca, en la región de Tacna, Perú. Según el estudio exhaustivo realizado por Tejada et al. (2019), este yacimiento cuenta con un potencial estimado de 5 082 647 toneladas de material explotable. Las muestras utilizadas en esta investigación fueron extraídas cuidadosamente de una profundidad controlada de 40 cm para garantizar su pureza y representatividad (Moreno-Maroto et al., 2022; Sacari Sacari, 2023).
- b) **Parafina:** Se empleó parafina plástica de grado industrial, específicamente seleccionada por sus propiedades adecuadas para sistemas de cambio de fase, en aplicaciones de almacenamiento térmico. La parafina utilizada presenta un punto de fusión característico de 54 ± 1 °C, propiedad que la hace particularmente adecuada para aplicaciones de climatización pasiva y sistemas solares térmicos de baja temperatura.

Adicionalmente, se utilizó agua ultrapura (resistividad $>18,2$ M Ω ·cm) para todos los procesos de lavado y preparación de las muestras, garantizando así, la eliminación de potenciales contaminantes que pudieran afectar las propiedades del material final.

Para la caracterización exhaustiva de los materiales y compuestos preparados, se emplearon los siguientes equipos especializados:

- a) Difractómetro de Rayos X:** El análisis de difracción de rayos X (DRX) se realizó utilizando un difractómetro equipado con un tubo de rayos X con ánodo de cobre ($\text{Cu-K}\alpha$, $\lambda=1,5406 \text{ \AA}$), operando en condiciones optimizadas a una tensión de 40 kV y una corriente de 30 mA. Los patrones de difracción fueron registrados en un rango angular (2θ) de 5° a 80° , con un paso angular controlado de $0,02^\circ$ para garantizar alta resolución y precisión en la identificación de fases cristalinas.
- b) Microscopio Electrónico de Barrido (SEM):** La morfología superficial y microestructura de las muestras fueron analizadas mediante un microscopio electrónico de barrido por emisión de campo (FE-SEM) modelo Quattro S de Thermo Scientific. Las muestras fueron preparadas mediante recubrimiento metálico y colocadas en la cámara de vacío, activando las bombas para obtener condiciones de alto vacío ($\approx 10^{-5} \text{ Pa}$). El haz de electrones fue acelerado aplicando un voltaje optimizado de 30 kV para obtener imágenes de alta resolución que permitieran visualizar claramente la estructura porosa de la diatomita y la distribución de la parafina en el material compuesto.
- c) Espectroscopía de Energía Dispersiva (EDS):** El análisis cuantitativo y cualitativo de la composición elemental de las muestras se llevó a cabo utilizando un detector de espectroscopía de energía dispersiva (EDS) acoplado al SEM. El detector fue operado en modo de barrido puntual, analizando múltiples regiones representativas en cada muestra para garantizar una evaluación estadísticamente significativa de la composición. Esta técnica permitió confirmar la presencia y distribución de los elementos constituyentes principales (Si, O, C) y detectar posibles impurezas.
- d) Calorímetro Diferencial de Barrido (DSC):** Para la evaluación precisa de las propiedades térmicas, se utilizó un calorímetro diferencial de barrido calibrado con estándares de referencia. El equipo fue operado en un rango de temperatura controlado de 30°C a 80°C , con velocidades de calentamiento/enfriamiento de $5^\circ\text{C}/\text{min}$, permitiendo caracterizar con precisión las transiciones de fase y la capacidad de almacenamiento térmico de los diferentes compuestos preparados.

3.3. Procedimiento experimental

El procedimiento experimental desarrollado para la síntesis del compuesto parafina-diatomita consistió en una serie de etapas secuenciales y controladas, comenzando con la encapsulación eficiente de parafina en la estructura porosa de la diatomita de Jalorapampa, seguido de tratamientos específicos y caracterizaciones exhaustivas para garantizar la correcta integración de los materiales y evaluar sus propiedades resultantes. A continuación, se detalla meticulosamente cada paso del procedimiento implementado.

3.3.1. Preparación de la diatomita

La diatomita fue extraída del yacimiento de Jalorapampa, Tacna, Perú, y sometida a un proceso riguroso de limpieza y purificación para eliminar impurezas naturales, como residuos orgánicos o partículas minerales no deseadas que pudieran afectar negativamente las propiedades del material final.

El protocolo detallado de purificación comprendió las siguientes etapas:

- a) Se tomó una cantidad controlada de tierra diatomita natural y se mezcló con agua ultrapura en proporción 1:10 (p/v) para facilitar la dispersión y posterior eliminación de impurezas mediante procesos físicos.
- b) La suspensión resultante fue sometida a agitación mecánica constante utilizando un agitador magnético calibrado durante un periodo optimizado de 1 hora y 30 minutos a 600 rpm, garantizando la dispersión homogénea del material.
- c) Tras la agitación, la mezcla se dejó decantar durante 45 minutos exactos, permitiendo la sedimentación de partículas más densas y la suspensión de la fracción más pura de diatomita.
- d) Cuidadosamente, se retiró el fluido sobrenadante que contenía el material diatomáceo suspendido, separándolo del sedimento que contenía impurezas más densas.
- e) Al residuo sedimentado se añadió nuevamente agua ultrapura en un vaso precipitado de un litro, continuando con la agitación de la muestra para maximizar la recuperación de diatomita pura.

- f) La suspensión resultante fue filtrada minuciosamente utilizando papel filtro cuantitativo con tamaño de poro de 2,5 μm , reteniendo las partículas de diatomita mientras permitía el paso de contaminantes solubles.
- g) El sistema de filtración se dejó operar durante toda la noche (aproximadamente 12 horas) para asegurar el filtrado completo del material.
- h) Finalmente, la muestra filtrada fue secada en un horno de convección a 105 $^{\circ}\text{C}$ hasta peso constante, y posteriormente sometida a un tratamiento térmico controlado a 600 $^{\circ}\text{C}$ durante 2 horas en atmósfera oxidante para eliminar completamente cualquier residuo orgánico y estabilizar la estructura cristalina de la diatomita (Xu & Li, 2013).

3.3.2. Encapsulación de la parafina en la diatomita

El proceso de encapsulación se realizó siguiendo un protocolo optimizado para garantizar la integración homogénea de la parafina en la matriz porosa de diatomita:

- a) Las partículas de parafina fueron reducidas mecánicamente mediante un rallador metálico previamente refrigerado para facilitar el procesamiento, obteniendo partículas con tamaño adecuado para su incorporación efectiva en los microporos de la diatomita.
- b) Las partículas de parafina se mezclaron en seco con la diatomita purificada en proporciones controladas, según las formulaciones especificadas en la Tabla 1, y se homogeneizaron inicialmente utilizando un mortero de ágata para garantizar la distribución uniforme de ambos componentes.
- c) Las mezclas homogeneizadas fueron colocadas en recipientes adecuados y sometidas a tratamiento térmico en un horno de precisión a 80 $^{\circ}\text{C}$ (temperatura superior al punto de fusión de la parafina) durante 4 horas, permitiendo la fusión completa de la parafina y su penetración en la estructura porosa de la diatomita.
- d) Para asegurar una preparación homogénea y prevenir la sedimentación o segregación de componentes, las muestras fueron agitadas manualmente cada 1,5 horas durante el tratamiento térmico.
- e) Tras completar el tiempo de tratamiento, las muestras fueron enfriadas controladamente hasta temperatura ambiente, permitiendo la solidificación gradual de la parafina dentro de la estructura porosa de la diatomita.

3.3.3. Almacenamiento y preparación de muestras para caracterización

Los compuestos parafina-diatomita finales fueron almacenados en recipientes herméticos, en un ambiente controlado seco y libre de polvo, asegurando que no estuvieran expuestos a condiciones ambientales adversas que pudieran alterar sus propiedades físicas, químicas o térmicas antes de su caracterización.

Para cada técnica de caracterización, se prepararon cuidadosamente pequeñas porciones representativas del compuesto, siguiendo protocolos específicos adecuados para cada método analítico:

- a) Para DRX: Las muestras fueron pulverizadas hasta obtener partículas de tamaño inferior a 45 μm y compactadas en portamuestras específicos para garantizar una superficie plana y homogénea que permitiera obtener patrones de difracción de alta calidad.
- b) Para SEM/EDS: Las muestras fueron montadas en soportes de aluminio utilizando cinta conductora de carbono y recubiertas con una fina capa de oro (aproximadamente 20 nm) mediante pulverización catódica para mejorar la conductividad eléctrica y prevenir efectos de carga durante la observación.
- c) Para DSC: Se prepararon muestras de 5-10 mg en cápsulas herméticas de aluminio, selladas para prevenir la pérdida de material durante los ciclos térmicos de análisis.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

4.1. Resultados de DRX

4.1.1. Análisis estructural de diatomita (DT)

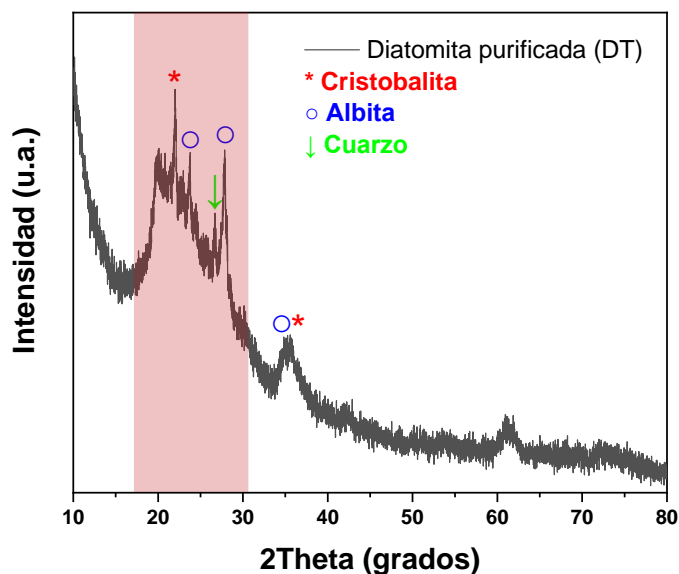
El difractograma presentado en la Figura 1 corresponde a la diatomita de Jalorapampa sometida a procesos de lavado y calcinación a 600 °C. El análisis revela claramente la presencia simultánea de materiales amorfos y cristalinos en la estructura. La región amorfa, característica fundamental de la diatomita, se manifiesta como una inflexión distintiva (hombro) localizada entre los 20° y 30° en el ángulo 2θ , confirmando la presencia de sílice amorfa como componente principal.; además, de ésta región amorfa característica, se identificaron con precisión tres fases cristalinas mayoritarias utilizando la base de datos Crystallography Open Database (COD):

- Cristobalita (COD: 1010938): Una forma cristalina de sílice (SiO_2) de alta temperatura.
- Albita (COD: 9000707): Un feldespato sódico ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) común en rocas sedimentarias.
- Cuarzo (COD: 9009666): La forma más estable y común de sílice cristalina.

La cristobalita y el cuarzo identificados son formas cristalinas de óxido de silicio (SiO_2), mientras que la albita es un aluminosilicato de sodio. Estas fases cristalinas concuerdan perfectamente con la composición silíceo típica de la diatomita de Jalorapampa, confirmando su naturaleza predominantemente silíceo y su adecuación para aplicaciones de almacenamiento térmico. Estos resultados son fundamentales para comprender el comportamiento del material como matriz de soporte para la encapsulación de PCM como la parafina.

Figura 1

Difractograma de diatomita lavada y calcinada a 600 °C



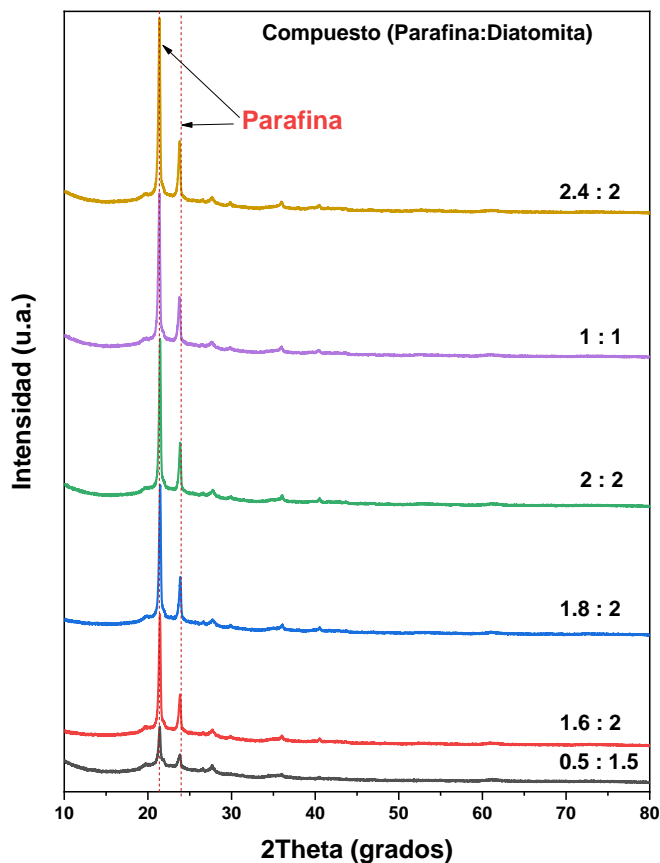
Nota. La región amorfa está claramente indicada por un hombro característico entre 20° y 30° en 2θ , típico de la estructura de sílice amorfa presente en la diatomita. Las fases cristalinas principales identificadas incluyen cristobalita (COD: 1010938), albita (COD: 9000707), y cuarzo (COD: 9009666), todas compatibles con la composición típica de la diatomita, que está compuesta principalmente por sílice.

4.1.2. Análisis estructural de diatomita - parafina

La Figura 2 muestra los difractogramas comparativos del compuesto parafina-diatomita, preparado con diferentes proporciones de parafina a diatomita, variando sistemáticamente desde P:0,5-D:1,5 hasta P:2,4-D:2. El análisis revela que los picos más intensos en los difractogramas, corresponden inequívocamente a la parafina, confirmando su correcta incorporación y encapsulación en la matriz porosa de la diatomita. La intensidad relativa de estos picos aumenta proporcionalmente con el incremento en el contenido de parafina, permitiendo verificar cuantitativamente la concentración de PCM en cada muestra.

Figura 2

Difractograma del compuesto parafina-diatomita en distintas proporciones



Nota. Difractogramas del análisis estructural del compuesto parafina-diatomita (DT) en distintas proporciones (P:0,5-D:1,5 hasta P:2,4-D:2). Los picos característicos correspondientes a la parafina se observan claramente en todas las muestras, aumentando en intensidad con la concentración de parafina, lo que indica una correcta incorporación progresiva en la matriz porosa de la diatomita.

Un hallazgo particularmente significativo del análisis por DRX es que la encapsulación de la parafina no altera sustancialmente la estructura cristalina básica de la diatomita, como se evidencia por la preservación de los picos característicos de cristobalita, albita y cuarzo. Esta conservación de la estructura cristalina garantiza la estabilidad estructural y térmica del sistema compuesto, aspecto fundamental para aplicaciones de almacenamiento de energía térmica que requieren numerosos ciclos de operación. Este análisis mediante DRX demuestra claramente que la parafina se integra eficientemente en la estructura porosa de la diatomita sin comprometer su integridad estructural, preservando así las propiedades térmicas y mecánicas necesarias para un PCM encapsulado eficiente.

4.2. Resultados de SEM y EDS

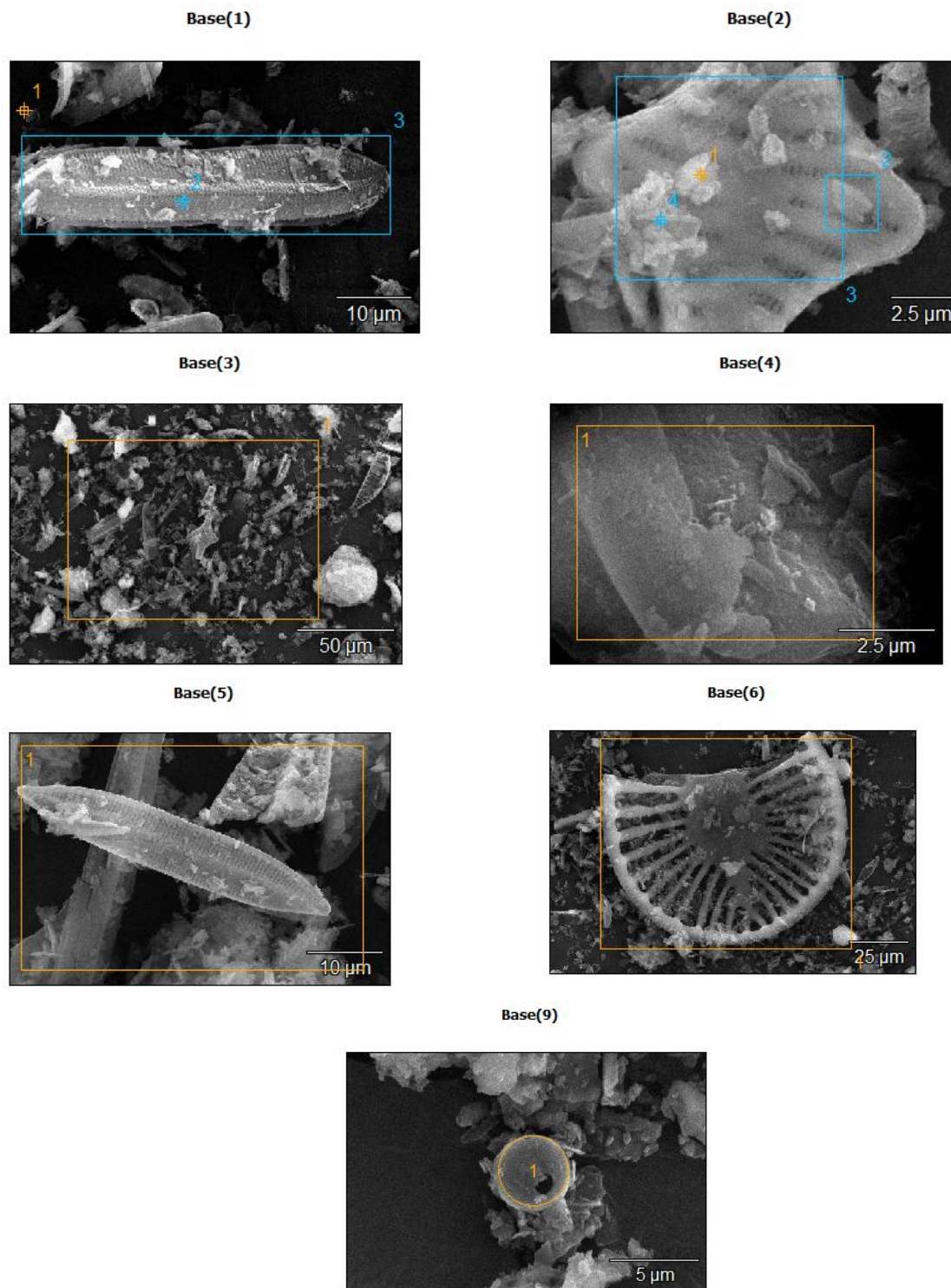
Este análisis estructural y composicional de las muestras DT, P:0,5-D:1,5, P:1,6-D:2, P:1,8-D:2, P:2-D:2 y P:2,4-D:2 fue realizado mediante Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) y Espectroscopía de Energía Dispersiva (EDS). Estas técnicas complementarias permitieron caracterizar detalladamente tanto la morfología superficial como la composición elemental de las muestras de diatomita pura y compuestos parafina-diatomita, aspectos fundamentales para evaluar su potencial en aplicaciones de almacenamiento de energía térmica, particularmente, en la encapsulación efectiva de materiales de cambio de fase (PCM).

Las imágenes obtenidas mediante SEM revelan con gran detalle la estructura superficial y la morfología porosa característica de las muestras. Esta porosidad intrincada resulta crucial para aplicaciones en encapsulación de materiales de cambio de fase (PCM), como la parafina, ya que permite una mayor superficie de contacto, facilitando significativamente la transferencia de calor y mejorando la estabilidad térmica y estructural del compuesto.

4.2.1. Análisis estructural y elemental DT

Las micrografías SEM de alta resolución de la diatomita pura (DT), presentadas en la Figura 3, revelan claramente su característica estructura microporosa tridimensional. Las imágenes muestran frústulas de diatomeas bien preservadas con morfologías predominantemente discoidales y cilíndricas, características del género *Cyclotella* frecuentemente encontrado en la diatomita de Jalorapampa. La superficie presenta una red interconectada de microporos con diámetros que oscilan entre 0,5-5 μm , distribuidos homogéneamente en toda la estructura. Esta arquitectura porosa intrincada constituye un factor determinante para la capacidad de encapsulación y retención de la parafina en las muestras compuestas.

Figura 3
 Imagen SEM de las DT Puro



Nota. Las micrografías SEM revelan en detalle la estructura microporosa característica de la diatomita: (A) DT Pura – Base (1) (aumento de 4620x) muestra frústulas completas con morfología discoidal típica; (B) DT Pura 2 – Base (2) (aumento de 14804x) exhibe en detalle la red de microporos interconectados; (C) DT Pura 3 – Base (3) a Base (9) (aumento de 1250x) presenta la distribución homogénea de estructuras silíceas con elevada porosidad.

El análisis elemental mediante EDS, cuyos resultados se presentan detalladamente en la Tabla 2, confirma que la diatomita está compuesta predominantemente por silicio (Si) y oxígeno (O), elementos constituyentes del SiO₂, que representa entre el 85-90 % de la composición total. La concentración de Si varía entre 0,55-20,26 % en peso según el punto de análisis, mientras que el O presenta valores entre 28,39-56,56 %. Esta variabilidad refleja la heterogeneidad natural del material y las diferentes microestructuras presentes en la muestra. También se detectaron cantidades menores de aluminio (Al, 0,20-5,89 %) y trazas de otros elementos, que forman parte de las impurezas naturales de este material sedimentario.

Tabla 2
Composición elemental de las muestras DT en diferentes puntos de análisis

Elemento	DT Pura			DT Pura 2				DT Pura 3				
	Base (1)			Base (2)				Base (3)	Base (4)	Base (5)	Base (6)	Base (9)
	pt1 (%)	pt2 (%)	pt3 (%)	pt1 (%)	pt2 (%)	pt3 (%)	pt4 (%)	pt1 (%)	pt1 (%)	pt1 (%)	pt1 (%)	pt1 (%)
Carbono (C)	67,53	34,30	40,89	24,40	29,98	28,96	27,82	38,07	15,05	35,12	25,32	36,67
Oxígeno (O)	28,39	52,50	48,94	56,56	52,73	53,59	53,09	49,10	52,90	49,99	50,82	43,04
Silicio (Si)	0,55	9,29	6,83	13,79	12,11	12,41	13,01	7,72	20,26	9,91	19,16	12,79
Aluminio (Al)	0,20	0,70	0,63	1,35	1,21	1,31	1,37	1,25	5,89	1,28	1,37	1,44
Oro (Au)	3,32	2,54	2,23	2,24	2,48	2,19	2,86	2,44	1,16	2,12	1,75	4,48

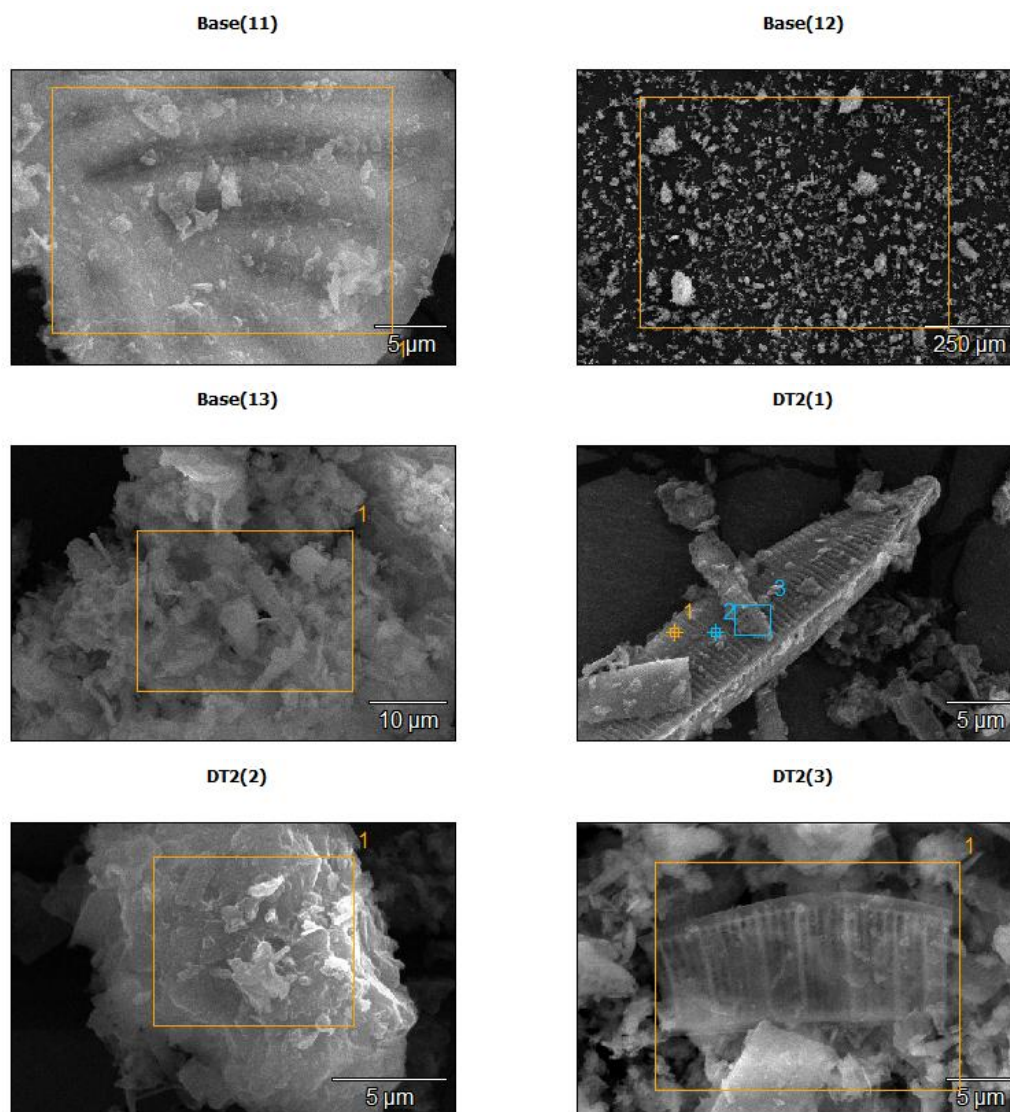
Nota. El oro (Au) detectado en las muestras proviene del recubrimiento conductor aplicado durante la preparación para mejorar la conductividad eléctrica durante el análisis SEM, y no forma parte de la composición natural de la diatomita.

La presencia significativa de carbono (C) en cantidades variables (15,05-67,53 %) puede atribuirse parcialmente a residuos orgánicos no eliminados completamente durante el proceso de purificación, así como a la cinta de carbono utilizada para fijar las muestras al portamuestras. Esta caracterización detallada de la diatomita pura establece la línea base para evaluar los cambios estructurales y composicionales tras la incorporación de parafina.

4.2.2. Análisis estructural y elemental P:0,5-D:1,5

Las micrografías SEM del compuesto P:0,5-D:1,5, presentadas en la Figura 4, evidencian los primeros indicios de la encapsulación de parafina en la estructura porosa de la diatomita. Con esta proporción inicial de parafina (25 % en peso del compuesto), se observa que algunos microporos comienzan a rellenarse, aunque la estructura general de las frústulas de diatomeas permanece claramente reconocible.

Figura 4
Imagen SEM de la muestra P:0,5-D:1,5



Nota. La imagen SEM revela la estructura porosa característica de la diatomita, encapsulada con parafina. (A) Base (11) (aumento de 8081x), (B) Base (12) (aumento de 200x), (C) Base (13) (aumento de 4362x), (D) DT2(1) (aumento de 7500x), (E) DT2(2) (aumento de 12899x), (F) DT2(3) (aumento de 7500x).

El análisis EDS de esta muestra (Tabla 3) revela un incremento significativo en el contenido de carbono (16,36-51,25 %) en comparación con algunas regiones de la diatomita pura, confirmando la presencia de parafina. La distribución del carbono no es completamente homogénea, lo que indica que la encapsulación en esta proporción es parcial y localizada principalmente en macroporos superficiales. Los contenidos de silicio (3,85-33,37 %) y oxígeno (40,90-53,32 %) siguen siendo significativos, evidenciando que la estructura básica de la diatomita permanece intacta y continúa siendo el componente estructural predominante en esta formulación.

Tabla 3

Composición elemental de las muestras P:0,5-D:1,5 en diferentes puntos de análisis

Elemento	Base	Base	Base	DT2(1)			DT2(2)	DT2(3)	DT2(4)	
	(11)	(12)	(13)	pt1	pt2	pt3	pt1	pt1	pt1	pt2
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
Carbono (C)	29,95	47,11	30,70	42,01	35,10	32,76	21,19	16,36	23,14	51,25
Oxígeno (O)	49,56	42,38	47,67	48,22	52,54	53,32	47,57	40,93	45,42	40,90
Magnesio (Mg)	0,37	0,54	1,33	0,28	0,25	0,35	0,32	1,80	1,73	0,40
Aluminio (Al)	0,71	1,10	2,04	0,44	0,42	0,68	1,08	3,29	2,95	0,54
Silicio (Si)	17,97	6,43	14,94	6,75	9,18	10,37	27,63	33,37	22,79	3,85
Potasio (K)	0,10	0,12	0,25	0,06	-	-	0,31	0,62	0,48	-
Calcio (Ca)	0,12	-	0,24	-	-	-	-	0,78	0,50	-
Hierro (Fe)	0,21	0,39	0,70	-	-	0,40	0,14	2,39	1,72	0,37
Oro (Au)	1,01	1,94	1,54	2,24	2,51	2,53	0,98	-	1,27	2,69

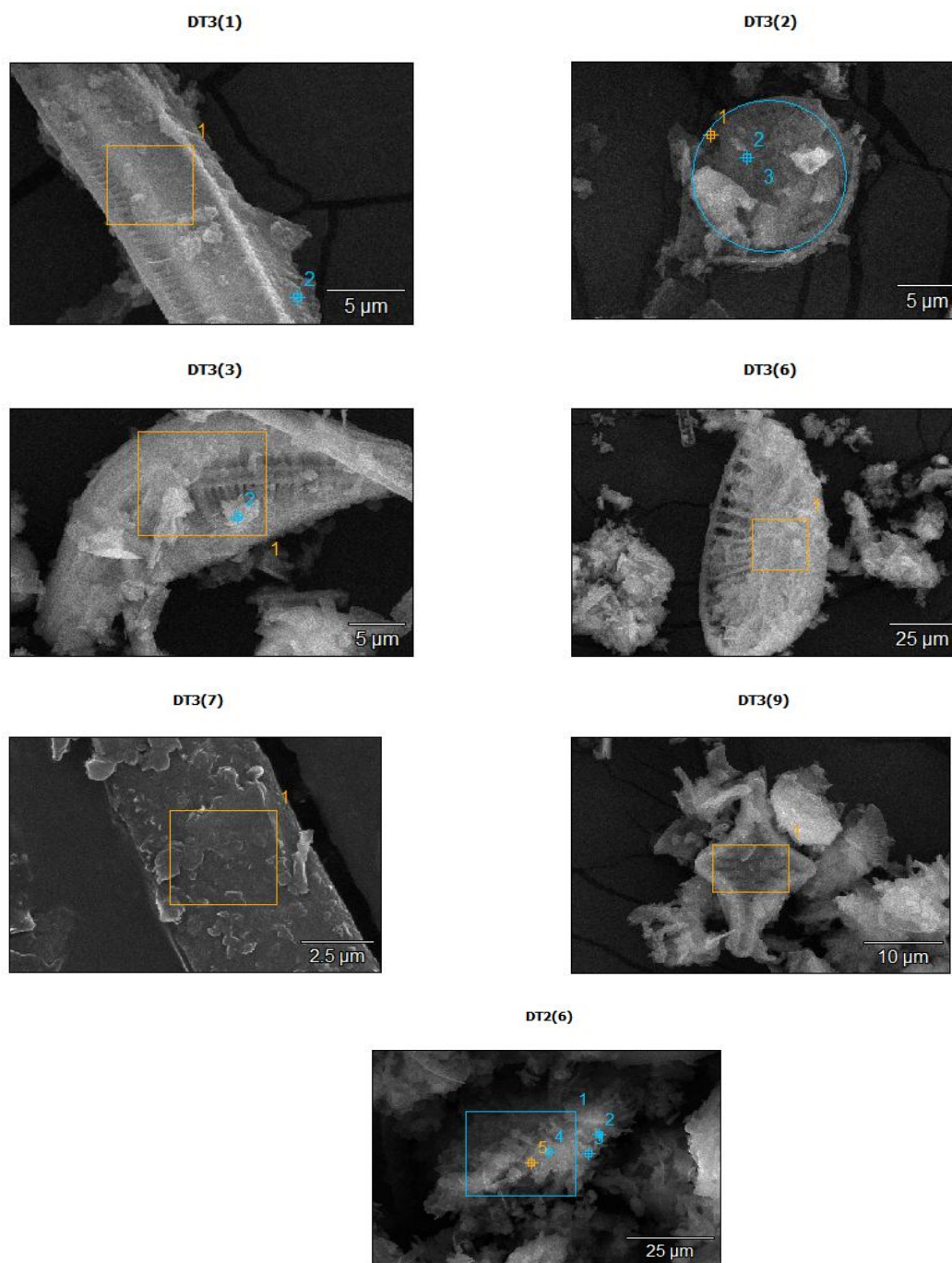
Nota. El contenido de oro (Au) en todas las muestras se debe al recubrimiento aplicado para mejorar la conductividad eléctrica durante el análisis SEM.

4.2.3. Análisis estructural y elemental de P:1,6-D:2

Al incrementar la proporción de parafina a P:1,6-D:2 (44,4 % de parafina en peso), las micrografías SEM (Figura 5) revelan cambios morfológicos más pronunciados. Se observa una mayor ocupación de los microporos por la parafina y la formación de películas delgadas que recubren parcialmente las estructuras de diatomita. Esta

distribución más extensa de la parafina contribuye a mejorar la interacción térmica entre ambos componentes.

Figura 5
Imagen SEM de la muestra P:1,6-D:2



Nota. Las micrografías evidencian mayor infiltración de parafina: (A) DT3(1) (aumento de 9779x) muestra microporos mayoritariamente ocupados; (B) DT3(2) (aumento de 7500x) revela formación de películas de parafina; (C) DT3(3) (aumento de 7018x), (D) DT3(6) (aumento de 1693x), (E) DT3(7) (aumento de 19571x), (F) DT3(9) (aumento de 5182x), (G) DT3(10) (aumento de 2525x) exhiben diferentes grados de integración parafina-diatomita, con cavidades bien definidas aún visibles

El análisis elemental mediante EDS (Tabla 4) confirma el aumento sustancial en el contenido de carbono (30,27-44,23 %), característico de la parafina, mientras el contenido de silicio disminuye proporcionalmente (6,62-38,07 %) en comparación con la muestra anterior. Particularmente notable es la reducción en el contenido de oxígeno en algunos puntos de análisis (22,77-49,38 %), lo que indica una mayor presencia de parafina que comenzaría a dominar la composición superficial del material. También se observa que los elementos minoritarios (Mg, Al, K, Ca) mantienen proporciones similares, sugiriendo que la incorporación de parafina no altera la composición elemental básica de la diatomita.

Tabla 4

Composición elemental consolidada de P:1,6-D:2 en diferentes puntos de análisis

Elemento	DT3(1)		DT3(2)			DT3(3)		DT3(6)	DT3(7)	DT3(9)		DT3(10)				
	pt1 (%)	pt2 (%)	pt1 (%)	pt2 (%)	Pt3 (%)	pt1 (%)	pt2 (%)	pt1 (%)	pt1 (%)	pt1 (%)	pt1 (%)	pt2 (%)	pt3 (%)	pt4 (%)	pt5 (%)	
Carbono (C)	35,47	44,23	40,63	34,07	38,06	38,98	35,25	36,48	38,55	40,07	34,61	30,27	32,84	31,21	33,02	
Oxígeno (O)	49,38	45,68	27,26	22,77	23,32	32,63	33,69	41,38	46,97	43,95	40,03	41,06	42,37	43,10	41,58	
Magnesio (Mg)	0,25	0,54	0,57	0,65	0,81	0,71	0,85	0,68	0,28	0,46	1,32	1,29	1,45	1,51	1,39	
Aluminio (Al)	0,79	0,76	1,48	1,72	1,89	1,63	1,84	1,09	0,27	0,73	2,38	2,44	2,51	2,37	2,48	
Silicio (Si)	11,72	6,62	30,06	38,07	33,34	20,96	21,83	17,73	12,19	12,30	18,10	21,65	20,01	21,28	20,49	
Potasio (K)	0,11	0,11	-	2,72	0,56	0,38	0,34	0,18	-	0,07	-	-	-	-	-	
Calcio (Ca)	0,12	0,09	-	-	-	0,42	0,47	0,17	-	0,11	-	-	-	-	-	
Hierro (Fe)	-	0,21	-	2,72	2,02	0,81	0,68	0,39	-	0,38	-	-	-	-	-	
Oro (Au)	2,17	1,65	-	-	-	3,50	5,03	1,90	1,74	1,94	1,49	3,00	2,81	2,53	2,97	

Nota: La presencia de oro (Au) se debe al recubrimiento aplicado para mejorar la conductividad durante el análisis SEM

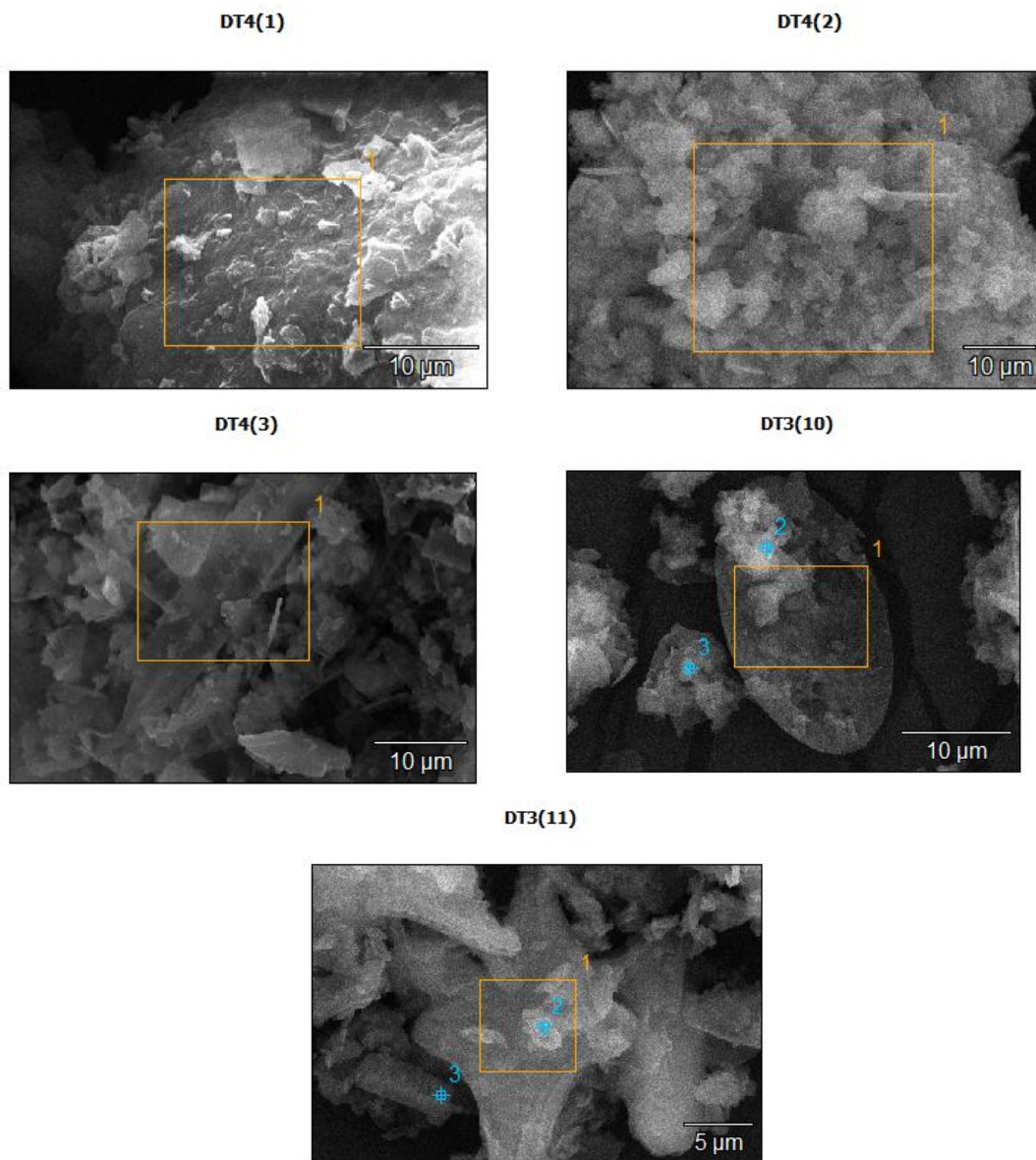
4.2.4. Análisis estructural y elemental de P:1,8-D:2

La muestra P:1,8-D:2 (47,4 % de parafina en peso), identificada posteriormente como óptima según los análisis térmicos, presenta características morfológicas particularmente interesantes. Las micrografías SEM (Figura 6) revelan una distribución excepcionalmente homogénea de la parafina en la matriz de diatomita, con una ocupación casi completa de los microporos pero manteniendo la integridad estructural de las frústulas. Se observa la formación de una estructura compuesta integrada donde la parafina y la diatomita coexisten en un equilibrio morfológico que optimiza la interacción térmica.

El análisis elemental EDS (Tabla 5) confirma la distribución óptima de componentes, con contenidos de carbono consistentes (26,39-39,68 %) en diferentes puntos de análisis, indicando una encapsulación uniforme. Los contenidos de silicio (11,70-28,98 %) y oxígeno (22,89-45,74 %) todavía mantienen valores significativos, evidenciando que la estructura silícea de la diatomita sigue proporcionando el soporte mecánico fundamental para el material compuesto. Esta proporción particular muestra la menor variabilidad composicional entre diferentes puntos de análisis, lo que respalda la hipótesis de una distribución excepcionalmente homogénea de la parafina en la matriz porosa.

Figura 6

Imagen SEM de la muestra P:1,8-D:2



Nota. La imagen SEM revela la estructura porosa característica de la diatomita, encapsulada con parafina. (A) DT4(1) (aumento de 5980x), (B) DT4(2) (aumento de 3766x), (C) DT4(3) (aumento de 5000x), (D) DT4(10) (aumento de 6059x), (E) DT4(11) (aumento de 7606x)

Tabla 5

Composición Elemental Consolidada de P:1,8-D:2 en Puntos de Análisis

Elemento	DT4(1)	DT4(2)	DT4(3)	DT4(10)			DT4(11)		
	pt1 (%)	pt1 (%)	pt1 (%)	pt1 (%)	pt2 (%)	pt3 (%)	pt1 (%)	pt2 (%)	pt3 (%)
Carbono (C)	28,16	34,04	26,39	35,86	39,28	39,68	30,79	32,43	34,55
Oxígeno (O)	40,15	40,94	44,55	45,74	41,85	43,75	29,98	36,78	22,89
Sodio (Na)	0,27	0,36	-	-	0,79	-	-	0,53	0,36
Magnesio (Mg)	5,07	1,33	1,41	1,12	0,68	0,80	0,72	0,94	0,59
Aluminio (Al)	3,04	2,73	2,38	1,48	2,57	0,95	2,08	2,02	1,67
Silicio (Si)	19,79	17,62	22,44	13,74	12,29	11,70	28,98	21,04	24,60
Potasio (K)	0,29	0,44	0,37	0,18	0,18	0,11	0,48	0,33	0,37
Calcio (Ca)	0,41	0,30	0,39	0,23	0,66	0,09	0,51	0,44	0,56
Hierro (Fe)	1,45	1,03	1,08	0,54	0,42	0,26	1,26	1,18	1,66
Oro (Au)	1,39	1,20	0,99	1,00	1,15	2,65	5,20	4,85	12,09

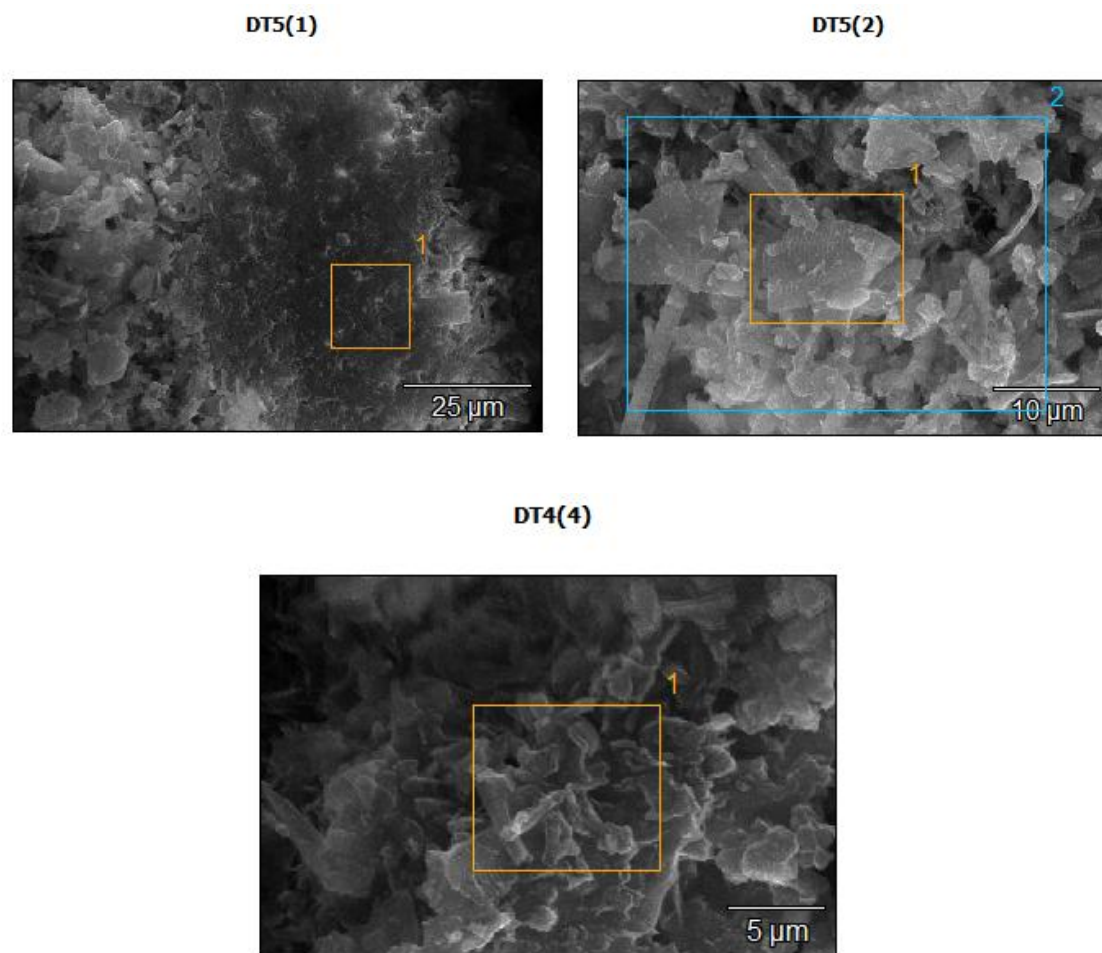
Nota: El oro (Au) presente en la muestra se debe al recubrimiento aplicado durante el análisis SEM para mejorar la conductividad.

4.2.5. Análisis estructural y elemental de P:2-D:2

Al incrementar la proporción de parafina a P:2-D:2 (50 % de parafina en peso), las micrografías SEM (Figura 7) revelan los primeros signos de saturación en la capacidad de encapsulación de la diatomita. Se observa un exceso de parafina que comienza a formar aglomeraciones superficiales, recubriendo completamente algunas regiones de la muestra y obstruyendo parcialmente la estructura porosa original de la diatomita.

Figura 7

Imagen SEM de la muestra P:2-D:2



Nota. Las micrografías evidencian principios de saturación: (A) DT5(1) (aumento de 2417x) muestra formación de capas superficiales de parafina; (B) DT5(2) (aumento de 5000x) revela algunas regiones con exceso de material; (C) DT5(4) (aumento de 6030x) exhibe obstrucción parcial de la estructura porosa original.

El análisis elemental mediante EDS (Tabla 6) confirma esta observación morfológica, con contenidos de carbono significativos (24,24-34,43 %) y una disminución relativa en los contenidos de silicio y oxígeno en algunos puntos específicos. La distribución de elementos comienza a mostrar mayor heterogeneidad que en la muestra P:1,8-D:2, indicando que esta proporción se aproxima al límite de la capacidad de encapsulación eficiente de la diatomita.

Tabla 6

Composición elemental de P:2-D:2 en puntos de análisis

Elemento	DT5(1)	DT5(2)	DT5(2)	DT5(4)
	pt1 (%)	pt1 (%)	pt2 (%)	pt1 (%)
Carbono ©	32,94	24,24	24,73	34,43
Oxígeno (O)	32,16	41,59	38,14	39,09
Sodio (Na)	0,33	0,34	0,50	0,28
Magnesio (Mg)	1,62	1,57	1,45	1,80
Aluminio (Al)	2,52	2,90	3,12	2,37
Silicio (Si)	25,81	24,48	26,36	18,79
Potasio (K)	0,40	0,51	0,66	0,32
Calcio (Ca)	0,53	0,63	0,75	0,36
Hierro (Fe)	1,45	1,33	1,90	1,01
Oro (Au)	2,24	2,08	2,39	1,56

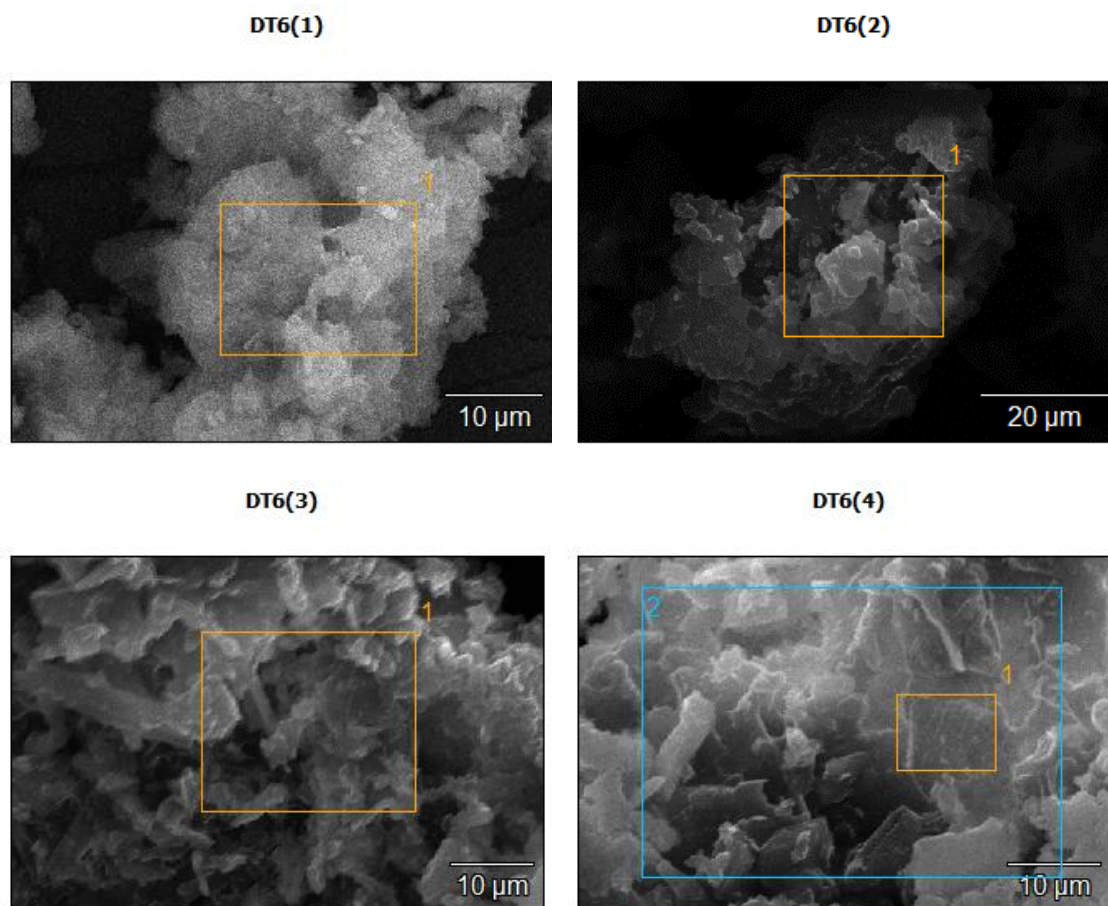
Nota: Se observa mayor variabilidad composicional que en P:1,8-D:2, reflejando la distribución menos homogénea de la parafina al aproximarse al límite de saturación. La presencia de oro (Au) en la muestra se debe al recubrimiento aplicado durante el análisis SEM.

4.2.6. Análisis estructural y elemental de P:2.4-D:2

La muestra con mayor contenido de parafina, P:2,4-D:2 (54,5 % de parafina en peso), presenta en sus micrografías SEM (Figura 8) claras evidencias de supersaturación. Se observan extensas regiones donde la parafina forma una fase continua que recubre completamente la estructura de la diatomita, junto con aglomeraciones significativas que alteran la morfología característica del material poroso original.

Figura 8

Imagen SEM de la muestra P:2,4-D:2



Nota. Las micrografías confirman la supersaturación: (A) DT6(1) (aumento de 4480x) muestra extensas regiones recubiertas por parafina; (B) DT6(2) (aumento de 3000x) exhibe formación de fase continua de parafina; (C) DT6(3) (aumento de 3929x), (D) DT6(4) (aumento de 4364x) revelan significativa alteración de la estructura porosa original.

El análisis elemental EDS (Tabla 7) respalda estas observaciones morfológicas, con contenidos de carbono consistentemente elevados (30,35-40,58 %) que reflejan la predominancia de la parafina en la superficie del material. Los contenidos de silicio (15,78-22,71 %) muestran una disminución proporcional, indicando el enmascaramiento parcial de la estructura de diatomita por el exceso de parafina. Esta muestra presenta mayor heterogeneidad composicional, con fluctuaciones significativas en los contenidos elementales entre diferentes puntos de análisis.

A continuación, se muestra la composición elemental obtenida mediante el análisis EDS para diferentes puntos de la muestra P:2,4-D:2.

Tabla 7

Composición elemental de P:2,4-D:2 en puntos de análisis

Elemento	DT6(1)	DT6(2)	DT6(3)	DT6(4)	DT6(4)
	pt1 (%)	pt1 (%)	pt1 (%)	pt1 (%)	pt2 (%)
Carbono (C)	38,81	34,97	30,35	33,82	40,58
Oxígeno (O)	37,59	40,19	31,87	40,30	38,07
Flúor (F)	-	0,03	0,24	-	-
Sodio (Na)	0,20	0,36	0,63	0,25	0,18
Magnesio (Mg)	2,21	1,66	1,01	1,13	1,13
Aluminio (Al)	2,09	2,82	4,60	2,00	1,90
Silicio (Si)	15,89	16,37	22,71	19,40	15,78
Potasio (K)	0,27	0,32	0,68	0,41	0,29
Calcio (Ca)	0,39	0,40	2,77	0,30	0,27
Hierro (Fe)	0,90	1,09	2,14	0,96	0,67
Cobre (Cu)	0,16	-	-	0,26	-
Oro (Au)	1,49	1,79	3,00	1,17	1,14

Nota: La variabilidad composicional refleja la distribución heterogénea de la parafina en condiciones de supersaturación, con formación de dominios diferenciados. La presencia de oro (Au) en la muestra se debe al recubrimiento aplicado durante el análisis SEM para mejorar la conductividad.

4.2.7. DT y DT-Parafina

El análisis sistemático mediante SEM/EDS de la serie completa de muestras, desde la diatomita pura hasta el compuesto con mayor contenido de parafina, revela una evolución morfológica y composicional que permite establecer correlaciones fundamentales con las propiedades térmicas posteriormente evaluadas.

En las etapas iniciales de incorporación de parafina (P:0,5-D:1,5), se observa una infiltración selectiva que comienza en los macroporos más accesibles, preservando gran parte de la estructura original de la diatomita. Al incrementar el contenido de parafina (P:1,6-D:2), la infiltración se extiende hacia microporos secundarios, formando películas

delgadas que recubren parcialmente las estructuras silíceas sin comprometer su integridad estructural.

La proporción P:1,8-D:2 representa un punto de inflexión crítico, donde se alcanza una distribución excepcionalmente homogénea con ocupación óptima de los microporos sin exceso superficial significativo. Esta estructura integrada, donde la parafina ocupa eficientemente el volumen poroso disponible mientras la diatomita mantiene su función como matriz de soporte, explica el comportamiento térmico superior observado en los análisis de DSC para esta formulación específica.

Al superar este umbral óptimo (P:2-D:2 y P:2,4-D:2), el exceso de parafina comienza a formar aglomeraciones superficiales y fases continuas que recubren extensivamente la estructura de diatomita, comprometiendo la eficiencia de la transferencia térmica. La formación de estas capas gruesas de parafina explica la disminución en el rendimiento térmico observado en estas muestras, a pesar de su mayor contenido absoluto de PCM.

Esta correlación estructura-propiedades, evidenciada mediante la caracterización SEM/EDS, proporciona una comprensión fundamental de los mecanismos que gobiernan la eficiencia de almacenamiento térmico en estos materiales compuestos, respaldando la identificación de P:1,8-D:2 como la formulación óptima para aplicaciones prácticas de almacenamiento de energía térmica.

4.3. Resultados de DSC

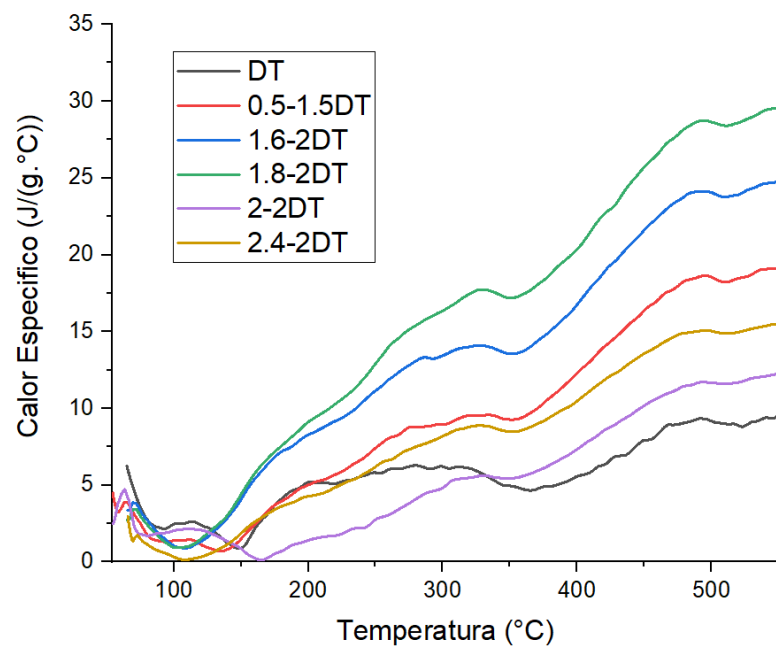
El análisis mediante Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC) fue realizado meticulosamente para evaluar la capacidad de almacenamiento térmico del compuesto parafina-diatomita en sus diferentes formulaciones, comparando sistemáticamente sus propiedades térmicas con las de la diatomita pura (DT) utilizada como referencia. El objetivo principal de esta caracterización fue determinar con precisión cómo varía el comportamiento térmico del material al incrementar progresivamente la cantidad de parafina encapsulada en la estructura porosa de la diatomita, identificando así la

formulación óptima para aplicaciones de almacenamiento de energía térmica en sistemas renovables.

La Figura 9 presenta las curvas de calor específico en función de la temperatura para todas las muestras estudiadas, abarcando desde la diatomita pura hasta las diferentes proporciones de compuesto parafina-diatomita.

Figura 9

Curvas de calor específico en función de la temperatura para diferentes proporciones de parafina y diatomita



Nota. Las muestras analizadas corresponden a DT (diatomita pura), P:0,5-D:1,5, P:1,6-D:2, P:1,8-D:2, P:2-D:2, y P:2,4-D:2, donde "P" representa la proporción específica de parafina y "D" la proporción de diatomita. Las curvas evidencian un incremento progresivo en la capacidad de almacenamiento térmico a medida que aumenta el contenido de parafina en la mezcla, hasta alcanzar un punto óptimo con la formulación P:1,8-D:2.

El análisis pormenorizado de cada muestra revela comportamientos térmicos distintivos en el rango de temperaturas evaluado (65-500 °C):

DT (Diatomita pura, sin parafina): La muestra de diatomita sin aditivos presentó el menor calor específico en todo el intervalo de temperatura analizado, con valores iniciales de $5,0 \pm 0,3$ J/g· °C a 65 °C, un valor promedio de $8,0 \pm 0,4$ J/g· °C a lo largo del rango evaluado, y un valor máximo de $9,0 \pm 0,4$ J/g· °C al alcanzar los 500 °C. Este comportamiento térmico es característico de la sílice amorfa, que presenta una capacidad de almacenamiento térmico relativamente baja en comparación con materiales específicamente diseñados para almacenamiento energético.

P:0,5-D:1,5 (Curva roja): La incorporación inicial de parafina (0,5 partes) mejoró notablemente la capacidad térmica de la muestra. A temperaturas inferiores a 200 °C, su comportamiento fue comparable al de la diatomita pura, con un calor específico inicial de $4,0 \pm 0,3$ J/g· °C a 65 °C, un valor promedio de $9,0 \pm 0,5$ J/g· °C, alcanzando un máximo significativo de $19,0 \pm 0,7$ J/g· °C a 500 °C, lo que representa un incremento del 111 % respecto a la diatomita pura. Particularmente relevante es que, a partir de 250 °C, el calor específico experimentó un aumento progresivo y sostenido, indicando que incluso una encapsulación parcial de parafina influye positivamente en la capacidad térmica del material compuesto.

P:1,6-D:2, P:1,8-D:2, P:2-D:2 y P:2,4-D:2: El aumento sistemático en la proporción de parafina respecto a la diatomita produjo efectos significativos en la capacidad de almacenamiento térmico, aunque no de manera linealmente proporcional:

- **P:1,6-D:2 (Curva azul):** Esta formulación alcanzó un calor específico máximo de $24,1 \pm 0,9$ J/g· °C a 500 °C, representando un incremento sustancial del 168 % respecto a la diatomita pura, evidenciando el efecto positivo de una mayor proporción de PCM.
- **P:1,8-D:2 (Curva verde):** Esta composición registró el valor más elevado de calor específico entre todas las formulaciones analizadas, alcanzando $29,3 \pm 1,1$ J/g· °C a 500 °C, lo que la posiciona inequívocamente como la formulación óptima para

aplicaciones de almacenamiento térmico, con un incremento excepcional del 226 % respecto al material de referencia.

- **P:2-D:2 (Curva morada) y P:2,4-D:2 (Curva naranja):** Contraintuitivamente, estas formulaciones con mayor contenido de parafina mostraron un desempeño térmico inferior, alcanzando valores máximos de apenas $12,2 \pm 0,8 \text{ J/g} \cdot ^\circ\text{C}$ y $15,4 \pm 0,7 \text{ J/g} \cdot ^\circ\text{C}$, respectivamente, significativamente por debajo del rendimiento observado en P:1,8-D:2. Este fenómeno sugiere la existencia de un umbral de saturación, donde el exceso de parafina no encapsulada adecuadamente puede comprometer las propiedades térmicas del compuesto.

La correlación de los resultados de DSC con los análisis estructurales mediante difracción de rayos X (DRX), microscopía electrónica de barrido (SEM) y espectroscopía de dispersión de energía (EDS) permitió establecer relaciones fundamentales entre la estructura microporosa de la diatomita, la distribución espacial de la parafina encapsulada y las propiedades térmicas resultantes del compuesto.

Los resultados integrales del estudio demuestran concluyentemente que P:1,8-D:2 constituye la formulación óptima, al maximizar la capacidad de almacenamiento térmico sin comprometer la estabilidad estructural del material. Su excepcional combinación de elevada capacidad térmica ($29,3 \text{ J/g} \cdot ^\circ\text{C}$) y la homogeneidad estructural observada mediante SEM/EDS la posicionan como candidata idónea para aplicaciones industriales diversas, sistemas de almacenamiento térmico en aplicaciones de energía renovable y soluciones avanzadas de climatización pasiva. En contraposición, las formulaciones con mayor proporción de PCM (P:2-D:2 y P:2,4-D:2), a pesar de su contenido superior de parafina, mostraron un rendimiento térmico significativamente inferior, confirmando empíricamente la existencia de una proporción óptima específica, para la encapsulación de parafina en la matriz porosa de diatomita

DISCUSIONES

El análisis de DRX realizado sistemáticamente en todas las muestras (DT, P:0,5-D:1,5, P:1,6-D:2, P:1,8-D:2, P:2-D:2 y P:2,4-D:2), permitió identificar con precisión la presencia de fases cristalinas características, como cristobalita, albita y cuarzo, en la diatomita de Jalorapampa. Como señala Cabeza (2014), la presencia de estas fases cristalinas es típica en diatomitas calcinadas a 600 °C, temperatura utilizada en nuestro protocolo de preparación. En el difractograma de la diatomita pura (DT), la región amorfa se localiza distintivamente entre 20° y 30° en 2θ , lo que corresponde perfectamente con la naturaleza predominantemente amorfa de la sílice biogénica presente en la diatomita.

Un hallazgo particularmente significativo fue observar cómo, al incrementar progresivamente la proporción de parafina desde P:0,5-D:1,5 hasta P:2,4-D:2, los picos correspondientes a la parafina emergían claramente en los difractogramas sin provocar alteraciones detectables en los picos característicos de la estructura cristalina básica de la diatomita. Esta preservación estructural, especialmente evidente en la muestra P:1,8-D:2, sugiere una integración óptima de la parafina en la matriz porosa de la diatomita sin comprometer su integridad cristalográfica, aspecto fundamental para mantener la estabilidad térmica y mecánica en aplicaciones prácticas (Seckbach, 2019).

Los difractogramas también revelaron que, en las muestras con mayor contenido de parafina (P:2-D:2 y P:2,4-D:2), la intensidad relativa de los picos asociados a la parafina aumentaba significativamente mientras disminuía la visibilidad de los picos característicos de la diatomita. Este fenómeno indica un posible enmascaramiento de la estructura cristalina de la diatomita por exceso de parafina superficial, lo que explicaría parcialmente la menor eficiencia térmica observada en estas formulaciones a pesar de su mayor contenido absoluto de PCM.

La caracterización elemental mediante EDS proporcionó evidencia cuantitativa crucial que complementa los hallazgos estructurales. En todas las muestras analizadas, el silicio y el oxígeno constituyeron los elementos predominantes en la matriz de diatomita, confirmando su composición fundamentalmente silíceo. A medida que se incrementaba la proporción de parafina en las muestras desde P:0,5-D:1,5 hasta P:2,4-D:2, se observó

un aumento progresivo y consistente en la concentración de carbono, elemento característico de la parafina, tal como señalan Khan et al. (2019) al estudiar la integración de PCM en matrices porosas.

Un hallazgo particularmente relevante fue la distribución elemental excepcionalmente homogénea observada en la muestra P:1,8-D:2, donde los contenidos de carbono (26,39-39,68 %), silicio (11,70-28,98 %) y oxígeno (22,89-45,74 %) mostraron la menor variabilidad entre diferentes puntos de análisis. Esta consistencia composicional respalda la hipótesis de una distribución óptima de la parafina en esta proporción específica, donde el PCM ocupa eficientemente el volumen poroso disponible sin formar aglomeraciones superficiales significativas ni dejar regiones pobremente infiltradas.

En contraste, las muestras con mayor contenido de parafina (P:2-D:2 y P:2,4-D:2) presentaron mayor heterogeneidad composicional, con regiones donde el carbono predominaba claramente (hasta 40,58 % en P:2,4-D:2), indicando exceso localizado de parafina. Esta heterogeneidad composicional correlaciona directamente con la menor eficiencia térmica observada en estas formulaciones, sugiriendo que la distribución espacial del PCM, más que su contenido absoluto, constituye un factor determinante en el rendimiento del material compuesto.

Las imágenes SEM proporcionaron evidencia visual directa de la evolución microestructural al incrementar el contenido de parafina en la matriz de diatomita. Como observaron Seckbach (2019) y Delgado et al. (2019), la diatomita pura (DT) presenta una estructura intrincadamente porosa con frústulas bien preservadas y una red tridimensional de microporos interconectados. Esta arquitectura porosa resulta ideal para la encapsulación de PCM, pero nuestro estudio revela la existencia de un umbral crítico de saturación.

En la formulación P:0,5-D:1,5, las micrografías mostraron una infiltración incipiente y heterogénea, con numerosos microporos aún vacíos, explicando su capacidad térmica relativamente modesta. La muestra P:1,6-D:2 presentó una ocupación más extensa de los microporos, pero fue la formulación P:1,8-D:2 la que exhibió una distribución morfológica óptima, con microporos completamente ocupados pero

manteniendo perfectamente reconocible la estructura de las frústulas de diatomeas. Esta arquitectura compuesta integrada, donde cada componente mantiene su funcionalidad estructural específica, explica el excepcional rendimiento térmico de esta proporción particular.

Las formulaciones con mayor contenido de parafina (P:2-D:2 y especialmente P:2,4-D:2) mostraron claras evidencias de supersaturación, con formación de capas superficiales continuas de parafina que recubren extensivamente y en algunos casos obstruyen completamente la estructura porosa original de la diatomita. Esta morfología alterada compromete significativamente la eficiencia de la transferencia térmica al reducir el área de contacto efectiva entre ambos componentes y formar barreras difusivas que limitan la conductividad térmica del sistema, explicando convincentemente su inferior rendimiento térmico a pesar del mayor contenido de PCM.

Los resultados obtenidos mediante calorimetría diferencial de barrido (DSC) proporcionaron evidencia cuantitativa determinante sobre la capacidad de almacenamiento térmico de las diferentes formulaciones estudiadas. Se observó claramente que la incorporación de parafina en la matriz de diatomita incrementa significativamente la capacidad de almacenamiento térmico del material compuesto, aunque con un límite de saturación bien definido que no sigue una relación lineal con el contenido de PCM.

La formulación P:1,8-D:2 alcanzó el equilibrio óptimo entre capacidad de almacenamiento térmico y estabilidad estructural, registrando un calor específico máximo extraordinario de 29,3 J/g· °C, mientras que formulaciones con mayor contenido de parafina como P:2-D:2 y P:2,4-D:2 mostraron valores significativamente inferiores (12,2 J/g· °C y 15,4 J/g· °C, respectivamente). Este comportamiento aparentemente contradictorio encuentra explicación directa en las observaciones microestructurales: cuando la cantidad de parafina excede la capacidad de encapsulación efectiva de la matriz porosa, se forman dominios segregados que comprometen la eficiencia del sistema compuesto (Sacari & Sacari, 2023).

Cabeza (2020) ha señalado que los materiales porosos como la diatomita facilitan efectivamente la encapsulación de PCM, pero también destaca que un exceso de material

puede reducir la conductividad térmica efectiva del compuesto. Nuestros resultados confirman plenamente esta observación, demostrando experimentalmente que la saturación excesiva de la matriz porosa reduce significativamente la eficiencia de transferencia térmica dentro del material, creando barreras difusivas que limitan el rendimiento energético global.

La correlación entre análisis térmico, composición elemental y morfología microestructural permitió establecer conexiones fundamentales entre la estructura del compuesto y sus propiedades funcionales. La diatomita pura (DT) presentó la menor capacidad de almacenamiento térmico (máximo $9 \text{ J/g} \cdot ^\circ\text{C}$), coherente con su naturaleza silícea y baja densidad energética intrínseca. En contraste, P:1,8-D:2 y P:1,6-D:2 mostraron incrementos extraordinarios del 226 % y 168 % respectivamente en almacenamiento térmico comparado con la diatomita pura, confirmando que la encapsulación óptima de PCM en la matriz porosa mejora sustancialmente la eficiencia energética del sistema (Seckbach, 2019).

El análisis del comportamiento térmico en el rango evaluado ($65\text{-}500 \text{ }^\circ\text{C}$) indica que el material podría tener aplicaciones potenciales en múltiples rangos de temperatura. Si bien los análisis realizados no incluyeron un estudio específico del comportamiento durante el cambio de fase de la parafina (aproximadamente a $54 \text{ }^\circ\text{C}$), las diferencias en capacidad calorífica observadas en las distintas formulaciones sugieren que la proporción óptima (P:1,8-D:2) maximizaría también la energía absorbida/liberada durante la transición de fase. Es importante destacar que, para aplicaciones prácticas de almacenamiento térmico, se requeriría caracterizar con mayor detalle el comportamiento del material precisamente en ese rango de temperatura de transición, utilizando menor velocidad de calentamiento/enfriamiento y enfocando el análisis específicamente en la región del cambio de fase.

Estos resultados tienen implicaciones directas para el diseño y optimización de sistemas de almacenamiento térmico basados en PCM encapsulados en matrices porosas naturales, demostrando que existe una proporción crítica específica, que maximiza la eficiencia energética, más allá de la cual el rendimiento disminuye a pesar de incrementar el contenido de material activo. Esta comprensión fundamental de la relación estructura-

propiedades constituye una contribución significativa al desarrollo de tecnologías de almacenamiento energético más eficientes y sostenibles utilizando recursos locales abundantes como la diatomita de Jalorapampa.

Para complementar los hallazgos actuales, se recomienda realizar en investigaciones futuras pruebas de ciclado térmico que evalúen la estabilidad de estas propiedades durante múltiples ciclos de fusión-solidificación, así como mediciones directas de conductividad térmica para cuantificar las mejoras en la transferencia de calor que la estructura compuesta proporciona en comparación con la parafina pura. Adicionalmente, análisis termogravimétricos (TGA) podrían proporcionar información valiosa sobre la estabilidad térmica a largo plazo y posible degradación del PCM bajo condiciones prolongadas de operación.

CONCLUSIONES

- 1 Las propiedades térmicas y estructurales del compuesto parafina-diatomita, proveniente de Jalorapampa, Tacna, han demostrado un alto potencial para mejorar la capacidad de almacenamiento de energía térmica. El compuesto supera a la parafina pura en términos de eficiencia térmica y estabilidad estructural, lo cual fue confirmado mediante los análisis de DRX, SEM, EDS y DSC. Estos resultados validan la viabilidad del compuesto para aplicaciones industriales que requieren almacenamiento confiable de energía térmica.
- 2 El proceso de purificación de la diatomita fue efectivo, garantizando una encapsulación homogénea de la parafina dentro de la estructura porosa de la diatomita. Los análisis de SEM y EDS confirmaron que la diatomita mantuvo una estructura porosa ideal para la absorción de parafina, sin alteraciones químicas o estructurales significativas. Esto es crucial para mantener la estabilidad térmica y estructural del compuesto durante los ciclos de almacenamiento de energía, mejorando su eficiencia a largo plazo.
- 3 Los resultados de DSC evidencian que, aunque P:2-D:2 y P:2,4-D:2 contenían más PCM, su capacidad térmica ($12 \text{ J/g} \cdot ^\circ\text{C}$ y $15 \text{ J/g} \cdot ^\circ\text{C}$, respectivamente) fue menor que la de P:1,8-D:2 ($29 \text{ J/g} \cdot ^\circ\text{C}$), lo que indica que existe un punto óptimo de encapsulación, que maximiza la eficiencia térmica, sin comprometer la estabilidad del material. El análisis estructural confirmó que la encapsulación homogénea del PCM en la diatomita, mejora la capacidad de retención de calor y reduce fluctuaciones térmicas, consolidando a P:1,8-D:2 como la formulación más eficiente para almacenamiento de energía térmica, en aplicaciones industriales y sistemas de energía renovable.
- 4 La estabilidad estructural del compuesto de parafina-diatomita se evaluó utilizando DRX y SEM. Los análisis de DRX mostraron que la estructura cristalina de la diatomita permaneció sin cambios, sin formación de nuevas fases, mientras que el SEM confirmó la preservación de la morfología del material y la homogeneidad del compuesto PCM después del estrés térmico. Esta integridad estructural y morfológica indica una resistencia notable a condiciones térmicas dinámicas, lo cual es importante para su aplicabilidad en sistemas de almacenamiento de energía térmica a largo plazo.

5 La evaluación comparativa frente a la parafina pura evidenció que el compuesto parafina-diatomita no solo mantuvo una capacidad de almacenamiento térmico similar, sino que además presentó mayor estabilidad estructural. Estos resultados posicionan al compuesto como una alternativa viable para aplicaciones industriales que demandan alta durabilidad térmica y resistencia a ciclos de calentamiento y enfriamiento repetidos. Aunque no se realizaron comparaciones directas con otros PCM comerciales, los resultados obtenidos sugieren que el material desarrollado ofrece un rendimiento competitivo, con claras ventajas en términos de estabilidad térmica, eficiencia energética y vida útil extendida, consolidándolo como una opción prometedora para el almacenamiento de energía térmica en el contexto de energías renovables y procesos industriales exigentes.

RECOMENDACIONES

- 1 Se recomienda a los futuros investigadores y grupos de investigación en almacenamiento de energía térmica, optimizar los procesos de purificación de la diatomita. Para ello, se sugiere emplear técnicas avanzadas de caracterización, como análisis de área superficial (BET), porosimetría de mercurio y espectroscopía infrarroja, además de optimizar tratamientos térmicos o químicos controlados. Estas acciones permitirán mejorar la eficiencia de encapsulación de parafina, incrementar la calidad de la diatomita y reducir tiempos y costos del proceso, asegurando la preservación de la estructura porosa esencial para el rendimiento térmico del compuesto.
- 2 Se recomienda a los futuros investigadores, realizar ensayos prolongados de ciclado térmico para evaluar la durabilidad y estabilidad del compuesto parafina-diatomita en condiciones industriales reales. Específicamente, se sugiere aplicar pruebas de ciclado térmico acelerado, sometiendo las muestras a múltiples ciclos de calentamiento y enfriamiento controlado, seguidos de análisis estructurales mediante DRX, SEM y EDS. Esta estrategia permitirá determinar la resistencia del material frente al estrés térmico continuo, condición crítica para su aplicación en sistemas industriales de almacenamiento de energía.
- 3 Se sugiere investigar nuevas formulaciones mediante el uso de diferentes tipos de parafinas, materiales porosos alternativos y otras posibles combinaciones de materiales de cambio de fase (PCM) con la diatomita. Este enfoque permitirá identificar formulaciones que maximicen la capacidad de almacenamiento térmico y optimicen la estabilidad estructural. Además, se propone explorar combinaciones que mejoren la eficiencia térmica y la sostenibilidad del sistema en aplicaciones industriales y de energías renovables.
- 4 Se sugiere a centros tecnológicos y empresas industriales realizar estudios de escalabilidad para evaluar la viabilidad técnica y económica de producir el compuesto parafina-diatomita a nivel industrial. Este análisis debe considerar estimaciones de costos de producción, disponibilidad de materias primas, impacto ambiental del proceso de fabricación y optimización de técnicas de síntesis a gran escala. La

validación de estos aspectos será crucial para garantizar el éxito de la implementación comercial del material desarrollado.

- 5 Se recomienda a los desarrolladores de proyectos piloto integrar el compuesto parafina-diatomita en sistemas reales de almacenamiento térmico, tales como plantas de energía solar de concentración, unidades de recuperación de calor industrial y sistemas de calefacción térmica estacional. La implementación en campo permitirá evaluar su desempeño operativo, eficiencia energética y estabilidad a largo plazo bajo condiciones reales de operación, lo cual contribuirá a consolidar su viabilidad como una opción innovadora y sostenible en el mercado energético.
- 6 Finalmente, se sugiere a futuros investigadores realizar comparaciones estandarizadas entre el compuesto parafina-diatomita y materiales de cambio de fase comerciales reconocidos, como Rubitherm, PureTemp o Axiotherm. Estos estudios deben considerar la capacidad térmica, estabilidad estructural frente a ciclos térmicos, costos de producción y vida útil de los materiales. El objetivo es posicionar objetivamente al nuevo compuesto dentro del mercado de tecnologías de almacenamiento de energía térmica, resaltando sus ventajas competitivas y áreas de mejora.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aw, M. S., Simovic, S., Addai-Mensah, J., & Losic, D. (2012). Silica microcapsules for prolonged drug release: Influences of microcapsule properties, storage conditions, and media on drug release. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, *101*(10), 3901-3912. <https://doi.org/10.1002/jps.23253>
- Bucio, A., Moreno-Tovar, R., Bucio, L., Espinosa-Dávila, J., & Anguebes-Franceschi, F. (2021). Characterization of beeswax, candelilla wax and paraffin wax for coating cheeses. *Coatings*, *11*(261). <https://doi.org/10.3390/coatings11030261>
- Cabeza, L. F. (2014). *Advances in thermal energy storage systems: Methods and applications*. Woodhead Publishing.
- Campbell, D. T., & Stanley, J. C. (1963). *Experimental and quasi-experimental designs for research*. Houghton Mifflin.
- Cullity, B. D., & Stock, S. R. (2014). *Elements of X-ray diffraction* (3rd ed.). Pearson Education Limited.
- Creswell, J. W. (2014). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches* (4th ed.). SAGE Publications.
- Delgado, J. M. P. Q., Martinho, J. C., Sá, A. V., & Guima, A. S. (2019). *Thermal energy storage with phase change materials: A literature review*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-97499-6>
- Dincer, I., & Egan, M. A. (2018). *Heat storage: A unique solution for energy systems*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-91893-8>
- Echlin, P. (2009). *Handbook of sample preparation for scanning electron microscopy and X-ray microanalysis*. Springer.
- Farid, M. M., Auckaili, A. M., & Gholamibo, G. (Eds.). (2021). *Thermal energy storage with phase change materials: Research contributions of Professor Mohammed Mehdi Farid in four decades*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780367567699>

- Goldstein, J. I., Newbury, D. E., Michael, J. R., Ritchie, N. W. M., Scott, J. H. J., & Joy, D. C. (2018). *Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis* (4th ed.). Springer.
- He, J., & Wang, X. (Eds.). (2024). *Polymers at nanoscale: Synthesis, properties and self-assembly* (Vol. 1). World Scientific.
- Kalaiselvam, S., & Parameshwaran, R. (2014). *Thermal energy storage technologies for sustainability: Systems design, assessment and applications*. Academic Press.
- Khan, A., Saikia, P., Saxena, R., Rakshit, D., & Saha, S. (2019). Microencapsulation of phase change material in water dispersible polymeric particles for thermoregulating rubber composites—A holistic approach. *International Journal of Energy Research*, 43(1), 1-13. <https://doi.org/10.1002/er.4925>
- Khan, Z., Khan, Z., & Ghafoor, A. (2019). A review of performance enhancement of PCM based latent heat storage system within the context of materials, thermal conductivity enhancement techniques and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74, 26-50.
- Li, Y.-Q., Samad, Y. A., Polychronopoulou, K., Alhassan, S. M., & Liao, K. (2014). From biomass to high performance solar–thermal and electric–thermal energy conversion and storage materials. *Journal of Materials Chemistry A*, 2(17), 7759–7765. <https://doi.org/10.1039/c4ta00839a>
- Li, M., Wu, Z., Tan, J., & Liu, S. (2014). Phase change material reinforced by diatomite and their application in energy-efficient buildings. *Materials & Design*, 63, 721-726. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.05.074>
- Montgomery, D. C. (2012). *Design and analysis of experiments* (8th ed.). John Wiley & Sons.
- Moreno-Maroto, J. M., Alonso-Azcárate, J., Martínez-García, C., Romero, M., López-Delgado, A., & Cotes-Palomino, T. (2022). Zeolitization of diatomite residues by a simple method. *Applied Sciences*, 12(21), 10977. <https://doi.org/10.3390/app122110977>

- Moreno-Maroto, M. J., Blanco, V. P., & López-Navarro, M. F. (2022). Advances in the encapsulation of phase change materials: An updated review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *150*, 111479.
- Nazir, H., Batool, M., Osorio, F. J. B., Isaza-Ruiz, M., Xu, X., Vignarooban, K., & Kannan, A. M. (2019). Recent developments in phase change materials for energy storage applications: A review. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *129*, 491-523.
- Qian, T., Li, J., Min, X., Deng, Y., Guan, W., & Ning, L. (2015). Diatomite: A promising natural candidate as carrier material for low middle and high temperature phase change material. *Energy Conversion and Management*, *98*, 34-45.
- Sacari Sacari, E. J. (2023). *Estudio de la diatomita de Jalaropampa, Tacna y su aplicación en celdas solares* [Tesis de Maestría en Gestión Ambiental y Desarrollo Sostenible, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Tacna, Perú].
- Seckbach, J. (2019). *Diatoms: Fundamentals and applications*. Wiley-Scrivener.
- Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R., & Buddhi, D. (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *13*(2), 318-345. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.10.005>
- Smol, J. P., & Stoermer, E. F. (2010). *The diatoms: Applications for the environmental and earth sciences* (2nd ed.). Cambridge University Press.
- Tejada Bedoya, M. (2019). *Evaluación de la diatomita de Jalorapampa para su aplicación en celdas solares* [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann].
- Xu, B., & Li, Z. (2013). Paraffin/diatomite composite phase change material incorporated cement-based composite for thermal energy storage. *Applied Energy*, *105*, 229-237. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.12.033>

- Zuo, X., & Li, X. (2014). Enhanced thermal conductivity of paraffin/diatomite composite phase change material by introducing expanded graphite and copper nanoparticles. *Applied Thermal Engineering*, 73(2), 1400-1408.
- Zuo, Z., & Li, X. (2014). Photocatalytic degradation of methylene blue using TiO₂. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/628956>

ANEXOS

Muestras procesadas de compuestos de parafina-diatomita con diferentes proporciones



Nota: La imagen muestra seis muestras procesadas de compuestos de parafina-diatomita con diferentes proporciones de parafina a diatomita. Cada tubo está etiquetado con la proporción correspondiente para su identificación en el análisis de microscopía electrónica. Las muestras van desde diatomita pura (DT) hasta un mayor contenido de parafina (P:0,5-D:1,5 a P:2,4-D:2). Estas muestras se utilizan para evaluar las propiedades térmicas y estructurales de los compuestos