



# **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

## **Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción**

“Estudio de las Propiedades Ópticas de Suspensiones Coloidales con Diferentes Concentraciones de Microcápsulas de Material que Cambia de Fase (MPCM) para Aplicaciones en Sistemas de Almacenamiento de Energía Solar.”

### **TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN**

**(PROYECTO DE GRADUACIÓN)**

Previo a la obtención del Título de:

**INGENIEROS MECÁNICOS**

Presentada por:

José Xavier Palacios Ruilova  
Cristhian Roberto Santos Roca

**GUAYAQUIL – ECUADOR**

Año: 2014

## **AGRADECIMIENTO**

Agradecemos a Dios por darnos las herramientas que nos permitieron completar este objetivo personal. A todas las personas que han contribuido a la consecución de este trabajo; en especial al Dr. Guillermo Soriano, Director de Proyecto de Graduación, por su invaluable ayuda y tutoría. Al Ing. Carlos Parra, Director Técnico del LEMAT, por su incondicional apoyo para la ejecución de los ensayos experimentales.

## DEDICATORIA

La culminación de este trabajo lo dedico a mis hermanos, Jasser Palacios y Denisse Izurieta, quienes son el motivo de mi esfuerzo y ganas de superarme continuamente, que este logro sirva como motivación para las metas que ellos se propongan en sus vidas. A mi madre, Sara Ruilova Coello, quien con su infinito y constante amor, me apoyó durante todo el proceso de mi carrera; y muy especialmente a mi padre, José Palacios Marín, quien es mi mejor maestro y amigo, y me demuestra cada día su fuerza y voluntad para salir adelante.

**José Palacios Ruilova**

## **DEDICATORIA**

A mi madre, Angelita Roca, y a mi tío, José Roca, por su permanente apoyo y consejo durante la trayectoria de mi carrera. A mi padre, quien motivó con aquellos primeros peldaños hacia mi formación profesional.

**Cristhian Santos Roca**

## TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

---

Ing. Jorge Duque R.  
DECANO DE LA FIMCP  
PRESIDENTE

---

Dr. Guillermo Soriano I., Ph. D.  
DIRECTOR DEL TFG

---

Ing. Mauricio Cornejo M.  
VOCAL

## **DECLARACIÓN EXPRESA**

“La responsabilidad del contenido de este Trabajo Final de Graduación, nos corresponden exclusivamente; y el patrimonio intelectual del mismo a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”

(Reglamento de Graduación de la ESPOL).

---

José Xavier Palacios Ruilova

---

Cristhian Roberto Santos Roca

## RESUMEN

El presente trabajo de investigación estudia la viabilidad de utilizar lechadas con microcápsulas de material que presente cambio de fase para almacenar energía térmica cuya fuente sea radiación solar. La investigación se realiza utilizando dos muestras comerciales de microcápsulas de material que cambia de fase (MPCM) a diferentes fracciones de masa. Dichas muestras comerciales MPCM 56D y MPCM 37 usan mezclas de parafinas seleccionadas principalmente por su alto calor latente y temperatura de transición de fase. Para la caracterización de la morfología de MPCM se utilizó la técnica de microscopía electrónica de barrido (SEM). El equipo analizador de tamaño de partículas, que utiliza la técnica de difracción laser, fue utilizado para el análisis de distribución de tamaño. Y finalmente se utilizó el método de espectrofotometría para medir las propiedades ópticas en el espectro de luz con longitudes de onda entre 450-1050 nm. Mediante los resultados obtenidos se realizó un análisis sobre la aplicabilidad de MPCM en sistemas térmicos solares. Resultados indican que los MPCM en concentraciones volumétricas menores a 0.50 %vol., presentan altos valores de absorbancia dentro del espectro de radiación solar.

## ÍNDICE GENERAL

	Páginas
RESUMEN .....	ii
ÍNDICE GENERAL.....	iii
ABREVIATURAS .....	vi
SIMBOLOGÍA .....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
ÍNDICE DE TABLAS .....	x
INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Justificación .....	3
1.3 Objetivos.....	5
1.3.1 Objetivo general .....	5
1.3.2 Objetivos específicos .....	6
<b>CAPÍTULO 2</b>	
2. MATERIALES .....	7
2.1 Material de Cambio de Fase (PCM) .....	7
2.1.1 Características Principales.....	8
2.1.2 Clasificación .....	11
2.1.3 Propiedades .....	14

2.1.4	Aplicaciones .....	17
2.2	Microcápsulas de Material de Cambio de Fase (MPCM).....	22
2.2.1	Características y Propiedades .....	24
2.3	Materiales para Análisis.....	28

### **CAPÍTULO 3**

3.	METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN .....	32
3.1	Metodología utilizada .....	32
3.2	Definición de variables de estudio .....	35
3.3	Equipos e instrumentos de medición .....	36
3.4	Protocolo experimental .....	44
3.4.1	Selección de concentraciones y cálculo de masa para las disoluciones coloidales .....	45
3.4.2	Elaboración de disoluciones coloidales.....	47
3.4.3	Estudio de Microscopia Electrónica de Barrido.....	51
3.4.4	Estudio de Distribución de Tamaño de Partícula .....	54
3.4.5	Estudio de Espectrofotometría .....	57

### **CAPÍTULO 4**

4.	RESULTADOS.....	60
4.1	Resultados de Caracterización de Forma y Tamaño de Partícula...61	
4.2	Resultados de Distribución de Tamaño .....	68
4.3	Resultados de Espectrofotometría.....	70
4.4	Aplicaciones Potenciales .....	75

**CAPÍTULO 5**

5. DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS .....	84
---	----

**CAPÍTULO 6**

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	92
---	----

## APÉNDICES

## BIBLIOGRAFÍA

## ABREVIATURAS

PCM	Phase Change Material (Material de Cambio de Fase)
MPCM	Microencapsulated Phase Change Material (Material de Cambio de Fase Microencapsulado)
MPCM 37	Material de Cambio de Fase Microencapsulado; Torta Húmeda; Temperatura de Fusión 37 °C
MPCM 56D	Material de Cambio de Fase Microencapsulado; Polvo Seco; Temperatura de Fusión 56 °C
SEM	Scanning Electron Microscope (Microscopio Electrónico de Barrido)
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
IEA	International Energy Agency

## SIMBOLOGÍA

$\omega_i$	Concentración de Masa o Fracción de Masa de la sustancia $i$
$\phi_i$	Concentración de Volumen o Fracción de Volumen de la sustancia $i$
%vol.	Porcentaje en volumen
$\rho_i$	Densidad de la sustancia $i$
$m_i$	Masa de la sustancia $i$
$\gamma_i$	Peso específico de la sustancia $i$
$n_i$	Número de moles de la sustancia $i$
$V_i$	Volumen de la sustancia $i$
$M_i$	Concentración Molar o Molaridad de la sustancia $i$
$I_o$	Intensidad de luz incidente
$I$	Intensidad de luz saliente
$\gamma$	Longitud de onda
$A$	Absorbancia
$\epsilon$	Coeficiente de absorción
$C$	Concentración del absorbente
$\lambda$	Longitud atravesada por la luz
span	Factor de dispersión
Ste	Número de Stefan
$C_p$	Calor específico de la suspensión
$q_w$	flujo de calor a través de las paredes de un tubo
$R$	Radio del tubo
$K$	constante de conducción de la suspensión
$C_m$	Fracción de masa del PCM en la suspensión
$h_f$	Calor de fusión del PCM
$\rho_m$	Densidad del material PCM
$d_m$	diámetro del núcleo de material microencapsulado
$d_c$	diámetro del material contenedor
$\rho_B$	Densidad promedio de la solución coloidal
$m_p$	fracción de masa de MPCM en la solución
$\rho_f$	Densidad del fluido portador
$C_{p_{avg}}$	Capacidad de calor específico promedio de la solución coloidal
$C_{p_m}$	Capacidad de calor específico de PCM
$C_{p_w}$	Capacidad de calor específico del agua

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1 Demanda de energía primaria total de Ecuador por sector (Tomado de castro [1]).....	2
Figura 2.1 Proceso de cambio de fase PCM (Tomado de Balart [13]).....	9
Figura 2.2 Clasificación de PCM (Adaptado de Abhat e Hirman[15,16]) ..	11
Figura 2.3 Relación entre temperatura y calor de fusión para los PCM (Tomado de Oliver [11]) .....	14
Figura 2.4 Almacenamiento de vacunas con tecnología PCM [23].....	19
Figura 2.5 Utilización de PCM en bloques de oficinas en Berlín (a) y empastado de paredes sobre capilares con PCM (b) [25] ....	20
Figura 2.6 Proceso esquemático de micro encapsulación (Adaptado de Wu [34]) .....	25
Figura 2.7 Presentación de materiales MPCM .....	29
Figura 2.8 Materiales para estudio.....	29
Figura 3.1 Proceso implementado para el trabajo investigativo.....	33
Figura 3.2 Microscopio Electrónico de Barrido SEM.....	38
Figura 3.3 Analizador de Tamaño de Partículas Mastersizer 2000.....	40
Figura 3.4 Espectrofotómetro UV.....	43
Figura 3.5 Microbalanza .....	44
Figura 3.6 Metodología experimental.....	45
Figura 4.1 Forma característica MPCM 56D (6000x).....	62
Figura 4.2 Forma característica MPCM 37 (6000x) .....	62
Figura 4.3 Interfaz software Scandium©.....	64
Figura 4.4 Medición de diámetros MPCM 56D (2000x) .....	65
Figura 4.5 Medición de diámetros MPCM 37 (2000x).....	66
Figura 4.6 Distribución de tamaño de partícula MPCM 56D .....	69
Figura 4.7 Distribución de tamaño de partícula MPCM 37.....	70
Figura 4.8 Absorbancia vs. Longitud de onda para diferentes concentraciones de MPCM 56D .....	71
Figura 4.9 Absorbancia vs. Longitud de onda para diferentes concentraciones de MPCM 37.....	72
Figura 4.10 Absorbancia en función de longitud de onda y concentración de MPCM 56D y MPCM 37.....	73
Figura 4.11 Comparación de resultados de colectores de calor de latente (LHS) y colectores de calor sensible (SHS) (Adaptado de Vijay [7]).....	76

Figura 4.12	Esquema de un colector solar convencional (Adaptado de Gende [38] ) .....	77
Figura 4.13	Esquema de colector solar de absorción de directa reforzado con nanofluidos Au-SiO <sub>2</sub> (Adaptado de Lee [41]) .....	78
Figura 4.14	Índice de refracción de nanofluidos en comparación con el agua (Adaptado de Taylor [42]) .....	79
Figura 4.15	Eficiencia de colector solar como función de diámetro de partícula y concentración de nanopartículas de plata Ag (Adaptado de Otanicar [44]) .....	81
Figura 4.16	Absorbancia vs. Concentración volumétrica de MPCM 56D y MPCM 37 en comparación con nanofluidos de grafito (Datos adaptados de Otanicar [45]) .....	83

## ÍNDICE DE TABLAS

		Pág.
Tabla 1	Aplicaciones de PCM en almacenamiento de energía térmica (Adaptado de Zalba [12]) .....	18
Tabla.2	Formas comerciales de PCM [31] .....	23
Tabla 3	Propiedades de MPCM 56D .....	30
Tabla 4	Propiedades de MPCM 37 .....	31
Tabla 5	VARIABLES DE ESTUDIO.....	36
Tabla 6	Valores de cantidad de soluto y solvente para muestras MPCM 37 y MPCM 56D.....	47
Tabla 7	Valores experimentales para preparación de muestras MPCM 56D .....	50
Tabla 8	Valores experimentales para preparación de muestras MPCM 37 .....	50
Tabla 9	Parámetros de Microscopía SEM.....	52
Tabla 10	Parámetros de Analizador de Tamaño de Partículas.....	55
Tabla 11	Parámetros de equipo para Espectrofotometría .....	58
Tabla 12	Resultados de caracterización de partículas MPCM 56D (Medidos en magnificación 2000x) .....	67
Tabla 13	Resultados de caracterización de partículas MPCM 37 (Medidos en magnificación 2000x) .....	67
Tabla 14	Absorbancia máxima - MPCM 56D .....	74
Tabla 15	Absorbancia máxima - MPCM 37 .....	75
Tabla 16	Estudio del incremento de la capacidad de calor específico con la adición de PCM (Adaptado de Eames [43]) .....	80

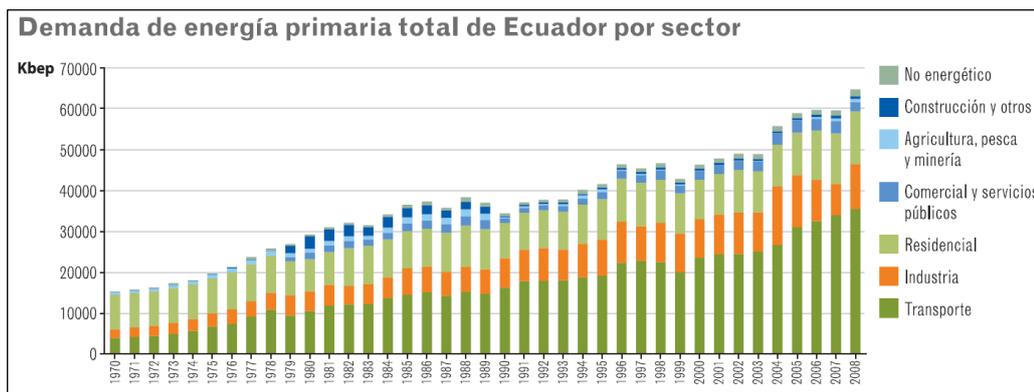
# INTRODUCCIÓN

## 1 INTRODUCCIÓN

### 1.1 Antecedentes

La energía se puede obtener de los diversos recursos con los que cuenta el planeta. Debido al crecimiento poblacional e industrial en el país y el mundo, durante décadas, las personas se han dedicado a la investigación de nuevas metodologías que logren procesos más eficientes y a la vez económicos, con el fin de generar y proveer energía. Recursos renovables y no renovables han sido la vía de suplir la necesidad; actualmente los recursos renovables han ganado fuerte popularidad en la generación eléctrica, debido al necesario cuidado del ecosistema.

En el Ecuador la demanda de energía primaria total se resume, en orden prioritario, en Transportación, Sector Industrial y Sector Residencial, como se muestra en la Figura 1.1.



**FIGURA 1.1 DEMANDA DE ENERGÍA PRIMARIA TOTAL DE ECUADOR POR SECTOR (TOMADO DE CASTRO [1])**

Energía eólica, hidroeléctrica, solar y geotérmica entre otras, se han convertido en temas de investigación imperativos. En Ecuador la fuente principal para la generación de energía, es mediante Hidroeléctricas, que representan el 43.7% de la capacidad efectiva en generación, y existen proyectos con referencia a este rubro que suplirían la demanda proyectada hasta el año 2020, de acuerdo con Castro [1] existe una iniciativa estatal en donde el 86% de la expansión planificada será con base en fuentes Hidroeléctricas, en donde el 32% está centrada a una sola central hidroeléctrica, Coca Codo Sinclair, que generará 1500 MW.

La energía solar en Ecuador solamente representa el 0.26% de la capacidad instalada y brinda 13.8 MW de capacidad efectiva, lo cual a

nivel de país no es considerable, pero puede contribuir enormemente a nivel de industria o residencia; por otro lado en países de mayor desarrollo como China, India, Unión Europea y Estados Unidos existe un marcado desarrollo en este rubro, por lo cual se espera que llegue a ser competitivo con otros métodos de obtención de energía. Este avance en energías renovables, según la Agencia Internacional de Energía (IEA por sus siglas en inglés) [2] se debería según las políticas de subsidio de cada gobierno. Existen estudios que describen procesos por el cual se busca incrementar una eficiencia en esta metodología, logrando así una reducción de costos y mayor optimización de los recursos.

Con este trabajo investigativo se desea explorar el uso de este material como medio para hacer más eficiente los procesos de captación y transporte de energía térmica solar. Este trabajo permitirá sugerir alternativas para aplicar este material en sistemas energéticos del sector residencial y del sector industrial.

## **1.2 Justificación**

La radiación proveniente del sol es una fuente capaz de solventar las demandas energéticas de la civilización humana. Aproximadamente brinda una cantidad de 885 Millones de Tera Watt-Hora (TWh) sobre la superficie de la tierra en un año. En otras cifras, le tomaría

aproximadamente, 1 hora y 25 minutos al sol, enviar la cantidad de energía que consumió el planeta en todo el año 2011[2–4]

La obtención de energía a través de esta vía muestra un crecimiento importante, según la IEA [2] se estima que para el año 2035 la energía solar aumentará del 0.4% al 2.6% de la generación global de electricidad. La radiación solar puede ser capturada y transformada en dos formas: calor y electricidad. La aplicación más desarrollada es la primera de ellas, siendo también motivo principal de este trabajo.

Las celdas fotovoltaicas son el medio para obtener electricidad mediante la radiación solar debido a la excitación de electrones producida por los fotones incidentes sobre los paneles. Según Parida [5] la proyección para el futuro de electricidad por radiación solar se debería por el agotamiento de recursos fósiles. Sus aplicaciones son extensas y cubren necesidades en edificios, usos industriales y residenciales.

La obtención de calor por radiación solar se aprovecha mediante los colectores solares térmicos. De acuerdo con Kalogirou [6], la energía solar en forma de calor en colectores solares es ampliamente utilizada para: calentamiento de agua, enfriamiento y calentamiento de lugares con necesidades termodinámicas específicas, procesos industriales de transferencia de calor y demás aplicaciones. Generalmente los colectores solares utilizan fluidos de fácil adquisición y bajo costo, siendo el agua uno de los más comunes.

El desarrollo de colectores solares térmicos de mayor eficiencia comprende optimizar las propiedades ópticas y térmicas de los fluidos de trabajo. Una opción de mejora en el almacenamiento de energía térmica es utilizar material que cambia de fase microencapsulado (MPCM por sus siglas en inglés). El uso de este material supondría un cambio en el diseño de colectores solares. Se ha comprobado que un sistema solar que incorpora material que cambia de fase en el fluido de trabajo supera en cantidad de almacenamiento de calor a un sistema solar con agua del mismo tamaño [7]. Con esto se propone que pueden ser elaborados colectores solares más pequeños y eficientes con una reducción de costos de capitales y operación.

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo general**

El trabajo tiene como objetivo caracterizar experimentalmente la absorbancia en el espectro solar de lechadas que contienen material microencapsulado que cambia de fase. Se busca determinar relaciones de estas propiedades con parámetros tales como tamaño de partículas, concentración de solución y naturaleza del material. Los resultados permitirán realizar un análisis sobre la aplicabilidad de este material en diseño de colectores solares térmicos.

### **1.3.2 Objetivos específicos**

Con el fin de alcanzar el objetivo general planteado, es imperativo plantear ciertos objetivos específicos, que a continuación se detallan:

- Estudiar la absorbancia espectral de los materiales MPCM en intervalos específicos.
- Determinar el intervalo de longitud de onda, dentro de la gama de espectro electromagnético, en donde se presenta la mayor absorbancia en cada material a diferentes concentraciones.
- Comparar el tamaño de partícula, la forma de microcápsulas, la distribución del tamaño y la absorbancia en diferentes concentraciones de disoluciones coloidales (MPCM & Agua destilada).
- Evaluar resultados obtenidos y sugerir posibles mejoras en sistemas de almacenamiento térmico.
- Analizar la aplicabilidad de los resultados obtenidos en sistemas térmicos solares y determinar las propiedades que pueden mejorarse.

# CAPÍTULO 2

## 2 MATERIALES

En el presente capítulo se presenta una revisión bibliográfica sobre material que cambia de fase (PCM) y lechadas de material que cambia de fase microencapsulado (MPCM). Se mencionan los principios físicos del material, su clasificación, propiedades y aplicaciones.

### 2.1 Material de Cambio de Fase (PCM)

Los materiales que cambian de fase (PCM) han sido motivo de estudio desde hace varias décadas por su potencial uso en sistemas de almacenamiento térmico. El principio consiste en aprovechar el calor latente de estos materiales para el almacenamiento de energía. El material que cambia de fase con más aplicaciones ingenieriles es el hielo, el cual cambia de sólido a líquido a 0°C con la aplicación de energía en forma de calor. En la actualidad se realizan estudios en el

desarrollo de materiales PCM que puedan congelarse a temperaturas diferentes a 0 °C. [8]

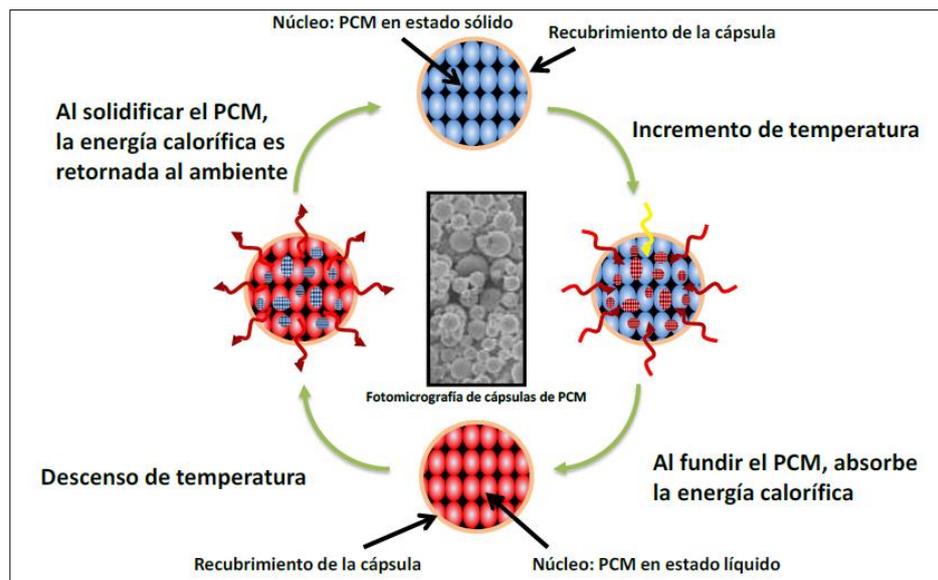
El primer estudio sobre PCM fue documentado por Telkes [9–11] en 1948, quien propuso el uso de PCM en paredes y techos para la regulación de temperatura de un edificio; para ello construyó una casa de 135 m<sup>2</sup> con 8 colectores solares en el techo y utilizó sales hidratadas como PCM. Muchos investigadores se han dedicado al desarrollo e instrucción de esta tecnología. En su investigación, Zalba [12] detalla varios PCM que han sido estudiados y desarrollados para diversas aplicaciones; a su vez propone una división para los tipos de TES, la primera de ellas es la protección térmica de lugares o productos; la otra división propuesta es el almacenamiento de energía para su uso posterior.

### **2.1.1 Características Principales**

Los PCM son sustancias que pueden generar o absorber una gran cantidad de energía, en general en forma de calor. La forma de calor aprovechada del material es el calor latente, cuya definición es: “La cantidad de calor que necesita una sustancia para pasar de un estado a otro, sin un cambio en la temperatura”. Muestra ciertas ventajas sobre el calor sensible, definido como: “Cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura de una muestra de un 1 gr. en 1°C”; también utilizado para

fines energéticos. Debido a que todo cambio de fase se da a una temperatura constante, existe un mayor control sobre el proceso. La alta densidad de energía de los sistemas de almacenamiento latente permite compactar instalaciones y vuelve práctica la manufactura de componentes y sistemas.

La Figura 2.1 muestra el principio físico del material que cambia de fase (PCM).



**FIGURA 2.1 PROCESO DE CAMBIO DE FASE PCM (TOMADO DE BALART [13])**

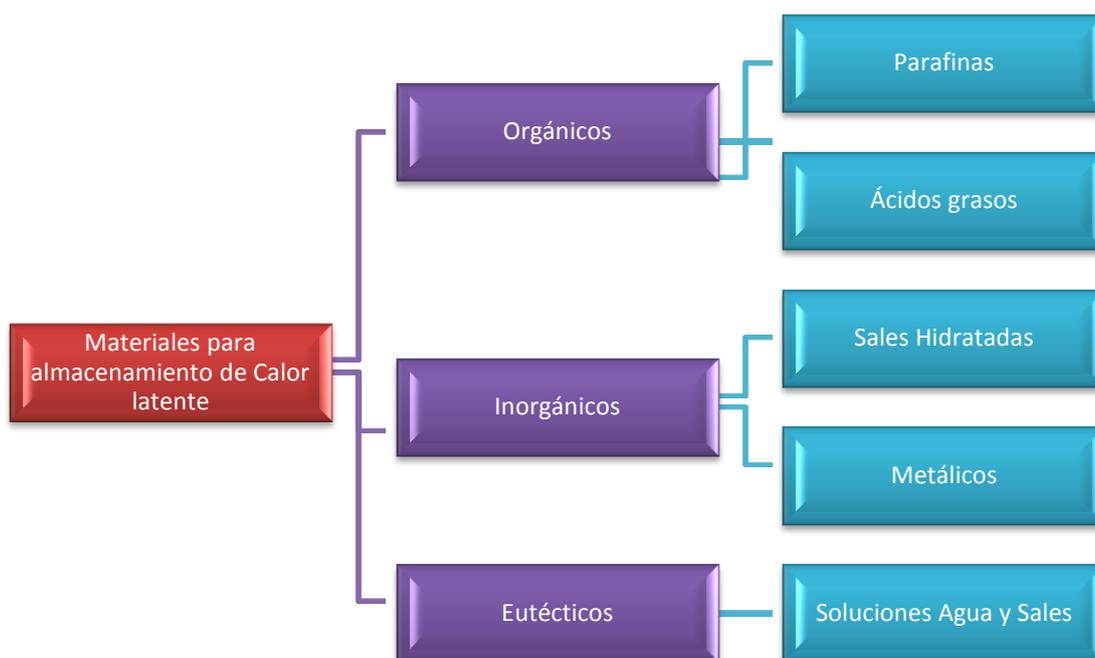
Los PCM son atractivos para fines energéticos debido a su facilidad de mantener un control en intervalos pequeños de temperatura; de modo

que, brinda una ventaja sobre demás materiales que trabajan con calor sensible, los cuales demandan una mayor temperatura para una misma cantidad de energía. Así mismo, los PCM cuentan con una amplia gama de temperaturas de trabajo (carga y descarga energética del material) que ofrece la posibilidad de elegir el material apropiado en la aplicación deseada.

Sharma [14] expone las características deseadas que se buscan en un PCM para sistemas de almacenamiento térmico. Para propiedades térmicas, la temperatura de cambio de fase del PCM debe ser tal que coincida con la temperatura de operación de la aplicación de enfriamiento o de calefacción. Se busca un alto calor latente de transición, buena transferencia de calor para asistir la carga y descarga de la energía almacenada. En propiedades físicas, se busca uniformidad en cambio de fase, alta densidad energética y pequeños cambios de volumen durante la transición. En propiedades cinéticas, se desea bajo grado de sobreenfriamiento y buena tasa de cristalización de núcleos. En propiedades químicas es deseable una larga estabilidad química, lo que reduce la degradación por pérdida de agua en PCM. También se desea una buena compatibilidad con materiales de construcción, no toxicidad y no inflamabilidad para ampliar su uso en aplicaciones. Por último, económicamente es deseable contar con PCM con alta disponibilidad en el mercado y tenga bajo costo.

### 2.1.2 Clasificación

Los PCM pueden ser clasificados en materiales orgánicos, materiales inorgánicos y materiales eutécticos. Dentro de esta clasificación, cada uno de los materiales tiene valores de punto de fusión, punto de congelamiento y entalpía de fusión variados. Lo que brinda una amplia gama de elección del PCM más idóneo para las condiciones de cada aplicación. La Figura 2.2 representa la clasificación del material de cambio de fase sugerida por Abhat e Hirman[15,16]:



**FIGURA 2.2 CLASIFICACIÓN DE PCM (ADAPTADO DE ABHAT E HIRMAN[15,16])**

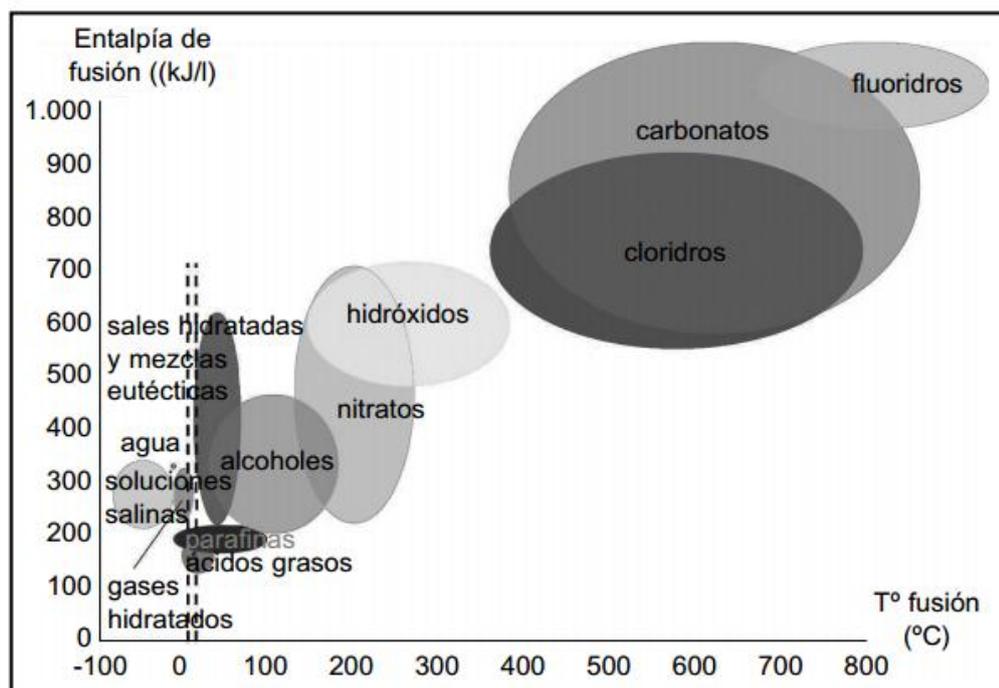
Los PCM orgánicos se subclasifican en parafinas y ácidos; es decir cadenas de hidrocarburos. Las parafinas y ácidos grasos tienen facilidad de formar núcleos y cristales durante el cambio de fase sin ayuda de un agente nucleador. Además, como ventajas se pueden enunciar su estabilidad térmica y que no sufren de histéresis o sub-enfriamiento (el líquido se enfría por debajo del punto de solidificación). Como desventaja más significativa se tiene que no cuentan con valores altos de calor de fusión y de conductividad térmica. Su costo de producción es superior comparado con los materiales inorgánicos. Las parafinas han sido utilizadas en sistema de almacenamiento térmico debido a sus valores de temperatura de fusión.

Los materiales inorgánicos se subclasifican en sales hidratadas y materiales PCM metálicos. Cuentan con un alto valor de calor de fusión y tienen un bajo costo de adquisición, lo que los convierte en materiales atractivos para aplicaciones de almacenamiento térmico. Sin embargo las sales hidratadas sufren de sub enfriamiento lo que les da cierta desventaja sobre los materiales orgánicos, aunque se puede contrarrestar con la incursión de agentes nucleadores. Otro aspecto a considerar es la interacción que tiene con el ambiente. Generalmente los materiales inorgánicos tienden a sufrir corrosión y tienen baja estabilidad

química, lo que indica que necesitarían de un contenedor para ser utilizados con otros materiales.

Los materiales eutécticos son la mezcla de dos o más componentes orgánicos e inorgánicos, los cuales cambian de fase congruentemente. Las mezclas eutécticas de materiales brindan una densidad de almacenamiento térmico ligeramente superior a los PCM orgánicos con valores de punto de fusión similares a los materiales de la mezcla. Entre las desventajas se puede mencionar el costo elevado de su fabricación y que no existen estudios concretos sobre la evaluación de propiedades de la mezcla.

La Figura 2.3 muestra la relación entre temperatura y calor de fusión que tienen los PCM, misma que puede servir de guía de selección. Los materiales de mayor uso son las parafinas, los ácidos grasos, las sales hidratadas y las mezclas eutécticas, las cuales tienen un intervalo de temperaturas entre 0 y 100°C de temperatura de fusión. Como se muestra en la Figura 2.3, esta clasificación de materiales tiene diferentes valores de entalpía de licuación. Por ejemplo: el uso de parafinas sugieren valores cerca de 200 KJ/L durante el proceso de cambio de fase; mientras que, las sales hidratadas y mezclas eutécticas muestran valores de entalpía entre 200 y 600 KJ/L.



**FIGURA 2.3 RELACIÓN ENTRE TEMPERATURA Y CALOR DE FUSIÓN PARA LOS PCM (TOMADO DE OLIVER [11])**

Ciertamente un solo material o una sola clasificación no puede ser utilizada para todos los sistemas, es por esto que siempre debe existir un análisis sobre cuál sería el material ideal para utilizar.

### 2.1.3 Propiedades

Las propiedades dependen del material PCM utilizado, en la Figura 2.3 se puede observar los diversos valores de entalpía para las varias clasificaciones de PCM. La entalpía de fusión, la temperatura de fusión y la temperatura de congelamiento son propiedades intrínsecas principales

de los materiales, y son motivo de selección en las aplicaciones. Mientras menor sea la diferencia entre las temperaturas de cambio de fase, puede existir un mejor control de una temperatura deseada. De manera general, las propiedades de los PCM son dependientes del tipo de material usado.

En el caso de materiales orgánicos se tienen bajos valores de conductividad térmica, una alta estabilidad química y facilidad para cristalizar núcleos; contrariamente en los materiales inorgánicos que tienen una mejor conductividad térmica pero mala interacción en compuestos y necesidad de agentes nucleadores.

Se busca que la densidad relativa del material sea aproximadamente igual a uno, siendo así capaz de mezclarse con otros fluidos de fácil adquisición, como por ejemplo agua destilada.

El rendimiento de los PCMs en sistemas de transferencia de calor depende de varios factores resumidos en el número adimensional Stefan (Ste) que tiene la siguiente expresión.

$$Ste = \frac{Q_{sensible}}{Q_{latente}} = \frac{C_p (q_w \frac{R}{K})}{C_m h_f} \quad (1)$$

Y se define como la relación del calor sensible del material sobre su calor latente. Estos valores fueron determinados para un caso de flujo a través de un tubo. [17]

En el caso de PCM se prefiere un número de Stefan menor a uno, lo que sugiere un alto valor de calor latente sobre el calor sensible del material y por ende una mejor eficiencia del material que cambia de fase. Se buscan materiales con un alto valor de entalpía de fusión y alto valor de fracción de masa, en caso que sea utilizado en suspensión. Sin embargo, el alto valor de concentración de masa da un alto valor de viscosidad, lo que produce mayores costos en su aplicación.

Las propiedades ópticas de los PCM no han sido investigadas ampliamente y son variables de estudio para trabajos de investigación. Este trabajo de investigación se enfoca específicamente en el estudio de la absorbancia que tienen los materiales PCM sometidos a la incidencia de luz solar.

De acuerdo con lo establecido en la ley de Beer Lambert se espera que exista una relación proporcional entre los valores de absorbancia obtenidos por longitudes de onda específicos que atraviesan a una sustancia y la concentración de dicha sustancia. Como se muestra en la Ec. 2:

$$A_{\lambda} = -\log\left(\frac{I}{I_0}\right) = \varepsilon \cdot C \cdot l \quad (2)$$

Para el caso de PCM en aplicaciones solares se espera que los máximos valores de absorbancia se encuentren en longitudes de onda

correspondientes a ultravioleta, luz visible e infrarroja. Los cuales son características de la radiación solar en el espectro electromagnético. [3]

Las propiedades más importantes para la selección de un material que cambia de fase son: temperatura de operación, entalpía de cambio de fase, densidad de almacenamiento de energía y comportamiento con sustancias complementarias.

#### **2.1.4 Aplicaciones**

Las aplicaciones de los PCM son amplias y diversas. Debido a la versatilidad en tamaño y forma, el material puede ser utilizado en varios campos; entre ellos se tiene ingenieriles, deportivos, energéticos, industriales y residenciales. [18–22]. La Tabla 1 enlista las aplicaciones de PCM en el área de almacenamiento de energía térmica resumidas por Zalba [12].

**TABLA 1**  
**APLICACIONES DE PCM EN ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA**  
**TÉRMICA (ADAPTADO DE ZALBA [12])**

Listado de Aplicaciones de PCM
Almacenamiento térmico de energía solar
Almacenamiento pasivo en arquitectura bioclimática
Protección térmica de alimentos: transporte, hostelería, etc.
Agroindustria de alimentos, vino, productos lácteos, invernaderos
Protección térmica de dispositivos electrónicos
Aplicaciones médicas: transporte de sangre, mesas de operación, terapias frío-calor
Enfriamiento de motores (eléctricos y de combustión)
Confort térmico en vehículos
Sistemas térmicos en aeronaves

Uno de los mayores campos desarrollados es el almacenamiento de productos de alto cuidado, como lo son vacunas sensibles a temperaturas, alimentos perecibles o medicinas. Mediante el uso de PCM se mantiene el control de temperaturas idóneas para la transportación de estos insumos. Laboratorios y empresas implementan esta tecnología en servicios de transporte, garantizando el cuidado de los mismos.



**FIGURA 2.4 ALMACENAMIENTO DE VACUNAS CON  
TECNOLOGÍA PCM [23]**

En el campo de la edificación, el ahorro de energía en edificios y domicilios ha motivado el desarrollo de sistemas que produzcan la misma sensación de confort, con un menor consumo de energía en sistemas de enfriamiento. Algunos estudios como los de Xichun [24], Harland [10], Tian [4] y Zhao [19] han propuesto diseños para la optimización de edificios y sistema de almacenamiento mediante el uso de PCM. Según el manual técnico de ASHRAE [8], la aplicación de PCM en tecnologías de almacenamiento térmico minimiza los costos de energéticos mientras previene la reducción prematura de la capacidad de almacenamiento de los sistemas.



**FIGURA 2.5 UTILIZACIÓN DE PCM EN BLOQUES DE OFICINAS EN BERLÍN (A) Y EMPASTADO DE PAREDES SOBRE CAPILARES CON PCM (B) [25]**

Los PCM también están presentes en las áreas electrónica, comercial y textil; como es el caso del diseño de dispositivos y de trajes térmicos [20], que se han perfeccionado con el fin de generar mayor confort en las personas. El gran beneficio concebido se debe al ahorro energético y por ende económico que produce el uso de PCM. Básicamente los PCM se han convertido en una forma de alternativa energética en estas áreas debido a su bajo valor comercial y fácil adaptación en los diversos sistemas solicitados.

Ingenierilmente la incursión de PCM ha logrado optimizar sistemas residenciales e industriales. Summers [26] adicionó PCM en el diseño de un deshumidificador de aire solar y de esta forma mejoró la eficiencia del dispositivo en 35%. Bates [27] estudió el uso de PCM en la refrigeración

de sistemas de taladrado de pozos, sugiriendo una alternativa ingenieril en esta aplicación. Muthusivagami [21] mostró que el uso de PCM en cocina solares muestra una mejora en su funcionamiento. Los PCM también han llegado a ser implementados en exploraciones espaciales como el caso de Apollo 15, en donde el vehículo “Lunar rover” contó con parafinas para almacenamiento térmico en su exploración lunar [11].

Actualmente se estudian los PCM en trabajos de fluidos para tecnologías de colectores solares. Kurklu [28] desarrollo un prototipo de colector solar con agua y parafinas PCM (de 45-50 °C de punto de fusión) para investigar rendimientos térmicos a corto plazo en condiciones ambientales de Turquía. Kurklu concluyó que el colector solar con PCM logró una eficiencia térmica máxima del 80% y resultó ser más ventajoso sobre colectores solares de agua caliente en términos de peso total del sistema y costos.

Fath [29] estudió el rendimiento térmico del efecto termosifón en colectores solares que aplican materiales PCM (con 32, 43, 51 y 61 °C de punto de fusión) y que son aplicados a sistemas de calefacción de aire. El análisis de Fath logró determinar el material PCM con mayor rendimiento para condiciones ambientales de la ciudad Alejandría, Egipto

ofreciendo temperaturas adecuadas para la aplicación de calefacción de aire.

Sharma [30] estudió el beneficio térmico del diseño una cocina solar basado en un colector solar de tubos al vacío y PCM (con 118°C de punto de fusión) como material de almacenamiento térmico en las condiciones ambientales de Japón. Durante las horas de sol el PCM almacenó la energía en forma de calor latente y luego se utilizó para cocinar en horarios nocturnos. De esta forma, el sistema permitió cocinar en horarios diurnos y nocturnos con energía solar. El PCM generó temperaturas de hasta 130°C, produciendo condiciones apropiadas para la cocción de alimentos.

## **2.2 Microcápsulas de Material de Cambio de Fase (MPCM)**

Los PCM son producidos y comercializados en diferentes presentaciones dependiendo de la aplicación a la cual van dirigidos. La encapsulación es una técnica desarrollada en búsqueda de la optimización del producto. Los laboratorios que estudian estos materiales encapsulan el PCM para obtener variantes en el comportamiento del material y sus propiedades. En la Tabla 2 se muestran las formas comerciales más comunes de PCM.

**TABLA 2**  
**FORMAS COMERCIALES DE PCM [31]**

	PCM	Micro Cápsulas PCM	Macro Cápsulas PCM
Descripción	Esta es la forma más simple del material. Se encuentra en estado sólido por encima de la temperatura de congelamiento, y se encuentra en estado líquido bajo su temperatura de fusión.	La encapsulación de material que cambia de fase crea una forma microscópica de contención del material. En esta forma no se percibirá el estado de material. Las capsulas tienen una excelente estabilidad química y térmica (250C+).	Macro PCM son formas encapsuladas de Material que cambia de fase, a diferencia de M PCM, los Macro PCM tienen dimensiones de 3-4 mm.

El material que cambia de fase microencapsulado es una forma desarrollada en laboratorios, la cual busca mayor eficiencia y productividad del uso de PCM. El uso de materiales orgánicos e inorgánicos como herramientas para el control de temperaturas ha generado que se incursione en diferentes campos. Ciertamente muchos de estos materiales tienen desventajas como las ya mencionada anteriormente. La técnica de microencapsulación de material es alternativa que se ha utilizado para reducirlas.

Bates [27] realizó estudios acerca del taladrado de pozos empleando un PCM orgánico como refrigerante. El material PCM formó aglomeraciones

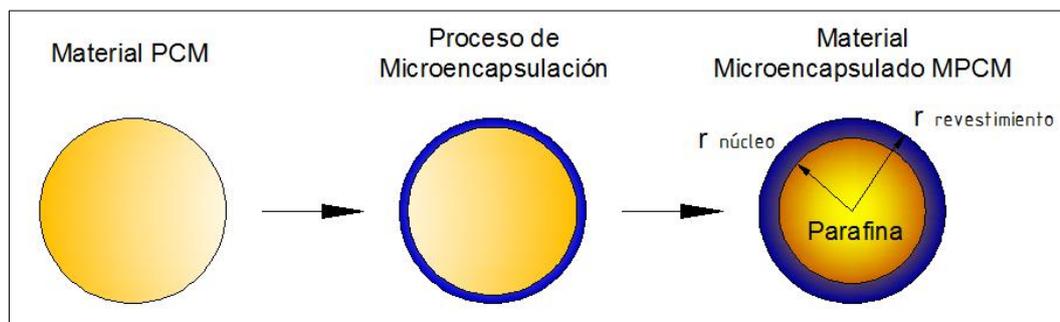
indeseadas y en consecuencia el material perdió sus propiedades y produjo taponamientos en el flujo del fluido. Bates concluye su investigación sugiriendo micro encapsular los PCM con el fin de mantener las propiedades individuales de las partículas y dar estabilidad al material.

Estudios realizados por Kasza [32] y Roy [33] apuntan a que la adición de MPCM en sistemas térmicos provoca que exista un aumento en la tasa de transferencia de calor. Esto se debería al valor de coeficientes convectivos generados alrededor de cada cápsula debido a su proceso de cambio de fase y el aumento de su capacidad de calor específico.

### **2.2.1 Características y Propiedades**

El material que cambia de fase microencapsulado corresponde a una mejora del uso de PCM en sistemas térmicos. Su característica principal es que el material que cambie de fase, se encuentra encerrado por un polímero que corresponde aproximadamente entre 10-20% de la masa total de la cápsula (como se muestra en la Figura 2.6). Esta disposición crea un aislamiento del material con el ambiente y a su vez no reacciona, ni impide la transferencia de calor hacia o desde el material. Los MPCM son de gran estabilidad térmica y química, y mediante un proceso de

micro encapsulación logran tamaños de partícula del orden de micrones. Debido a su tamaño es cómodo su uso en varias aplicaciones.



**FIGURA 2.6 PROCESO ESQUEMÁTICO DE MICRO ENCAPSULACIÓN  
(ADAPTADO DE WU [34])**

Con el uso de PCM microencapsulado se solucionan muchos de los problemas que presentan los materiales sin revestimiento. El uso de corteza crea una barrera entre el líquido portador y el material que cambia de fase, logrando así que no exista posibilidad de reacción con este, manteniendo las propiedades del PCM. Otro aspecto relevante es el manejo de volumen dentro de las microcápsulas, con la presencia del revestimiento el material puede cambiar de fase como un núcleo y ocupar el volumen de la cápsula. Finalmente, un aspecto importante es el beneficio en la tasa de transferencia de calor, de acuerdo con Kasza y Chen [32], el uso de microcápsulas en soluciones coloidales mejorará la conductividad térmica efectiva y la capacidad de calor efectiva.

Debido a que las soluciones con MPCM son coloidales, para fines de cálculos se usan las propiedades efectivas de la mezcla. Charunyakorn[17] propuso las ecuaciones que definen dichas variables. La densidad un material PCM y la densidad efectiva de la mezcla se calculan con las Ecs. 3 y 4 respectivamente:

$$\rho_m = \frac{8}{7} \left( \frac{d_m}{d_c} \right) \quad (3)$$

$$\rho_b = \frac{1}{\frac{m_p}{\rho_p} + \frac{(1 - m_p)}{\rho_f}} \quad (4)$$

Y la capacidad de calor específico efectivo se calcula con la Ec. 5,

$$Cp_{avg} = m_p Cp_m + m_w Cp_w \quad (5)$$

Las Ecs. 3 a 5 expresan que estas propiedades están en función de la concentración de masa de PCM, el tamaño del recubrimiento y propiedades del líquido que lo porta.

Debido a la característica de poseer más de una fase, no se ha determinado una correlación totalmente fiable que aplique para el cálculo del coeficiente convectivo global, podría deberse a la no homogeneidad

del proceso de cambio de fase. Sin embargo existe la certeza que el uso de MPCM mejora el rendimiento de transferencia de calor [33,35,36] debido a la alta relación de área sobre volumen de las cápsulas, el aprovechamiento de las propiedades del PCM microencapsulado y el contacto directo con el líquido solvente.

La microencapsulación, sin embargo, lleva a ciertas desventajas. La microencapsulación eleva el grado de sobreenfriamiento del material. Para disminuir el grado de sobreenfriamiento se requiere adicionar agentes nucleadores que tengan rendimientos consistentes durante múltiples ciclos térmicos. [37] Es decir, los agentes nucleadores deben ser materiales con fiabilidad a largo plazo. Por otra parte, al momento de preparar lechadas junto con otros aditivos es imperativo realizar estudios de compatibilidad química con la cápsula de revestimiento. Las sustancias terceras pueden reaccionar químicamente debilitando o disolviendo la cápsula que rodea el PCM. [37]

La preparación de lechadas de MPCM demanda un control de las propiedades termodinámicas; por ejemplo, la viscosidad varía considerablemente con el tamaño de partícula y las concentraciones de los PCM, agentes nucleadores y aditivos. Además, las partículas de

MPCM presentan la tendencia a formar aglomeraciones, lo que implica la pérdida de características individuales de las cápsulas. Por último, debido a los amplios rangos de tamaño de partícula producidos por la encapsulación, es difícil llegar a modelos analíticos que calculen los coeficientes convectivos de las partículas contenidas en la lechada.

### **2.3 Materiales para Análisis**

Para el caso específico de este trabajo investigativo, se cuenta con dos muestras de MPCM. El MPCM 37 Torta Húmeda, material en forma de polvo hidratado, según datos del fabricante cuenta con un porcentaje de agua. El material microencapsulado es parafina, su punto de fusión está en 37°C. El MPCM 56D Polvo Seco, material en forma de polvo seco, según datos del fabricante. El material microencapsulado es parafina, su punto de fusión se encuentra en 56°C. Las Figura 2.7 y 2.8 muestran los materiales MPCM que se utilizarán para el estudio y su presentación.



**FIGURA 2.7 PRESENTACIÓN DE MATERIALES MPCM**



**FIGURA 2.8 MATERIALES PARA ESTUDIO**

En la Tabla 3 se detallan las propiedades de MPCM 56D que despacha el fabricante Microtek Laboratories.

**TABLA 3**  
**PROPIEDADES DE MPCM 56D**

PROPIEDAD	DESCRIPCIÓN
Apariencia	Color Blanco
Forma	100% solidos (polvo seco)
Composición de capsula	85 – 90 % (% en peso) PCM 10 – 15 (% en peso) recubrimiento polímero
Material núcleo	Parafina
Punto de fusión	56°C (133°F)
Calor de fusión	160 – 180 J/g
Gravedad Específica	0.9
Estabilidad de la temperatura	Extremadamente estable - menos del 1% de fuga cuando se calienta hasta 250°C
Ciclismo térmico	Múltiple

De igual manera se detallan las propiedades de MPCM 37 que brinda el fabricante Microtek Laboratories en la Tabla 4.

TABLA 4

## PROPIEDADES DE MPCM 37

PROPIEDAD	DESCRIPCIÓN
Apariencia	Color Blanco
Forma	70% solidos, 30% agua
Composición de capsula	85-90% wt.% PCM 10-15 wt.% recubrimiento de polímero
Material núcleo	Parafina
Punto de fusión	37°C (99°F)
Calor de fusión	190 - 200 J/g
Gravedad Específica	0.9
Estabilidad de la temperatura	Extremadamente estable - menos del 1% de fuga cuando se calienta hasta 250°C
Ciclismo térmico	Múltiple

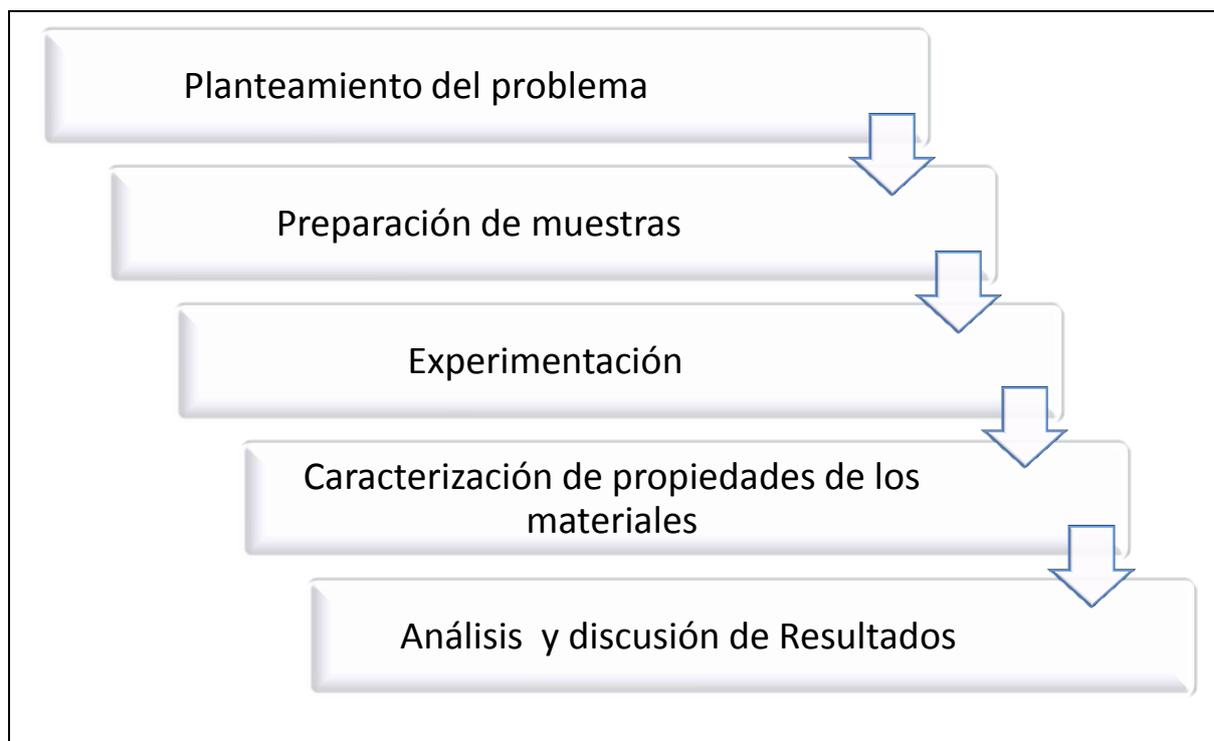
# **CAPÍTULO 3**

## **3 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN**

En este capítulo se detallan los pasos seguidos para el desarrollo de la investigación. Se incluye la definición de la metodología utilizada y variables de estudio, datos de equipos e instrumentos de medición, y protocolo experimental para cada prueba.

### **3.1 Metodología utilizada**

Para la ejecución del presente trabajo investigativo se planteó un plan de acción, mismo que se muestra en la Figura 3.1 y que se detalla a continuación.



**FIGURA 3.1 PROCESO IMPLEMENTADO PARA EL TRABAJO INVESTIGATIVO**

**Planteamiento del Problema:** Etapa inicial de la investigación, en donde se recopilará información sobre la manipulación y funcionamiento de los equipos a utilizarse, delineamiento de las variables de estudio y las condiciones experimentales, la preparación de muestras indicada para cada equipo y los intervalos estimados para nuestras variables de estudio.

**Preparación de muestras:** Proceso en el cual se realizará el desarrollo de las muestras indicadas para cada equipo, tomando en cuenta las recomendaciones del tipo de equipo, los protocolos impuestos por el

laboratorio y la hoja técnica proporcionada por el proveedor de las MPCM.

**Experimentación:** Etapa donde se ejecutarán las pruebas previamente programadas en la planificación. Es necesaria la respectiva capacitación en los diversos equipos a utilizarse. Así también esta etapa representa un proceso de retroalimentación, lo que garantiza mejoras en los resultados, perfeccionando lo inicialmente planteado. Para completar con esta etapa, se hará uso Microscopio de Barrido (SEM) y Analizador de Tamaño de Partículas para caracterización de tamaño, Espectrofotómetro para la caracterización de propiedades.

**Caracterización de propiedades de los materiales:** Etapa interpretativa de los resultados obtenidos durante la experimentación, y donde se proporcionan valores dimensionales a las variables de estudios, dando apertura al análisis e interpretación de los mismos.

**Análisis y discusión de resultados:** Etapa que usará criterios ingenieriles con fundamentos en los conocimientos adquiridos para una proyección teórica sobre el caso en estudio, en donde surgen enunciados y reformas generales para escenarios similares.

### **3.2 Definición de variables de estudio**

El estudio de nuevos materiales, tales como MPCM, apunta a una exploración de las propiedades de los mismos. Como ya fue mencionado anteriormente, las investigaciones y aplicaciones de MPCM son relativamente nuevas, por esta razón la caracterización de los materiales es motivo imperativo de examen.

Parámetros como morfología de partícula, distribución de tamaño, área de microcápsulas y alguna tendencia cualitativa de las partículas podrían ayudar en la caracterización de las muestras; dicho análisis se realizará mediante el uso de microscopio electrónico de barrido (SEM) y analizador de partículas por difracción laser. Análogamente la variación de concentraciones volumétricas de MPCM en soluciones coloidales sometidas a técnicas de espectrofotometría con longitudes de onda variables, arrojaría información sobre su efecto en las propiedades ópticas del material. Las variables de estudio se muestran en la Tabla 5.

**TABLA 5**  
**VARIABLES DE ESTUDIO**

Variables de estudio
Morfología de MPCM
Diámetro medio de partícula
Distribución del tamaño de partículas
Concentraciones volumétricas de MPCM en soluciones coloidales
Absorbancia espectral de soluciones coloidales
Absorbancia máxima de soluciones coloidales

### 3.3 Equipos e Instrumentos de Medición

El proceso de caracterización de MPCM comprende el estudio de varios parámetros ya definidos anteriormente, para ello es imperativa la ejecución de pruebas. Para la elaboración de los ensayos se han realizado las respectivas investigaciones, además de seguir el procedimiento sugerido por el fabricante de cada equipo, así mismo para el uso de herramientas e instrumentos de medición para la preparación de muestras. A continuación se describen características, funciones y condiciones experimentales para cada ensayo a realizar.

## **Microscopio Electrónico de Barrido SEM**

El microscopio electrónico de barrido es un equipo que utiliza un haz de electrones para visualizar objetos con una resolución de alcance de hasta 4 nm en condiciones de alto vacío ( $\times 10^{-4}$  Pa), lo que permite definir con certeza la morfología de materiales. Con el uso de este equipo se espera visualizar las formas de material y realizar una estimación de tamaño promedio de partícula.

La técnica para producir imágenes consiste en la detección de electrones secundarios excitados y la detección de electrones retro dispersados que son emitidos desde la superficie de la muestra debido a la interacción con el haz de luz; que a su vez es generado por un filamento controlado por el operador. El uso de SEM demanda una gran inversión y espacio de operación; estos son factores que se ponen a consideración para su uso.

La microscopía electrónica de barrido requiere una adecuada preparación de muestra que comprende control de humedad, calidad de vacío y dispersión de la muestra. Dicho protocolo es explicado con mayor amplitud en el desarrollo de este capítulo. Debido a la naturaleza de las parafinas MPCM 37 y MPCM 56D se necesita realizar dispersión y desecación de una selección representativa de la muestra. No se

considera necesario realizar recubrimiento metálico, pues el material demuestra tener capacidades conductivas.

El equipo a utilizar es el microscopio electrónico de barrido SEM modelo INSPECT S del fabricante FEI Company mostrado en la Figura 3.2. Los datos técnicos se encuentran en el Apéndice B. Conjuntamente, el software Scandium© de “Olympus Soft Imaging Solutions GmbH” es un programa útil para el análisis de imágenes generadas en SEM; entre sus funciones están la generación de reportes y la caracterización de medidas como longitud, superficies, entre otros.



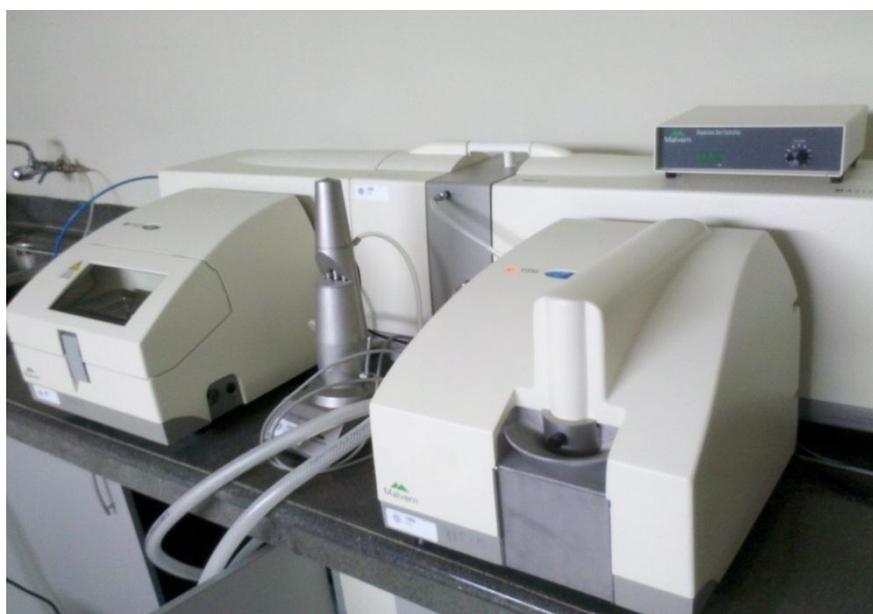
**FIGURA 3.2 MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO SEM**

### **Analizador de Tamaño Partículas**

El Analizador de Tamaño de Partículas es un equipo que mediante el principio de difracción laser determina la distribución de tamaño de partícula de una muestra. Su funcionamiento se basa en censar la intensidad de luz difractada. Al pasar el haz de luz por las partículas de las muestras, este se difracta al contacto con ellas, creando así un patrón de dispersión que es leído por un detector de luz. El principio tiene fundamento en la Teoría de Mie, que establece que las partículas de la muestra pueden ser consideradas como esferas con diámetro uniforme para el análisis. De esta forma el equipo brinda resultados de distribución de tamaño estimado. La ventaja del uso del equipo analizador de partículas es la facilidad y rapidez de operación, ya que no requiere de medios conductores o fuerzas de gran magnitud.

Al igual que el SEM, el analizador de partículas necesita de ciertas condiciones para su experimentación tales como una concentración adecuada de la solución, homogeneidad de la muestra y parámetros de control; todos ellos son detallados en el protocolo de experimentación del equipo. Al utilizar este equipo se espera obtener una distribución de tamaño de partícula de los materiales MPCM 56D y MPCM 37. Se busca conocer los intervalos de tamaño de partícula que se han logrado con el proceso de microencapsulación y analizar el uso del material. También

se pretende verificar la información proporcionada por el fabricante y evaluar los resultados en relación a la morfología observada en microscopía SEM. El equipo a utilizar es el Mastersizer 2000 con la unidad de dispersión Hydro SM del fabricante Malvern instruments, el mismo se muestra en la Figura 3.3



**FIGURA 3.3 ANALIZADOR DE TAMAÑO DE PARTÍCULAS  
MASTERSIZER 2000**

Los resultados de la técnica de difracción laser se expresan en términos de una medida central de tamaño de distribución y de dos parámetros de describen el grosor de la distribución. La mediana o  $d(0.5)$  es el cálculo más estable generado por la técnica de difracción laser y es el valor

utilizado para representar la medida central de tamaño. Similarmente, la práctica dicta que se deben incluir los dos puntos que describen la parte más gruesa y la más fina de la distribución, es decir los percentiles  $d(0.1)$  y  $d(0.9)$ .

Los resultados del analizador de tamaño de partícula están basados en un tipo de distribución volumétrica. La medida  $D[4,3]$  es el diámetro medio del volumen equivalente, el cual es utilizado para comparar los resultados de tamaño con imágenes que se observan bajo el microscopio. Este valor es sensible a la presencia de partículas grandes en la distribución y por tanto útil para identificar aglomeraciones.

Los percentiles estándar del análisis  $d(0.1)$ ,  $d(0.5)$  y  $d(0.9)$  representan el tamaño de partícula por debajo del cual se encuentra el porcentaje (10%, 50% o 90%) de microcápsulas en la muestra.

El factor de dispersión es la medida del ancho de la distribución; mientras más estrecha es la distribución, más pequeña es el factor de dispersión. La uniformidad: es la medida que representa la desviación absoluta desde la mediana. El área superficial específica se define como el área total de las partículas dividida para el peso total.

El diámetro medio del volumen equivalente o  $D [4,3]$  representa el centro de gravedad de la distribución en términos de volumen y es independiente del número de partículas de la muestra se expresa con la siguiente ecuación:

$$D[4,3] = \frac{\sum d^4}{\sum d^3} \quad (6)$$

El diámetro medio de la superficie equivalente o  $D [3,2]$  representa el centro de gravedad de la distribución en términos de área superficial y es independiente del número de partículas de la muestra y se estudia cuando se analizan aerosoles.

Se expresa con la siguiente ecuación:

$$D[3,2] = \frac{\sum d^3}{\sum d^2} \quad (7)$$

### **Espectrofotómetro**

El espectrofotómetro es un equipo para análisis químico de soluciones que basa su principio en la ley de Beer Lambert. Un haz de luz monocromática, entre 190- 1100 nm, con intensidad  $I_0$  atraviesa una muestra y mide la intensidad de luz posterior a su interacción con la solución. Para la ejecución de la prueba es necesario el uso de celdas o cubetas, transparente a la luz, que contienen la muestra.

Mediante el uso de este instrumento se puede determinar la concentración o dar información sobre propiedades ópticas de la solución en cuestión. Para el caso específico de este trabajo, se hará uso de este equipo para determinar la absorbancia de las MPCM en disolución con agua destilada.

El instrumento espectrofotómetro a utilizar es Genesys 10-S UV Scanning del fabricante Thermo Fisher Scientific, el mismo se muestra en la Figura 3.4. Los datos técnicos del equipo se detallan en el Apéndice B.



**FIGURA 3.4 ESPECTROFOTÓMETRO UV**

### **Microbalanza**

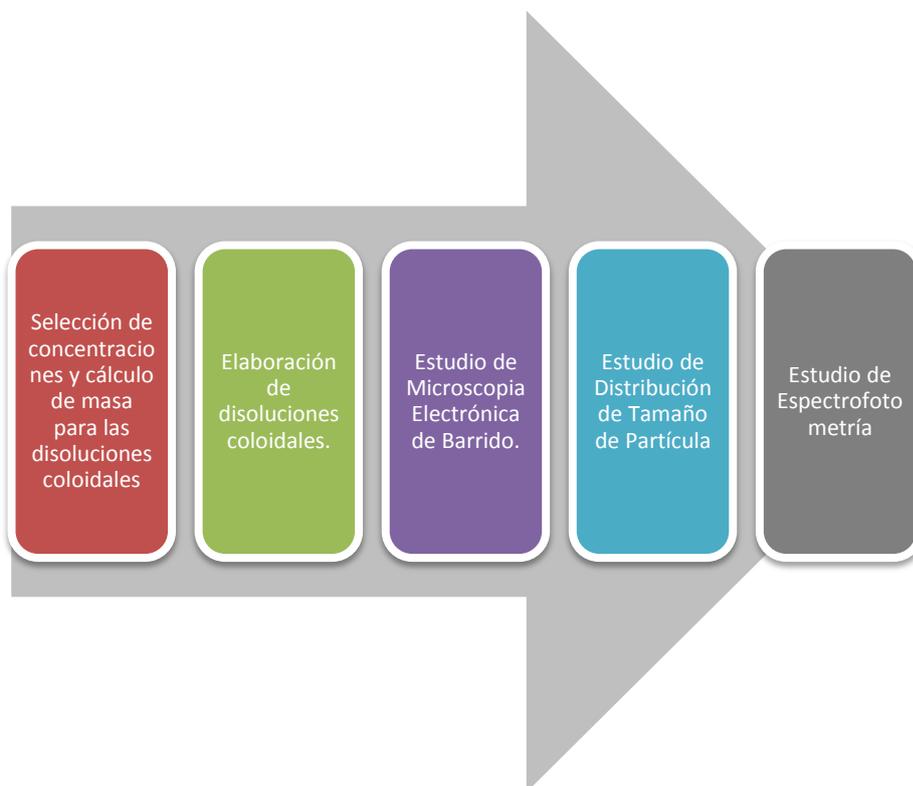
Para la preparación de soluciones coloidales es imperativo el uso de una microbalanza. Se medirá la cantidad necesaria de material para cada solución con base en los valores de masa determinados en los cálculos de concentración volumétrica. La Microbalanza a utilizar es fabricada por Shimadzu con una resolución de 0.1 mg. El equipo se muestra en la Figura 3.5 Los datos técnicos del equipo se detallan en el Apéndice B.



**FIGURA 3.5 MICROBALANZA**

### **3.4 Protocolo Experimental**

El Protocolo Experimental que se llevará a cabo tiene la estructura mostrada en la Figura 3.6.



**FIGURA 3.6 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL**

### **3.4.1 Selección de Concentraciones y Cálculo de Masa para las Disoluciones Coloidales**

Este estudio comprende investigar la absorción del material para aplicaciones técnico-ingenieriles en diseños tentativos de colectores solares. Es por esta razón que es requisito fundamental un estudio de la absorbancia que pueden lograr los materiales MPCM 37 y MPCM 56D dispuestos en una gama disoluciones coloidales.

Se prepara las disoluciones según el siguiente modelo:

La concentración de una disolución en términos de masa se expresa como:

$$\omega_i = \frac{m_i}{m_i + m_{H_2O}} \quad (8)$$

Por lo tanto, despejando la Ec. 8, la masa de MPCM en la disolución en términos de la concentración  $\omega_i$  y masa del agua  $m_{H_2O}$  está dada por:

$$m_i = \frac{\omega_i m_{H_2O}}{1 - \omega_i} \quad (9)$$

Esta es la cantidad de MPCM que se debe adicionar durante la preparación de muestras. Es decir que los datos necesarios para la elaboración de disoluciones son los presentados en la Tabla 6.

**TABLA 6**  
**VALORES DE CANTIDAD DE SOLUTO Y SOLVENTE PARA**  
**MUESTRAS MPCM37 Y MPCM 56D**

Concentración $\omega = V/V$ (%)	Solvente: Agua Destilada V (ml)	Masa de soluto MPCM m(g)
0.05	30	0.0150
0.10	30	0.0300
0.15	30	0.0451
0.20	30	0.0601
0.25	30	0.0752
0.35	30	0.1054
0.40	30	0.1205
0.50	30	0.1508

### 3.4.2 Elaboración de Disoluciones Coloidales

#### Selección de Muestras Representativas de material MPCM

Los materiales MPCM 37 y MPCM 56D son partículas almacenadas en envases sellados. Es primordial realizar una adecuada selección de muestras representativas. Siendo la presentación de estos materiales en forma de polvos, las partículas grandes tienden a ascender a la parte superior del envase mientras que las más pequeñas descienden al fondo. Los materiales deben ser mezclados completamente antes de tomar una muestra. Para el efecto, se debe sostener el envase en ambas manos y rotarlo gentilmente, cambiando su orientación continuamente por

aproximadamente 20 segundos. Una vez abierto el envase se debe mover el contenido utilizando una espátula.

*Procedimiento Experimental:*

Para la elaboración de las disoluciones coloidales a diferentes concentraciones que sigue la Tabla 6, se preparó el siguiente procedimiento experimental:

- i. Limpiar debidamente los instrumentos de laboratorio a utilizar para evitar la contaminación del material MPCM.
- ii. Encender la Microbalanza y configurar la interfaz digital en resolución 0.001 g.
- iii. Encerar la microbalanza.
- iv. Insertar un vidrio reloj dentro de la microbalanza. Tomar su lectura y volver a encerar el equipo.
- v. Utilizando una microespátula tomar una muestra representativa del material MPCM y depositarla en el vidrio reloj.
- vi. Utilizar la microespátula para dispersar el material MPCM sobre la superficie del vidrio reloj.
- vii. Aplicar leve presión con la microespátula para reducir las aglomeraciones de partículas. De esta forma se facilita la posterior disolución del material.

- viii. Tomar la lectura de la microbalanza.
- ix. Adicionar o retirar material particulado del vidrio reloj hasta lograr la lectura de la cantidad de masa deseada, correspondiente a la disolución que se pretende preparar, siguiendo los datos calculados y mostrados en la Tabla 6.
- x. Llenar un vaso de precipitación con 30 ml. de agua destilada.
- xi. Trasladar el material particulado del vidrio reloj al vaso de precipitación.
- xii. Introducir el vidrio reloj en la microbalanza y ver la lectura del polvo remanente, misma que debe ser considerada para la exactitud del procedimiento.
- xiii. Revolver vigorosamente la mezcla usando un agitador hasta que la disolución sea homogénea.
- xiv. Verter la mezcla del vaso de precipitación a un envase de polietileno con sello hermético y tapa roscada con etiquetado identificativo.
- xv. Repetir los pasos v al xiv para todas concentraciones, limpiando debidamente los instrumentos.

En las Tablas 7 y 8 se muestran las disoluciones preparadas de forma experimental.

**TABLA 7**  
**VALORES EXPERIMENTALES PARA PREPARACIÓN DE MUESTRAS**  
**MPCM56D**

Concentración $\omega$ (%vol.)	Solvente: Agua Destilada V (ml) $\pm$ 0.5 ml	Soluto: MPCM 56D m(g) $\pm$ 0.0001g
0.05	30	0.0153
0.10	30	0.0301
0.15	30	0.0448
0.20	30	0.0603
0.25	30	0.0753
0.35	30	0.1047
0.40	30	0.1209
0.50	30	0.1507

**TABLA 8**  
**VALORES EXPERIMENTALES PARA PREPARACIÓN DE MUESTRAS**  
**MPCM37**

Concentración $\omega$ (%vol.)	Solvente: Agua Destilada V (ml) $\pm$ 0.5 ml	Soluto: MPCM 37 m(g) $\pm$ 0.0001g
0.05	30	0.0152
0.10	30	0.0299
0.15	30	0.0448
0.20	30	0.0600
0.25	30	0.0749
0.35	30	0.1055
0.40	30	0.1203
0.50	30	0.1514

### **3.4.3 Estudio de Microscopia Electrónica de Barrido.**

Para la caracterización de forma y tamaño de las MPCM mediante microscopia SEM, se siguió el procedimiento de preparación que a continuación se detalla:

- i. Realizar una apropiada selección representativa de material MPCM particulado.
- ii. Utilizando una pinza pegar un disco de carbono en el Pin Stub y retirar el adhesivo superior.
- iii. Con la microespátula esparcir el material MPCM sobre la superficie adhesiva del disco de carbono.
- iv. Dispersar la muestra y remover el exceso utilizando aire comprimido.
- v. Insertar el Pin Stub en el porta pines.
- vi. Deshidratar la muestra con etanol. Para el efecto, tomar con una micropipeta, 40 microlitros de etanol y colocar sobre la muestra en el Pin Stub.
- vii. Repetir los pasos i al vi para el siguiente material MPCM.
- viii. Guardar el porta pines dentro del Desecador de Vidrio.
- ix. Esperar 5 minutos antes de proceder a retirar las muestras del Desecador.

Los parámetros configurados en el equipo se muestran en la Tabla 9:

**TABLA 9**  
**PARÁMETROS DE MICROSCOPIA SEM**

<i>PARÁMETRO</i>	<i>DESCRIPCIÓN</i>
<i>Modo:</i>	<i>Alto Vacío</i>
<i>Presión:</i>	<i>26.00 Pa</i>
<i>Voltaje de filamento:</i>	<i>15.00 kV</i>
<i>Spot:</i>	<i>2.0</i>
<i>Magnificación:</i>	<i>500x – 4000x</i>

*Procedimiento Experimental:*

Para el uso apropiado del microscopio SEM, se siguió la metodología sugerida por el manual de operación del equipo:

- i. Verificar el estado del equipo en la Interfaz de Control del Microscopio xTM. La recámara deberá estar en vacío y el indicador de color verde.
- ii. Ventilar la recámara interna “Vent” y esperar a que el indicador este de color gris.

- iii. Abrir la puerta de la recámara y montar el Pin-Stub sobre la plataforma de soporte.
- iv. Cerrar la puerta de la recámara.
- v. Activar la opción de vacío "Pump" y esperar a que el indicador este de color Verde.
- vi. En la Interfaz de Control ingresar los parámetros de configuración del Microscopio SEM.
- vii. Navegar sobre la superficie de la muestra con las opciones "Map" y "Navigation" y los botones del mouse.
- viii. Aumentar la magnificación entre los valores 500x y 4000x.
- ix. Enfocar la imagen, cada vez que se aumente la magnificación, con el botón "Focus".
- x. Guardar las imágenes.
- xi. Apagar el filamento con el botón "HV" una vez finalizadas las observaciones.
- xii. Encerar la plataforma de soporte que se muestra en el Panel "Mov".
- xiii. Ventilar la recámara.
- xiv. Abrir la puerta de la recámara y retirar el Pin Stub.
- xv. Cerrar la puerta de la recámara.
- xvi. Dejar el equipo en vacío. "Pump"

#### **3.4.4 Estudio de Distribución de Tamaño de Partícula**

Para la preparación de muestras requeridas para el equipo analizador de tamaño de partícula se utilizó el siguiente procedimiento:

- i. Tomar una apropiada muestra representativa de material MPCM.
- ii. Depositar el material MPCM sobre un vidrio reloj.
- iii. Utilizar una microespátula para diseminar el material MPCM sobre la superficie del vidrio reloj.
- iv. Aplicar leve presión con la microespátula para reducir las aglomeraciones de partículas. De esta forma se facilita la posterior disolución del material.

Los siguientes parámetros pueden configurarse en una interfaz de Medición Manual o en un Procedimiento Estándar de Operación (SOP).

**TABLA 10**  
**PARÁMETROS DE ANALIZADOR DE TAMAÑO DE PARTÍCULAS**

<i>PARÁMETRO</i>	<i>DESCRIPCIÓN</i>
<u>Propiedades Ópticas de la Muestra:</u>	
Nombre:	Parafina
Índice de refracción:	1.43
Absorción:	0.1
Densidad:	0.9 g/cm <sup>3</sup>
<u>Propiedades Ópticas del Dispersante:</u>	
Nombre:	Agua
Índice de refracción:	1.33
Modelo:	Propósitos Generales
Sensibilidad:	Sensibilidad Normal
Geometría:	Geometría Esférica
Tiempo de medición de muestra:	15 segundos
Tiempo de medición de segundo plano:	15 segundos
Límites de obscuración:	Inferior 10%, Superior 20%
Velocidad del stirrer:	(2500 – 2800) RPM

*Procedimiento Experimental:*

Para el uso apropiado del analizador de tamaño de partículas se siguió la metodología sugerida por el manual de operación del equipo:

- i. Encender el Controlador de la Unidad de Dispersión Hydro SM.
- ii. Encender la Plataforma Óptica y esperar a que caliente 30 min.

- iii. Realizar una limpieza adecuada del sistema.
- iv. Iniciar el Software Malvern Application.
- v. Ingresar los parámetros de configuración del equipo.
- vi. Realizar lavado y enjuagado con dispersante (agua destilada).
- vii. Llenar la unidad de dispersión con agua destilada.
- viii. Iniciar una rutina de medición.
- ix. Fijar la velocidad del Stirrer en el Controlador de la Unidad de Dispersión.
- x. Medir el Segundo Plano con el botón "Measure Background".
- xi. Introducir la muestra preparada en la Unidad de Dispersión con ayuda de una microespátula. Adicionar la muestra de forma pausada hasta que el porcentaje de obscuración esté dentro de la zona color verde (10% - 20%).
- xii. Esperar a que la muestra se disuelva.
- xiii. Medir la muestra con el botón "Measure Sample".
- xiv. Guardar los Resultados proyectos en el panel de Reportes.
- xv. Desactivar el Stirrer en el Controlador de la Unidad de Dispersión una vez finalizadas las observaciones.
- xvi. Purgar el contenido de la unidad de Dispersión.
- xvii. Realizar lavado y enjuagado con dispersante (agua destilada).
- xviii. Repetir pasos iii al xvii para medir otra muestra MPCM.
- xix. Cerrar el Software Malvern Application.

- xx. Apagar el Controlador de la Unidad de Dispersión Hydro SM.y la Plataforma Óptica

### **3.4.5 Estudio de Espectrofotometría**

De acuerdo con lo establecido por la ley de Beer Lambert (Ecuación (2.1)), se ejecutará la prueba de absorción con el instrumento espectrofotómetro Genesys UV, el objetivo de la prueba es encontrar los valores de longitud de onda, dentro del espectro electromagnético, donde las soluciones coloidales muestren picos de absorbancia máximos; cabe recalcar que la absorbancia es directamente proporcional con la concentración de la solución, razón por la cual se esperaba que exista un aumento de la propiedad con soluciones a mayores concentraciones.

Siendo la presentación de las muestras coloidales en forma de líquidos, las partículas grandes tienden a hundirse hacia el fondo del coloide; mientras que las más pequeñas ascienden a la parte superior del envase. Se debe agitar vigorosamente el envase antes de remover el sello hermético para tomar la muestra.

Las muestras que se utilizarán en este estudio son las disoluciones coloidales que se prepararon a diferentes concentraciones, que se

exponen en las Tablas 3.2 y 6. Los parámetros configurados en el equipo se presentan en la Tabla 9:

**TABLA 11**  
**PARÁMETROS DE EQUIPO PARA ESPECTROFOTOMETRÍA**

<i>PARÁMETRO</i>	<i>DESCRIPCIÓN</i>
<i>Modo de Medición:</i>	<i>Absorbancia</i>
<i>Longitud de onda inicial:</i>	<i>450 nm</i>
<i>Longitud de onda final:</i>	<i>1150 nm</i>
<i>Posicionador de muestra</i>	<i>Auto 6</i>
<i>Velocidad de Barrido</i>	<i>Medio</i>
<i>Intervalo:</i>	<i>2 nm</i>
<i>Corrección de celdas:</i>	<i>Apagado</i>

*Procedimiento Experimental:*

Los valores de longitud de onda para el análisis de absorbancia se establecieron para intervalos dentro del espectro de luz visible e Infrarrojo, es decir entre 450 nm y 1050 nm, los mismo que son representativos para radiación solar. El procedimiento experimental a seguir es el siguiente:

- i. Encender el Espectrofotómetro e ingresar los parámetros de configuración del equipo.
- ii. Llenar una celda con agua destilada, la cual representará el Blanco de la medición.
- iii. Insertar la celda que contiene el Blanco dentro del Espectrofotómetro en la posición B del Posicionador de Muestras.
- iv. Medir la Línea Base.
- v. Agitar vigorosamente el envase que contiene la muestra de disolución coloidal, previamente preparada, que se pretende medir.
- vi. Insertar la celda que contiene muestra de disolución dentro del Espectrofotómetro en la posición 1 del Posicionador de Muestras.
- vii. Medir muestra de Barrido de Absorbancia.
- viii. Guardar datos y gráficas obtenidas.
- ix. Repetir los pasos vi al viii, reemplazando la celda en la posición 1 del Posicionador de Muestras.
- x. Retirar las celdas del Espectrofotómetro.
- xi. Apagar el equipo.

# CAPÍTULO 4

## 4 RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos durante las diversas pruebas realizadas, buscando a través de ellas la caracterización física y óptica de los MPCM 37 (Torta Húmeda) y MCPM 56D (Polvo Seco). Los resultados de la técnica de microscopía se expresan con la medida  $D[2,0]$  de tamaño de partículas en base al área superficial medida; esta medición depende del número de microcápsulas observadas en las imágenes. Por otro lado, los resultados de la técnica de difracción laser se expresan en términos de la mediana de una distribución de tamaños en base al volumen de partículas y de los percentiles  $d(0.1)$  y  $d(0.9)$  que representan los valores más finos y gruesos de dicha distribución. Adicionalmente, la difracción laser expresa la medida  $D[4,3]$  de diámetro medio de volumen equivalente, que es utilizado para comparar los resultados de distribución en relación con los resultados  $D[2,0]$  caracterizados en la técnica de microscopía.

#### **4.1 Resultados de Caracterización de Forma y Tamaño de Partícula**

Utilizando microscopía SEM se observó la forma características de los MPCM. El procedimiento fue realizado con magnificaciones de: 500X, 1000X, 1500X, 2000X, 3000X, 4000X y 6000X.

En las Figs. 4.1 y 4.2 se muestra que las MPCM 56D y MPCM 37 tienen cápsulas de forma esférica; además, que el revestimiento logra aislar el PCM evitando que exista una mezcla con el fluido portador. La metodología permite distinguir el núcleo de parafina y el material del revestimiento. Las observaciones revelan que las microcápsulas MPCM 56D tienen tamaños más grandes que las MPCM 37. Las microcápsulas de MPCM 37 (Figura 4.2) muestran una superficie aparentemente rugosa.

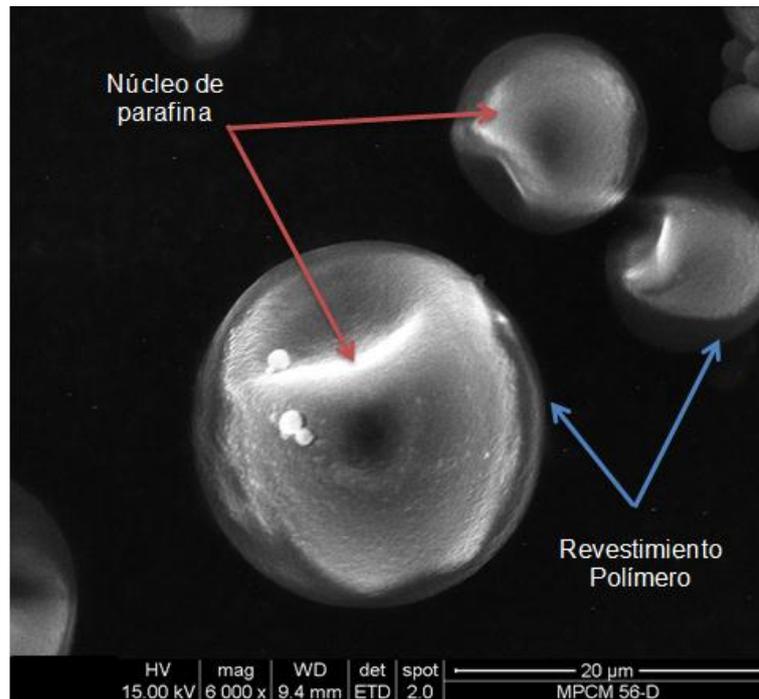


FIGURA 4.1 FORMA CARACTERÍSTICA MPCM 56D (6000X)

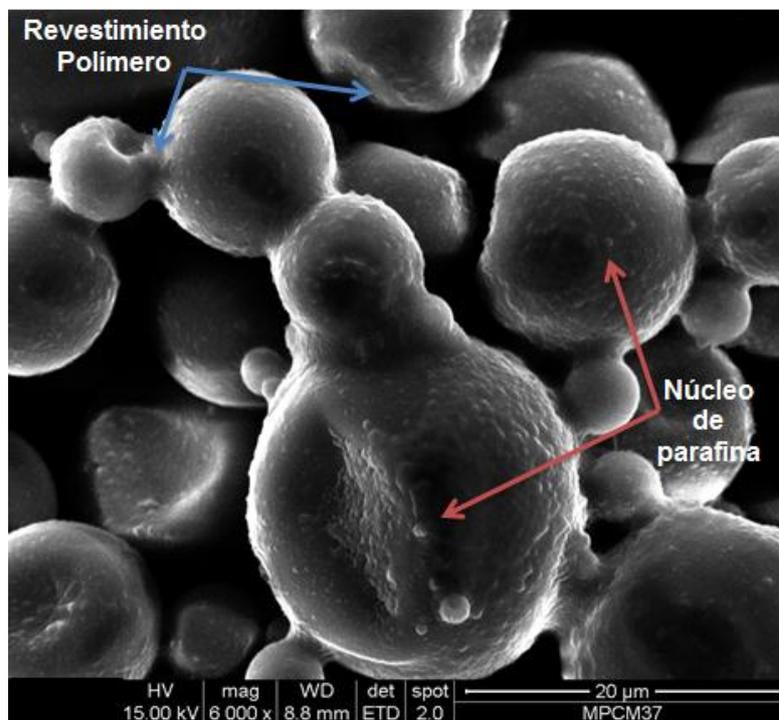
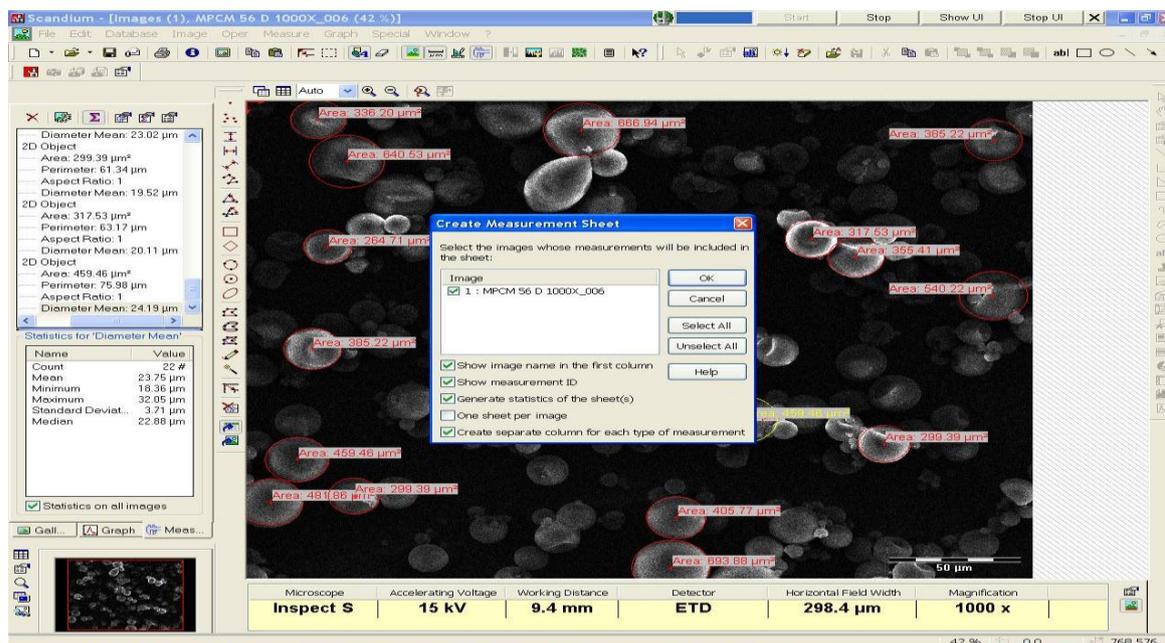


FIGURA 4.2 FORMA CARACTERÍSTICA MPCM 37 (6000X)

En el Apéndice C se encuentran todas las figuras obtenidas con el SEM. En las resoluciones menores a 6000X, se puede observar que existe diversidad en el tamaño de partículas de las muestras de MPCM 56D y MPCM 37. Las cápsulas muestran tendencia a formar grumos, esto ocurre con mayor frecuencia en el material MPCM 37.

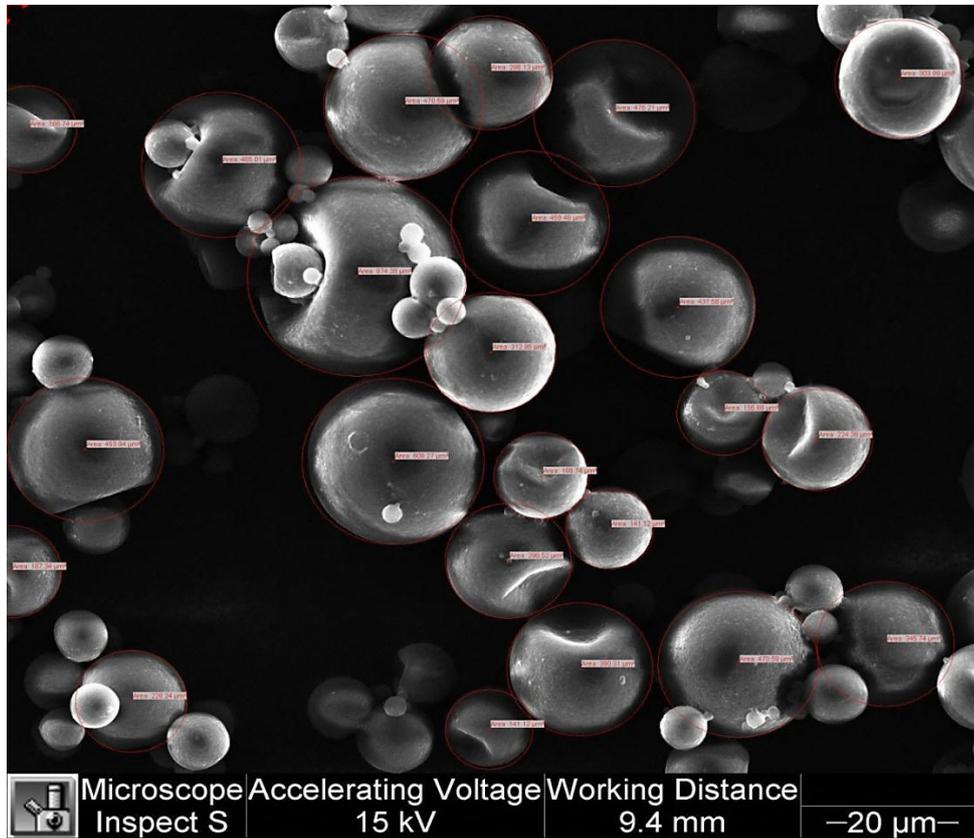
Mediante el uso del programa Scandium© de se obtuvieron resultados estadísticos sobre la morfología de las partículas MPCM en términos de diámetro promedio y área promedio. En la Figura 4.3 se presenta el interfaz del software, el cual brinda la facilidad de seleccionar entes independientes dentro de una misma imagen y arroja las dimensiones respectivas a dicha medición y resultados estadísticos de toda la muestra.



**FIGURA 4.3 INTERFAZ SOFTWARE SCANDIUM©**

Se realizaron las mediciones de tamaño para MPCM 56D y MPCM 37; las cuales son mostradas en las Figs. 4.4 y 4.5, respectivamente. Para fines de análisis de tamaño, se calculó el diámetro promedio de una partícula en relación al área que representa un círculo de tres puntos. Los valores de diámetro promedio de partícula para MPCM 56D es 20.51 $\mu\text{m}$ , mientras que para MPCM 37 el diámetro promedio es 18.66  $\mu\text{m}$ . Los resultados de mediana de muestra arrojan una tendencia similar, donde el valor de mediana para MPCM 56D es 19.96  $\mu\text{m}$  y para MPCM 37 es 17.48  $\mu\text{m}$ . Análogamente los valores de área y perímetro denotan la diferencia en tamaños entre las dos muestras. Los resultados se

muestran en las Tablas 12 y 13 para MPCM 56D y MPCM 37, respectivamente.



**FIGURA 4.4 MEDICIÓN DE DIÁMETROS MPCM 56D (2000X)**

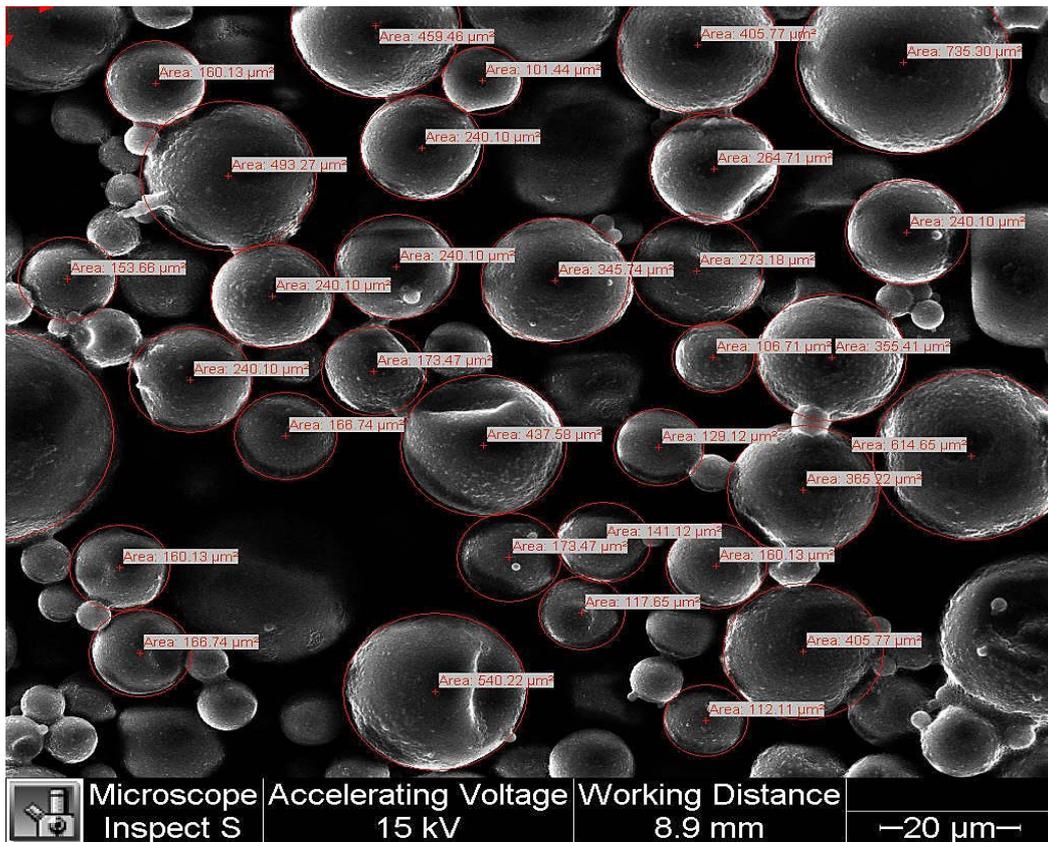


FIGURA 4.5 MEDICIÓN DE DIÁMETROS MPCM 37 (2000X)

**TABLA 12**  
**RESULTADOS DE CARACTERIZACIÓN DE PARTÍCULAS MPCM 56D**  
**(MEDIDOS EN MAGNIFICACIÓN 2000X)**

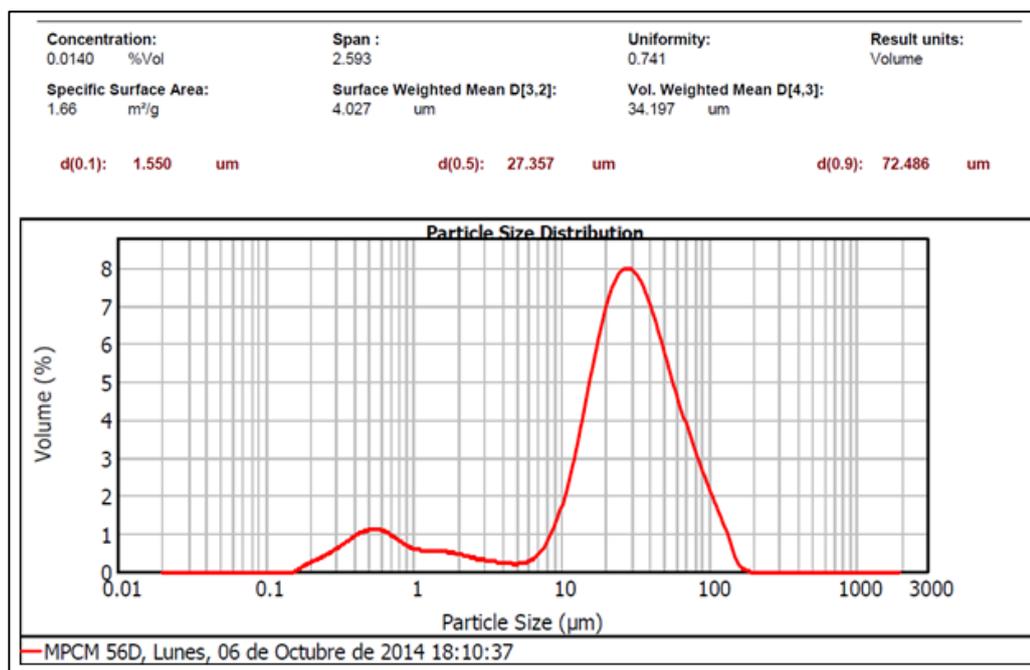
	Área	Perímetro	Relación de Aspecto	Diámetro Promedio
No. de partículas analizadas	23	23	23	23
Unidades	µm <sup>2</sup>	µm		µm
Media	350.35	64.42	1.05	20.51
Mínimo	141.12	42.11	1.00	13.40
Máximo	874.38	104.82	1.84	33.37
Desviación Estándar	177.34	16.25	0.19	5.17
Mediana	312.95	62.71	1.00	19.96

**TABLA 13**  
**RESULTADOS DE CARACTERIZACIÓN DE PARTÍCULAS MPCM 37**  
**(MEDIDOS EN MAGNIFICACIÓN 2000X)**

	Área	Perímetro	Relación de Aspecto	Diámetro Promedio
No. de partículas analizadas	33	33	33	33
Unidades	µm <sup>2</sup>	µm		µm
Media	299.87	58.62	1.07	18.66
Mínimo	101.44	35.70	1.00	11.36
Máximo	976.47	110.77	2.29	35.26
Desviación Estándar	200.36	18.51	0.25	5.89
Mediana	240.10	54.93	1.00	17.48

## 4.2 Resultados de Distribución de Tamaño

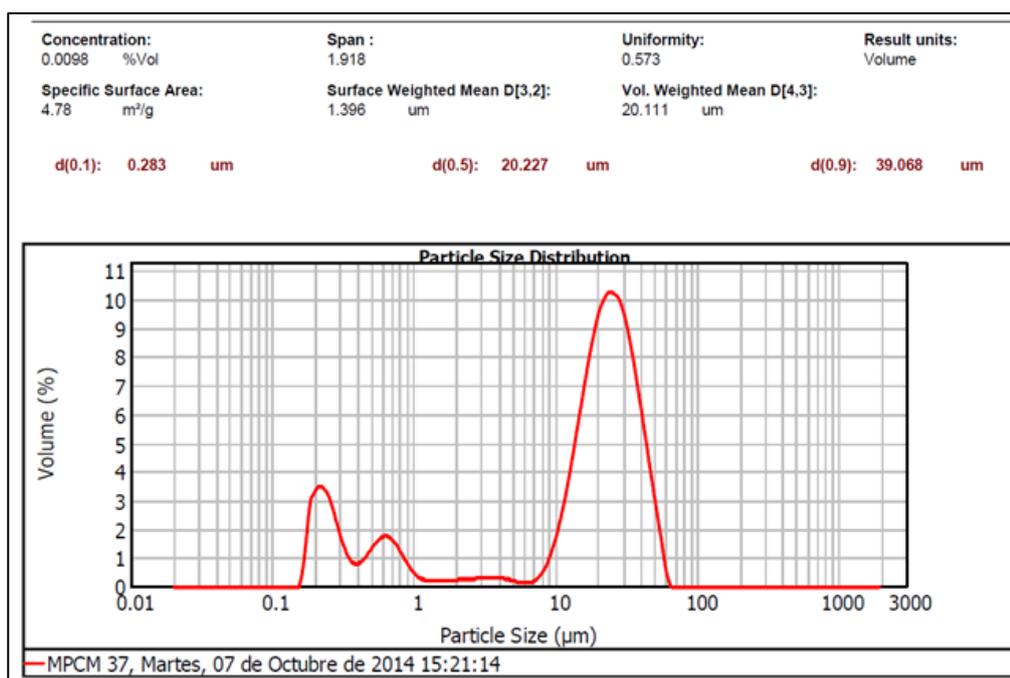
La distribución de tamaño de MPCM fue caracterizada mediante el instrumento Analizador de Tamaño de Partículas, que utiliza el principio de difracción laser. La Figura 4.6 muestra la tendencia de tamaño para el MPCM 56D. Los resultados indican que el MPCM 56D tiene cápsulas con una mediana de 27.357  $\mu\text{m}$ ; es decir que, el volumen de las microcápsulas que tienen un diámetro menor o igual a 27.357  $\mu\text{m}$  corresponden al 50% del volumen total de las partículas de la muestra. El volumen de las microcápsulas que tienen un diámetro menor o igual a 1.550  $\mu\text{m}$  corresponde al 10% del volumen total de las partículas de la muestra. Y el volumen de las microcápsulas que tienen un diámetro menor o igual a 72.486  $\mu\text{m}$  corresponde al 90% del volumen total de las partículas de la muestra. El valor de factor de dispersión para esta distribución es 2.593. Por último el diámetro medio de partículas D [4,3] calculado en base a la distribución volumétrica es de 34.197  $\mu\text{m}$ . Esto puede ser interpretado como presencia de aglomeraciones, dado que la medida D[4,3] es sensible a las partículas grandes.



**FIGURA 4.6 DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE PARTÍCULA MPCM 56D**

De igual manera se analizó la tendencia del tamaño de partícula del MPCM 37, la distribución se muestra en la Figura 4.7. Los resultados indican que el MPCM 37 tiene cápsulas con una mediana de 20.227 µm; es decir que, el volumen de las microcápsulas que tienen un diámetro de 20.227 µm corresponden al 50% del volumen total de las partículas de la muestra. El volumen de las microcápsulas que tienen un diámetro menor o igual a 0.283 µm corresponde al 10% del volumen total de las partículas de la muestra. Y el volumen de las microcápsulas que tienen un diámetro menor o igual a 39.068 µm corresponde al 90% del volumen total de las partículas de la muestra. El valor de factor de dispersión para

esta distribución es 1.918. Por último el diámetro medio de partículas calculado en base a la distribución volumétrica es de 20.111  $\mu\text{m}$ , esto se interpreta como poca presencia de aglomeraciones.



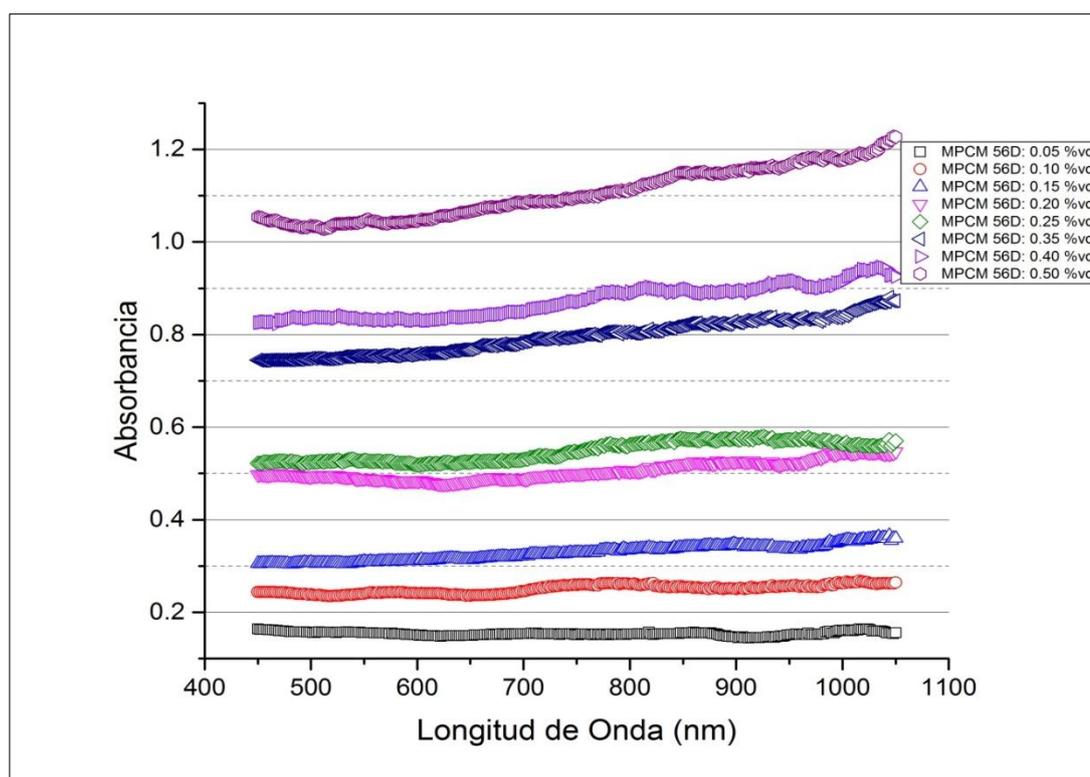
**FIGURA 4.7 DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE PARTÍCULA MPCM 37**

En el Apéndice E se muestran los reportes detallados del analizador de tamaño de partículas con sus respectivas gráficas y datos tabulados.

### 4.3 Resultados de Espectrofotometría

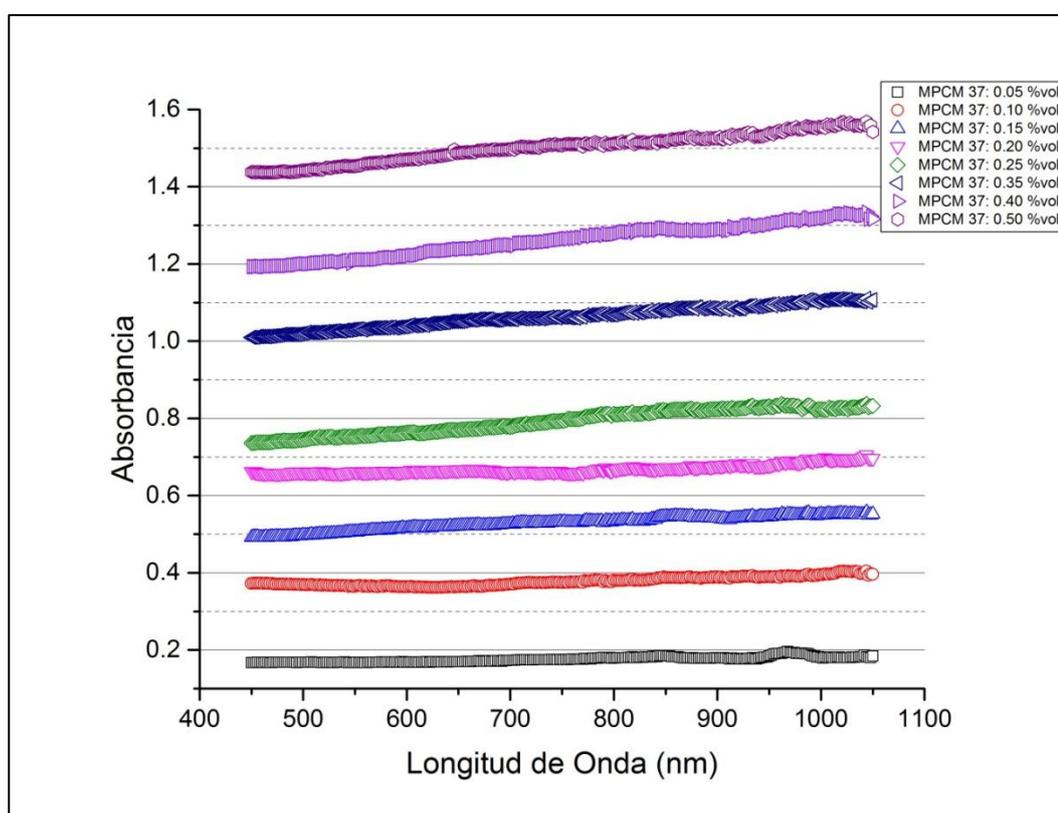
Muestras de diferentes concentraciones, desde 0.05 %vol hasta 0.50 %vol, fueron utilizadas para la consecución del experimento. En la Figura

4.9 se muestra la absorbancia de las muestra de MPCM 56D. Se puede observar que se presenta un pico en la región infrarroja que es más pronunciado para las concentraciones mayores a 0.25 %vol. Los valores de absorbancia son menores a 0.2 para concentraciones menores a 0.05 % vol. y llegan a valores de absorbancia ser mayores a 1.0 para concentraciones mayores a 0.50 %vol. De acuerdo con Clark [38], un valor de absorbancia mayor a 1.0 significa que más del 90 % de la intensidad de luz que incide sobre la disolución es absorbida por el material MPCM.



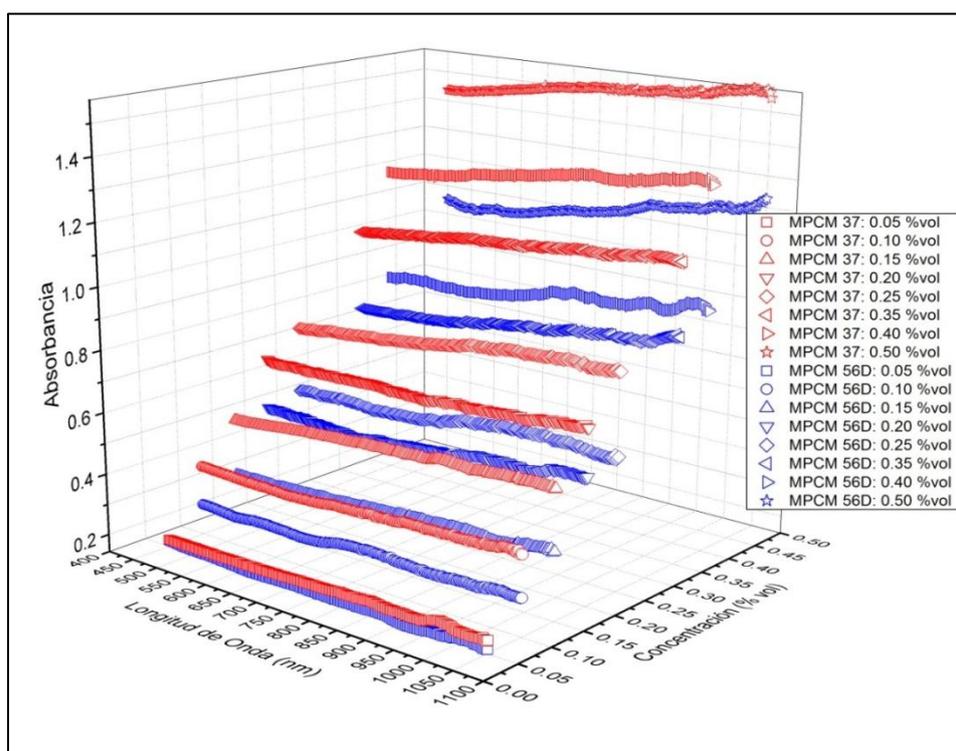
**FIGURA 4.8 ABSORBANCIA VS. LONGITUD DE ONDA PARA  
DIFERENTES CONCENTRACIONES DE MPCM 56D**

De manera similar se efectuaron las pruebas con las muestras de MPCM 37, se muestran los resultados de Absorbancia en la Figura 4.9. Los valores de absorbancia son mayores a 1.0 en concentraciones mayores a 0.35%vol, lo que sugiere que las muestras son suficientemente opacas como para absorber más del 90% de la energía del haz de luz incidente [38].



**FIGURA 4.9 ABSORBANCIA VS. LONGITUD DE ONDA PARA DIFERENTES CONCENTRACIONES DE MPCM 37**

La Figura 4.10 expone una distribución del comportamiento de 3 variables de estudio para las dos muestras MPCM. Esta representación gráfica permite visualizar una comparación de potencial de absorbancia en las disoluciones preparadas. El gráfico muestra que las disoluciones que tienen MPCM 37 como sustancia operativa de almacenamiento de calor latente presentan valores de absorbancia mayores a las disoluciones MPCM 56D bajo las mismas condiciones experimentales y en todo el espectro de radiación comprendido entre el intervalo de longitud de onda: 450 a 1050 nm.



**FIGURA 4.10 ABSORBANCIA EN FUNCIÓN DE LONGITUD DE ONDA Y CONCENTRACIÓN DE MPCM 56D Y MPCM 37**

Dentro de los resultados obtenidos, en cada concentración del MPCM 56D y del MPCM 37 existe un valor de absorbancia máxima. En la Tabla 14 se muestran los valores de absorbancia máxima y longitud de onda correspondiente a dicho valor para las concentraciones volumétricas del MPCM 56D.

**TABLA 14**  
**ABSORBANCIA MÁXIMA - MPCM 56D**

Concentración (%vol)	Absorbancia	Long. Onda (nm)
0.05	0.164	1016, 1024
0.10	0.268	1016
0.15	0.366	1044
0.20	0.548	1016
0.25	0.58	926
0.35	0.881	1044
0.40	0.946	1036
0.50	1.228	1048

Análogamente para MPCM 37, se obtuvieron los valores de absorbancia máxima con los correspondientes valores de longitud de onda. Los resultados se muestran en la Tabla 15

**TABLA 15**  
**ABSORBANCIA MÁXIMA - MPCM 37**

Concentración (%vol)	Absorbancia	Long. Onda (nm)
0.05	<i>0.196</i>	<i>968</i>
0.10	<i>0.405</i>	<i>1022, 1044</i>
0.15	<i>0.557</i>	<i>1044</i>
0.20	<i>0.705</i>	<i>1044</i>
0.25	<i>0.837</i>	<i>962, 1044</i>
0.35	<i>1.111</i>	<i>1044</i>
0.40	<i>1.334</i>	<i>1044</i>
0.50	<i>1.568</i>	<i>1044</i>

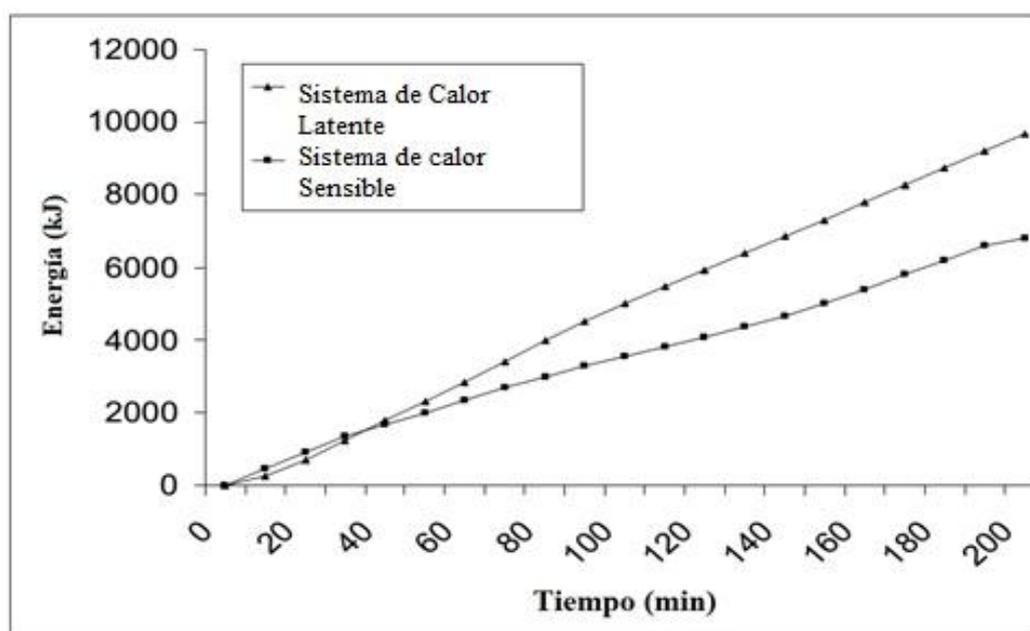
Como se puede observar en las Tablas 14 y 15, el valor máximo de absorbancia para las concentraciones 0.05 a 0.50 %vol. se presenta con mayor frecuencia para una longitud de onda de aproximadamente 1044 nm.

#### **4.4 Aplicaciones potenciales**

Los colectores solares son dispositivos captadores de radiación con capacidad de almacenamiento de energía térmica, que presentan una alternativa para el ahorro y mejor uso de la energía solar. Con la

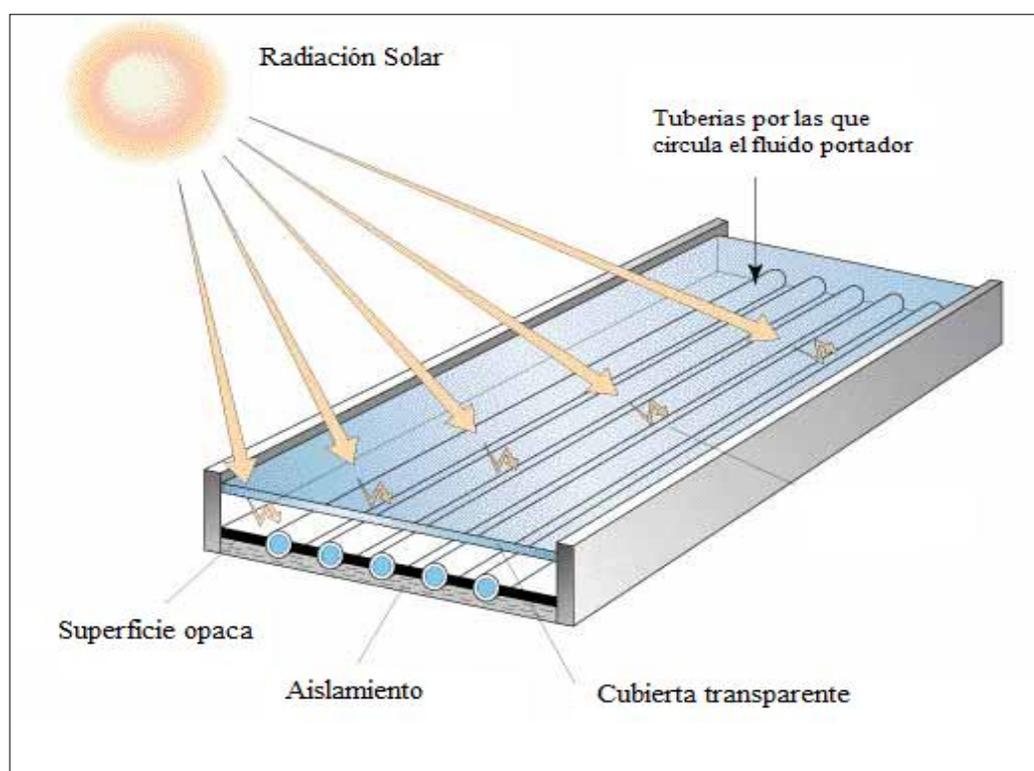
caracterización de la morfología y de las propiedades ópticas de MPCM se obtiene apertura para buscar la eficiencia en estas aplicaciones.

El uso de colectores solares demuestra tener mayor inclinación hacia sistemas de calor latente. El estudio comparativo de Vijay [7] revela que el sistema de almacenamiento de calor latente excede al sistema de almacenamiento de calor sensible en capacidades energéticas para sistemas de almacenamiento de energía solar, como se muestra en la Figura 4.11.



**FIGURA 4.11 COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE COLECTORES DE CALOR DE LATENTE (LHS) Y COLECTORES DE CALOR SENSIBLE (SHS) (ADAPTADO DE VIJAY [7])**

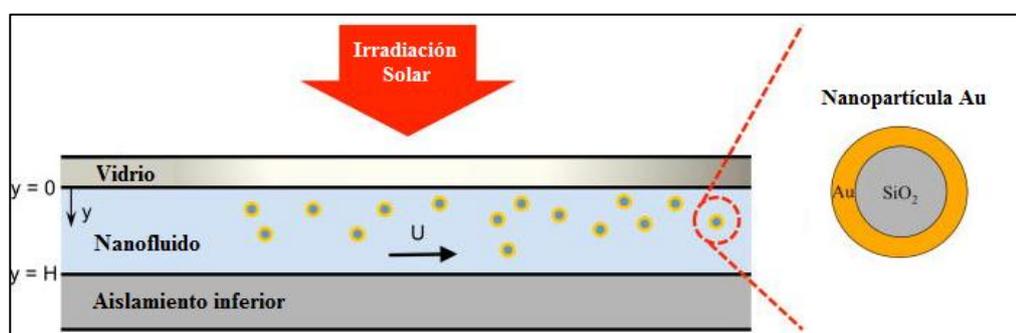
La Figura 4.12 muestra el esquema de un colector solar convencional, el dispositivo utiliza una superficie opaca para el almacenamiento de energía térmica que posteriormente es transmitida al fluido en circulación, para las aplicaciones destinadas.



**FIGURA 4.12 ESQUEMA DE UN COLECTOR SOLAR CONVENCIONAL  
(ADAPTADO DE GENDE [38] )**

Otanicar [40] realizó el estudio de cuatro fluidos para absorción de energía en colectores solares de absorción directa; en donde demuestra la viabilidad de utilizar líquidos opacos como material de

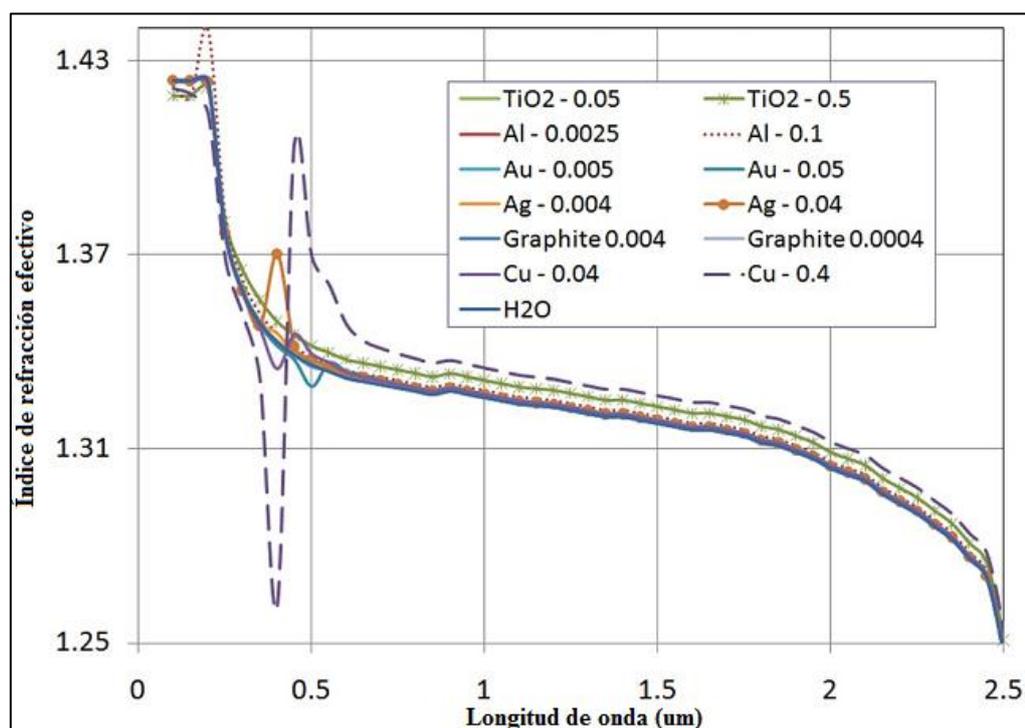
almacenamiento. Simultáneamente, reconoce un potencial incremento de sus propiedades con la inclusión de nanopartículas suspendidas en el fluido. La Figura 4.13 muestra el esquema de un colector solar de absorción directa, el dispositivo utiliza las nanopartículas disueltas en el fluido para la absorción de radiación solar; de esta forma, el almacenamiento de energía térmica sucede en el fluido portador.



**FIGURA 4.13 ESQUEMA DE COLECTOR SOLAR DE ABSORCIÓN DE DIRECTA REFORZADO CON NANOFLUIDOS AU-SIO<sub>2</sub> (ADAPTADO DE LEE [41])**

Con la inclusión de fluidos reforzados con MPCM y nano fluidos se logra que la transmisión de calor sea directamente con el fluido de trabajo, además que la presencia de nanopartículas mejora las propiedades ópticas del líquido de trabajo. Es decir que en el esquema de diseño de colectores solares, la implementación de fluidos reforzados con nanopartículas reemplazaría a la superficie opaca del colector; ahorrando

costos de fabricación en materiales y disminuyendo el peso de los equipos. La Figura 4.14 muestra los resultados de Taylor [42] del estudio de nanofluidos en comparación con agua, donde el índice de refracción efectivo aumenta con la inclusión de nanopartículas en el fluido portador.



**FIGURA 4.14 ÍNDICE DE REFRACCIÓN DE NANOFLUIDOS EN COMPARACIÓN CON EL AGUA (ADAPTADO DE TAYLOR [42])**

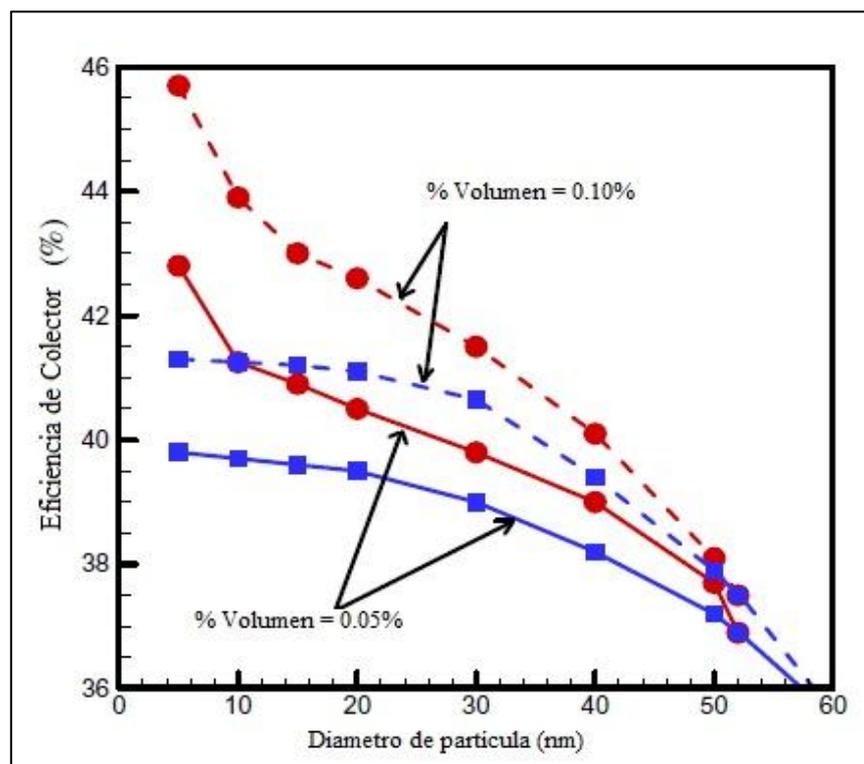
El estudio realizado por Eames [43] muestra que la inclusión de concentraciones de PCM en colectores solares tiene un beneficio en las propiedades térmicas del sistema colector; la Tabla 16 refleja el

incremento de la capacidad de calor específico con el aumento de la concentración volumétrica de PCM.

**TABLA 16**  
**ESTUDIO DEL INCREMENTO DE LA CAPACIDAD DE CALOR**  
**ESPECÍFICO CON LA ADICIÓN DE PCM (ADAPTADO DE EAMES [43])**

	Viscosidad cinemática ( $\text{mm}^2 \text{s}^{-1}$ )	Capacidad de calor específico ( $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ )	Capacidad de calor específico durante transición de fase ( $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ )
Agua	1	4200	-
10% PCM	2	3960	11120
15% PCM	4.5	3840	14580
20% PCM	8	3720	18040
25% PCM	12	3600	21500
30% PCM	18	3480	23760

Mahian [44] realizó una comparación del efecto de la concentración y el tamaño de partícula en la eficiencia de colectores solares, mediante la experimentación con Nano fluidos; Mahian concluye con la sugerencia de realizar los estudios para encontrar la concentración óptima para una eficiencia deseable. Como base para su aportación muestra los resultados obtenidos por Otanicar [42], la Figura 4.15 muestra la relación que existe entre eficiencia de colector, tamaño de nanofluido y concentración volumétrica.



**FIGURA 4.15 EFICIENCIA DE COLECTOR SOLAR COMO FUNCIÓN DE DIÁMETRO DE PARTÍCULA Y CONCENTRACIÓN DE NANOPARTÍCULAS DE PLATA AG (ADAPTADO DE OTANICAR [44])**

Los resultados obtenidos durante la experimentación corroboran lo presentado por Otanicar [40] y Mahian [44], Los MPCM mostraron tendencia de aumento de su absorbancia con el aumento de concentración volumétrica, lo que sugiere que deba existir mayor investigación sobre este campo para una mayor eficiencia en los sistemas. Análogamente, el tamaño de partícula es otro factor a considerar para evaluar su aplicabilidad en la eficiencia de colectores

solares; en este trabajo se observa que el material con menor distribución de tamaño muestra una mejor absorbancia, lo que indicaría que su relación sería inversa, y podría ser mejorada con la disminución de tamaño de microcápsulas.

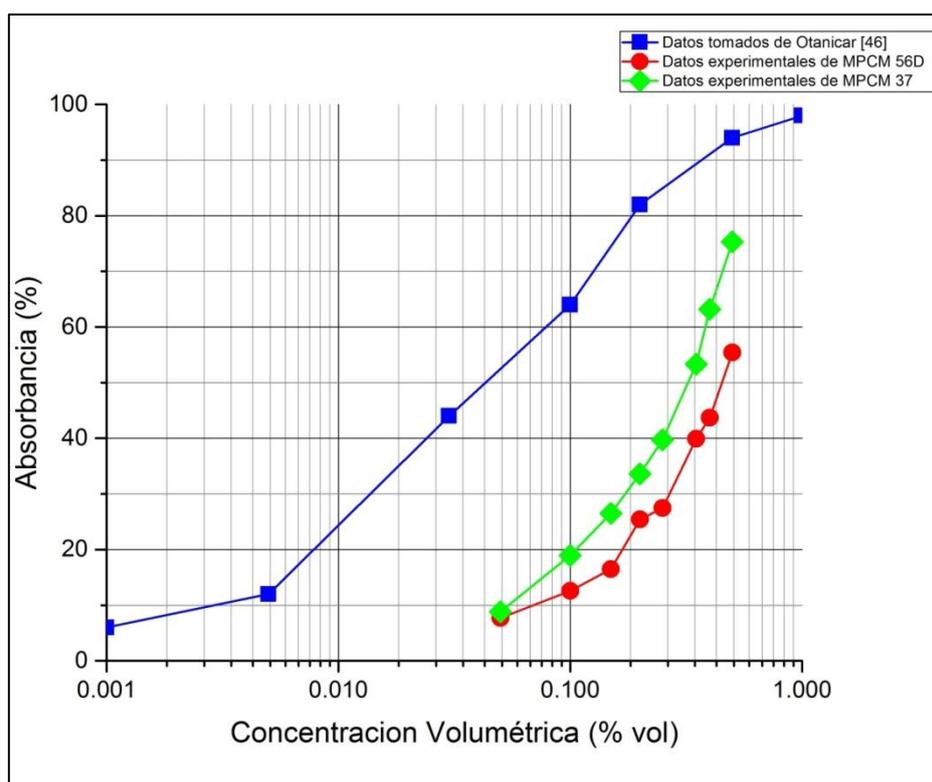
Otanicar [45] realizó un estudio sobre la aplicabilidad de los nanofluidos en colectores solares de absorción directa, para ello utilizó muestras de nanofluidos de grafito con tamaño de partícula de 30 nm en concentraciones entre 0.001% vol. hasta 1% vol. dando como resultado una tendencia de aumento de absorbancia con el aumento de concentración.

Los cálculos de absorbancia por longitud de onda para cada concentración de MPCM se realizaron de acuerdo a la Ec. 2. y se presentan en el Apéndice F. La absorbancia global para las concentraciones se expresa en la Ec. 10.

$$Absorbancia (\%) = \int_{450}^{1050} A_{\lambda} d\lambda \quad (10)$$

Tomando los resultados de Otanicar, y haciendo una comparación con los datos de espectrofotometría de MPCM, se tiene como resultado la Figura 4.16, en donde se observa que existe una tendencia similar para el aumento de absorbancia con la presencia de mayor número de material microencapsulado. Sin embargo, los MPCM muestran valores de

absorbancia menores a los obtenidos por nanofluidos, incluso para concentraciones mayores, esto se debería a las características físico químicas del material y la diferencia en tamaños de partículas.



**FIGURA 4.16 ABSORBANCIA VS. CONCENTRACIÓN VOLUMÉTRICA DE MPCM 56D Y MPCM 37 EN COMPARACIÓN CON NANOFLUIDOS DE GRAFITO (DATOS ADAPTADOS DE OTANICAR [45])**

# CAPÍTULO 5

## 5 DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Los resultados presentan que la caracterización de la forma de la microcápsulas MPCM 56D (Figura 4.1) y MPCM 37 (Figura 4.2) es esférica y redondeada con paredes de revestimiento delgadas. De acuerdo con Shin [20], esto contribuye a una mejora en la termorregulación basada en una relación de tamaño de núcleo a espesor de revestimiento. Se comprobó que el material polímero de revestimiento funciona como barrera entre material PCM y el líquido portador en que se disuelve. La observación con el microscopio SEM mostró tendencias del material microencapsulado a formar aglomeraciones. Este comportamiento advierte una inestabilidad al momento de proponer modelos basados en el tamaño de partícula y forma perfectamente esférica, como lo menciona Zhao.[19].

Se puede reducir la formación de aglomeraciones mediante técnicas de separación, como lo son: agitación magnética, adición de surfactantes,

aplicación de energía ultrasónica y variación del pH. En este trabajo se intentó emplear la técnica de agitación magnética. La agitación magnética resultó ser un método poco práctico, pues las partículas de mayor tamaño acabaron desplazadas hacia a los extremos del envase contenedor de la lechada, formando aglomerados en las paredes del envase y reduciendo la homogeneidad de la muestra para el estudio de distribución de tamaño de partícula. La adición de surfactantes comprendió una alteración en la composición química de las lechadas, que a su vez impediría obtener resultados exactos acerca de los materiales de estudio MPCM. La aplicación de energía ultrasónica requiere de un estudio preliminar para seleccionar el nivel de ultrasonido suficiente para separar las partículas MPCM sin ocasionar la ruptura de las microcápsulas y evitar la formación de cavitaciones que puedan perturbar los resultados del análisis de distribución de tamaño de partículas.

Es necesario subrayar que la diferencia en resultados entre las metodologías de cálculo de tamaño de microcápsulas se debe al principio utilizado por cada método. El tamaño de partícula resultante en la técnica de microscopía electrónica de barrido es una medida del tipo  $D[2,0]$ ; es decir que la técnica mide el área superficial para calcular el diámetro, y depende del número de partículas observadas en la magnificación. El tamaño de partícula resultante en la técnica difracción laser es una medida del tipo  $D(4,3)$ ; es decir, mide el

volumen de las partículas para calcular el diámetro y es independiente del número de partículas en la muestra.

El análisis de imagen de microscopía SEM mediante software Scandium© presentó valores de diámetro promedio de 20.51  $\mu m$  y de 18.66  $\mu m$ , para los materiales MPCM 56D y MPCM 37 respectivamente, de igual manera se obtuvieron resultados de mediana y desviación estándar. Los resultados de mediana son 19.66  $\mu m$  para MPCM 56D y 17.48  $\mu m$  para MPCM 37; y los resultados de desviación estándar son 5.17  $\mu m$  para MPCM 56D y 5.89  $\mu m$  para MPCM 37. Los valores de mediana y diámetro promedio son cercanos entre sí. Esto se debe a que para el análisis SEM, las partículas se identificaron manualmente, sin considerar aglomeraciones como un solo cuerpo sino reconociendo y fraccionando sus elementos individuales; lo que arroja un valor más real sobre el tamaño de microcápsulas.

Las gráficas de distribución de tamaño de partícula (Figs. 4.6 y 4.7) mostraron que la mediana para la distribución de microcápsulas es 27.357  $\mu m$  con factor de dispersión de 2.593 para MPCM 56D y mediana de 20.227  $\mu m$  con un factor de dispersión de 1.918 para MPCM 37; el diámetro promedio D [4,3] del material MPCM 56D es 34.19  $\mu m$  y del material MPCM 37 es de 20.11  $\mu m$ . Dado que el D [4,3] es sensible a partículas grandes y conociendo que los valores  $d(0.9)$  están en el orden de las 70  $\mu m$  para MPCM 56D y 39  $\mu m$  para

MPCM 37, es posible deducir que su alto valor es debido a la formación de aglomeraciones del material.

Las gráficas de análisis de barridos de absorbancia (Apéndice F) muestran que en general los picos se presentan en el espectro de longitud de onda de luz infrarroja. De acuerdo con [2,3,40] la radiación solar se distingue por longitud de onda y está compuesta por: luz ultravioleta 10%, luz visible 40% y luz infrarroja 50%. Los valores de absorbancia máxima de las disoluciones coloidales MPCM 56D (Tabla 14) y MPCM 37 (Tabla 15) corresponden a longitudes de onda infrarroja en el intervalo aproximado de 1020 nm a 1044 nm. Estos resultados justifican a los materiales MPCM 56D y MPCM 37 para aplicaciones solares.

Como se puede observar en las Tablas 14 y 15, las disoluciones coloidales de MPCM 56D y MPCM 37 presentan un valor máximo de absorbancia en la longitud de onda 1044 nm. Lo cual deduce que la mayor absorbancia de estos MPCM se obtiene dentro del espectro electromagnético correspondiente al intervalo infrarrojo. La Figura 4.10 muestra una relación entre absorbancia, longitud de onda y material, este último parámetro permite realizar un análisis considerando que cada material tiene un tamaño de partícula promedio.

De la Figura 4.10 se observa la tendencia de aumento de absorbancia con el aumento de longitud de onda del haz de luz incidente previamente mencionada, y también se observa una diferencia marcada entre absorbancias de una misma concentración pero diferente material o tamaño de partícula, es decir que para tamaños de partículas más pequeños (MPCM37) se tiene mejores absorbancias. Esto demuestra una relación inversamente proporcional entre la absorbancia y el tamaño de partícula de MPCM.

De acuerdo con Otanicar [41] los factores que limitan la eficiencia de los colectores solares son dos; el primer factor es la capacidad del sistema para capturar el calor; y el segundo, la efectividad del sistema en transmitir el calor al fluido de trabajo. El primer factor puede ser solventado con la inclusión de materiales MPCM en el sistema. Los resultados de las propiedades ópticas obtenidos en esta investigación sugieren que fluidos de trabajo con concentraciones de MPCM menores a 0.50 %vol. tienen altos valores de absorbancia en comparación con el agua; es decir que se logra un fluido opaco el cual según Minardi [42] mejora la eficiencia del sistema debido que reemplaza las placas de absorción y de esta forma se logra una forma de absorción directa en el fluido. Sin embargo el uso de MPCM en fluidos de trabajo, aumenta la viscosidad del mismo, haciendo que los costos para bombeo aumenten; factor a considerar dentro del diseño de colectores solares.

Sharma [14] expone entre las características deseables para PCM un alto valor de conductividad, lo cual sería idóneo para satisfacer la segunda condición para un colector solar eficiente según Otanicar [41]. Se ha demostrado mediante experimentación que el uso de PCM como medio para absorber energía contribuye en una mejora para el diseño de colectores solares, Vijay [7] lo demostró experimentalmente y a la vez sugirió la posibilidad de hacerlo diseños más compactos y económicos.

El uso de nanofluidos contribuye al sistema para lograr una mejor eficiencia en colectores solares, Shin [43] concluye que el uso de nano fluidos mejora la capacidad de calor específica en un 14.5% con solo 1% de concentración de masa, de manera similar Saidur [44] comenta sobre la mejora en absorbancia de radiación solar del fluido de trabajo con el uso de nano fluidos de aluminio y a su vez concluye que el uso de nano fluidos de aluminio sería una buena solución para colectores solares de absorción directa.

Sin embargo, los nanofluidos traerían ciertas desventajas sobre los sistemas de colectores solares. La investigación de Mahian [45] acerca de sistemas solares térmicos ingenieriles reconoció que los nanofluidos presentan problemas de aglomeración en diseños bombeados. A pesar de esta desventaja, una adecuada combinación de estos dos materiales (MPCM y nanofluidos) sería la vía para optimizar colectores solares de absorción

directa. El desarrollo de nanofluidos con PCM realizado por Khodadadi [46] demostró un aumento en la conductividad térmica al adicionar nanopartículas. Este avance se complementa con el parámetro deseado de Sharma [14]

De acuerdo lo analizado en este trabajo con respecto a la Figura 4.16 se puede demostrar que las lechadas MPCM y los nanofluidos presentan valores de absorbancia incrementales en el rango de 0.05 % vol. y 0.50 % vol. Además que estos los materiales exhiben una mejor propiedad óptica en tamaños de partículas más pequeños.

# CAPÍTULO 6

## 6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los MPCM demuestran ser una forma atractiva de obtención de energía mediante una fuente de energía renovable. En análisis de los casos de estudio [7,18,26,47–49] reveló que es posible reducir las dimensiones de los colectores solares para una misma necesidad energética; mediante el control de los siguientes parámetros: el tipo de material PCM, sus propiedades térmicas, propiedades ópticas, su morfología y otros factores adyacentes como la potencia de bombeo para el colector y la necesidad energética en la aplicación.

Este trabajo comprueba, mediante la comparativa de dos muestras con diferentes tamaños a mismas concentraciones, que el MPCM con menor tamaño de microcápsulas presenta una mayor absorbancia espectral. Esto resuelve que, es posible utilizar lechadas MPCM con menores tamaños de

partícula para satisfacer requerimientos específicos de absorbancia, y de esta forma aumentar la efectividad de los sistemas de almacenamiento de energía.

Con base a la observación y experimentación realizada en este trabajo investigativo, se puede considerar que el material MPCM 37 Torta Húmeda muestra una mejor dispersión de sus cápsulas en comparación con el MPCM 56 Polvo Seco; esto se debe al porcentaje de humedad presente en el primero de ellos que facilita la disolución en el fluido portador. Es decir que, en la optimización del diseño de colectores solares existe una inclinación hacia el uso de lechadas MPCM cuyas microcápsulas contengan humedad.

La aplicación de líquidos opacos en colectores solares es mejorada a través de la inclusión de MPCM y nanofluidos en el líquido portador; sin embargo, es imperativo realizar un análisis sobre la concentración volumétrica. Pues, mayores cantidades de partículas utilizadas comprenden un aumento en la viscosidad del líquido de transferencia de calor, lo que deriva a un mayor costo en potencia de bombeo y dimensionamiento de tuberías. Una solución ante esta problemática es la selección adecuada de tamaño de partícula a utilizar.

Uno de los principales problemas de MPCM es la formación de aglomeraciones, a pesar de que existen técnicas para la dispersión, su uso en aplicaciones ingenieriles comprende realizar estudios preliminares para

asegurar que las técnicas no afectan las propiedades óptimas de trabajo de las microcápsulas en las lechadas MPCM. En lo posible se recomienda emplear materiales MPCM que eviten la formación de grupos de partículas.

El uso de micro partículas y nano partículas corresponde a un avance en la tecnología de obtención de energía solar, no obstante su uso tiene ciertas limitaciones como las mencionadas anteriormente, por esta razón se proponen los desafíos para una mejora en esta tecnología. El primer desafío a considerar para trabajos futuros, es la optimización del proceso de microencapsulado para lograr un material que presente una distribución de tamaño de partícula más uniforme; lo que servirá para deducir con mayor exactitud experimental el valor de tamaño idóneo para las aplicaciones solares. El segundo desafío es estudiar la estabilidad y durabilidad de las microcápsulas ante condiciones de ciclos de trabajo comprendidas en aplicaciones de solares. Y el tercer desafío es realizar una investigación experimental en síntesis y disminución de tamaño de encapsulamiento para comprobar las propiedades y características morfológicas óptimas requeridas en diseños de aplicaciones solares.

En la actualidad del Ecuador, aun no hay conocimiento suficiente sobre el uso de recursos renovables. Con la publicación de este trabajo investigativo se espera promover una exploración más profunda sobre las ventajas del uso de

materiales para la mejora en transferencia y almacenamiento de calor. Y sea así una contribución para el desarrollo del sector energético del país.

# APÉNDICES

Apéndice A	Hojas Técnicas de Materiales MPCM
Apéndice B	Datos Técnicos de los Equipos Utilizados
Apéndice C	Imágenes de Microscopio Electrónico de Barrido SEM
Apéndice D	Resultados de Scandium©
Apéndice E	Resultados de Analizador de Tamaño de Partículas
Apéndice F	Resultados de Espectrofotómetro

# APÉNDICE A – HOJAS TÉCNICAS DE MATERIALES MPCM



2400 E. River Rd.  
Dayton, Ohio 45439  
Tel: 937.236.2213 • Fax: 937.236.2217  
e-mail: [microtek@microteklabs.com](mailto:microtek@microteklabs.com)  
[www.microteklabs.com](http://www.microteklabs.com)

## MPCM 56D Microencapsulated Phase Change Material Phase Change: 56°C, 133°F

### DESCRIPTION

Microencapsulated phase change materials (MicroPCMs) are very small bi-component particles consisting of a core material - the PCM - and an outer shell or capsule wall. PCMs are low melting materials with melt points in the range of -30C to 60C that can absorb and release large amounts of heat. The capsule wall is an inert, stable polymer or plastic.

### APPLICATIONS

Microencapsulated PCMs are used to regulate temperatures and for heat storage in a variety of applications.

A primary use of the microPCM products is in the coating of fabrics and foams for the textile industry. The coated materials have broad applications for use in various wearing apparel such as inner and outer garments, gloves and footwear. These end-use products containing microPCMs work by absorbing the body's excess heat, storing that heat, and releasing it back to the body as needed.

Microencapsulated PCMs are also finding wide spread applications in several other areas, including in:

Microencapsulated PCMs are also finding wide spread applications in several other areas, including in:

- **Electronics** - for cooling electrical components in computers, increasing duty cycles in lasers, and helping maintain constant temperatures for scientific instrumentation and military equipment used in the field.
- **Building Materials** - to increase the energy efficiency of residential and commercial buildings. The materials are being used in combination with radiant heat and solar energy to extend the heating and cooling efficiencies of these systems. PCMs are also being incorporated in plasters, fiberboards, tiles, and insulation.
- **Storage Solutions** - to protect food, beverages, medical products, and temperature-sensitive chemicals in transit.

### PROPERTIES

The MPCM 56D product exhibits the following general properties

Typical Properties	
Appearance	White to slightly off-white color
Form	Dry powder
Capsule Composition	85-90% wt.% PCM 10-15 wt.% polymer shell
Core Material	Paraffin
Particle size (mean)	15-25 micron
Melting Point	56°C (133°F)
Heat of Fusion	160 - 180 J/g
Specific Gravity	0.9
Temperature Stability	Extremely stable – less than 1% leakage when heated to 250°C
Thermal Cycling	Multiple

### PACKAGING

This product is generally shipped in 50-gallon fiber drums of 140 pounds net weight. Sample quantities may be ordered for customers requiring smaller amounts of product.

### HEALTH AND SAFETY

The product is classified as non-hazardous. Please refer to the Material Safety Data Sheet (MSDS) for necessary safety and handling precautions for this product.



The product discussed is sold without warranty, expressed or implied, on the condition that the purchaser shall make their own determination of suitability of the product for their purposes. Nothing in this bulletin shall be construed as granting permission to use or practice any invention covered by any patent.

FIGURA A.1 HOJA TÉCNICA DEL MATERIAL MPCM 56D

## MPCM 37

### Microencapsulated Phase Change Material Phase Change: 37°C , 98.6°F

#### DESCRIPTION

Microencapsulated phase change materials (MicroPCMs) are very small bi-component particles consisting of a core material – the PCM - and an outer shell or capsule wall. PCMs are low melting materials with melt points in the range of -30°C to 55°C, that can absorb and release large amounts of heat. The capsule wall is an inert, stable polymer or plastic.

#### APPLICATIONS

Microencapsulated PCMs are used to regulate temperatures and for heat storage in a variety of applications.

A primary use of the microPCM products is in the coating of fabrics and foams for the textile industry. The coated materials have broad applications for use in various wearing apparel such as inner and outer garments, gloves and footwear. These end-use products containing microPCMs work by absorbing the body's excess heat, storing that heat, and releasing it back to the body as needed.

Microencapsulated PCMs are also finding wide spread applications in several other areas, including in:

- **Electronics** - for cooling electrical components in computers, increasing duty cycles in lasers, and helping maintain constant temperatures for scientific instrumentation and military equipment used in the field.
- **Building Materials** – to increase the energy efficiency of residential and commercial buildings. The materials are being used in combination with radiant heat and solar energy to extend the heating and cooling efficiencies of these systems. PCMs are also being incorporated in plasters, fiberboards, tiles, and insulation.
- **Storage Solutions** – to protect food, beverages, medical products, and temperature-sensitive chemicals in transit.

#### PROPERTIES

The MPCM 37 product exhibits the following general properties.

Typical Properties	
Appearance	White to slightly off-white color
Form	Wet cake (70% Solids, 30% Water)
Capsule composition	85-90% wt.% PCM 10-15 wt.% polymer shell
Core material	Paraffin
Particle size (mean)	17-20 micron
Melting point	37°C (99°F)
Heat of Fusion	190 - 200 J/g
Specific Gravity	0.9
Temperature Stability	Extremely stable – less than 1% leakage when heated to 250°C
Thermal Cycling	Multiple

#### PACKAGING

This product is generally shipped in 50-gallon fiber drums of 250 pounds net weight (175 pounds nominal dry weight). Sample quantities may be ordered for customers requiring smaller amounts of product.

#### HEALTH AND SAFETY

The product is classified as non-hazardous. Please refer to the Material Safety Data Sheet (MSDS) for necessary safety and handling precautions for this product.



The product discussed is sold without warranty, expressed or implied, on the condition that the purchaser shall make their own determination of suitability of the product for their purposes. Nothing in this bulletin shall be construed as granting permission to use or practice any invention covered by any patent.

**FIGURA A.2 HOJA TÉCNICA DEL MATERIAL MPCM 37**

## **APÉNDICE B – DATOS TÉCNICOS DE LOS EQUIPOS UTILIZADOS**

### Datos técnicos del equipo Microscopio Óptico de Barrido (SEM):

Fabricante: FEI Company

Modelo: Inspect S

Resolución High Vacuum: 4.0 nm a 30kV (BSE)

Resolución Low Vacuum: 4.0 nm a 30kV (BSE)

Corriente de la Probeta: hasta 2  $\mu$ A

Voltaje/Fase/Frecuencia: 240/3/60

Software: xTM versión 3.1.4

Software de análisis de imagen: Scandium© versión 5.0

### Datos técnicos del equipo Analizador de Tamaño de Partículas:

Fabricante: Malvern Instruments

Modelo: Mastersizer 2000 APA2000

Red Light type: HeNe gas laser; 633 nm beam wavelenght

Blue Light type: LED; 455 nm beam wavelenght

Unidad de Dispersión: Hydro SM Small Volume Dispersión Unit

Modelo de la Unidad de Dispersión: AWM2002

Velocidad del Stirrer: 350- 2880 RPM

Voltaje/Fase/Frecuencia: 115/1/60

Software: Malvern Application 5.60

Datos técnicos del equipo Espectrofotómetro:

Fabricante: Thermo Fisher Scientific Inc.

Modelo: Genesys 10-S UV

Rev. de Software: 1.200

Voltaje/Fase/Frecuencia: 115/1/60

Datos técnicos del equipo Microbalanza:

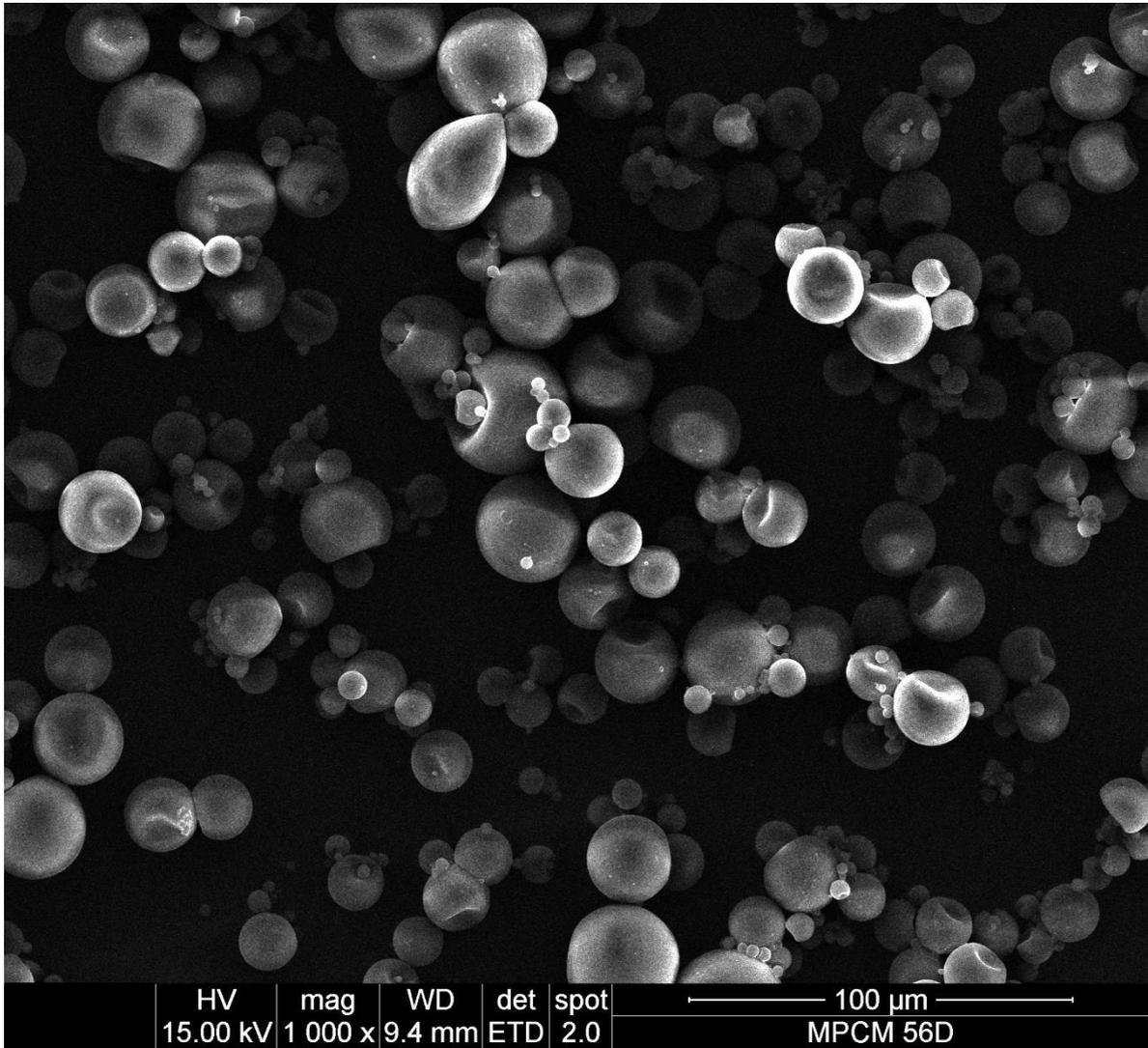
Fabricante: Shimadzu

Modelo: AX200

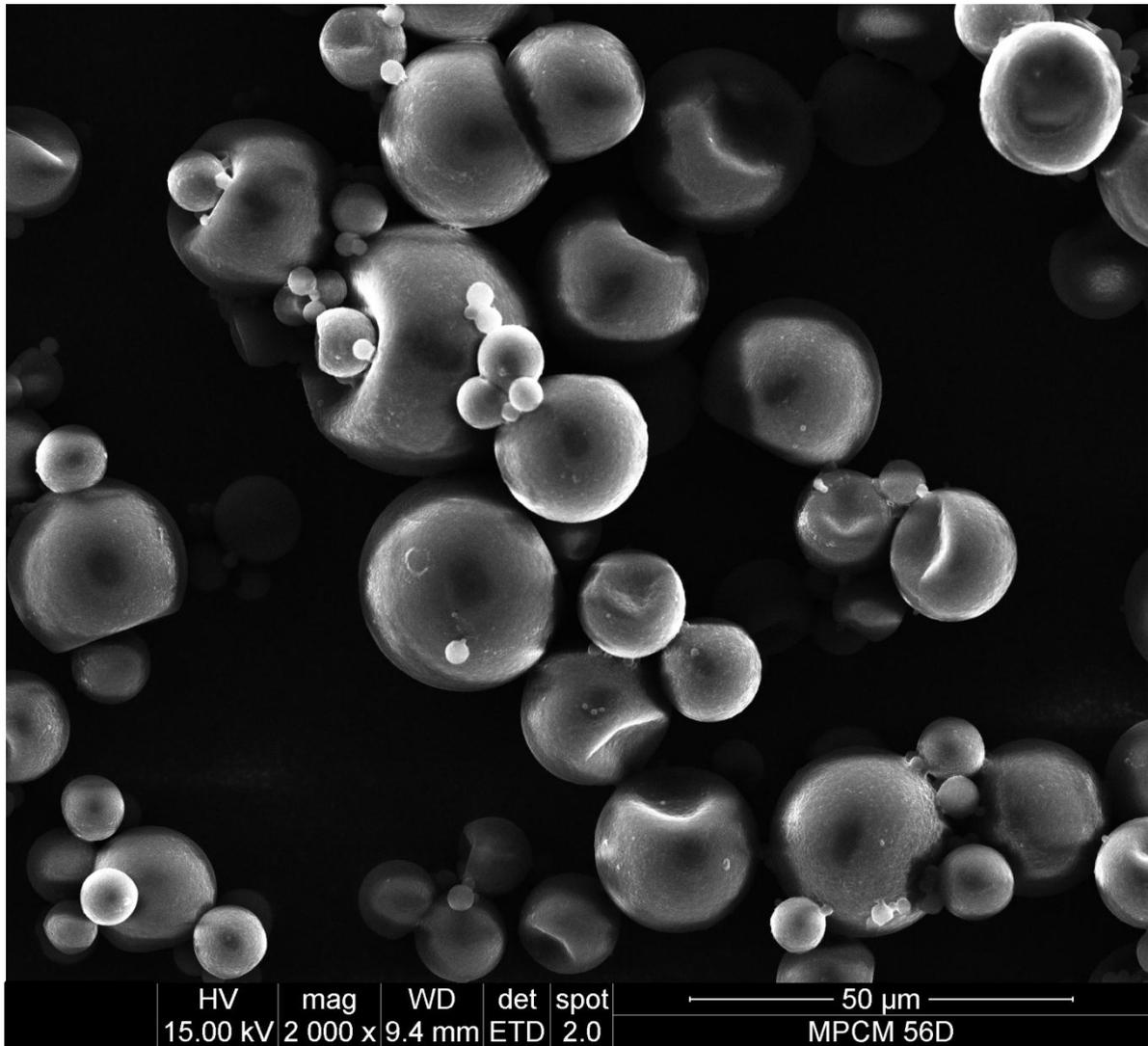
Resolución: 0.1 mg

Voltaje/Fase/Frecuencia: 115/1/60

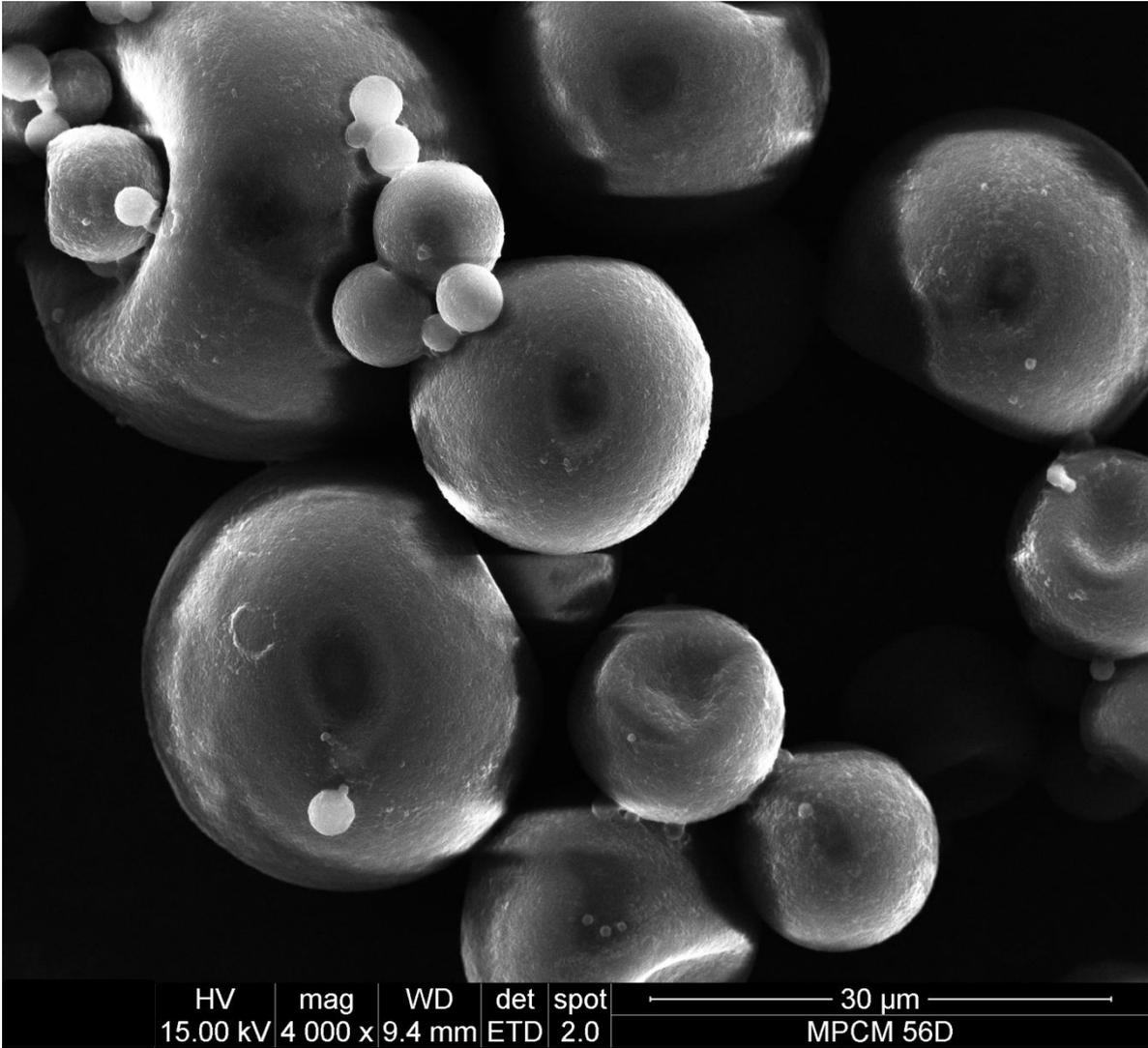
**APÉNDICE C – IMÁGENES DE MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO SEM**



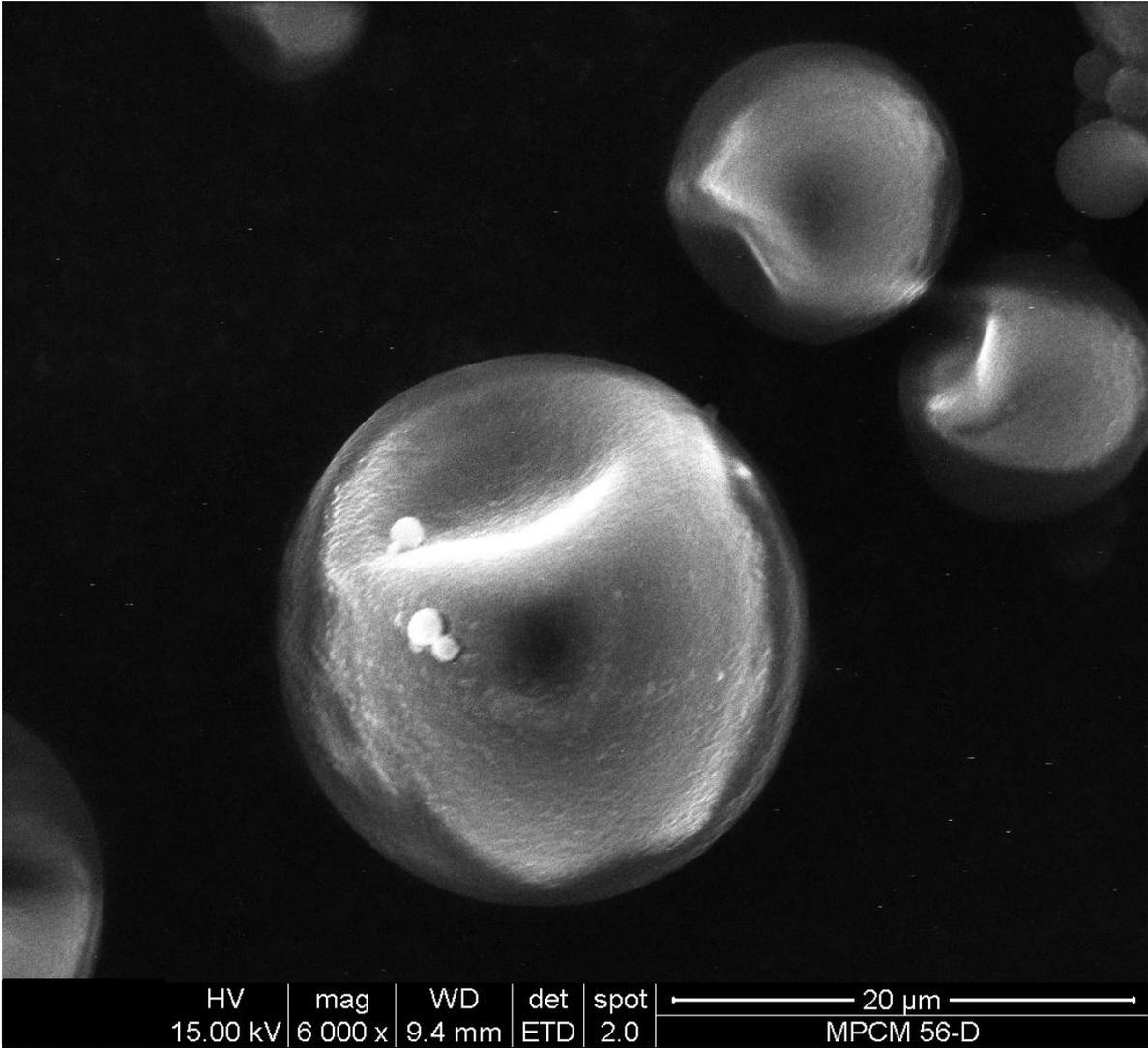
**FIGURA C.1 MICROSCOPIA MPCM 56D (1000X)**



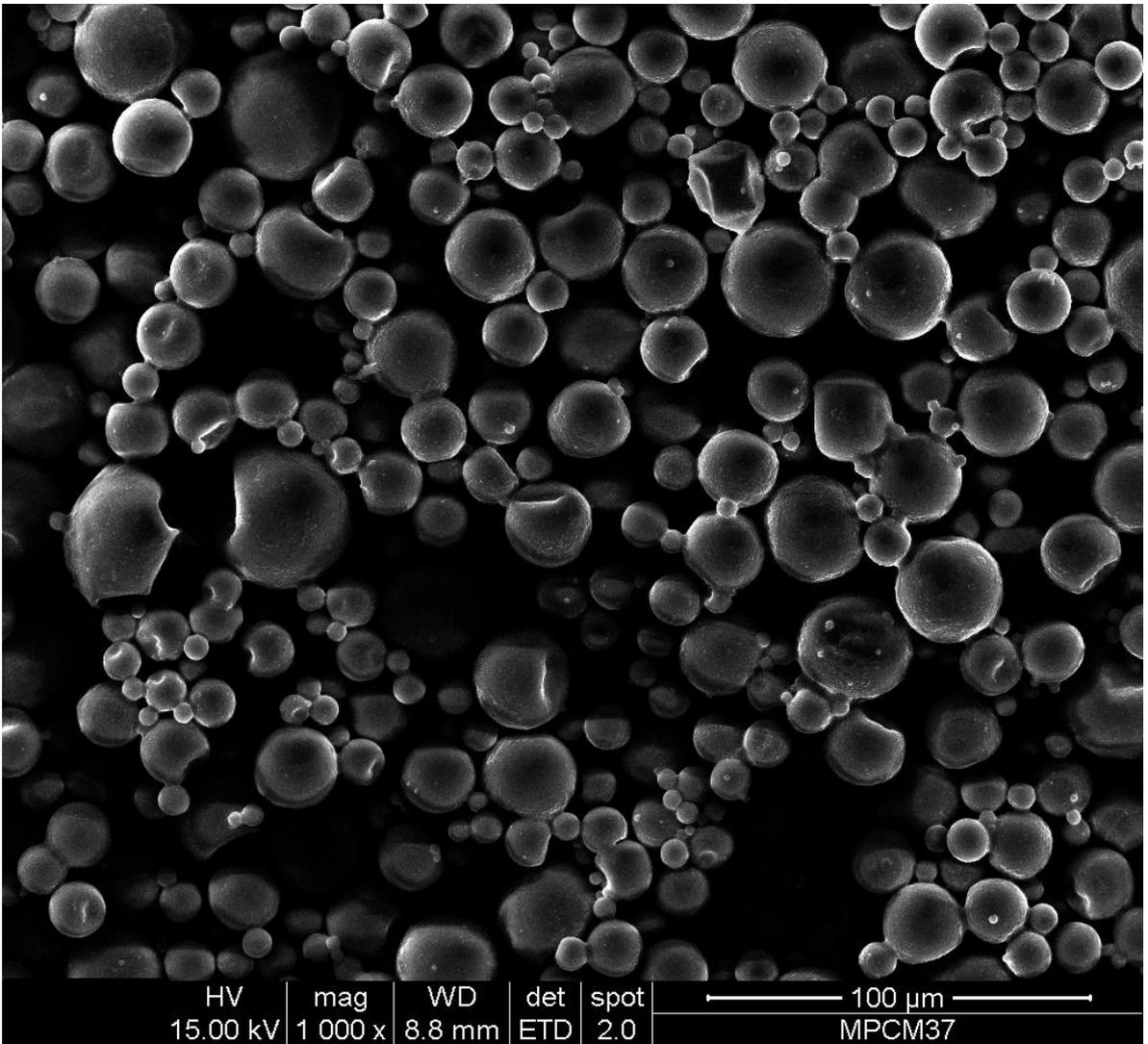
**FIGURA C.2 MICROSCOPIA MPCM 56D (2000X)**



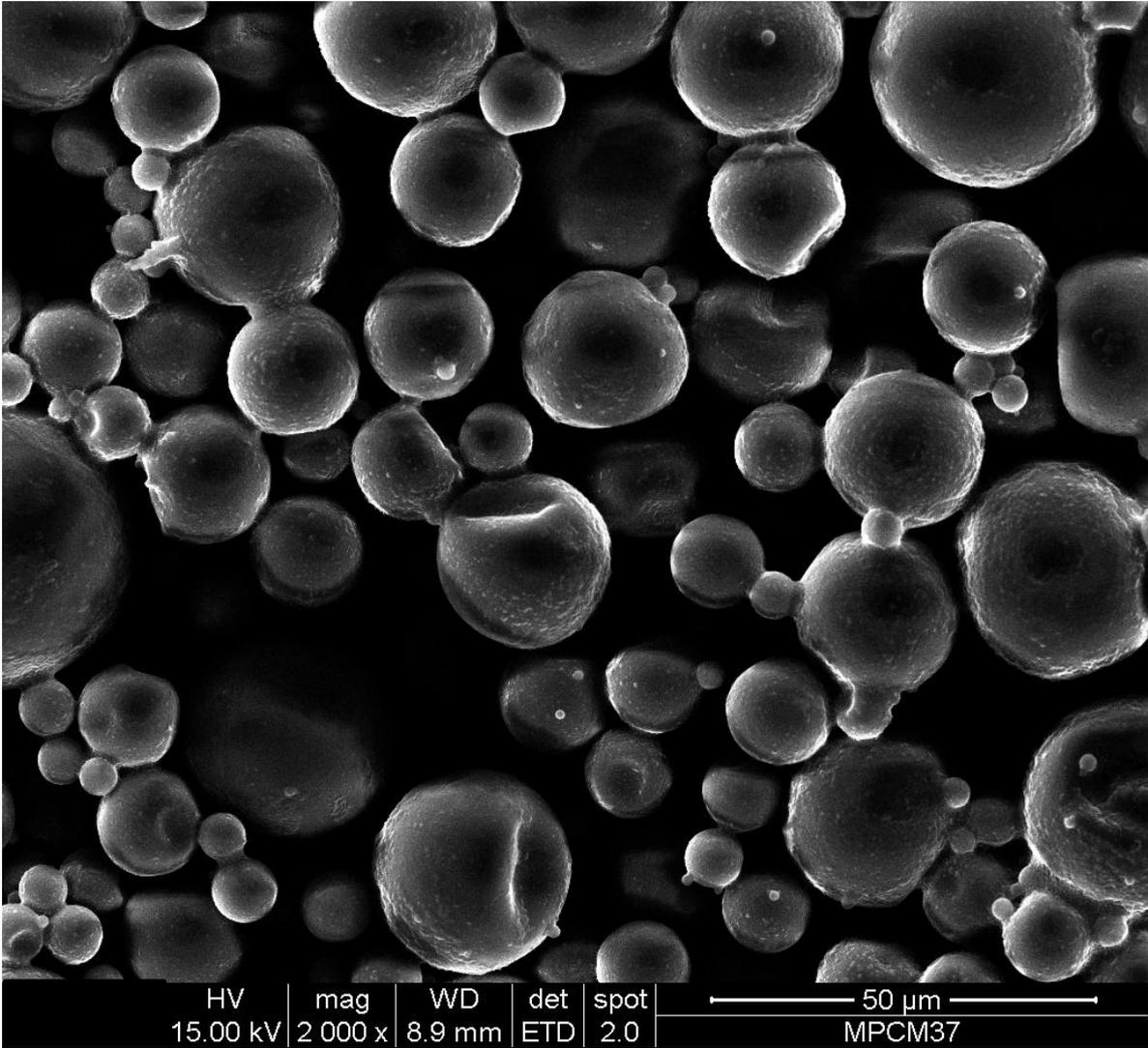
**FIGURA C.3 MICROSCOPÍA MPCM56D (4000X)**



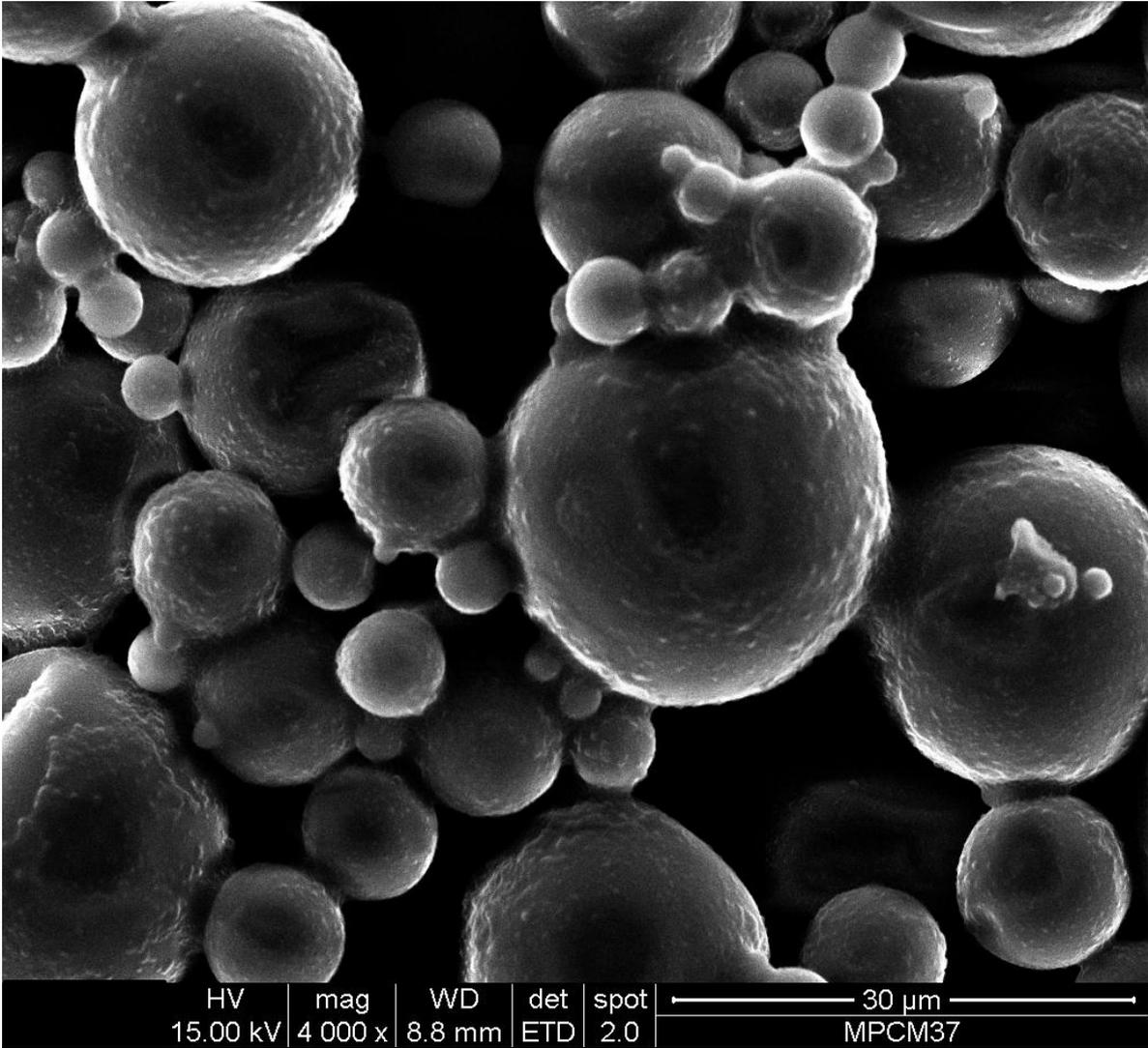
**FIGURA C.4 MICROSCOPIA MPCM56D (6000X)**



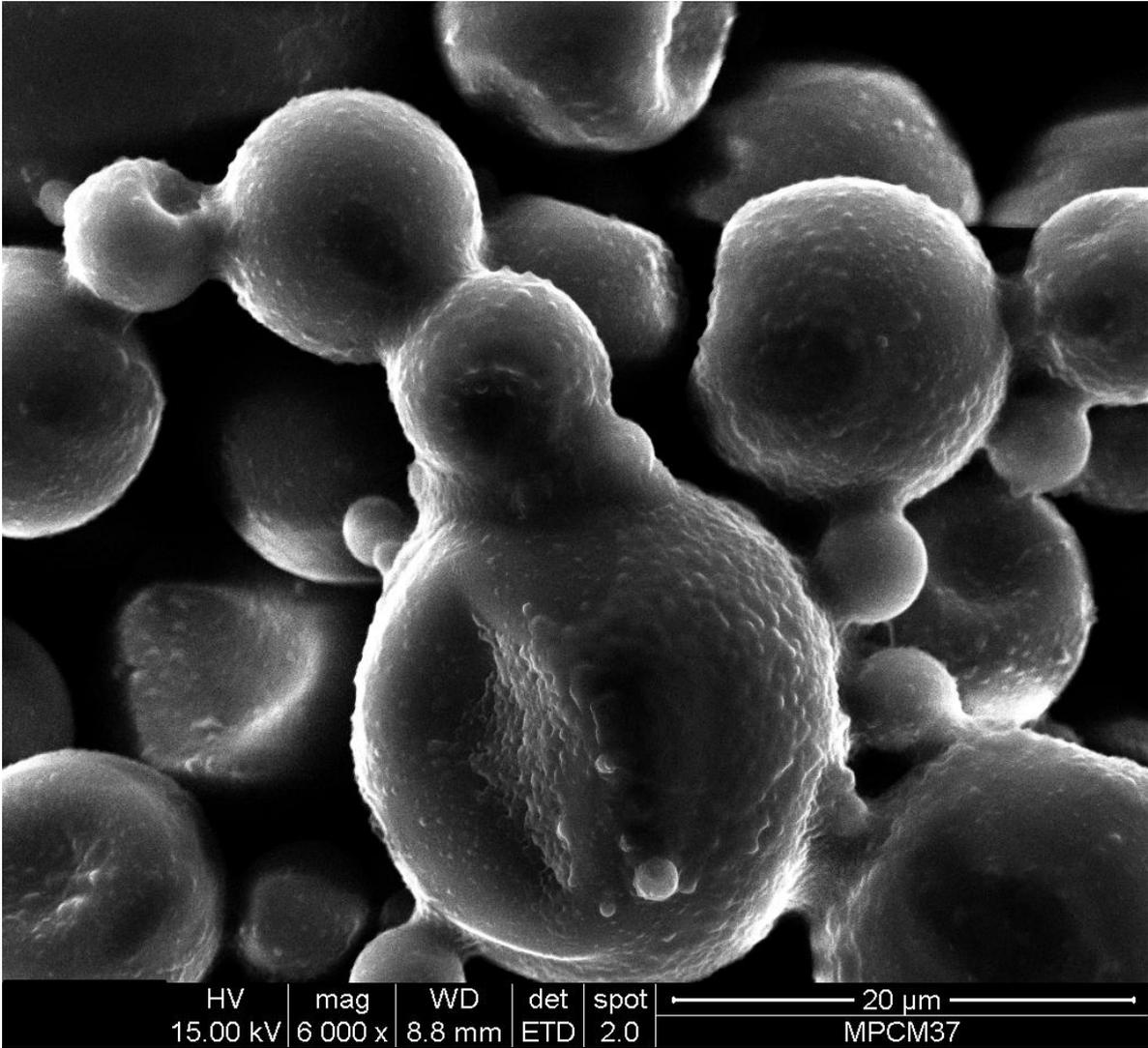
**FIGURA C.5 MICROSCOPIA MPCM37 (1000X)**



**FIGURA C.6 MICROSCOPIA MPCM37 (2000X)**



**FIGURA C.7 MICROSCOPIA MPCM37 (4000X)**



**FIGURA C.8 MICROSCOPIA MPCM37 (6000X)**

## APÉNDICE D - RESULTADOS SCANDIUM®

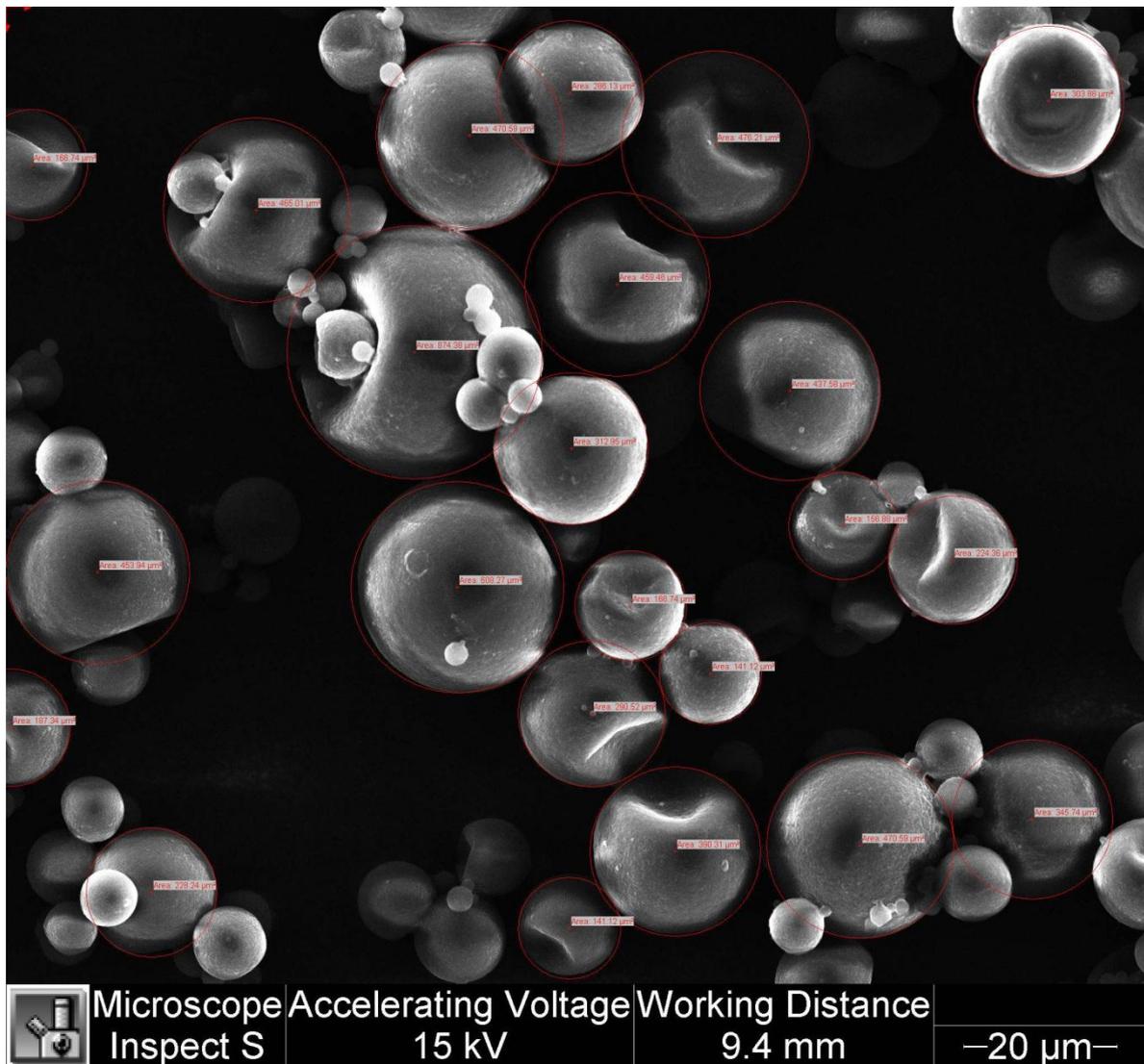
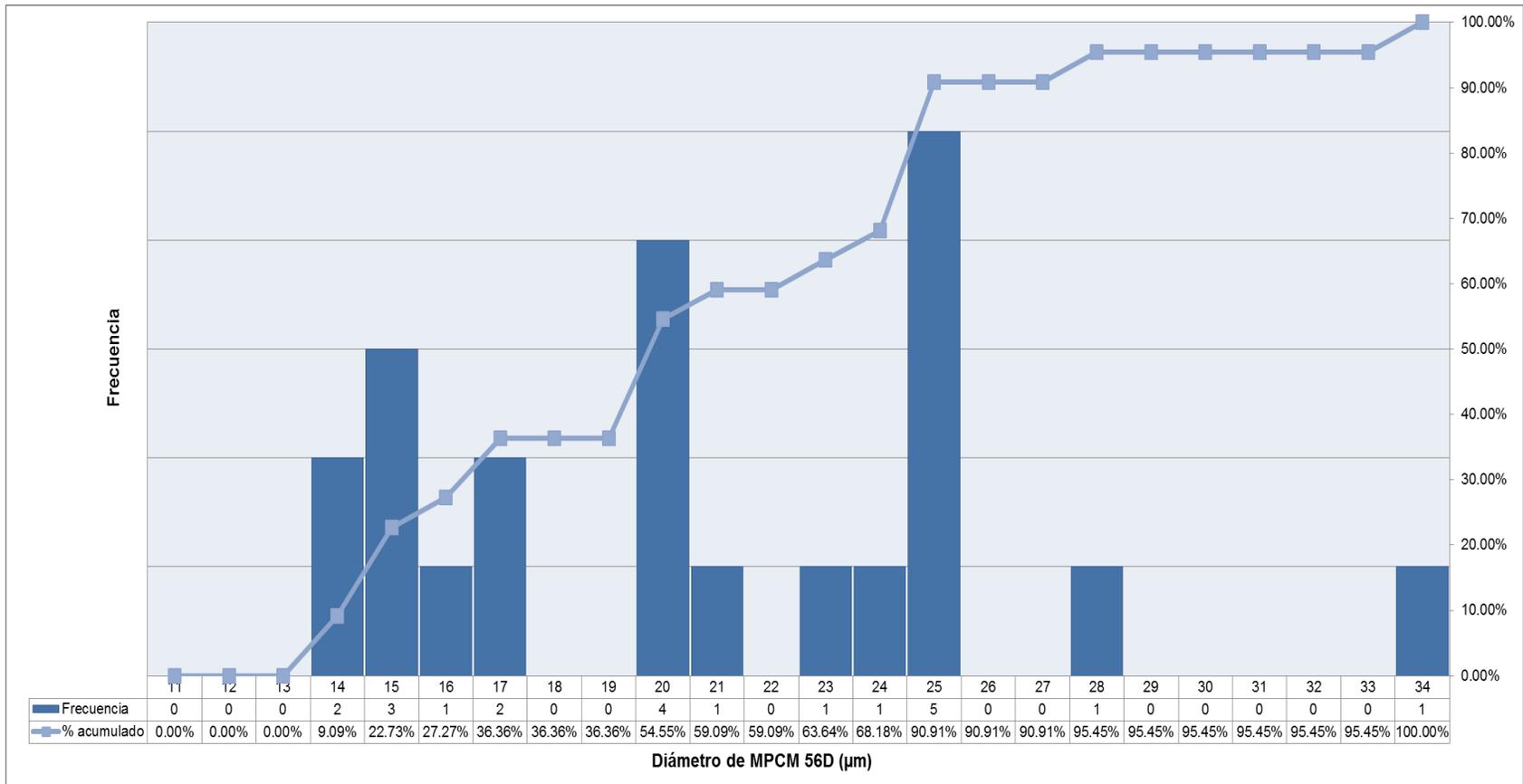


FIGURA D.1 USO DE SCANDIUM® EN TOMA DE MEDIDAS MPCM 56D

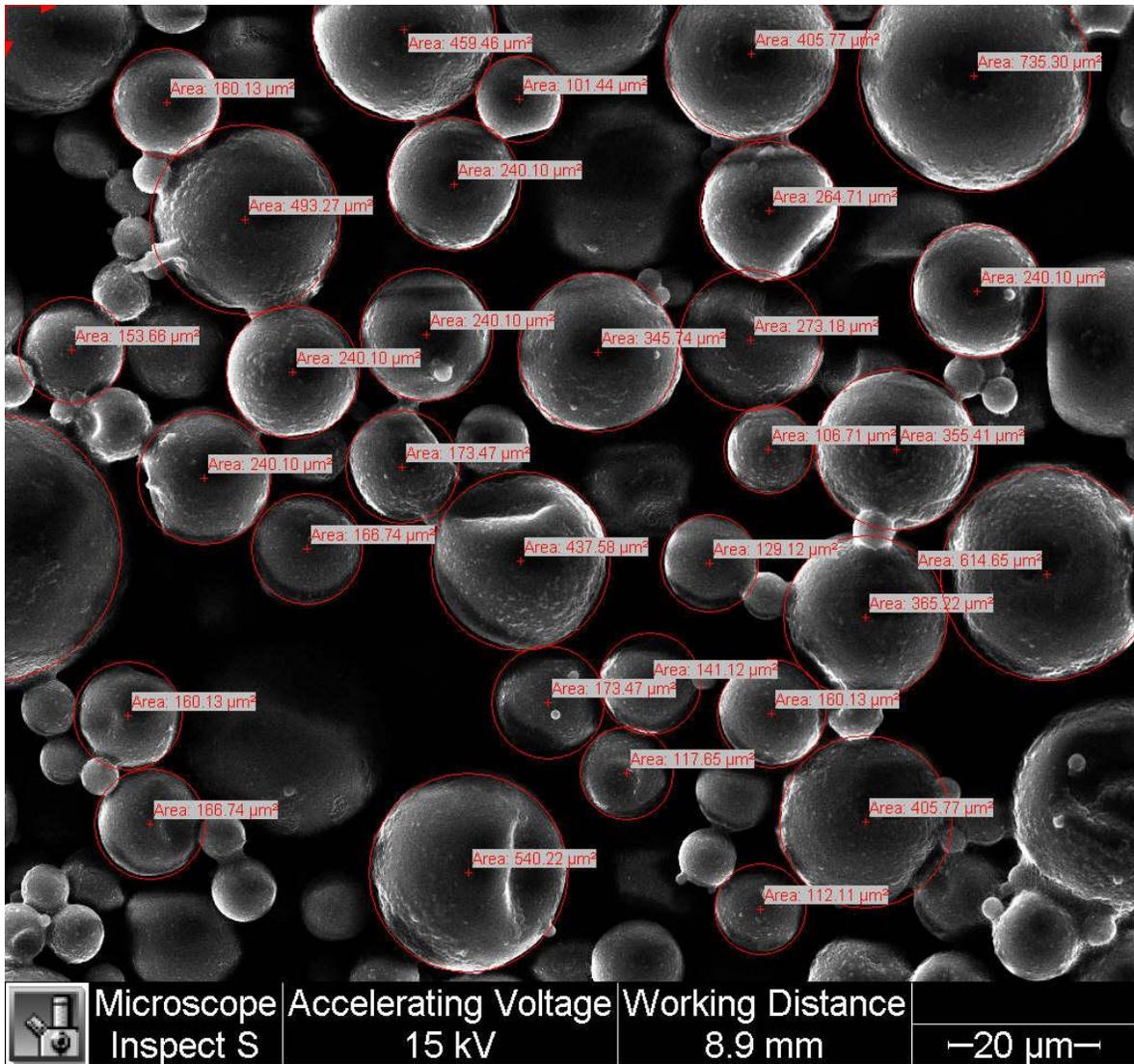
**TABLA D.1**

**REPORTE SCANDIUM© DE MPCM 56D**

	Área μm <sup>2</sup>	Perímetro μm	Diámetro μm
1	437.58	74.15	23.60
2	303.88	61.79	19.67
3	224.36	53.10	16.90
4	390.31	70.03	22.29
5	453.94	75.53	24.04
6	228.24	53.56	17.05
7	290.52	60.42	19.23
8	166.74	45.77	14.57
9	141.12	42.11	13.40
10	608.27	87.43	27.83
11	312.95	62.71	19.96
12	141.12	42.11	13.40
13	470.59	76.90	24.48
14	345.74	65.91	20.98
15	156.88	44.40	14.13
16	286.13	59.96	19.09
17	470.59	76.90	24.48
18	459.46	75.98	24.19
19	476.21	77.36	24.62
20	465.01	76.44	24.33
21	874.38	104.82	33.37
22	166.74	45.77	14.57
23	187.34	48.52	15.44
	<b>Promedio</b>	<b>Promedio</b>	<b>Promedio</b>
	<b><u>350.35</u></b>	<b><u>64.42</u></b>	<b><u>20.51</u></b>



**FIGURA D.2 HISTOGRAMA DE REPORTE SCANDIUM© DE MPCM 56D**

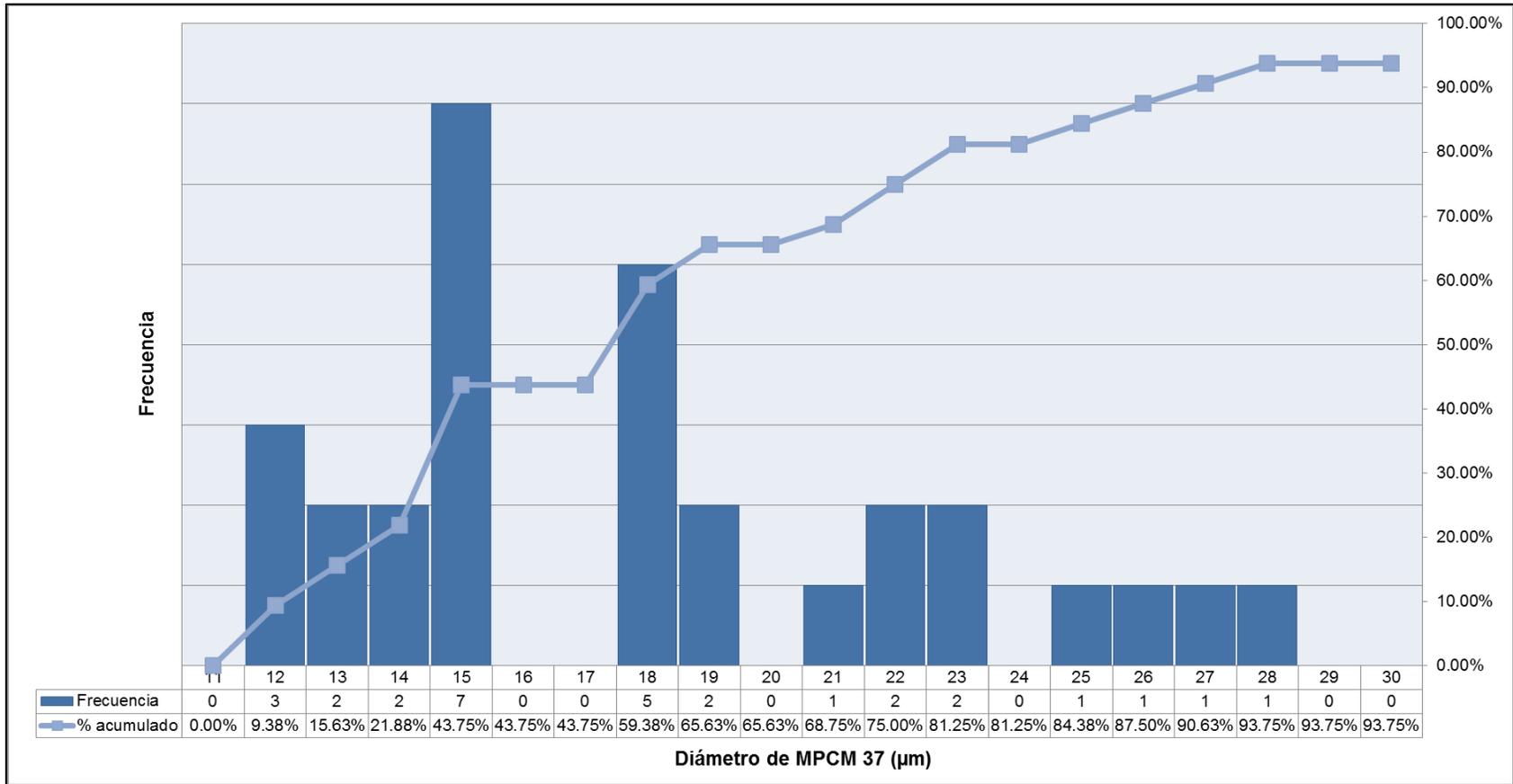


**FIGURA D.3 USO DE SCANDIUM© EN TOMA DE MEDIDAS MPCM37**

**TABLA D.2**

**REPORTE SCANDIUM© DE MPCM37**

	Área µm <sup>2</sup>	Perímetro µm	Diámetro µm
1	437.58	74.15	23.60
2	345.74	65.91	20.98
3	355.41	66.83	21.27
4	365.22	67.75	21.56
5	540.22	82.39	26.23
6	160.13	44.86	14.28
7	240.10	54.93	17.48
8	240.10	54.93	17.48
9	240.10	54.93	17.48
10	166.74	45.77	14.57
11	173.47	46.69	14.86
12	129.12	40.28	12.82
13	106.71	36.62	11.66
14	264.71	57.68	18.36
15	240.10	54.93	17.48
16	240.10	54.93	17.48
17	160.13	44.86	14.28
18	405.77	71.41	22.73
19	614.65	87.89	27.97
20	405.77	71.41	22.73
21	735.30	96.13	30.60
22	493.27	78.73	25.06
23	160.13	44.86	14.28
24	166.74	45.77	14.57
25	459.46	75.98	24.19
26	101.44	35.70	11.36
27	153.66	43.94	13.99
28	141.12	42.11	13.40
29	173.47	46.69	14.86
30	976.47	110.77	35.26
31	273.18	58.59	18.65
32	117.65	38.45	12.24
33	112.11	37.53	11.95
	<b><u>Promedio</u></b>	<b><u>Promedio</u></b>	<b><u>Promedio</u></b>
	<b><u>299.87</u></b>	<b><u>58.62</u></b>	<b><u>18.66</u></b>



**GRAFICA D.4 HISTOGRAMA DE REPORTE SCANDIUM© DE MPCM 37**

# APÉNDICE E – RESULTADOS DE MASTERSIZER

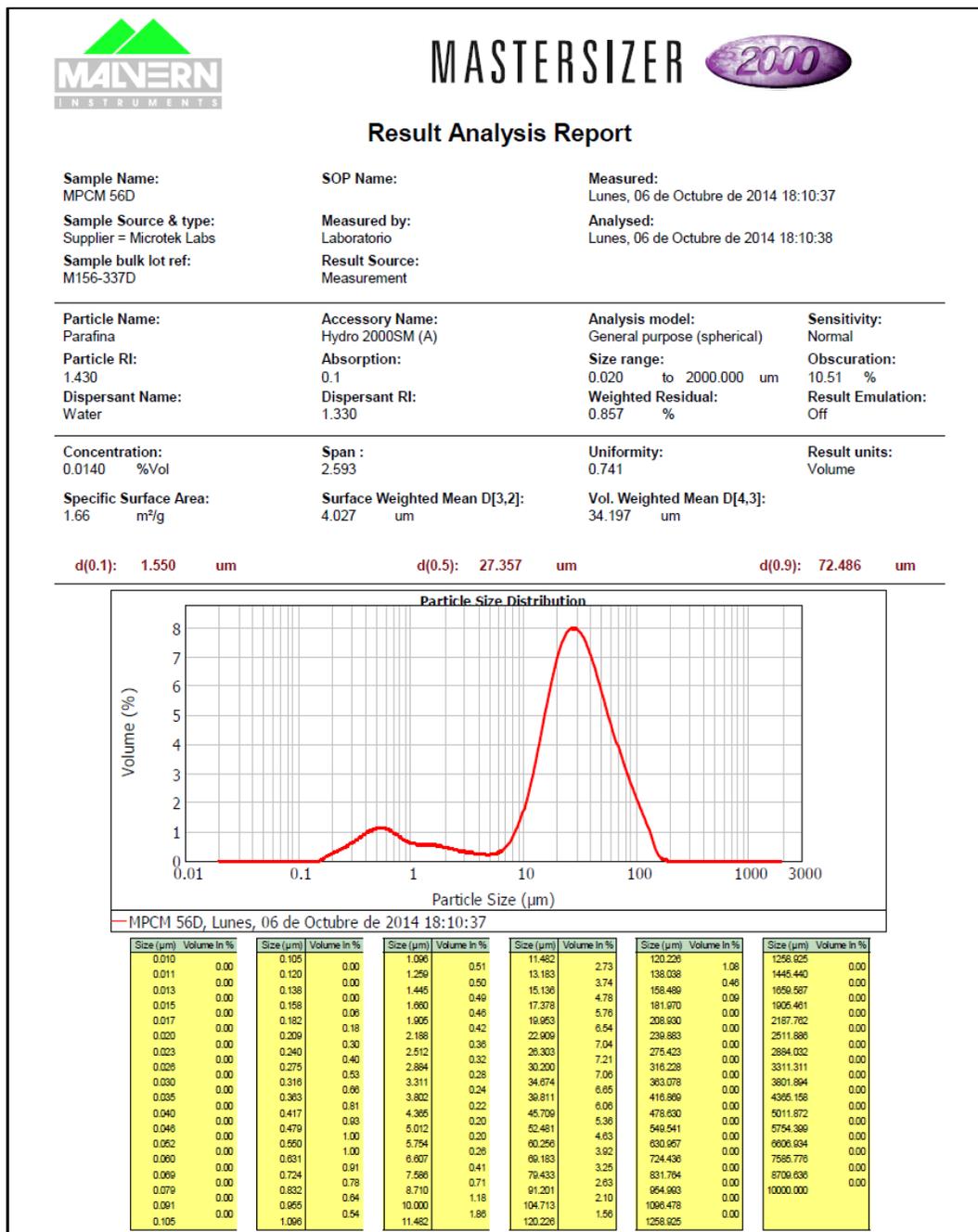


FIGURA E.1 REPORTE DE ANALISIS DE MPCM 56D



# MASTERSIZER



## Result: Statistics Report

Sample Name:  
MPCM 56D

SOP Name:

Measured:  
Lunes, 06 de Octubre de 2014 18:10:37

Sample Source & type:  
Supplier = Microtek Labs

Measured by:  
Laboratorio

Analysed:  
Lunes, 06 de Octubre de 2014 18:10:38

Sample bulk lot ref:  
M156-337D

Result Source:  
Measurement

Result units:  
Volume

No	Size (µm)	Mean In%	1*S.D.	No	Size (µm)	Mean In%	1*S.D.	No	Size (µm)	Mean In%	1*S.D.	No	Size (µm)	Mean In%	1*S.D.
1	0.010	0.00	0.00	27	0.363	0.81	0.00	53	13.183	3.74	0.00	79	478.630	0.00	0.00
2	0.011	0.00	0.00	28	0.417	0.93	0.00	54	15.136	4.78	0.00	80	549.541	0.00	0.00
3	0.013	0.00	0.00	29	0.479	1.00	0.00	55	17.378	5.76	0.00	81	630.957	0.00	0.00
4	0.015	0.00	0.00	30	0.550	1.00	0.00	56	19.953	6.54	0.00	82	724.436	0.00	0.00
5	0.017	0.00	0.00	31	0.631	0.91	0.00	57	22.909	7.04	0.00	83	831.764	0.00	0.00
6	0.020	0.00	0.00	32	0.724	0.78	0.00	58	26.303	7.21	0.00	84	954.993	0.00	0.00
7	0.023	0.00	0.00	33	0.832	0.64	0.00	59	30.200	7.06	0.00	85	1096.478	0.00	0.00
8	0.026	0.00	0.00	34	0.955	0.54	0.00	60	34.674	6.65	0.00	86	1258.925	0.00	0.00
9	0.030	0.00	0.00	35	1.096	0.51	0.00	61	39.811	6.06	0.00	87	1445.440	0.00	0.00
10	0.035	0.00	0.00	36	1.259	0.50	0.00	62	45.709	5.36	0.00	88	1659.587	0.00	0.00
11	0.040	0.00	0.00	37	1.445	0.49	0.00	63	52.481	4.63	0.00	89	1905.461	0.00	0.00
12	0.046	0.00	0.00	38	1.660	0.46	0.00	64	60.256	3.92	0.00	90	2187.762	0.00	0.00
13	0.052	0.00	0.00	39	1.905	0.42	0.00	65	69.183	3.25	0.00	91	2511.886	0.00	0.00
14	0.060	0.00	0.00	40	2.188	0.36	0.00	66	79.433	2.63	0.00	92	2884.032	0.00	0.00
15	0.069	0.00	0.00	41	2.512	0.32	0.00	67	91.201	2.10	0.00	93	3311.311	0.00	0.00
16	0.079	0.00	0.00	42	2.884	0.28	0.00	68	104.713	1.56	0.00	94	3801.894	0.00	0.00
17	0.091	0.00	0.00	43	3.311	0.24	0.00	69	120.226	1.08	0.00	95	4365.158	0.00	0.00
18	0.105	0.00	0.00	44	3.802	0.22	0.00	70	138.038	0.46	0.00	96	5011.872	0.00	0.00
19	0.120	0.00	0.00	45	4.365	0.20	0.00	71	158.489	0.09	0.00	97	5754.399	0.00	0.00
20	0.138	0.00	0.00	46	5.012	0.20	0.00	72	181.970	0.00	0.00	98	6606.934	0.00	0.00
21	0.158	0.06	0.00	47	5.754	0.26	0.00	73	208.930	0.00	0.00	99	7585.776	0.00	0.00
22	0.182	0.18	0.00	48	6.607	0.41	0.00	74	239.883	0.00	0.00	100	8709.636	0.00	0.00
23	0.209	0.30	0.00	49	7.586	0.71	0.00	75	275.423	0.00	0.00		10000.000	0.00	0.00
24	0.240	0.40	0.00	50	8.710	1.18	0.00	76	316.228	0.00	0.00				
25	0.275	0.53	0.00	51	10.000	1.86	0.00	77	363.078	0.00	0.00				
26	0.316	0.66	0.00	52	11.482	2.73	0.00	78	416.869	0.00	0.00				
	0.363				13.183			79	478.630	0.00	0.00				

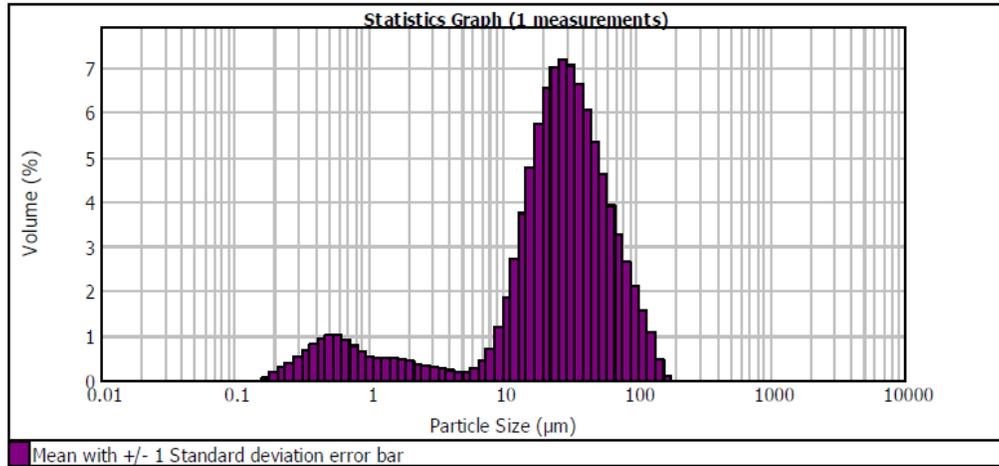


FIGURA E.2 REPORTE ESTADISTICO DE MPCM 56D

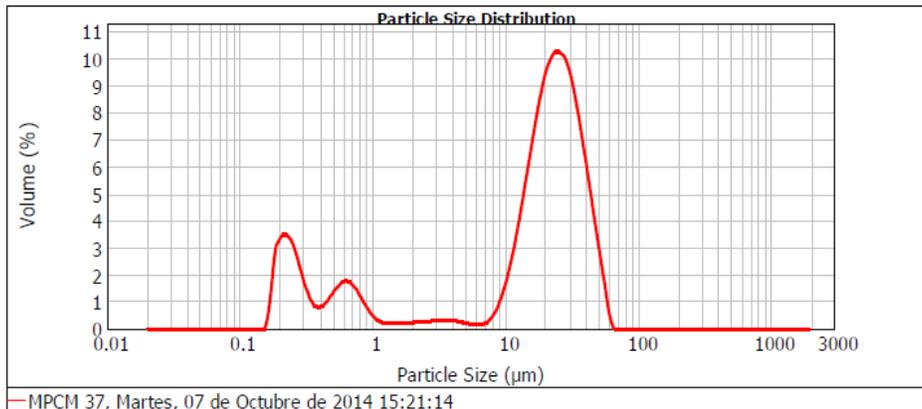


# MASTERSIZER 2000

## Result Analysis Report

<b>Sample Name:</b> MPCM 37	<b>SOP Name:</b>	<b>Measured:</b> Martes, 07 de Octubre de 2014 15:21:14	
<b>Sample Source &amp; type:</b> Supplier = Microtek Labs	<b>Measured by:</b> Laboratorio	<b>Analysed:</b> Martes, 07 de Octubre de 2014 15:21:15	
<b>Sample bulk lot ref:</b> M620-488	<b>Result Source:</b> Measurement		
<b>Particle Name:</b> Parafina	<b>Accessory Name:</b> Hydro 2000SM (A)	<b>Analysis model:</b> General purpose (spherical)	<b>Sensitivity:</b> Normal
<b>Particle RI:</b> 1.430	<b>Absorption:</b> 0.1	<b>Size range:</b> 0.020 to 2000.000 um	<b>Obscuration:</b> 12.11 %
<b>Dispersant Name:</b> Water	<b>Dispersant RI:</b> 1.330	<b>Weighted Residual:</b> 1.473 %	<b>Result Emulation:</b> Off
<b>Concentration:</b> 0.0098 %Vol	<b>Span :</b> 1.918	<b>Uniformity:</b> 0.573	<b>Result units:</b> Volume
<b>Specific Surface Area:</b> 4.78 m <sup>2</sup> /g	<b>Surface Weighted Mean D[3,2]:</b> 1.396 um	<b>Vol. Weighted Mean D[4,3]:</b> 20.111 um	

d(0.1): 0.283 um      d(0.5): 20.227 um      d(0.9): 39.068 um



MPCM 37, Martes, 07 de Octubre de 2014 15:21:14

Size (µm)	Volume In %										
0.010	0.00	0.105	0.00	1.098	0.22	11.482	3.23	120.228	0.00	1258.025	0.00
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	0.17	13.183	4.77	138.038	0.00	1445.440	0.00
0.013	0.00	0.138	0.00	1.445	0.17	15.136	6.37	158.498	0.00	1658.587	0.00
0.015	0.00	0.158	0.84	1.660	0.18	17.378	7.83	181.970	0.00	1805.461	0.00
0.017	0.00	0.182	2.96	1.905	0.20	19.953	8.86	208.630	0.00	2187.762	0.00
0.020	0.00	0.209	3.11	2.188	0.22	22.909	9.28	239.883	0.00	2511.886	0.00
0.023	0.00	0.240	2.67	2.512	0.25	26.303	8.98	275.423	0.00	2894.032	0.00
0.026	0.00	0.275	1.72	2.884	0.25	30.200	8.98	316.228	0.00	3311.311	0.00
0.030	0.00	0.316	0.96	3.311	0.29	34.674	8.00	363.078	0.00	3801.884	0.00
0.035	0.00	0.363	0.70	3.802	0.28	39.811	6.51	416.869	0.00	4365.158	0.00
0.040	0.00	0.417	0.88	4.365	0.22	45.709	3.05	478.630	0.00	5011.872	0.00
0.046	0.00	0.479	1.25	5.012	0.15	52.481	1.35	549.541	0.00	5754.369	0.00
0.052	0.00	0.550	1.55	5.754	0.11	60.256	0.04	630.957	0.00	6606.934	0.00
0.060	0.00	0.631	1.55	6.607	0.11	69.183	0.00	724.436	0.00	7585.776	0.00
0.069	0.00	0.724	1.55	7.588	0.18	79.433	0.00	831.794	0.00	8700.638	0.00
0.079	0.00	0.832	1.22	8.710	0.46	91.201	0.00	954.963	0.00	10000.000	0.00
0.091	0.00	0.955	0.76	10.000	1.03	104.713	0.00	1096.478	0.00		
0.105	0.00	1.086	0.40	11.482	1.97	120.228	0.00	1258.025	0.00		

FIGURA E.3 REPORTE DE ANALISIS DE MPCM 37



# MASTERSIZER



## Result: Statistics Report

Sample Name:  
MPCM 37

SOP Name:

Measured:  
Martes, 07 de Octubre de 2014 15:21:14

Sample Source & type:  
Supplier = Microtek Labs

Measured by:  
Laboratorio

Analysed:  
Martes, 07 de Octubre de 2014 15:21:15

Sample bulk lot ref:  
M620-488

Result Source:  
Measurement

Result units:  
Volume

No	Size (µm)	Mean In%	1*S.D.	No	Size (µm)	Mean In%	1*S.D.	No	Size (µm)	Mean In%	1*S.D.	No	Size (µm)	Mean In%	1*S.D.
1	0.010	0.00	0.00	27	0.363	0.70	0.00	53	13.183	4.77	0.00	79	478.630	0.00	0.00
2	0.011	0.00	0.00	28	0.417	0.88	0.00	54	15.136	6.37	0.00	80	549.541	0.00	0.00
3	0.013	0.00	0.00	29	0.479	1.25	0.00	55	17.378	7.83	0.00	81	630.957	0.00	0.00
4	0.015	0.00	0.00	30	0.550	1.55	0.00	56	19.953	8.86	0.00	82	724.436	0.00	0.00
5	0.017	0.00	0.00	31	0.631	1.55	0.00	57	22.909	9.28	0.00	83	831.764	0.00	0.00
6	0.020	0.00	0.00	32	0.724	1.22	0.00	58	26.303	8.98	0.00	84	954.993	0.00	0.00
7	0.023	0.00	0.00	33	0.832	0.76	0.00	59	30.200	8.00	0.00	85	1096.478	0.00	0.00
8	0.026	0.00	0.00	34	0.955	0.40	0.00	60	34.674	6.51	0.00	86	1258.925	0.00	0.00
9	0.030	0.00	0.00	35	1.096	0.22	0.00	61	39.811	4.77	0.00	87	1445.440	0.00	0.00
10	0.035	0.00	0.00	36	1.259	0.17	0.00	62	45.709	3.05	0.00	88	1659.587	0.00	0.00
11	0.040	0.00	0.00	37	1.445	0.17	0.00	63	52.481	1.35	0.00	89	1905.461	0.00	0.00
12	0.046	0.00	0.00	38	1.660	0.18	0.00	64	60.256	0.04	0.00	90	2187.762	0.00	0.00
13	0.052	0.00	0.00	39	1.905	0.20	0.00	65	69.183	0.00	0.00	91	2511.886	0.00	0.00
14	0.060	0.00	0.00	40	2.188	0.22	0.00	66	79.433	0.00	0.00	92	2884.032	0.00	0.00
15	0.069	0.00	0.00	41	2.512	0.25	0.00	67	91.201	0.00	0.00	93	3311.311	0.00	0.00
16	0.079	0.00	0.00	42	2.884	0.29	0.00	68	104.713	0.00	0.00	94	3801.894	0.00	0.00
17	0.091	0.00	0.00	43	3.311	0.30	0.00	69	120.226	0.00	0.00	95	4365.158	0.00	0.00
18	0.105	0.00	0.00	44	3.802	0.28	0.00	70	138.038	0.00	0.00	96	5011.872	0.00	0.00
19	0.120	0.00	0.00	45	4.365	0.22	0.00	71	158.489	0.00	0.00	97	5754.399	0.00	0.00
20	0.138	0.00	0.00	46	5.012	0.15	0.00	72	181.970	0.00	0.00	98	6606.934	0.00	0.00
21	0.158	0.84	0.00	47	5.754	0.11	0.00	73	208.930	0.00	0.00	99	7585.776	0.00	0.00
22	0.182	2.96	0.00	48	6.607	0.18	0.00	74	239.883	0.00	0.00	100	8709.636	0.00	0.00
23	0.209	3.11	0.00	49	7.586	0.46	0.00	75	275.423	0.00	0.00		10000.000	0.00	0.00
24	0.240	2.67	0.00	50	8.710	1.03	0.00	76	316.228	0.00	0.00				
25	0.275	1.72	0.00	51	10.000	1.97	0.00	77	363.078	0.00	0.00				
26	0.316	0.96	0.00	52	11.482	3.23	0.00	78	416.869	0.00	0.00				
	0.363				13.183				478.630						

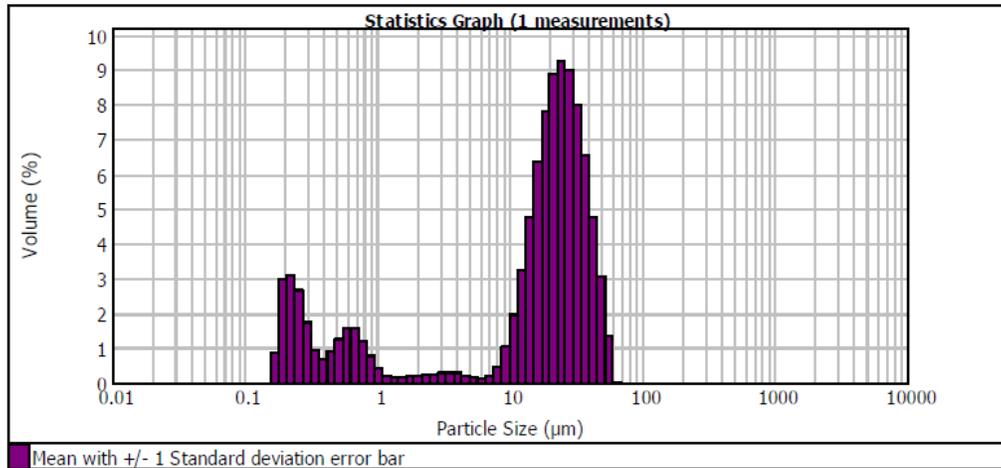


FIGURA E.4 REPORTE ESTADISTICO DE MPCM 37

## APÉNDICE F - RESULTADOS ESPECTROFOTÓMETRO

**TABLA F.1**

**ABSORBANCIA(A) POR LONGITUD DE ONDA( $\lambda$ ) DE MPCM 56D AL 0.05 %vol.**

$\lambda$ (nm)	A								
450	0.164	520	0.157	590	0.152	660	0.151	730	0.154
452	0.163	522	0.157	592	0.152	662	0.151	732	0.153
454	0.163	524	0.156	594	0.152	664	0.152	734	0.152
456	0.163	526	0.157	596	0.152	666	0.152	736	0.153
458	0.163	528	0.157	598	0.151	668	0.152	738	0.153
460	0.162	530	0.157	600	0.151	670	0.153	740	0.153
462	0.162	532	0.157	602	0.150	672	0.152	742	0.154
464	0.162	534	0.158	604	0.151	674	0.152	744	0.153
466	0.161	536	0.157	606	0.150	676	0.152	746	0.154
468	0.161	538	0.157	608	0.150	678	0.153	748	0.152
470	0.160	540	0.157	610	0.149	680	0.154	750	0.151
472	0.160	542	0.157	612	0.150	682	0.153	752	0.151
474	0.160	544	0.157	614	0.149	684	0.152	754	0.153
476	0.159	546	0.157	616	0.150	686	0.153	756	0.153
478	0.159	548	0.156	618	0.149	688	0.154	758	0.153
480	0.158	550	0.156	620	0.149	690	0.153	760	0.153
482	0.158	552	0.156	622	0.148	692	0.153	762	0.153
484	0.158	554	0.156	624	0.149	694	0.153	764	0.152
486	0.158	556	0.156	626	0.149	696	0.154	766	0.151
488	0.158	558	0.156	628	0.149	698	0.154	768	0.153
490	0.158	560	0.155	630	0.150	700	0.154	770	0.152
492	0.158	562	0.155	632	0.149	702	0.154	772	0.153
494	0.158	564	0.155	634	0.150	704	0.154	774	0.152
496	0.157	566	0.155	636	0.150	706	0.154	776	0.153
498	0.157	568	0.155	638	0.150	708	0.155	778	0.151
500	0.157	570	0.155	640	0.149	710	0.154	780	0.151
502	0.156	572	0.155	642	0.150	712	0.155	782	0.153
504	0.156	574	0.154	644	0.150	714	0.154	784	0.153
506	0.157	576	0.155	646	0.150	716	0.154	786	0.153
508	0.158	578	0.153	648	0.150	718	0.153	788	0.152
510	0.157	580	0.153	650	0.150	720	0.153	790	0.152
512	0.157	582	0.154	652	0.150	722	0.153	792	0.153
514	0.157	584	0.153	654	0.151	724	0.154	794	0.152
516	0.157	586	0.153	656	0.151	726	0.154	796	0.152
518	0.157	588	0.153	658	0.151	728	0.154	798	0.153

800	0.153	854	0.155	908	0.145	962	0.152	1016	0.164
802	0.153	856	0.156	910	0.145	964	0.153	1018	0.163
804	0.153	858	0.156	912	0.144	966	0.152	1020	0.163
806	0.153	860	0.157	914	0.146	968	0.155	1022	0.163
808	0.154	862	0.155	916	0.145	970	0.152	1024	0.164
810	0.154	864	0.155	918	0.146	972	0.152	1026	0.163
812	0.154	866	0.156	920	0.146	974	0.152	1028	0.159
814	0.153	868	0.156	922	0.145	976	0.152	1030	0.160
816	0.154	870	0.155	924	0.146	978	0.153	1032	0.159
818	0.157	872	0.155	926	0.146	980	0.153	1034	0.159
820	0.153	874	0.156	928	0.146	982	0.153	1036	0.160
822	0.152	876	0.156	930	0.147	984	0.157	1038	0.159
824	0.153	878	0.154	932	0.147	986	0.158	1040	0.158
826	0.153	880	0.154	934	0.148	988	0.159	1042	0.155
828	0.154	882	0.153	936	0.146	990	0.155	1044	0.155
830	0.154	884	0.151	938	0.147	992	0.155	1046	0.156
832	0.154	886	0.150	940	0.148	994	0.158	1048	0.154
834	0.154	888	0.149	942	0.149	996	0.160	1050	0.156
836	0.154	890	0.150	944	0.148	998	0.161		
838	0.154	892	0.148	946	0.149	1000	0.160		
840	0.154	894	0.148	948	0.151	1002	0.160		
842	0.154	896	0.147	950	0.151	1004	0.161		
844	0.154	898	0.147	952	0.152	1006	0.162		
846	0.154	900	0.147	954	0.152	1008	0.160		
848	0.156	902	0.145	956	0.153	1010	0.160		
850	0.156	904	0.146	958	0.153	1012	0.161		
852	0.156	906	0.147	960	0.152	1014	0.161		

**TABLA F.2**

**ABSORBANCIA(A) POR LONGITUD DE ONDA( $\lambda$ ) DE MPCM 56D AL 0.10 %vol.**

$\lambda$ (nm)	A								
450	0.244	468	0.243	486	0.240	504	0.237	522	0.236
452	0.244	470	0.243	488	0.240	506	0.237	524	0.236
454	0.244	472	0.243	490	0.240	508	0.238	526	0.236
456	0.244	474	0.243	492	0.239	510	0.237	528	0.236
458	0.244	476	0.243	494	0.240	512	0.236	530	0.237
460	0.244	478	0.242	496	0.239	514	0.236	532	0.237
462	0.244	480	0.242	498	0.238	516	0.235	534	0.238
464	0.244	482	0.242	500	0.239	518	0.235	536	0.238
466	0.244	484	0.241	502	0.238	520	0.235	538	0.238

---

540	0.238	626	0.240	712	0.251	798	0.262	884	0.251
542	0.239	628	0.239	714	0.252	800	0.261	886	0.251
544	0.239	630	0.238	716	0.252	802	0.261	888	0.250
546	0.240	632	0.238	718	0.254	804	0.262	890	0.251
548	0.240	634	0.238	720	0.253	806	0.261	892	0.251
550	0.240	636	0.239	722	0.254	808	0.259	894	0.252
552	0.241	638	0.238	724	0.256	810	0.258	896	0.251
554	0.242	640	0.238	726	0.255	812	0.259	898	0.251
556	0.243	642	0.238	728	0.257	814	0.260	900	0.250
558	0.243	644	0.237	730	0.256	816	0.260	902	0.251
560	0.242	646	0.236	732	0.257	818	0.262	904	0.253
562	0.242	648	0.237	734	0.257	820	0.261	906	0.252
564	0.243	650	0.236	736	0.258	822	0.263	908	0.250
566	0.242	652	0.237	738	0.259	824	0.257	910	0.251
568	0.243	654	0.237	740	0.258	826	0.256	912	0.251
570	0.243	656	0.237	742	0.258	828	0.257	914	0.255
572	0.243	658	0.237	744	0.259	830	0.255	916	0.254
574	0.243	660	0.237	746	0.259	832	0.256	918	0.252
576	0.244	662	0.237	748	0.260	834	0.257	920	0.252
578	0.243	664	0.237	750	0.259	836	0.254	922	0.253
580	0.243	666	0.238	752	0.260	838	0.254	924	0.253
582	0.244	668	0.238	754	0.260	840	0.255	926	0.255
584	0.243	670	0.238	756	0.260	842	0.256	928	0.255
586	0.244	672	0.238	758	0.260	844	0.254	930	0.255
588	0.243	674	0.239	760	0.260	846	0.256	932	0.255
590	0.242	676	0.239	762	0.260	848	0.257	934	0.258
592	0.242	678	0.239	764	0.259	850	0.255	936	0.255
594	0.242	680	0.240	766	0.258	852	0.255	938	0.255
596	0.242	682	0.240	768	0.259	854	0.255	940	0.255
598	0.242	684	0.240	770	0.258	856	0.255	942	0.257
600	0.241	686	0.241	772	0.262	858	0.255	944	0.257
602	0.241	688	0.242	774	0.263	860	0.253	946	0.256
604	0.242	690	0.242	776	0.262	862	0.253	948	0.257
606	0.241	692	0.242	778	0.263	864	0.254	950	0.257
608	0.241	694	0.243	780	0.263	866	0.253	952	0.258
610	0.241	696	0.244	782	0.263	868	0.252	954	0.257
612	0.241	698	0.246	784	0.263	870	0.252	956	0.259
614	0.241	700	0.245	786	0.262	872	0.252	958	0.257
616	0.241	702	0.246	788	0.263	874	0.250	960	0.255
618	0.241	704	0.247	790	0.260	876	0.253	962	0.257
620	0.241	706	0.249	792	0.262	878	0.251	964	0.256
622	0.241	708	0.249	794	0.262	880	0.255	966	0.255
624	0.240	710	0.250	796	0.262	882	0.254	968	0.258

---

970	0.255	988	0.262	1006	0.265	1024	0.265	1042	0.263
972	0.255	990	0.258	1008	0.264	1026	0.263	1044	0.262
974	0.256	992	0.259	1010	0.265	1028	0.262	1046	0.263
976	0.254	994	0.263	1012	0.265	1030	0.262	1048	0.262
978	0.255	996	0.265	1014	0.265	1032	0.261	1050	0.264
980	0.255	998	0.263	1016	0.268	1034	0.263		
982	0.259	1000	0.263	1018	0.266	1036	0.262		
984	0.260	1002	0.263	1020	0.266	1038	0.263		
986	0.260	1004	0.266	1022	0.265	1040	0.263		

**TABLA F.3**

**ABSORBANCIA(A) POR LONGITUD DE ONDA( $\lambda$ ) DE MPCM 56D AL 0.15 %vol.**

$\lambda$ (nm)	A								
450	0.306	504	0.306	558	0.309	612	0.312	666	0.318
452	0.305	506	0.307	560	0.309	614	0.313	668	0.318
454	0.306	508	0.307	562	0.309	616	0.313	670	0.319
456	0.306	510	0.307	564	0.310	618	0.313	672	0.319
458	0.306	512	0.307	566	0.310	620	0.314	674	0.319
460	0.306	514	0.306	568	0.310	622	0.315	676	0.320
462	0.307	516	0.307	570	0.310	624	0.315	678	0.320
464	0.307	518	0.306	572	0.311	626	0.316	680	0.321
466	0.306	520	0.307	574	0.311	628	0.316	682	0.320
468	0.306	522	0.307	576	0.311	630	0.316	684	0.320
470	0.306	524	0.307	578	0.310	632	0.317	686	0.319
472	0.306	526	0.307	580	0.310	634	0.316	688	0.320
474	0.306	528	0.306	582	0.311	636	0.316	690	0.320
476	0.305	530	0.305	584	0.311	638	0.316	692	0.320
478	0.305	532	0.305	586	0.311	640	0.315	694	0.321
480	0.304	534	0.305	588	0.311	642	0.314	696	0.321
482	0.304	536	0.305	590	0.311	644	0.314	698	0.321
484	0.305	538	0.306	592	0.311	646	0.314	700	0.322
486	0.306	540	0.307	594	0.311	648	0.314	702	0.322
488	0.307	542	0.307	596	0.312	650	0.314	704	0.322
490	0.307	544	0.307	598	0.311	652	0.314	706	0.325
492	0.307	546	0.309	600	0.312	654	0.315	708	0.326
494	0.308	548	0.309	602	0.312	656	0.315	710	0.326
496	0.307	550	0.310	604	0.314	658	0.316	712	0.326
498	0.307	552	0.309	606	0.312	660	0.317	714	0.325
500	0.308	554	0.309	608	0.313	662	0.317	716	0.325
502	0.307	556	0.310	610	0.312	664	0.317	718	0.325

720	0.325	788	0.333	856	0.341	924	0.342	992	0.349
722	0.325	790	0.332	858	0.341	926	0.343	994	0.350
724	0.327	792	0.335	860	0.342	928	0.343	996	0.352
726	0.327	794	0.338	862	0.341	930	0.342	998	0.353
728	0.327	796	0.336	864	0.341	932	0.342	1000	0.354
730	0.327	798	0.334	866	0.341	934	0.343	1002	0.355
732	0.327	800	0.335	868	0.342	936	0.338	1004	0.357
734	0.326	802	0.336	870	0.344	938	0.338	1006	0.357
736	0.326	804	0.336	872	0.344	940	0.338	1008	0.355
738	0.328	806	0.337	874	0.345	942	0.338	1010	0.355
740	0.327	808	0.336	876	0.345	944	0.338	1012	0.355
742	0.328	810	0.337	878	0.343	946	0.338	1014	0.353
744	0.329	812	0.337	880	0.344	948	0.337	1016	0.356
746	0.328	814	0.338	882	0.345	950	0.337	1018	0.357
748	0.329	816	0.338	884	0.344	952	0.336	1020	0.358
750	0.329	818	0.340	886	0.343	954	0.336	1022	0.356
752	0.329	820	0.338	888	0.343	956	0.338	1024	0.358
754	0.329	822	0.338	890	0.344	958	0.338	1026	0.358
756	0.328	824	0.336	892	0.344	960	0.336	1028	0.360
758	0.329	826	0.335	894	0.345	962	0.340	1030	0.360
760	0.329	828	0.337	896	0.347	964	0.340	1032	0.360
762	0.329	830	0.337	898	0.348	966	0.339	1034	0.363
764	0.330	832	0.336	900	0.346	968	0.342	1036	0.359
766	0.329	834	0.336	902	0.345	970	0.341	1038	0.361
768	0.330	836	0.336	904	0.345	972	0.341	1040	0.361
770	0.330	838	0.336	906	0.346	974	0.341	1042	0.359
772	0.334	840	0.337	908	0.342	976	0.341	1044	0.366
774	0.334	842	0.340	910	0.344	978	0.343	1046	0.355
776	0.335	844	0.338	912	0.344	980	0.342	1048	0.360
778	0.335	846	0.340	914	0.343	982	0.343	1050	0.360
780	0.335	848	0.340	916	0.343	984	0.345		
782	0.334	850	0.340	918	0.343	986	0.349		
784	0.335	852	0.341	920	0.344	988	0.353		
786	0.335	854	0.341	922	0.342	990	0.350		

**TABLA F.4**

**ABSORBANCIA(A) POR LONGITUD DE ONDA( $\lambda$ ) DE MPCM 56D AL 0.20 %vol.**

$\lambda$ (nm)	A								
450	0.497	526	0.495	602	0.484	678	0.489	754	0.499
452	0.498	528	0.494	604	0.485	680	0.488	756	0.499
454	0.498	530	0.493	606	0.483	682	0.489	758	0.500
456	0.497	532	0.492	608	0.483	684	0.488	760	0.501
458	0.496	534	0.492	610	0.481	686	0.488	762	0.501
460	0.496	536	0.492	612	0.481	688	0.489	764	0.502
462	0.497	538	0.493	614	0.481	690	0.489	766	0.501
464	0.498	540	0.492	616	0.480	692	0.489	768	0.502
466	0.498	542	0.489	618	0.479	694	0.490	770	0.500
468	0.499	544	0.488	620	0.477	696	0.490	772	0.503
470	0.499	546	0.489	622	0.477	698	0.490	774	0.502
472	0.498	548	0.489	624	0.477	700	0.488	776	0.502
474	0.498	550	0.489	626	0.477	702	0.487	778	0.502
476	0.498	552	0.490	628	0.477	704	0.488	780	0.503
478	0.498	554	0.489	630	0.478	706	0.491	782	0.504
480	0.498	556	0.489	632	0.479	708	0.492	784	0.505
482	0.497	558	0.488	634	0.478	710	0.493	786	0.505
484	0.498	560	0.487	636	0.479	712	0.494	788	0.505
486	0.496	562	0.487	638	0.480	714	0.494	790	0.502
488	0.496	564	0.487	640	0.480	716	0.495	792	0.507
490	0.495	566	0.488	642	0.482	718	0.495	794	0.506
492	0.495	568	0.488	644	0.482	720	0.495	796	0.506
494	0.494	570	0.488	646	0.481	722	0.495	798	0.505
496	0.494	572	0.487	648	0.482	724	0.496	800	0.504
498	0.493	574	0.486	650	0.483	726	0.496	802	0.506
500	0.493	576	0.485	652	0.484	728	0.498	804	0.505
502	0.494	578	0.484	654	0.484	730	0.497	806	0.505
504	0.495	580	0.483	656	0.485	732	0.497	808	0.504
506	0.495	582	0.483	658	0.487	734	0.496	810	0.505
508	0.496	584	0.484	660	0.488	736	0.498	812	0.506
510	0.495	586	0.484	662	0.488	738	0.497	814	0.508
512	0.494	588	0.483	664	0.489	740	0.499	816	0.510
514	0.495	590	0.483	666	0.489	742	0.498	818	0.513
516	0.495	592	0.484	668	0.490	744	0.499	820	0.508
518	0.494	594	0.484	670	0.491	746	0.500	822	0.508
520	0.494	596	0.484	672	0.491	748	0.499	824	0.508
522	0.496	598	0.484	674	0.491	750	0.499	826	0.512
524	0.496	600	0.483	676	0.491	752	0.499	828	0.512

830	0.516	876	0.523	922	0.523	968	0.528	1014	0.545
832	0.514	878	0.520	924	0.520	970	0.528	1016	0.548
834	0.514	880	0.521	926	0.524	972	0.530	1018	0.547
836	0.516	882	0.527	928	0.524	974	0.532	1020	0.547
838	0.517	884	0.524	930	0.523	976	0.533	1022	0.547
840	0.515	886	0.522	932	0.523	978	0.535	1024	0.545
842	0.519	888	0.525	934	0.525	980	0.533	1026	0.545
844	0.517	890	0.525	936	0.522	982	0.536	1028	0.545
846	0.519	892	0.524	938	0.520	984	0.539	1030	0.545
848	0.521	894	0.526	940	0.518	986	0.541	1032	0.546
850	0.521	896	0.526	942	0.519	988	0.545	1034	0.547
852	0.522	898	0.525	944	0.521	990	0.544	1036	0.545
854	0.521	900	0.526	946	0.522	992	0.541	1038	0.544
856	0.521	902	0.527	948	0.522	994	0.541	1040	0.542
858	0.523	904	0.527	950	0.524	996	0.544	1042	0.544
860	0.525	906	0.527	952	0.522	998	0.546	1044	0.542
862	0.525	908	0.524	954	0.521	1000	0.546	1046	0.544
864	0.525	910	0.525	956	0.525	1002	0.545	1048	0.544
866	0.523	912	0.525	958	0.522	1004	0.547	1050	0.547
868	0.523	914	0.527	960	0.522	1006	0.546		
870	0.523	916	0.527	962	0.524	1008	0.543		
872	0.524	918	0.524	964	0.524	1010	0.544		
874	0.521	920	0.523	966	0.523	1012	0.544		

**TABLA F.5**

**ABSORBANCIA(A) POR LONGITUD DE ONDA( $\lambda$ ) DE MPCM 56D AL 0.25 %vol.**

$\lambda$ (nm)	A								
450	0.522	476	0.526	502	0.525	528	0.527	554	0.527
452	0.522	478	0.525	504	0.525	530	0.525	556	0.526
454	0.523	480	0.526	506	0.525	532	0.527	558	0.526
456	0.525	482	0.527	508	0.526	534	0.529	560	0.526
458	0.525	484	0.525	510	0.526	536	0.530	562	0.527
460	0.524	486	0.525	512	0.525	538	0.531	564	0.527
462	0.524	488	0.524	514	0.526	540	0.531	566	0.526
464	0.525	490	0.522	516	0.527	542	0.529	568	0.525
466	0.526	492	0.521	518	0.526	544	0.527	570	0.526
468	0.526	494	0.522	520	0.527	546	0.527	572	0.526
470	0.527	496	0.524	522	0.527	548	0.527	574	0.526
472	0.527	498	0.523	524	0.528	550	0.528	576	0.526
474	0.527	500	0.525	526	0.529	552	0.528	578	0.524

---

580	0.522	666	0.527	752	0.546	838	0.571	924	0.579
582	0.523	668	0.527	754	0.548	840	0.571	926	0.580
584	0.522	670	0.526	756	0.549	842	0.567	928	0.578
586	0.522	672	0.526	758	0.551	844	0.573	930	0.575
588	0.522	674	0.526	760	0.551	846	0.574	932	0.575
590	0.522	676	0.526	762	0.553	848	0.576	934	0.577
592	0.523	678	0.527	764	0.555	850	0.574	936	0.569
594	0.522	680	0.529	766	0.554	852	0.574	938	0.570
596	0.521	682	0.527	768	0.555	854	0.573	940	0.571
598	0.519	684	0.527	770	0.553	856	0.573	942	0.571
600	0.518	686	0.526	772	0.559	858	0.573	944	0.571
602	0.518	688	0.528	774	0.560	860	0.573	946	0.572
604	0.519	690	0.529	776	0.559	862	0.572	948	0.573
606	0.519	692	0.528	778	0.563	864	0.571	950	0.573
608	0.521	694	0.528	780	0.563	866	0.571	952	0.572
610	0.521	696	0.528	782	0.564	868	0.574	954	0.572
612	0.522	698	0.529	784	0.561	870	0.575	956	0.575
614	0.521	700	0.530	786	0.561	872	0.576	958	0.573
616	0.521	702	0.531	788	0.560	874	0.575	960	0.572
618	0.522	704	0.531	790	0.559	876	0.573	962	0.576
620	0.521	706	0.534	792	0.562	878	0.572	964	0.575
622	0.521	708	0.534	794	0.561	880	0.570	966	0.574
624	0.523	710	0.535	796	0.558	882	0.570	968	0.578
626	0.524	712	0.536	798	0.558	884	0.572	970	0.574
628	0.524	714	0.538	800	0.562	886	0.574	972	0.572
630	0.524	716	0.538	802	0.563	888	0.574	974	0.572
632	0.523	718	0.537	804	0.563	890	0.575	976	0.570
634	0.522	720	0.538	806	0.564	892	0.574	978	0.569
636	0.521	722	0.538	808	0.565	894	0.573	980	0.569
638	0.522	724	0.536	810	0.565	896	0.574	982	0.572
640	0.523	726	0.537	812	0.566	898	0.576	984	0.572
642	0.524	728	0.536	814	0.565	900	0.574	986	0.571
644	0.525	730	0.535	816	0.566	902	0.572	988	0.571
646	0.525	732	0.536	818	0.568	904	0.573	990	0.566
648	0.524	734	0.537	820	0.564	906	0.577	992	0.566
650	0.524	736	0.539	822	0.564	908	0.575	994	0.569
652	0.525	738	0.542	824	0.566	910	0.576	996	0.568
654	0.526	740	0.544	826	0.567	912	0.573	998	0.565
656	0.527	742	0.546	828	0.568	914	0.575	1000	0.563
658	0.526	744	0.546	830	0.570	916	0.573	1002	0.564
660	0.525	746	0.546	832	0.569	918	0.577	1004	0.567
662	0.526	748	0.548	834	0.568	920	0.578	1006	0.562
664	0.526	750	0.546	836	0.570	922	0.577	1008	0.561

---

1010	0.560	1020	0.560	1030	0.560	1040	0.560	1050	0.570
1012	0.562	1022	0.560	1032	0.558	1042	0.564		
1014	0.562	1024	0.560	1034	0.559	1044	0.573		
1016	0.563	1026	0.559	1036	0.561	1046	0.560		
1018	0.560	1028	0.560	1038	0.561	1048	0.565		

**TABLA F.6**

**ABSORBANCIA(A) POR LONGITUD DE ONDA( $\lambda$ ) DE MPCM 56D AL 0.35 %vol.**

$\lambda$ (nm)	A								
450	0.745	512	0.747	574	0.755	636	0.765	698	0.784
452	0.744	514	0.747	576	0.754	638	0.766	700	0.784
454	0.744	516	0.747	578	0.753	640	0.767	702	0.785
456	0.744	518	0.747	580	0.753	642	0.767	704	0.786
458	0.744	520	0.748	582	0.755	644	0.767	706	0.790
460	0.745	522	0.748	584	0.756	646	0.767	708	0.790
462	0.745	524	0.749	586	0.756	648	0.767	710	0.791
464	0.745	526	0.749	588	0.757	650	0.768	712	0.791
466	0.745	528	0.751	590	0.756	652	0.770	714	0.791
468	0.745	530	0.752	592	0.755	654	0.772	716	0.790
470	0.745	532	0.752	594	0.756	656	0.775	718	0.789
472	0.745	534	0.752	596	0.757	658	0.777	720	0.790
474	0.745	536	0.752	598	0.758	660	0.777	722	0.791
476	0.745	538	0.752	600	0.759	662	0.777	724	0.792
478	0.745	540	0.754	602	0.758	664	0.776	726	0.793
480	0.745	542	0.754	604	0.759	666	0.776	728	0.792
482	0.745	544	0.754	606	0.760	668	0.776	730	0.790
484	0.746	546	0.754	608	0.759	670	0.777	732	0.792
486	0.746	548	0.753	610	0.760	672	0.775	734	0.793
488	0.746	550	0.754	612	0.760	674	0.777	736	0.793
490	0.746	552	0.753	614	0.760	676	0.778	738	0.792
492	0.747	554	0.753	616	0.760	678	0.778	740	0.793
494	0.747	556	0.754	618	0.760	680	0.780	742	0.794
496	0.747	558	0.754	620	0.760	682	0.779	744	0.794
498	0.748	560	0.752	622	0.760	684	0.778	746	0.795
500	0.749	562	0.753	624	0.760	686	0.778	748	0.796
502	0.748	564	0.754	626	0.762	688	0.778	750	0.797
504	0.749	566	0.755	628	0.764	690	0.778	752	0.797
506	0.749	568	0.755	630	0.764	692	0.779	754	0.798
508	0.748	570	0.756	632	0.765	694	0.782	756	0.800
510	0.748	572	0.755	634	0.765	696	0.782	758	0.800

760	0.800	820	0.807	880	0.822	940	0.831	1000	0.842
762	0.800	822	0.807	882	0.821	942	0.833	1002	0.840
764	0.801	824	0.806	884	0.824	944	0.832	1004	0.843
766	0.799	826	0.807	886	0.824	946	0.832	1006	0.848
768	0.798	828	0.808	888	0.823	948	0.830	1008	0.852
770	0.798	830	0.812	890	0.822	950	0.827	1010	0.852
772	0.802	832	0.812	892	0.821	952	0.830	1012	0.854
774	0.804	834	0.814	894	0.823	954	0.833	1014	0.856
776	0.805	836	0.813	896	0.828	956	0.834	1016	0.858
778	0.805	838	0.813	898	0.829	958	0.834	1018	0.860
780	0.806	840	0.813	900	0.826	960	0.834	1020	0.862
782	0.806	842	0.817	902	0.825	962	0.838	1022	0.863
784	0.806	844	0.817	904	0.825	964	0.836	1024	0.864
786	0.805	846	0.818	906	0.829	966	0.832	1026	0.866
788	0.805	848	0.819	908	0.831	968	0.834	1028	0.867
790	0.801	850	0.820	910	0.830	970	0.834	1030	0.869
792	0.805	852	0.821	912	0.829	972	0.834	1032	0.870
794	0.804	854	0.823	914	0.830	974	0.833	1034	0.870
796	0.806	856	0.824	916	0.829	976	0.831	1036	0.869
798	0.804	858	0.824	918	0.833	978	0.828	1038	0.869
800	0.805	860	0.824	920	0.835	980	0.831	1040	0.871
802	0.803	862	0.824	922	0.834	982	0.838	1042	0.871
804	0.802	864	0.825	924	0.835	984	0.835	1044	0.881
806	0.802	866	0.821	926	0.837	986	0.839	1046	0.873
808	0.803	868	0.820	928	0.838	988	0.840	1048	0.872
810	0.805	870	0.820	930	0.837	990	0.839	1050	0.873
812	0.806	872	0.823	932	0.835	992	0.836		
814	0.806	874	0.826	934	0.838	994	0.838		
816	0.806	876	0.825	936	0.830	996	0.836		
818	0.812	878	0.824	938	0.830	998	0.839		

**TABLA F.7**

**ABSORBANCIA(A) POR LONGITUD DE ONDA( $\lambda$ ) DE MPCM 56D AL 0.40 %vol.**

$\lambda$ (nm)	A								
450	0.826	462	0.827	474	0.831	486	0.838	498	0.834
452	0.826	464	0.827	476	0.830	488	0.838	500	0.835
454	0.827	466	0.828	478	0.832	490	0.836	502	0.836
456	0.828	468	0.823	480	0.833	492	0.836	504	0.837
458	0.828	470	0.831	482	0.834	494	0.837	506	0.838
460	0.827	472	0.831	484	0.836	496	0.834	508	0.838

---

510	0.837	596	0.830	682	0.844	768	0.881	854	0.899
512	0.837	598	0.830	684	0.846	770	0.881	856	0.897
514	0.837	600	0.832	686	0.847	772	0.888	858	0.896
516	0.837	602	0.832	688	0.849	774	0.889	860	0.894
518	0.836	604	0.833	690	0.849	776	0.889	862	0.891
520	0.837	606	0.831	692	0.849	778	0.892	864	0.890
522	0.835	608	0.830	694	0.849	780	0.891	866	0.890
524	0.835	610	0.830	696	0.848	782	0.891	868	0.889
526	0.837	612	0.831	698	0.849	784	0.890	870	0.888
528	0.840	614	0.830	700	0.849	786	0.893	872	0.890
530	0.841	616	0.832	702	0.850	788	0.892	874	0.892
532	0.838	618	0.832	704	0.849	790	0.890	876	0.892
534	0.838	620	0.832	706	0.853	792	0.892	878	0.890
536	0.837	622	0.833	708	0.855	794	0.890	880	0.893
538	0.835	624	0.833	710	0.854	796	0.889	882	0.891
540	0.835	626	0.835	712	0.856	798	0.887	884	0.889
542	0.836	628	0.834	714	0.856	800	0.893	886	0.891
544	0.835	630	0.834	716	0.857	802	0.889	888	0.892
546	0.836	632	0.836	718	0.857	804	0.890	890	0.892
548	0.833	634	0.838	720	0.858	806	0.891	892	0.893
550	0.832	636	0.838	722	0.859	808	0.894	894	0.895
552	0.832	638	0.838	724	0.858	810	0.896	896	0.894
554	0.834	640	0.837	726	0.859	812	0.899	898	0.892
556	0.833	642	0.837	728	0.861	814	0.899	900	0.891
558	0.832	644	0.837	730	0.862	816	0.900	902	0.893
560	0.832	646	0.837	732	0.863	818	0.903	904	0.894
562	0.830	648	0.838	734	0.864	820	0.899	906	0.896
564	0.831	650	0.838	736	0.864	822	0.901	908	0.895
566	0.833	652	0.839	738	0.866	824	0.899	910	0.894
568	0.832	654	0.839	740	0.867	826	0.898	912	0.890
570	0.831	656	0.839	742	0.868	828	0.898	914	0.896
572	0.830	658	0.840	744	0.871	830	0.895	916	0.895
574	0.831	660	0.840	746	0.871	832	0.897	918	0.897
576	0.834	662	0.839	748	0.872	834	0.897	920	0.898
578	0.832	664	0.840	750	0.871	836	0.893	922	0.897
580	0.831	666	0.841	752	0.870	838	0.890	924	0.900
582	0.835	668	0.842	754	0.871	840	0.892	926	0.902
584	0.835	670	0.843	756	0.872	842	0.894	928	0.902
586	0.835	672	0.843	758	0.875	844	0.891	930	0.904
588	0.834	674	0.843	760	0.875	846	0.892	932	0.907
590	0.834	676	0.843	762	0.875	848	0.895	934	0.911
592	0.831	678	0.844	764	0.880	850	0.897	936	0.905
594	0.831	680	0.845	766	0.880	852	0.898	938	0.907

---

940	0.908	964	0.910	988	0.906	1012	0.930	1036	0.946
942	0.913	966	0.905	990	0.907	1014	0.931	1038	0.944
944	0.913	968	0.904	992	0.905	1016	0.936	1040	0.943
946	0.913	970	0.902	994	0.912	1018	0.941	1042	0.940
948	0.914	972	0.903	996	0.911	1020	0.940	1044	0.928
950	0.914	974	0.903	998	0.912	1022	0.939	1046	0.928
952	0.916	976	0.902	1000	0.913	1024	0.940	1048	0.930
954	0.916	978	0.900	1002	0.917	1026	0.937	1050	0.925
956	0.917	980	0.901	1004	0.925	1028	0.938		
958	0.914	982	0.906	1006	0.926	1030	0.942		
960	0.910	984	0.903	1008	0.928	1032	0.941		
962	0.912	986	0.904	1010	0.928	1034	0.943		

**TABLA F.8**

**ABSORBANCIA(A) POR LONGITUD DE ONDA( $\lambda$ ) DE MPCM 56D AL 0.50 %vol.**

$\lambda$ (nm)	A								
450	1.054	498	1.033	546	1.043	594	1.045	642	1.064
452	1.053	500	1.035	548	1.043	596	1.045	644	1.064
454	1.052	502	1.034	550	1.046	598	1.045	646	1.064
456	1.050	504	1.034	552	1.048	600	1.045	648	1.065
458	1.048	506	1.033	554	1.049	602	1.047	650	1.066
460	1.046	508	1.032	556	1.046	604	1.049	652	1.067
462	1.046	510	1.029	558	1.045	606	1.048	654	1.068
464	1.046	512	1.028	560	1.045	608	1.048	656	1.069
466	1.047	514	1.029	562	1.044	610	1.048	658	1.070
468	1.046	516	1.030	564	1.043	612	1.049	660	1.072
470	1.044	518	1.031	566	1.041	614	1.049	662	1.072
472	1.041	520	1.036	568	1.040	616	1.051	664	1.075
474	1.040	522	1.038	570	1.040	618	1.052	666	1.074
476	1.039	524	1.039	572	1.039	620	1.055	668	1.075
478	1.038	526	1.039	574	1.041	622	1.056	670	1.076
480	1.036	528	1.039	576	1.043	624	1.056	672	1.075
482	1.035	530	1.039	578	1.042	626	1.057	674	1.075
484	1.035	532	1.039	580	1.042	628	1.057	676	1.075
486	1.035	534	1.040	582	1.042	630	1.056	678	1.075
488	1.034	536	1.041	584	1.043	632	1.057	680	1.078
490	1.032	538	1.040	586	1.043	634	1.058	682	1.079
492	1.031	540	1.041	588	1.042	636	1.060	684	1.079
494	1.032	542	1.041	590	1.043	638	1.061	686	1.079
496	1.031	544	1.041	592	1.044	640	1.063	688	1.081

---

690	1.083	764	1.100	838	1.140	912	1.152	986	1.185
692	1.085	766	1.098	840	1.141	914	1.160	988	1.184
694	1.085	768	1.100	842	1.144	916	1.159	990	1.183
696	1.086	770	1.098	844	1.146	918	1.160	992	1.181
698	1.085	772	1.103	846	1.149	920	1.159	994	1.179
700	1.084	774	1.103	848	1.150	922	1.159	996	1.176
702	1.084	776	1.104	850	1.150	924	1.159	998	1.176
704	1.085	778	1.107	852	1.150	926	1.160	1000	1.177
706	1.089	780	1.107	854	1.150	928	1.161	1002	1.178
708	1.088	782	1.108	856	1.149	930	1.161	1004	1.183
710	1.087	784	1.108	858	1.146	932	1.161	1006	1.181
712	1.087	786	1.109	860	1.148	934	1.165	1008	1.181
714	1.088	788	1.110	862	1.150	936	1.161	1010	1.184
716	1.088	790	1.108	864	1.150	938	1.161	1012	1.187
718	1.086	792	1.112	866	1.151	940	1.158	1014	1.188
720	1.087	794	1.110	868	1.151	942	1.161	1016	1.192
722	1.088	796	1.109	870	1.152	944	1.162	1018	1.191
724	1.087	798	1.109	872	1.150	946	1.163	1020	1.190
726	1.089	800	1.115	874	1.147	948	1.166	1022	1.188
728	1.088	802	1.113	876	1.147	950	1.168	1024	1.191
730	1.087	804	1.114	878	1.146	952	1.170	1026	1.192
732	1.088	806	1.117	880	1.149	954	1.172	1028	1.196
734	1.088	808	1.119	882	1.149	956	1.175	1030	1.199
736	1.089	810	1.120	884	1.149	958	1.172	1032	1.197
738	1.093	812	1.124	886	1.147	960	1.171	1034	1.201
740	1.094	814	1.125	888	1.147	962	1.179	1036	1.209
742	1.093	816	1.124	890	1.149	964	1.179	1038	1.214
744	1.093	818	1.126	892	1.150	966	1.177	1040	1.214
746	1.092	820	1.126	894	1.152	968	1.182	1042	1.213
748	1.094	822	1.129	896	1.152	970	1.180	1044	1.220
750	1.096	824	1.128	898	1.154	972	1.182	1046	1.221
752	1.097	826	1.131	900	1.152	974	1.182	1048	1.228
754	1.098	828	1.133	902	1.155	976	1.181	1050	1.227
756	1.097	830	1.132	904	1.154	978	1.179		
758	1.098	832	1.135	906	1.155	980	1.177		
760	1.097	834	1.137	908	1.155	982	1.176		
762	1.099	836	1.138	910	1.157	984	1.180		

---

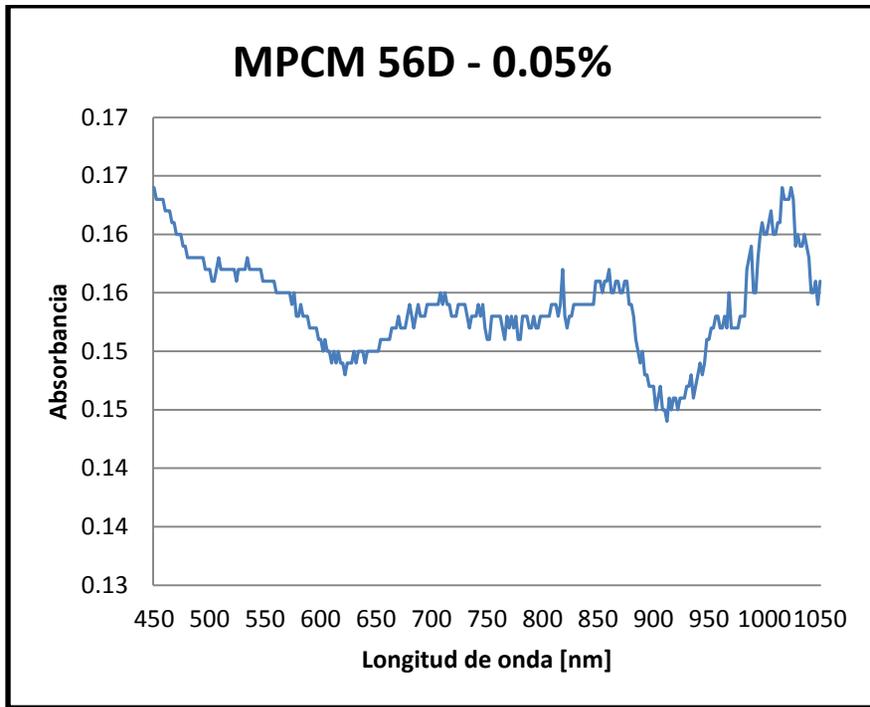


FIGURA F.1 MPCM 56D AL 0.05 %vol

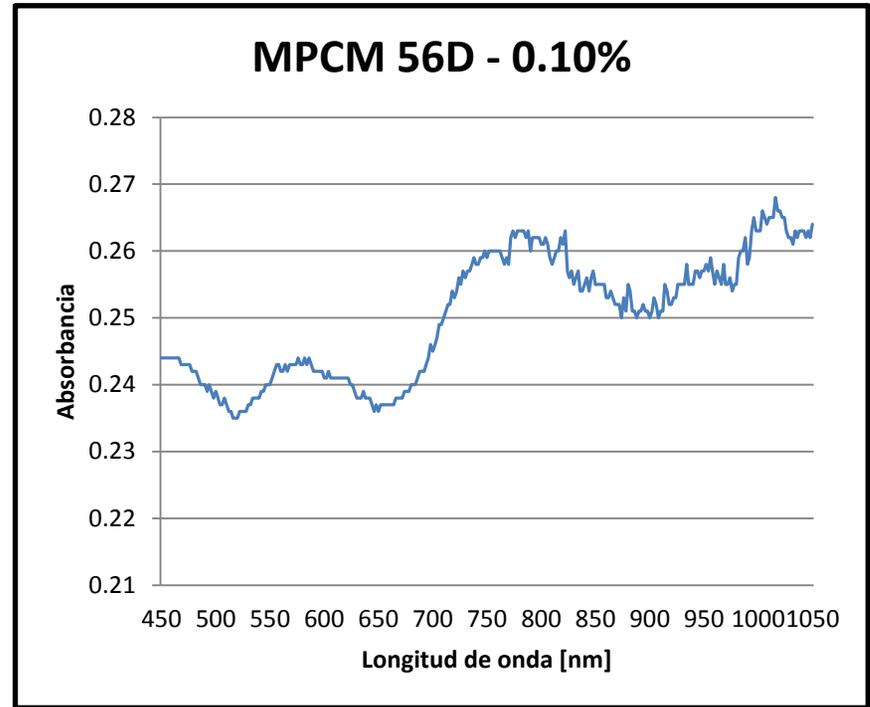
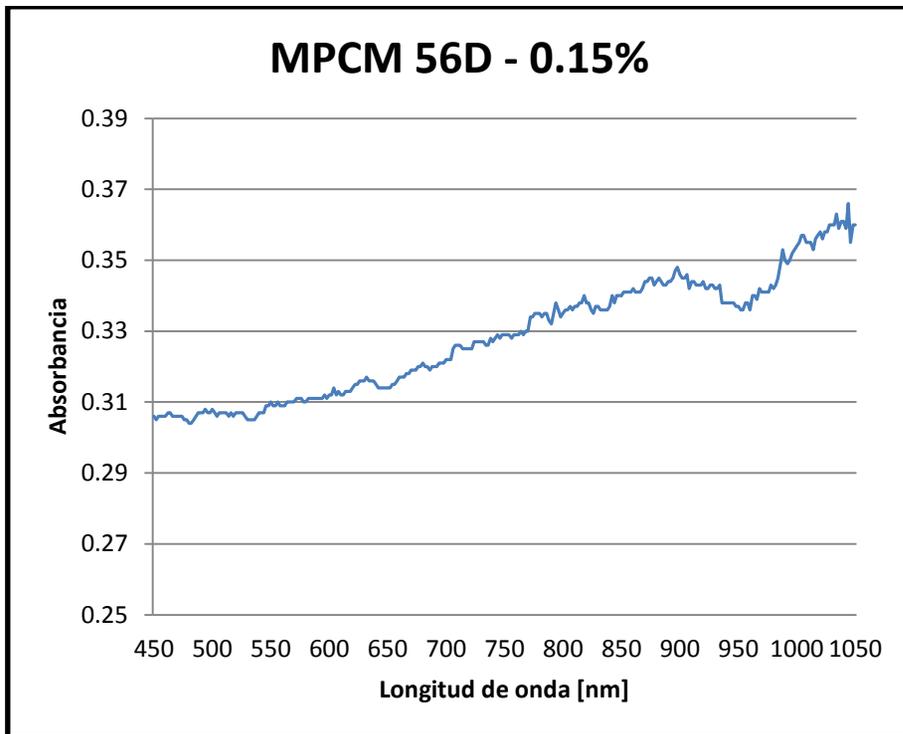
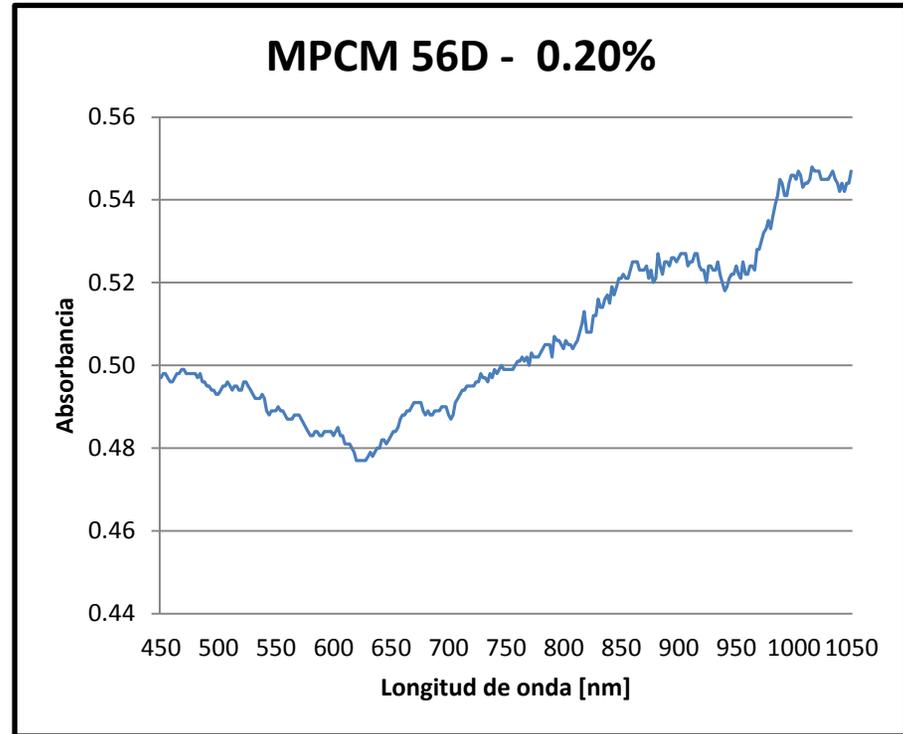


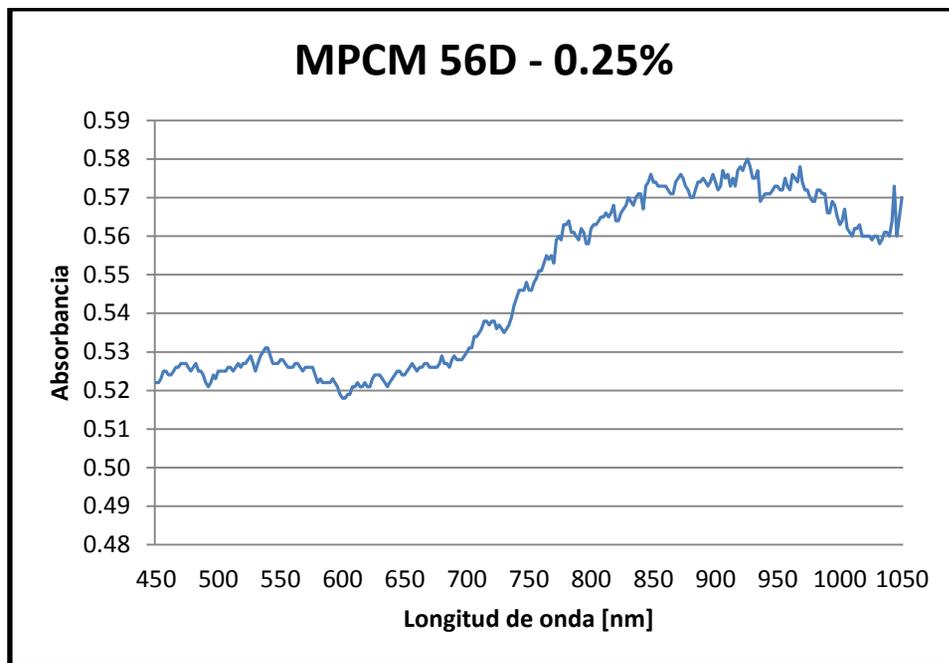
FIGURA F.2 MPCM 56D AL 0.10 %vol



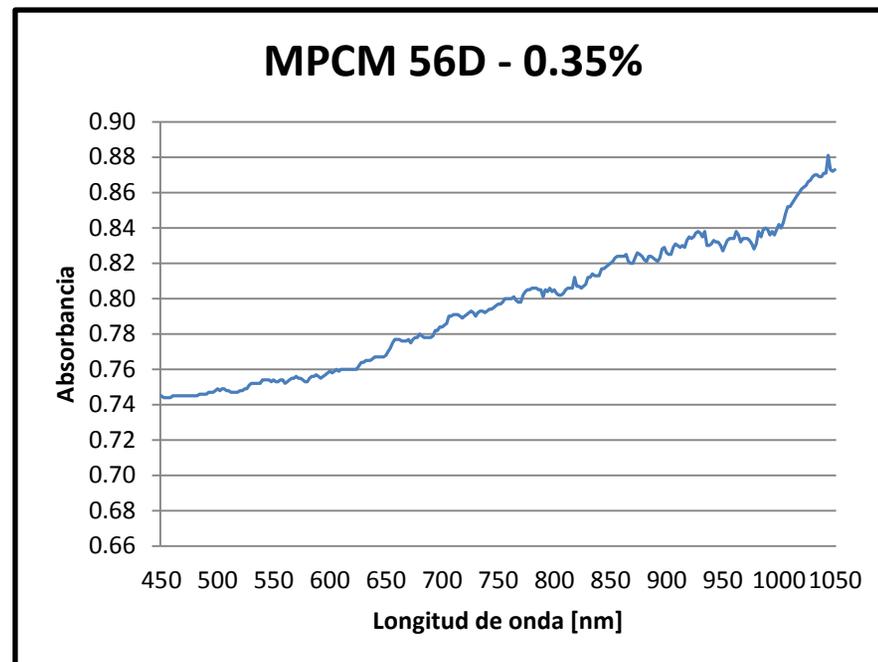
**FIGURA F.3 MPCM 56D AL 0.15 %vol**



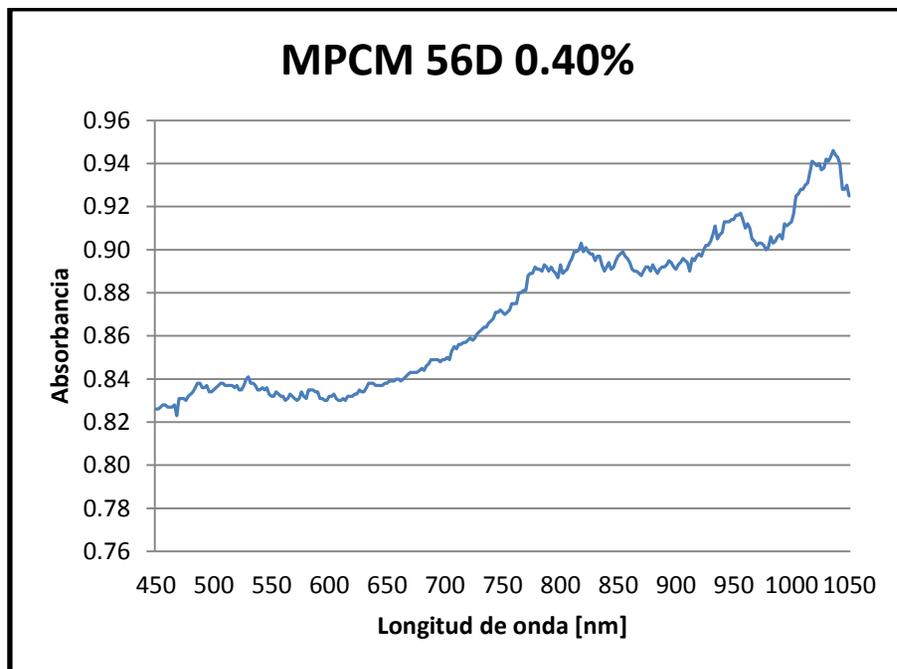
**FIGURA F.4 MPCM 56D AL 0.20 %vol**



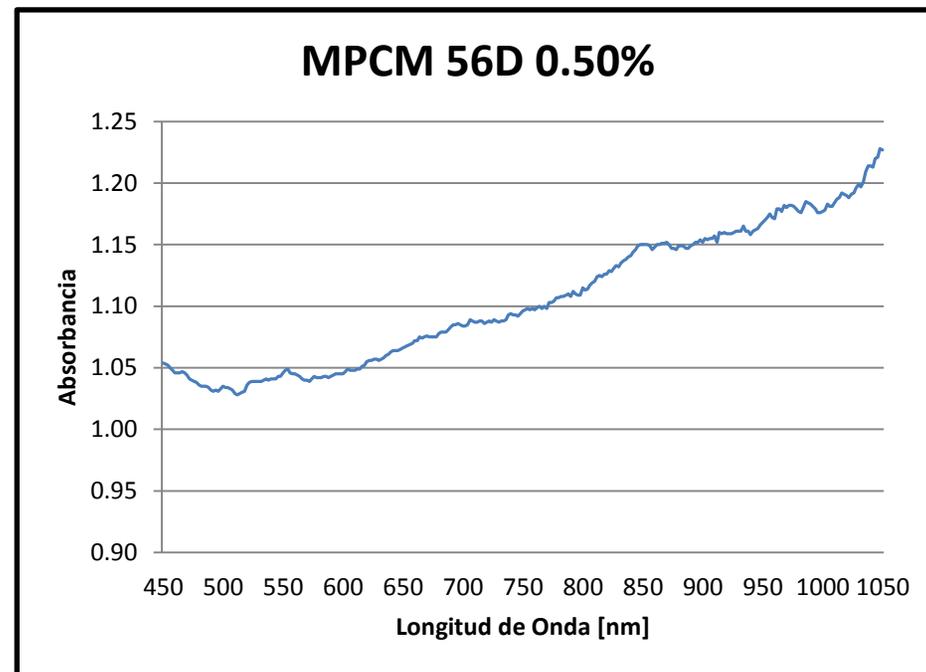
**FIGURA F.5 MPCM 56D AL 0.25%**



**FIGURA F.6 MPCM 56D AL 0.35%**



**FIGURA F.7 MPCM 56D AL 0.40%**



**FIGURA F.8 MPCM 56D AL 0.50%**

**TABLA F.9**

**ABSORBANCIA(A) POR LONGITUD DE ONDA( $\lambda$ ) DE MPCM 37 AL 0.05 %vol.**

$\lambda$ (nm)	A								
450	0.167	526	0.168	602	0.168	678	0.171	754	0.176
452	0.167	528	0.168	604	0.169	680	0.172	756	0.175
454	0.167	530	0.167	606	0.169	682	0.171	758	0.176
456	0.168	532	0.168	608	0.168	684	0.171	760	0.177
458	0.168	534	0.168	610	0.169	686	0.172	762	0.177
460	0.168	536	0.168	612	0.168	688	0.172	764	0.176
462	0.167	538	0.168	614	0.169	690	0.172	766	0.176
464	0.168	540	0.169	616	0.169	692	0.171	768	0.177
466	0.168	542	0.168	618	0.169	694	0.173	770	0.176
468	0.167	544	0.167	620	0.170	696	0.172	772	0.178
470	0.167	546	0.168	622	0.168	698	0.173	774	0.178
472	0.168	548	0.167	624	0.169	700	0.173	776	0.178
474	0.168	550	0.167	626	0.170	702	0.173	778	0.177
476	0.168	552	0.168	628	0.170	704	0.173	780	0.179
478	0.168	554	0.167	630	0.169	706	0.174	782	0.179
480	0.168	556	0.168	632	0.170	708	0.174	784	0.178
482	0.168	558	0.167	634	0.169	710	0.175	786	0.179
484	0.168	560	0.167	636	0.169	712	0.174	788	0.180
486	0.168	562	0.167	638	0.170	714	0.175	790	0.181
488	0.168	564	0.168	640	0.169	716	0.175	792	0.181
490	0.168	566	0.168	642	0.170	718	0.175	794	0.180
492	0.168	568	0.168	644	0.170	720	0.174	796	0.181
494	0.167	570	0.168	646	0.170	722	0.174	798	0.178
496	0.168	572	0.168	648	0.170	724	0.175	800	0.180
498	0.168	574	0.168	650	0.170	726	0.175	802	0.179
500	0.168	576	0.169	652	0.170	728	0.175	804	0.180
502	0.168	578	0.168	654	0.170	730	0.175	806	0.180
504	0.168	580	0.168	656	0.170	732	0.175	808	0.180
506	0.168	582	0.169	658	0.171	734	0.175	810	0.180
508	0.169	584	0.169	660	0.170	736	0.175	812	0.180
510	0.168	586	0.169	662	0.170	738	0.175	814	0.181
512	0.168	588	0.168	664	0.171	740	0.176	816	0.181
514	0.168	590	0.169	666	0.171	742	0.176	818	0.183
516	0.168	592	0.169	668	0.171	744	0.176	820	0.180
518	0.167	594	0.168	670	0.172	746	0.175	822	0.180
520	0.167	596	0.170	672	0.171	748	0.176	824	0.181
522	0.168	598	0.168	674	0.171	750	0.176	826	0.181
524	0.168	600	0.169	676	0.171	752	0.175	828	0.181

830	0.183	876	0.180	922	0.177	968	0.196	1014	0.180
832	0.182	878	0.178	924	0.177	970	0.194	1016	0.182
834	0.182	880	0.178	926	0.178	972	0.194	1018	0.182
836	0.182	882	0.178	928	0.177	974	0.194	1020	0.180
838	0.184	884	0.179	930	0.178	976	0.191	1022	0.180
840	0.183	886	0.179	932	0.178	978	0.192	1024	0.180
842	0.183	888	0.178	934	0.180	980	0.191	1026	0.180
844	0.185	890	0.179	936	0.178	982	0.192	1028	0.180
846	0.185	892	0.179	938	0.177	984	0.190	1030	0.182
848	0.185	894	0.178	940	0.178	986	0.191	1032	0.181
850	0.185	896	0.179	942	0.180	988	0.190	1034	0.182
852	0.184	898	0.180	944	0.181	990	0.187	1036	0.182
854	0.185	900	0.179	946	0.182	992	0.184	1038	0.183
856	0.183	902	0.179	948	0.182	994	0.184	1040	0.183
858	0.183	904	0.179	950	0.184	996	0.182	1042	0.187
860	0.183	906	0.180	952	0.186	998	0.183	1044	0.183
862	0.183	908	0.179	954	0.189	1000	0.181	1046	0.182
864	0.181	910	0.178	956	0.190	1002	0.179	1048	0.180
866	0.180	912	0.177	958	0.191	1004	0.182	1050	0.184
868	0.179	914	0.179	960	0.191	1006	0.181		
870	0.180	916	0.178	962	0.191	1008	0.180		
872	0.180	918	0.177	964	0.193	1010	0.182		
874	0.180	920	0.178	966	0.194	1012	0.180		

**TABLA F.10**

**ABSORBANCIA(A) POR LONGITUD DE ONDA( $\lambda$ ) DE MPCM 37 AL 0.10 %vol.**

$\lambda$ (nm)	A								
450	0.372	476	0.371	502	0.369	528	0.367	554	0.367
452	0.373	478	0.371	504	0.369	530	0.366	556	0.366
454	0.373	480	0.371	506	0.369	532	0.367	558	0.365
456	0.373	482	0.371	508	0.370	534	0.367	560	0.366
458	0.373	484	0.371	510	0.369	536	0.366	562	0.365
460	0.373	486	0.370	512	0.368	538	0.367	564	0.365
462	0.372	488	0.371	514	0.368	540	0.366	566	0.366
464	0.373	490	0.370	516	0.369	542	0.366	568	0.365
466	0.372	492	0.370	518	0.367	544	0.365	570	0.365
468	0.372	494	0.370	520	0.368	546	0.366	572	0.364
470	0.372	496	0.370	522	0.368	548	0.365	574	0.365
472	0.371	498	0.369	524	0.367	550	0.365	576	0.366
474	0.371	500	0.370	526	0.367	552	0.366	578	0.365

---

580	0.366	666	0.366	752	0.375	838	0.383	924	0.391
582	0.366	668	0.365	754	0.376	840	0.384	926	0.391
584	0.366	670	0.365	756	0.375	842	0.387	928	0.391
586	0.365	672	0.365	758	0.377	844	0.386	930	0.391
588	0.365	674	0.365	760	0.376	846	0.388	932	0.391
590	0.365	676	0.366	762	0.376	848	0.389	934	0.393
592	0.364	678	0.366	764	0.377	850	0.388	936	0.389
594	0.364	680	0.368	766	0.376	852	0.388	938	0.389
596	0.364	682	0.367	768	0.377	854	0.388	940	0.388
598	0.364	684	0.367	770	0.375	856	0.388	942	0.389
600	0.364	686	0.367	772	0.380	858	0.388	944	0.389
602	0.364	688	0.368	774	0.379	860	0.388	946	0.389
604	0.365	690	0.369	776	0.379	862	0.388	948	0.389
606	0.364	692	0.368	778	0.380	864	0.387	950	0.390
608	0.363	694	0.369	780	0.380	866	0.388	952	0.389
610	0.363	696	0.370	782	0.382	868	0.388	954	0.389
612	0.364	698	0.370	784	0.381	870	0.388	956	0.390
614	0.363	700	0.371	786	0.381	872	0.389	958	0.389
616	0.363	702	0.371	788	0.380	874	0.389	960	0.388
618	0.363	704	0.371	790	0.377	876	0.388	962	0.392
620	0.362	706	0.373	792	0.380	878	0.387	964	0.391
622	0.362	708	0.373	794	0.378	880	0.388	966	0.391
624	0.362	710	0.373	796	0.377	882	0.387	968	0.393
626	0.362	712	0.374	798	0.377	884	0.385	970	0.391
628	0.362	714	0.374	800	0.381	886	0.387	972	0.392
630	0.362	716	0.375	802	0.380	888	0.388	974	0.392
632	0.362	718	0.375	804	0.380	890	0.388	976	0.391
634	0.362	720	0.375	806	0.380	892	0.388	978	0.391
636	0.363	722	0.375	808	0.380	894	0.389	980	0.390
638	0.363	724	0.374	810	0.380	896	0.388	982	0.392
640	0.363	726	0.374	812	0.381	898	0.389	984	0.393
642	0.364	728	0.375	814	0.382	900	0.389	986	0.395
644	0.364	730	0.374	816	0.382	902	0.388	988	0.396
646	0.363	732	0.375	818	0.383	904	0.389	990	0.393
648	0.364	734	0.374	820	0.380	906	0.388	992	0.392
650	0.364	736	0.375	822	0.381	908	0.387	994	0.394
652	0.364	738	0.375	824	0.381	910	0.388	996	0.393
654	0.365	740	0.376	826	0.380	912	0.386	998	0.395
656	0.364	742	0.376	828	0.381	914	0.390	1000	0.395
658	0.364	744	0.376	830	0.381	916	0.389	1002	0.395
660	0.365	746	0.375	832	0.382	918	0.389	1004	0.397
662	0.365	748	0.376	834	0.382	920	0.389	1006	0.397
664	0.366	750	0.375	836	0.383	922	0.389	1008	0.396

---

1010	0.398	1020	0.404	1030	0.402	1040	0.398	1050	0.396
1012	0.398	1022	0.405	1032	0.404	1042	0.400		
1014	0.399	1024	0.404	1034	0.404	1044	0.405		
1016	0.402	1026	0.404	1036	0.403	1046	0.394		
1018	0.404	1028	0.403	1038	0.398	1048	0.398		

**TABLA F.11**

**ABSORBANCIA(A) POR LONGITUD DE ONDA( $\lambda$ ) DE MPCM 37 AL 0.15 %vol.**

$\lambda$ (nm)	A								
450	0.492	512	0.499	574	0.510	636	0.519	698	0.526
452	0.493	514	0.499	576	0.512	638	0.520	700	0.526
454	0.493	516	0.500	578	0.511	640	0.519	702	0.527
456	0.493	518	0.500	580	0.511	642	0.521	704	0.526
458	0.492	520	0.500	582	0.512	644	0.520	706	0.529
460	0.492	522	0.501	584	0.513	646	0.521	708	0.529
462	0.492	524	0.501	586	0.513	648	0.521	710	0.530
464	0.493	526	0.501	588	0.513	650	0.521	712	0.530
466	0.492	528	0.502	590	0.514	652	0.522	714	0.530
468	0.493	530	0.502	592	0.514	654	0.522	716	0.529
470	0.493	532	0.502	594	0.515	656	0.522	718	0.529
472	0.493	534	0.503	596	0.516	658	0.523	720	0.528
474	0.494	536	0.503	598	0.515	660	0.522	722	0.529
476	0.493	538	0.503	600	0.515	662	0.523	724	0.530
478	0.494	540	0.504	602	0.516	664	0.523	726	0.530
480	0.493	542	0.505	604	0.516	666	0.523	728	0.530
482	0.493	544	0.505	606	0.518	668	0.524	730	0.529
484	0.494	546	0.506	608	0.518	670	0.524	732	0.529
486	0.494	548	0.506	610	0.517	672	0.522	734	0.529
488	0.494	550	0.506	612	0.517	674	0.523	736	0.529
490	0.495	552	0.506	614	0.517	676	0.522	738	0.530
492	0.496	554	0.507	616	0.516	678	0.523	740	0.530
494	0.496	556	0.508	618	0.517	680	0.524	742	0.531
496	0.496	558	0.508	620	0.518	682	0.523	744	0.531
498	0.496	560	0.508	622	0.517	684	0.523	746	0.531
500	0.498	562	0.509	624	0.517	686	0.524	748	0.532
502	0.497	564	0.509	626	0.519	688	0.524	750	0.531
504	0.497	566	0.510	628	0.519	690	0.524	752	0.532
506	0.498	568	0.510	630	0.519	692	0.525	754	0.531
508	0.499	570	0.510	632	0.519	694	0.526	756	0.531
510	0.498	572	0.510	634	0.519	696	0.526	758	0.531

760	0.530	820	0.534	880	0.543	940	0.545	1000	0.552
762	0.531	822	0.534	882	0.544	942	0.546	1002	0.550
764	0.531	824	0.534	884	0.543	944	0.545	1004	0.550
766	0.531	826	0.535	886	0.544	946	0.545	1006	0.553
768	0.530	828	0.534	888	0.544	948	0.545	1008	0.553
770	0.531	830	0.536	890	0.544	950	0.546	1010	0.551
772	0.534	832	0.535	892	0.542	952	0.546	1012	0.551
774	0.535	834	0.535	894	0.544	954	0.547	1014	0.552
776	0.534	836	0.538	896	0.543	956	0.548	1016	0.553
778	0.534	838	0.539	898	0.543	958	0.548	1018	0.554
780	0.533	840	0.539	900	0.542	960	0.547	1020	0.554
782	0.533	842	0.543	902	0.541	962	0.552	1022	0.553
784	0.534	844	0.544	904	0.540	964	0.550	1024	0.554
786	0.533	846	0.545	906	0.541	966	0.548	1026	0.551
788	0.534	848	0.545	908	0.539	968	0.552	1028	0.553
790	0.530	850	0.546	910	0.538	970	0.551	1030	0.552
792	0.535	852	0.545	912	0.538	972	0.550	1032	0.553
794	0.534	854	0.545	914	0.541	974	0.550	1034	0.552
796	0.534	856	0.546	916	0.541	976	0.549	1036	0.551
798	0.532	858	0.547	918	0.542	978	0.549	1038	0.551
800	0.536	860	0.548	920	0.542	980	0.549	1040	0.551
802	0.534	862	0.546	922	0.542	982	0.549	1042	0.551
804	0.535	864	0.547	924	0.542	984	0.551	1044	0.557
806	0.535	866	0.547	926	0.544	986	0.554	1046	0.550
808	0.537	868	0.546	928	0.544	988	0.555	1048	0.550
810	0.536	870	0.546	930	0.544	990	0.550	1050	0.552
812	0.535	872	0.545	932	0.545	992	0.549		
814	0.536	874	0.547	934	0.547	994	0.549		
816	0.536	876	0.546	936	0.543	996	0.548		
818	0.538	878	0.543	938	0.543	998	0.551		

**TABLA F.12**

**ABSORBANCIA(A) POR LONGITUD DE ONDA( $\lambda$ ) DE MPCM 37 AL 0.20 %vol.**

$\lambda$ (nm)	A								
450	0.662	462	0.657	474	0.656	486	0.658	498	0.660
452	0.662	464	0.657	476	0.657	488	0.659	500	0.661
454	0.661	466	0.658	478	0.657	490	0.660	502	0.661
456	0.659	468	0.658	480	0.658	492	0.660	504	0.660
458	0.658	470	0.658	482	0.658	494	0.661	506	0.659
460	0.658	472	0.657	484	0.658	496	0.661	508	0.660

---

510	0.659	596	0.662	682	0.665	768	0.660	854	0.672
512	0.659	598	0.662	684	0.665	770	0.658	856	0.672
514	0.661	600	0.662	686	0.664	772	0.664	858	0.672
516	0.662	602	0.663	688	0.664	774	0.663	860	0.672
518	0.661	604	0.665	690	0.662	776	0.662	862	0.671
520	0.661	606	0.664	692	0.661	778	0.664	864	0.671
522	0.659	608	0.663	694	0.662	780	0.664	866	0.671
524	0.659	610	0.662	696	0.660	782	0.666	868	0.673
526	0.659	612	0.665	698	0.661	784	0.668	870	0.673
528	0.658	614	0.664	700	0.663	786	0.669	872	0.674
530	0.658	616	0.664	702	0.663	788	0.668	874	0.677
532	0.658	618	0.664	704	0.661	790	0.666	876	0.674
534	0.659	620	0.663	706	0.663	792	0.671	878	0.672
536	0.657	622	0.664	708	0.664	794	0.668	880	0.672
538	0.658	624	0.664	710	0.663	796	0.665	882	0.673
540	0.659	626	0.665	712	0.663	798	0.663	884	0.676
542	0.660	628	0.665	714	0.662	800	0.669	886	0.676
544	0.660	630	0.665	716	0.663	802	0.667	888	0.675
546	0.661	632	0.664	718	0.664	804	0.668	890	0.676
548	0.662	634	0.664	720	0.663	806	0.670	892	0.675
550	0.662	636	0.665	722	0.662	808	0.671	894	0.673
552	0.661	638	0.664	724	0.661	810	0.671	896	0.675
554	0.662	640	0.665	726	0.661	812	0.672	898	0.678
556	0.661	642	0.666	728	0.661	814	0.673	900	0.677
558	0.660	644	0.666	730	0.661	816	0.673	902	0.677
560	0.660	646	0.666	732	0.661	818	0.675	904	0.676
562	0.660	648	0.665	734	0.662	820	0.671	906	0.678
564	0.661	650	0.665	736	0.663	822	0.671	908	0.680
566	0.661	652	0.667	738	0.662	824	0.673	910	0.679
568	0.662	654	0.667	740	0.662	826	0.672	912	0.677
570	0.661	656	0.667	742	0.661	828	0.672	914	0.680
572	0.661	658	0.667	744	0.662	830	0.672	916	0.680
574	0.662	660	0.668	746	0.662	832	0.670	918	0.682
576	0.663	662	0.667	748	0.663	834	0.668	920	0.682
578	0.662	664	0.667	750	0.661	836	0.668	922	0.679
580	0.661	666	0.667	752	0.660	838	0.668	924	0.679
582	0.663	668	0.667	754	0.659	840	0.667	926	0.680
584	0.662	670	0.668	756	0.658	842	0.671	928	0.680
586	0.663	672	0.667	758	0.659	844	0.669	930	0.678
588	0.663	674	0.666	760	0.658	846	0.669	932	0.679
590	0.661	676	0.666	762	0.658	848	0.671	934	0.682
592	0.660	678	0.665	764	0.660	850	0.672	936	0.676
594	0.661	680	0.666	766	0.659	852	0.672	938	0.676

---

940	0.676	964	0.688	988	0.694	1012	0.693	1036	0.696
942	0.677	966	0.685	990	0.690	1014	0.694	1038	0.696
944	0.676	968	0.689	992	0.689	1016	0.696	1040	0.698
946	0.678	970	0.688	994	0.694	1018	0.694	1042	0.701
948	0.678	972	0.688	996	0.692	1020	0.694	1044	0.705
950	0.678	974	0.688	998	0.693	1022	0.694	1046	0.697
952	0.679	976	0.686	1000	0.694	1024	0.693	1048	0.696
954	0.681	978	0.684	1002	0.695	1026	0.694	1050	0.696
956	0.684	980	0.685	1004	0.698	1028	0.694		
958	0.683	982	0.689	1006	0.696	1030	0.696		
960	0.683	984	0.689	1008	0.694	1032	0.695		
962	0.687	986	0.693	1010	0.692	1034	0.695		

**TABLA F.13**

**ABSORBANCIA(A) POR LONGITUD DE ONDA( $\lambda$ ) DE MPCM 37 AL 0.25 %vol.**

$\lambda$ (nm)	A								
450	0.736	498	0.744	546	0.753	594	0.761	642	0.770
452	0.736	500	0.745	548	0.752	596	0.762	644	0.770
454	0.737	502	0.745	550	0.752	598	0.762	646	0.770
456	0.738	504	0.746	552	0.753	600	0.763	648	0.769
458	0.738	506	0.747	554	0.754	602	0.763	650	0.769
460	0.738	508	0.749	556	0.755	604	0.763	652	0.771
462	0.738	510	0.749	558	0.755	606	0.764	654	0.771
464	0.738	512	0.750	560	0.754	608	0.763	656	0.771
466	0.738	514	0.750	562	0.755	610	0.762	658	0.772
468	0.738	516	0.752	564	0.755	612	0.761	660	0.772
470	0.739	518	0.751	566	0.756	614	0.762	662	0.773
472	0.740	520	0.751	568	0.756	616	0.762	664	0.772
474	0.741	522	0.751	570	0.757	618	0.762	666	0.773
476	0.741	524	0.752	572	0.758	620	0.763	668	0.773
478	0.741	526	0.752	574	0.759	622	0.763	670	0.774
480	0.742	528	0.752	576	0.759	624	0.764	672	0.773
482	0.743	530	0.750	578	0.758	626	0.765	674	0.775
484	0.742	532	0.750	580	0.758	628	0.765	676	0.776
486	0.742	534	0.751	582	0.760	630	0.765	678	0.776
488	0.742	536	0.751	584	0.760	632	0.767	680	0.777
490	0.742	538	0.752	586	0.760	634	0.767	682	0.777
492	0.742	540	0.753	588	0.760	636	0.768	684	0.776
494	0.743	542	0.752	590	0.760	638	0.769	686	0.777
496	0.744	544	0.752	592	0.760	640	0.769	688	0.778

690	0.778	764	0.798	838	0.815	912	0.824	986	0.831
692	0.779	766	0.798	840	0.816	914	0.827	988	0.834
694	0.780	768	0.799	842	0.820	916	0.825	990	0.832
696	0.779	770	0.800	844	0.820	918	0.824	992	0.828
698	0.779	772	0.803	846	0.820	920	0.825	994	0.823
700	0.778	774	0.805	848	0.822	922	0.826	996	0.822
702	0.779	776	0.804	850	0.820	924	0.826	998	0.824
704	0.780	778	0.806	852	0.819	926	0.826	1000	0.824
706	0.782	780	0.806	854	0.820	928	0.827	1002	0.823
708	0.783	782	0.807	856	0.822	930	0.830	1004	0.823
710	0.784	784	0.808	858	0.823	932	0.831	1006	0.823
712	0.784	786	0.809	860	0.823	934	0.833	1008	0.828
714	0.785	788	0.812	862	0.823	936	0.828	1010	0.825
716	0.786	790	0.809	864	0.823	938	0.828	1012	0.825
718	0.785	792	0.812	866	0.823	940	0.826	1014	0.824
720	0.785	794	0.812	868	0.823	942	0.828	1016	0.827
722	0.786	796	0.811	870	0.823	944	0.829	1018	0.827
724	0.786	798	0.807	872	0.824	946	0.830	1020	0.828
726	0.788	800	0.812	874	0.825	948	0.830	1022	0.826
728	0.788	802	0.810	876	0.824	950	0.831	1024	0.827
730	0.788	804	0.810	878	0.821	952	0.829	1026	0.824
732	0.789	806	0.811	880	0.823	954	0.829	1028	0.827
734	0.789	808	0.812	882	0.822	956	0.832	1030	0.828
736	0.790	810	0.811	884	0.819	958	0.833	1032	0.829
738	0.791	812	0.813	886	0.820	960	0.832	1034	0.828
740	0.792	814	0.813	888	0.820	962	0.837	1036	0.828
742	0.793	816	0.813	890	0.823	964	0.835	1038	0.830
744	0.792	818	0.816	892	0.822	966	0.832	1040	0.832
746	0.792	820	0.811	894	0.824	968	0.834	1042	0.833
748	0.793	822	0.812	896	0.824	970	0.832	1044	0.837
750	0.794	824	0.812	898	0.824	972	0.833	1046	0.829
752	0.794	826	0.812	900	0.824	974	0.833	1048	0.831
754	0.796	828	0.813	902	0.824	976	0.831	1050	0.832
756	0.799	830	0.815	904	0.825	978	0.831		
758	0.798	832	0.814	906	0.825	980	0.828		
760	0.798	834	0.813	908	0.824	982	0.824		
762	0.798	836	0.814	910	0.825	984	0.827		

**TABLA F.14**

**ABSORBANCIA(A) POR LONGITUD DE ONDA( $\lambda$ ) DE MPCM 37 AL 0.35 %vol.**

$\lambda$ (nm)	A								
450	1.010	526	1.025	602	1.040	678	1.057	754	1.063
452	1.010	528	1.026	604	1.042	680	1.057	756	1.061
454	1.010	530	1.026	606	1.040	682	1.055	758	1.060
456	1.012	532	1.027	608	1.040	684	1.054	760	1.061
458	1.012	534	1.026	610	1.041	686	1.054	762	1.061
460	1.012	536	1.026	612	1.041	688	1.054	764	1.059
462	1.012	538	1.026	614	1.042	690	1.055	766	1.063
464	1.012	540	1.028	616	1.042	692	1.057	768	1.064
466	1.012	542	1.028	618	1.041	694	1.058	770	1.062
468	1.013	544	1.028	620	1.044	696	1.057	772	1.068
470	1.013	546	1.030	622	1.045	698	1.057	774	1.066
472	1.014	548	1.030	624	1.046	700	1.057	776	1.068
474	1.014	550	1.031	626	1.046	702	1.057	778	1.068
476	1.015	552	1.031	628	1.046	704	1.056	780	1.068
478	1.016	554	1.032	630	1.046	706	1.059	782	1.068
480	1.017	556	1.031	632	1.047	708	1.060	784	1.070
482	1.017	558	1.029	634	1.047	710	1.059	786	1.071
484	1.017	560	1.031	636	1.048	712	1.058	788	1.070
486	1.017	562	1.032	638	1.048	714	1.058	790	1.068
488	1.017	564	1.033	640	1.050	716	1.059	792	1.071
490	1.017	566	1.034	642	1.051	718	1.058	794	1.068
492	1.017	568	1.034	644	1.051	720	1.059	796	1.068
494	1.017	570	1.034	646	1.051	722	1.059	798	1.069
496	1.018	572	1.034	648	1.051	724	1.058	800	1.068
498	1.019	574	1.034	650	1.051	726	1.059	802	1.070
500	1.020	576	1.035	652	1.051	728	1.059	804	1.071
502	1.021	578	1.034	654	1.052	730	1.058	806	1.072
504	1.023	580	1.034	656	1.053	732	1.059	808	1.073
506	1.022	582	1.036	658	1.055	734	1.060	810	1.074
508	1.022	584	1.035	660	1.055	736	1.061	812	1.075
510	1.022	586	1.036	662	1.055	738	1.062	814	1.074
512	1.022	588	1.034	664	1.054	740	1.061	816	1.072
514	1.022	590	1.035	666	1.055	742	1.062	818	1.076
516	1.023	592	1.036	668	1.057	744	1.062	820	1.072
518	1.023	594	1.036	670	1.057	746	1.060	822	1.076
520	1.023	596	1.037	672	1.057	748	1.063	824	1.074
522	1.025	598	1.037	674	1.056	750	1.062	826	1.074
524	1.024	600	1.039	676	1.057	752	1.062	828	1.076

830	1.077	876	1.086	922	1.084	968	1.100	1014	1.108
832	1.077	878	1.083	924	1.084	970	1.099	1016	1.108
834	1.080	880	1.089	926	1.089	972	1.098	1018	1.110
836	1.076	882	1.088	928	1.091	974	1.099	1020	1.108
838	1.078	884	1.083	930	1.091	976	1.101	1022	1.108
840	1.080	886	1.084	932	1.091	978	1.101	1024	1.107
842	1.076	888	1.085	934	1.092	980	1.102	1026	1.108
844	1.080	890	1.087	936	1.088	982	1.098	1028	1.106
846	1.080	892	1.085	938	1.090	984	1.101	1030	1.105
848	1.080	894	1.086	940	1.089	986	1.106	1032	1.105
850	1.079	896	1.085	942	1.091	988	1.107	1034	1.105
852	1.080	898	1.084	944	1.092	990	1.106	1036	1.104
854	1.082	900	1.082	946	1.093	992	1.105	1038	1.103
856	1.084	902	1.085	948	1.093	994	1.102	1040	1.102
858	1.085	904	1.086	950	1.095	996	1.100	1042	1.105
860	1.084	906	1.085	952	1.095	998	1.104	1044	1.111
862	1.086	908	1.081	954	1.092	1000	1.106	1046	1.101
864	1.085	910	1.085	956	1.097	1002	1.106	1048	1.106
866	1.085	912	1.081	958	1.094	1004	1.105	1050	1.107
868	1.085	914	1.087	960	1.096	1006	1.108		
870	1.086	916	1.086	962	1.095	1008	1.108		
872	1.085	918	1.083	964	1.098	1010	1.108		
874	1.086	920	1.084	966	1.097	1012	1.108		

**TABLA F.15**

**ABSORBANCIA(A) POR LONGITUD DE ONDA( $\lambda$ ) DE MPCM 37 AL 0.40 %vol.**

$\lambda$ (nm)	A								
450	1.193	476	1.195	502	1.200	528	1.206	554	1.211
452	1.193	478	1.195	504	1.200	530	1.207	556	1.211
454	1.193	480	1.195	506	1.200	532	1.207	558	1.211
456	1.194	482	1.195	508	1.201	534	1.205	560	1.211
458	1.194	484	1.195	510	1.202	536	1.204	562	1.211
460	1.193	486	1.196	512	1.202	538	1.205	564	1.211
462	1.193	488	1.197	514	1.203	540	1.207	566	1.212
464	1.193	490	1.197	516	1.203	542	1.208	568	1.211
466	1.194	492	1.197	518	1.203	544	1.209	570	1.212
468	1.194	494	1.198	520	1.203	546	1.201	572	1.212
470	1.194	496	1.199	522	1.205	548	1.209	574	1.213
472	1.194	498	1.200	524	1.206	550	1.210	576	1.215
474	1.195	500	1.201	526	1.205	552	1.210	578	1.215

---

580	1.216	666	1.239	752	1.265	838	1.289	924	1.292
582	1.217	668	1.241	754	1.266	840	1.289	926	1.298
584	1.217	670	1.243	756	1.264	842	1.287	928	1.300
586	1.217	672	1.242	758	1.267	844	1.292	930	1.299
588	1.216	674	1.241	760	1.265	846	1.293	932	1.300
590	1.216	676	1.242	762	1.268	848	1.293	934	1.303
592	1.217	678	1.243	764	1.266	850	1.292	936	1.297
594	1.219	680	1.244	766	1.269	852	1.292	938	1.298
596	1.220	682	1.243	768	1.269	854	1.289	940	1.297
598	1.220	684	1.245	770	1.267	856	1.289	942	1.299
600	1.220	686	1.246	772	1.274	858	1.289	944	1.301
602	1.221	688	1.247	774	1.273	860	1.291	946	1.300
604	1.223	690	1.248	776	1.273	862	1.289	948	1.300
606	1.222	692	1.249	778	1.271	864	1.287	950	1.303
608	1.222	694	1.248	780	1.275	866	1.287	952	1.304
610	1.223	696	1.248	782	1.275	868	1.287	954	1.303
612	1.224	698	1.250	784	1.274	870	1.286	956	1.307
614	1.226	700	1.249	786	1.276	872	1.287	958	1.307
616	1.228	702	1.249	788	1.276	874	1.289	960	1.308
618	1.228	704	1.247	790	1.273	876	1.287	962	1.307
620	1.231	706	1.253	792	1.280	878	1.284	964	1.309
622	1.232	708	1.254	794	1.277	880	1.287	966	1.310
624	1.233	710	1.254	796	1.276	882	1.288	968	1.314
626	1.234	712	1.255	798	1.277	884	1.287	970	1.313
628	1.234	714	1.254	800	1.277	886	1.287	972	1.313
630	1.234	716	1.255	802	1.278	888	1.286	974	1.315
632	1.234	718	1.255	804	1.279	890	1.287	976	1.315
634	1.234	720	1.256	806	1.281	892	1.286	978	1.313
636	1.234	722	1.257	808	1.283	894	1.288	980	1.314
638	1.235	724	1.255	810	1.284	896	1.288	982	1.311
640	1.235	726	1.256	812	1.283	898	1.289	984	1.313
642	1.236	728	1.257	814	1.283	900	1.288	986	1.319
644	1.237	730	1.256	816	1.282	902	1.290	988	1.320
646	1.237	732	1.258	818	1.288	904	1.291	990	1.317
648	1.239	734	1.257	820	1.281	906	1.290	992	1.314
650	1.238	736	1.259	822	1.285	908	1.286	994	1.316
652	1.238	738	1.259	824	1.287	910	1.289	996	1.317
654	1.239	740	1.259	826	1.289	912	1.287	998	1.317
656	1.239	742	1.261	828	1.288	914	1.297	1000	1.319
658	1.240	744	1.262	830	1.290	916	1.295	1002	1.318
660	1.239	746	1.262	832	1.287	918	1.292	1004	1.318
662	1.239	748	1.263	834	1.288	920	1.292	1006	1.322
664	1.240	750	1.264	836	1.288	922	1.293	1008	1.321

---

1010	1.322	1020	1.330	1030	1.330	1040	1.326	1050	1.316
1012	1.323	1022	1.329	1032	1.328	1042	1.326		
1014	1.325	1024	1.328	1034	1.330	1044	1.334		
1016	1.330	1026	1.332	1036	1.326	1046	1.316		
1018	1.329	1028	1.331	1038	1.325	1048	1.324		

**TABLA F.16**

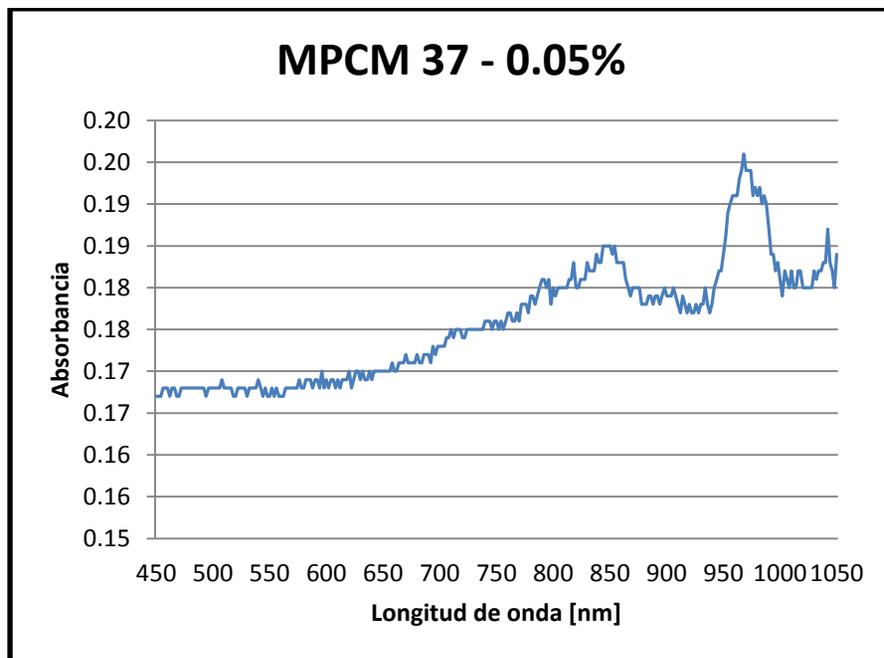
**ABSORBANCIA(A) POR LONGITUD DE ONDA( $\lambda$ ) DE MPCM 37 AL 0.50 %vol.**

$\lambda$ (nm)	A								
450	1.438	512	1.445	574	1.463	636	1.481	698	1.497
452	1.438	514	1.445	576	1.464	638	1.482	700	1.497
454	1.437	516	1.445	578	1.463	640	1.483	702	1.498
456	1.438	518	1.444	580	1.462	642	1.484	704	1.496
458	1.438	520	1.446	582	1.465	644	1.485	706	1.501
460	1.437	522	1.449	584	1.466	646	1.496	708	1.502
462	1.437	524	1.449	586	1.466	648	1.487	710	1.504
464	1.437	526	1.448	588	1.466	650	1.487	712	1.503
466	1.437	528	1.449	590	1.468	652	1.488	714	1.503
468	1.437	530	1.451	592	1.468	654	1.488	716	1.502
470	1.437	532	1.451	594	1.470	656	1.489	718	1.503
472	1.437	534	1.452	596	1.469	658	1.490	720	1.502
474	1.437	536	1.452	598	1.470	660	1.489	722	1.502
476	1.438	538	1.453	600	1.470	662	1.489	724	1.502
478	1.439	540	1.454	602	1.471	664	1.490	726	1.502
480	1.440	542	1.454	604	1.471	666	1.489	728	1.501
482	1.440	544	1.453	606	1.471	668	1.493	730	1.504
484	1.439	546	1.453	608	1.472	670	1.493	732	1.506
486	1.438	548	1.453	610	1.472	672	1.494	734	1.506
488	1.438	550	1.453	612	1.471	674	1.494	736	1.508
490	1.438	552	1.454	614	1.474	676	1.495	738	1.509
492	1.439	554	1.455	616	1.475	678	1.494	740	1.508
494	1.439	556	1.456	618	1.474	680	1.494	742	1.509
496	1.440	558	1.458	620	1.477	682	1.496	744	1.510
498	1.441	560	1.460	622	1.477	684	1.496	746	1.508
500	1.442	562	1.460	624	1.478	686	1.497	748	1.508
502	1.442	564	1.461	626	1.477	688	1.495	750	1.507
504	1.442	566	1.461	628	1.478	690	1.495	752	1.509
506	1.443	568	1.462	630	1.480	692	1.496	754	1.510
508	1.444	570	1.462	632	1.480	694	1.496	756	1.511
510	1.446	572	1.462	634	1.480	696	1.496	758	1.510

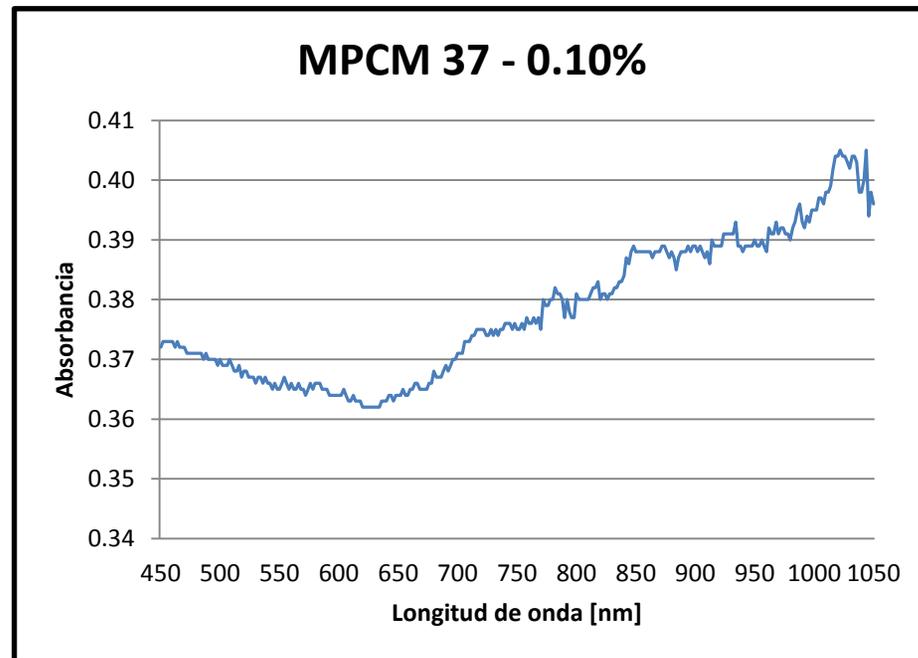
---

760	1.510	846	1.519	932	1.536	1018	1.561
762	1.510	848	1.518	934	1.539	1020	1.567
764	1.510	850	1.518	936	1.529	1022	1.567
766	1.510	852	1.518	938	1.531	1024	1.563
768	1.509	854	1.521	940	1.530	1026	1.562
770	1.504	856	1.523	942	1.531	1028	1.565
772	1.512	858	1.522	944	1.531	1030	1.562
774	1.512	860	1.522	946	1.533	1032	1.558
776	1.510	862	1.524	948	1.535	1034	1.559
778	1.510	864	1.525	950	1.539	1036	1.559
780	1.513	866	1.524	952	1.538	1038	1.557
782	1.515	868	1.526	954	1.536	1040	1.561
784	1.513	870	1.526	956	1.541	1042	1.560
786	1.511	872	1.526	958	1.543	1044	1.568
788	1.509	874	1.530	960	1.545	1046	1.556
790	1.506	876	1.528	962	1.542	1048	1.559
792	1.514	878	1.523	964	1.542	1050	1.542
794	1.510	880	1.528	966	1.547		
796	1.509	882	1.525	968	1.551		
798	1.510	884	1.523	970	1.549		
800	1.512	886	1.524	972	1.549		
802	1.513	888	1.523	974	1.551		
804	1.513	890	1.526	976	1.554		
806	1.513	892	1.523	978	1.548		
808	1.517	894	1.526	980	1.549		
810	1.514	896	1.525	982	1.548		
812	1.515	898	1.526	984	1.550		
814	1.516	900	1.525	986	1.557		
816	1.516	902	1.529	988	1.555		
818	1.521	904	1.523	990	1.554		
820	1.510	906	1.523	992	1.553		
822	1.513	908	1.529	994	1.553		
824	1.515	910	1.529	996	1.551		
826	1.515	912	1.525	998	1.555		
828	1.515	914	1.535	1000	1.554		
830	1.515	916	1.533	1002	1.555		
832	1.513	918	1.530	1004	1.553		
834	1.514	920	1.533	1006	1.561		
836	1.514	922	1.534	1008	1.557		
838	1.516	924	1.532	1010	1.560		
840	1.517	926	1.537	1012	1.558		
842	1.512	928	1.538	1014	1.557		
844	1.519	930	1.540	1016	1.560		

---



**FIGURA F.9 MPCM 537 AL 0.05%**



**FIGURA F.10 MPCM 37 AL 0.10%**

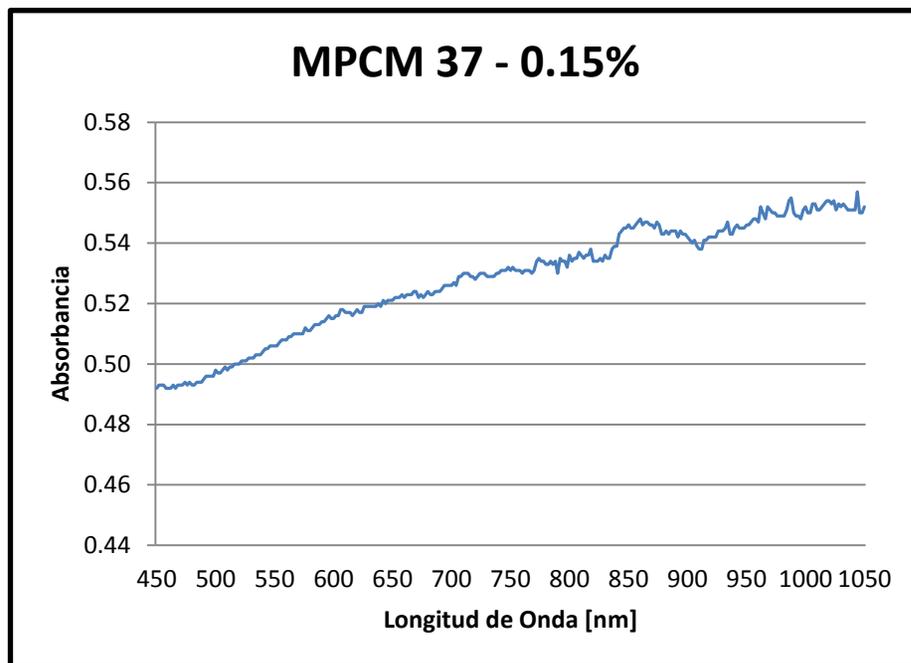


FIGURA F.11 MPCM 37 AL 0.15%

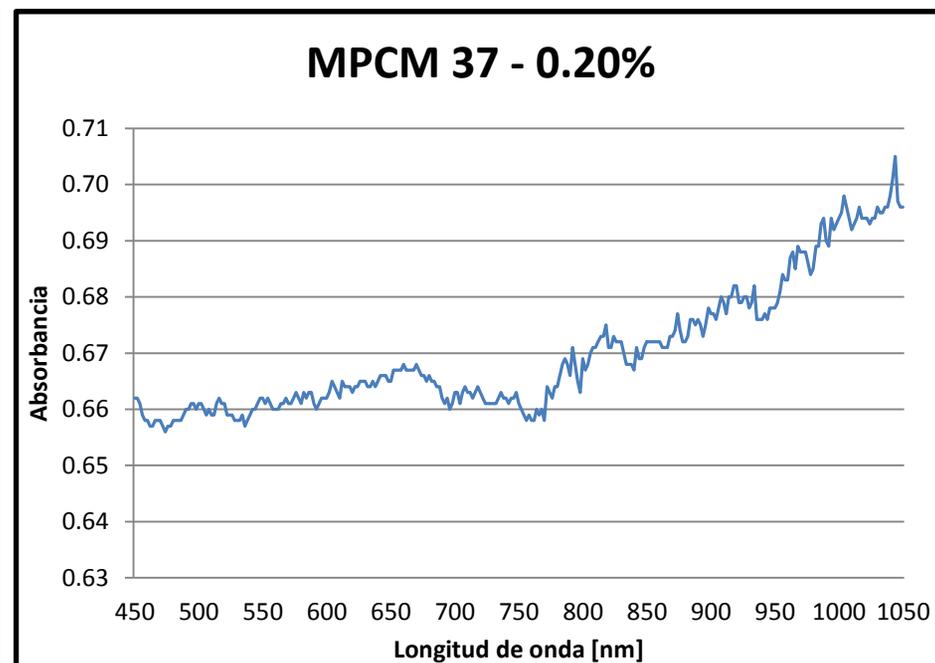
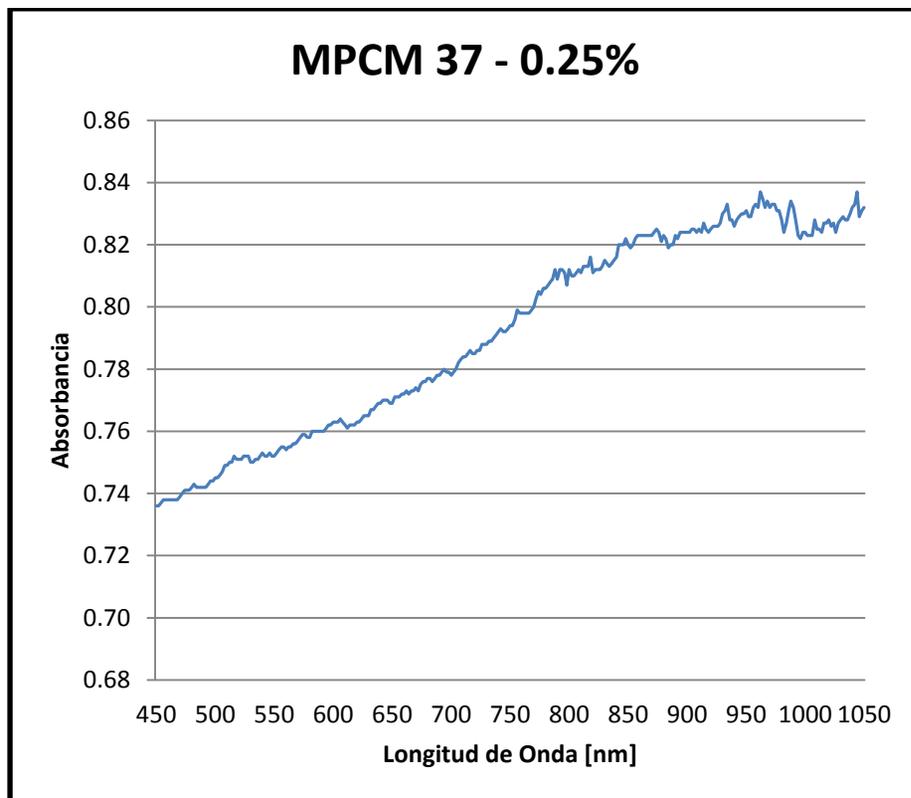
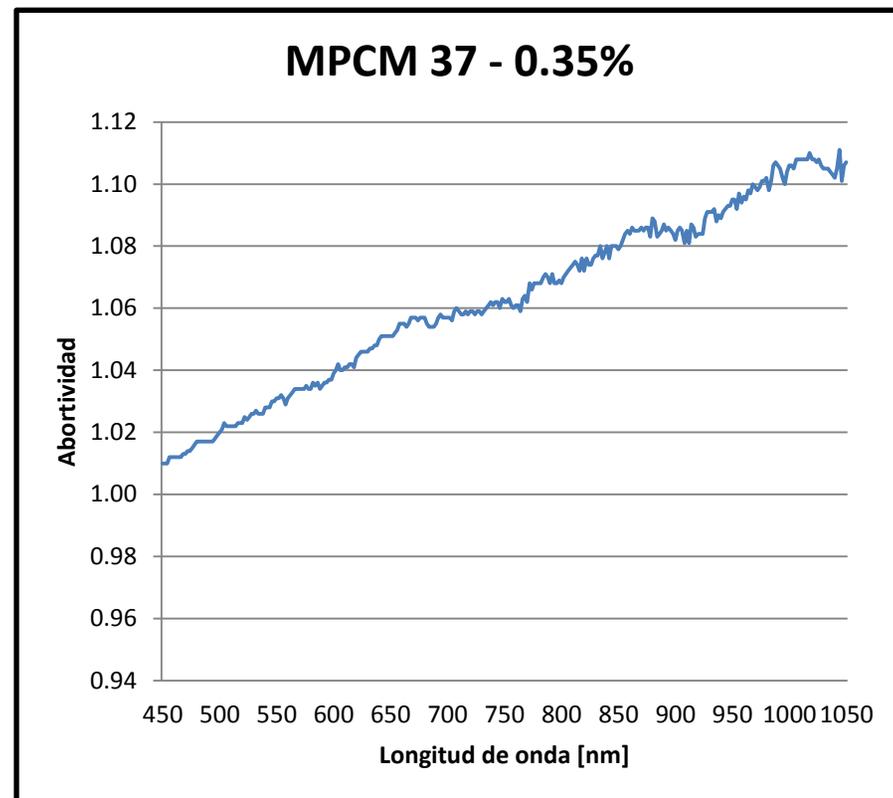


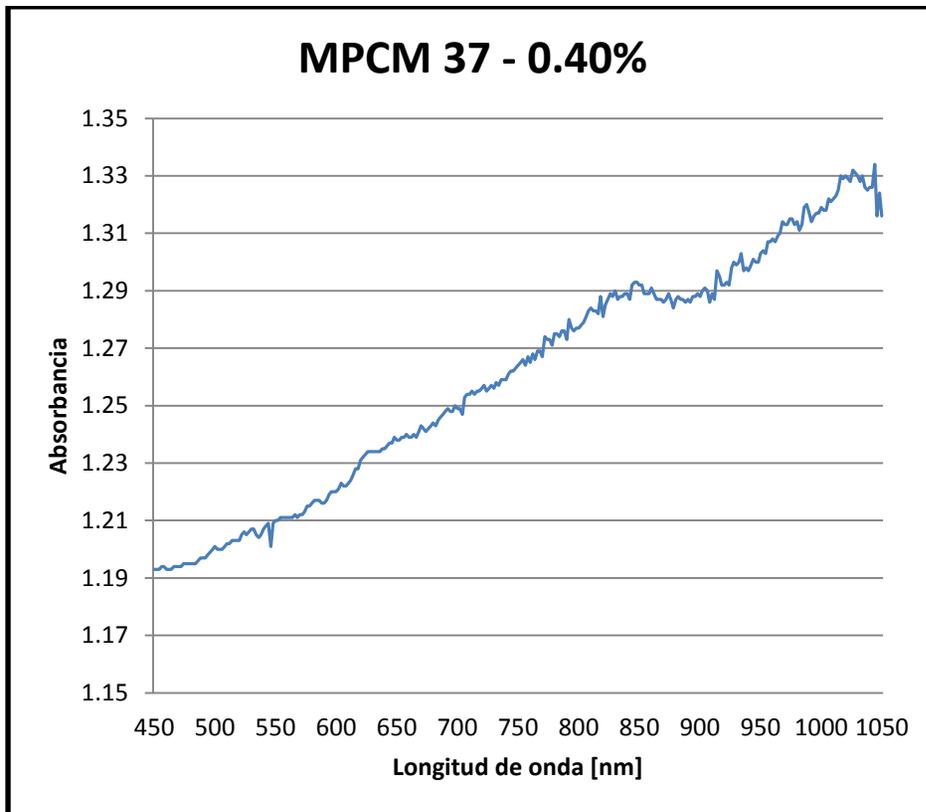
FIGURA F.12 MPCM 37 AL 0.20%



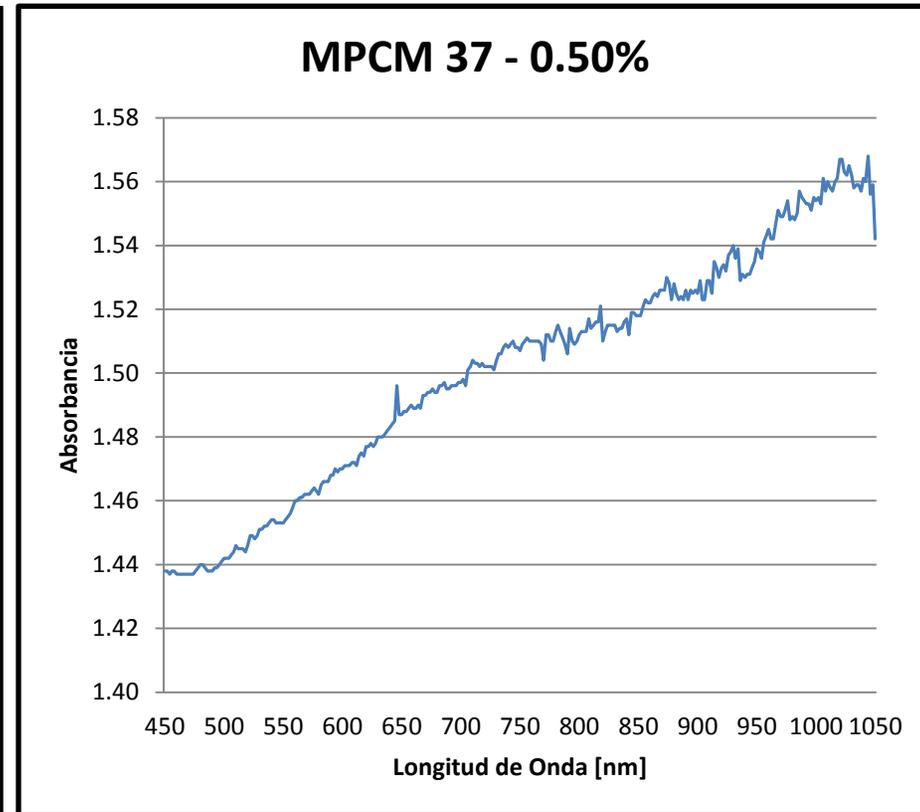
**FIGURA F.13 MPCM 37 AL 0.25%**



**FIGURA F.14 MPCM 37 AL 0.35%**



**FIGURA F.15 MPCM 37 AL 0.40%**



**FIGURA F.16 MPCM 37 AL 0.50%**

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Castro, M., Hacia una Matriz Energética Diversificada en Ecuador, Quito, CEDA, Nov. 2011.
- [2] International Energy Agency, "Renewable energy - World Energy Outlook 2013," World Energy Outlook 2013.
- [3] International Energy Agency, 2011, "Solar Energy Perspectives."
- [4] Tian, Y., and Zhao, C. Y., 2013, "A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications," Appl. Energy, **104**, pp. 538–553.
- [5] Parida, B., Iniyar, S., and Goic, R., 2011, "A review of solar photovoltaic technologies," Renew. Sustain. Energy Rev., **15**(3), pp. 1625–1636.
- [6] Kalogirou, S. A., 2004, "Solar thermal collectors and applications."
- [7] Vijay, P. S. A., Vignesh, M., and Nallusamy, N., "Comparitive study of sensible and latent heat storage integrated with solar water heating unit," pp. 1–6.
- [8] ASHRAE, 2008, "Thermal Storage", ASHRAE Handbook: HVAC Systems and Equipment, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, GA, pp. 50.7, 50.11, 50.21.
- [9] Sharma, S. D., Kitano, H., and Sagara, K., 2004, "Phase Change Materials for Low Temperature Solar Thermal Applications," **29**, pp. 31–64.
- [10] Harland, A., Mackay, C., and Vale, B., "Phase Change Materials in Architecture," pp. 1–11.
- [11] Oliver, a., Neila, F. J., and García-Santos, a., 2012, "Clasificación y selección de materiales de cambio de fase según sus características para su aplicación en sistemas de almacenamiento de energía térmica," Mater. Construcción, **62**(305), pp. 131–140.
- [12] Zalba, B., Marín, J. M., Cabeza, L. F., and Mehling, H., 2003, Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications, Elsevier.

- [13] Balart, R., 2012, "Estudio de materiales con cambio de fase (PCM) y análisis SEM de micro (PCM)."
- [14] Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R., and Buddhi, D., 2009, "Review on thermal energy storage with phase change materials and applications," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **13**(2), pp. 318–345.
- [15] Abhat, A., 1983, "Low temperature latent heat thermal energy storage: Heat storage materials," *Sol. Energy*, **30**(4), pp. 313–332.
- [16] Himran, S., Suwono, A., and Mansoori, G. A., 1994, "Characterization of Alkanes and Paraffin Waxes for Application as Phase Change Energy Storage Medium," *Energy Sources*, **16**(1), pp. 117–128.
- [17] Charunyakorn, P., and Sengupta, S., 1991, "Forced convection heat transfer in microencapsulated phase change material slurries: flow in circular ducts," ... *J. heat mass Transf.*
- [18] Medrano, M., Castell, A., Roca, J., Cabeza, L. F., and Nogués, M., 2007, "Use of Microencapsulated Phase Change Materials in Building Applications."
- [19] Zhao, C. Y., and Zhang, G. H., 2011, "Review on microencapsulated phase change materials (MEPCMs): Fabrication, characterization and applications," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **15**(8), pp. 3813–3832.
- [20] Shin, Y., Yoo, D. I., and Son, K., 2005, "Development of thermoregulating textile materials with microencapsulated Phase Change Materials (PCM). II. Preparation and application of PCM microcapsules," *J. Appl. Polym. Sci.*, **96**(6), pp. 2005–2010.
- [21] Muthusivagami, R. M., Velraj, R., and Sethumadhavan, R., 2010, "Solar cookers with and without thermal storage—A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **14**(2), pp. 691–701.
- [22] Hussein, H. M. S., El-Ghetany, H. H., and Nada, S. A., 2008, "Experimental investigation of novel indirect solar cooker with indoor PCM thermal storage and cooking unit," *J. Hazard. Mater.*, **157**(2-3), pp. 480–489.
- [23] Donnelly, K., 2012, "Phase change for the better – Vaccine applications" [Online]. Available: <http://www.path.org/blog/2012/03/phase-change-for-the-better/>.

- [24] Xichun, W., "Application of MPCM Slurry with Cooled Ceiling to Realize a Low Energy Building Design."
- [25] Kühl, L., "Use of Microencapsulated Phase Change Materials in Office Blocks."
- [26] Summers, E. K., Antar, M. A., and Lienhard, J. H., 2012, "Design and optimization of an air heating solar collector with integrated phase change material energy storage for use in humidification-dehumidification desalination," *Sol. Energy*, **86**(11), pp. 3417–3429.
- [27] Bates, M., Bruce, D., Wilcock, E., Smirnova, A. I., and Logan, A. J., 2012, "Temperature Control of Drilling Fluid with Phase-Change Materials."
- [28] Kürklü, A., Özmerzi, A., and Bilgin, S., 2002, "Thermal performance of water-phase change material solar collector," *Renew. Energy*, **26**(3), pp. 391–399.
- [29] Fath, H. E. S., 1995, "Transient analysis of thermosyphon solar air heater with built-in latent heat thermal energy storage system," *Renew. Energy*, **6**(2), pp. 119–124.
- [30] Sharma, S. D. D., Iwata, T., Kitano, H., and Sagara, K., 2005, "Thermal performance of a solar cooker based on an evacuated tube solar collector with a PCM storage unit," *Sol. Energy*, **78**(3), pp. 416–426.
- [31] MicrotekLab, "Which PCM is the right one for you" [Online]. Available: <http://www.microteklabs.com/which-pcm-is-the-right-one-for-you.html>.
- [32] Kasza, K. E., and Chen, M. M., 1985, "Improvement of the Performance of Solar Energy or Waste Heat Utilization Systems by Using Phase-Change Slurry as an Enhanced Heat-Transfer Storage Fluid," *J. Sol. Energy Eng.*, **107**(3), p. 229.
- [33] Roy, S. K., Senguptas, S., and Goel, M., 1994, "Laminar forced convection heat transfer in microcapsulated phase change material suspensions," **37**(4), pp. 593–604.
- [34] Wu, W., Bostanci, H., Chow, L. C., Ding, S. J., Hong, Y., Su, M., Kizito, J. P., Gschwender, L., and Snyder, C. E., 2011, "Jet impingement and spray cooling using slurry of nanoencapsulated phase change materials," *Int. J. Heat Mass Transf.*, **54**(13-14), pp. 2715–2723.

- [35] Reza Seyf, H., Wilson, M. R., Zhang, Y., and Ma, H. B., 2014, "Flow and Heat Transfer of Nanoencapsulated Phase Change Material Slurry Past a Unconfined Square Cylinder," *J. Heat Transfer*, **136**(5), p. 051902.
- [36] Zhou, D., Zhao, C. Y., and Tian, Y., 2012, "Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications," pp. 593–605.
- [37] Alvarado, J. L., Jones, B. G., and Marsh, C. P., 2008, Thermal Performance of Microencapsulated Phase Change Material Slurry.
- [38] Gende, D., "Environmental Science" [Online]. Available: <http://apesnature.homestead.com/chapter15.html>.
- [39] Otanicar, T., Phelan, P., and Golden, J., 2009, "Optical properties of liquids for direct absorption solar thermal energy systems," *Sol. Energy*, **83**(7), pp. 969–977.
- [40] Duffie, J. A., and Beckman, C. ., 1988, Solar Engineering of Thermal Processes.
- [41] Otanicar, T. P., Phelan, P. E., Prasher, R. S., Rosengarten, G., and Taylor, R. A., 2010, "Nanofluid-based direct absorption solar collector," *J. Renew. Sustain. Energy*, **2**(3), p. 033102.
- [42] Minardi, J. E., and Chuang, H. N., 1975, "Performance of a 'black' liquid flat-plate solar collector," *Sol. Energy*, **17**(3), pp. 179–183.
- [43] Shin, D., and Banerjee, D., 2011, "Enhancement of specific heat capacity of high-temperature silica-nanofluids synthesized in alkali chloride salt eutectics for solar thermal-energy storage applications," *Int. J. Heat Mass Transf.*, **54**(5-6), pp. 1064–1070.
- [44] Saidur, R., Meng, T. C., Said, Z., Hasanuzzaman, M., and Kamyar, a., 2012, "Evaluation of the effect of nanofluid-based absorbers on direct solar collector," *Int. J. Heat Mass Transf.*, **55**(21-22), pp. 5899–5907.
- [45] Mahian, O., Kianifar, A., Kalogirou, S. a., Pop, I., and Wongwises, S., 2013, "A review of the applications of nanofluids in solar energy," *Int. J. Heat Mass Transf.*, **57**(2), pp. 582–594.
- [46] Khodadadi, J. M., and Hosseinizadeh, S. F., 2007, "Nanoparticle-enhanced phase change materials (NEPCM) with great potential for improved thermal energy storage," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, **34**(5), pp. 534–543.

- [47] Alkilani, M. M., Sopian, K., Alghoul, M. A., Sohif, M., and Ruslan, M. H., 2011, "Review of solar air collectors with thermal storage units," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **15**(3), pp. 1476–1490.
- [48] Alva S., L. H., González, J. E., and Dukhan, N., 2005, "Initial Analysis of PCM Integrated Solar Collectors," *J. Sol. Energy Eng.*, **128**(2), pp. 173–177.
- [49] Benli, H., and Durmuş, A., 2009, "Performance analysis of a latent heat storage system with phase change material for new designed solar collectors in greenhouse heating," *Sol. Energy*, **83**(12), pp. 2109–2119.
- [50] Velraj, R., Seeniraj, R. V., Hafner, B., Faber, C., and Schwarzer, K., 1999, "Heat Transfer Enhancement in a Latent Heat Storage System," *Sol. Energy*, **65**(3), pp. 171–180.
- [51] Alkan, C., Sari, A., and Karaipekli, A., 2011, "Preparation, thermal properties and thermal reliability of microencapsulated n-eicosane as novel phase change material for thermal energy storage," *Energy Convers. Manag.*, **52**(1), pp. 687–692.
- [52] Alvarado, J. L., Marsh, C., Sohn, C., Phetteplace, G., and Newell, T., 2007, "Thermal performance of microencapsulated phase change material slurry in turbulent flow under constant heat flux," *Int. J. Heat Mass Transf.*, **50**(9-10), pp. 1938–1952.
- [53] Brunnati, C., and Martín, A. M., "Introducción a la Espectroscopía de Absorción Molecular Ultravioleta, Visible e Infrarrojo Cercano," pp. 1–10.
- [54] Chen, J., Yang, D., Jiang, J., Ma, A., and Song, D., 2014, "Research Progress of Phase Change Materials (PCMs) Embedded with Metal Foam (a Review)," *Procedia Mater. Sci.*, **4**, pp. 369–374.
- [55] Eames, P. C., and Griffiths, P. W., 2006, "Thermal behaviour of integrated solar collector/storage unit with 65 °C phase change material," *Energy Convers. Manag.*, **47**(20), pp. 3611–3618.
- [56] Hunger, M., Entrop, A. G., Mandilaras, I., Brouwers, H. J. H., and Founti, M., 2009, "The behavior of self-compacting concrete containing micro-encapsulated Phase Change Materials," *Cem. Concr. Compos.*, **31**(10), pp. 731–743.
- [57] Leahy, M., Barden, J. L., Murphy, B. T., Slater-thompson, N., and Peterson, D., *International Energy Outlook 2013*.

- [58] Ma, Z. W., and Zhang, P., 2013, "Modeling the heat transfer characteristics of flow melting of phase change material slurries in the circular tubes," *Int. J. Heat Mass Transf.*, **64**, pp. 874–881.
- [59] Medved', D., Kvakovský, M., and Sklenářová, V., 2010, "Latent heat storage systems," (May).
- [60] Nabil, M., and Khodadadi, J. M., 2013, "Experimental determination of temperature-dependent thermal conductivity of solid eicosane-based nanostructure-enhanced phase change materials," *Int. J. Heat Mass Transf.*, **67**, pp. 301–310.
- [61] Soft Imaging System GmbH, "Step by Step - Scandium© Universal SEM Imaging Platform", Germany.
- [62] Tseng, Y.-H., Fang, M.-H., Tsai, P.-S., and Yang, Y.-M., 2005, "Preparation of microencapsulated phase-change materials (MCPCMs) by means of interfacial polycondensation.," *J. Microencapsul.*, **22**(1), pp. 37–46.
- [63] Whitesides, G. M., 2006, "The origins and the future of microfluidics.," *Nature*, **442**(7101), pp. 368–373.
- [64] Zeng, R., Wang, X., Chen, B., Zhang, Y., Niu, J., Wang, X., and Di, H., 2009, "Heat transfer characteristics of microencapsulated phase change material slurry in laminar flow under constant heat flux," *Appl. Energy*, **86**(12), pp. 2661–2670.
- [65] Zhang, G. H., and Zhao, C. Y., 2011, "Thermal and rheological properties of microencapsulated phase change materials," *Renew. Energy*, **36**(11), pp. 2959–2966.
- [66] Marchi, S., Pagliolico, S., and Sassi, G., 2013, "Characterization of panels containing micro-encapsulated Phase Change Materials," *Energy Convers. Manag.*, **74**, pp. 261–268.
- [67] Agyenim, F., Hewitt, N., Eames, P., and Smyth, M., 2010, "A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS)," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **14**(2), pp. 615–628.
- [68] Dolado, P., 2011, "Almacenamiento térmico de energía mediante Almacenamiento térmico de energía mediante cambio de fase Diseño y modelización de equipos de almacenamiento para intercambio de calor con aire."

- [69] Hawlader, M. N. a., Uddin, M. S., and Khin, M. M., 2003, "Microencapsulated PCM thermal-energy storage system," *Appl. Energy*, **74**(1-2), pp. 195–202.
- [70] Hu, X., and Zhang, Y., 2002, "Novel insight and numerical analysis of convective heat transfer enhancement with microencapsulated phase change material slurries: laminar flow in a circular tube with constant heat flux," *Int. J. Heat Mass Transf.*, **45**(15), pp. 3163–3172.
- [71] Shen, X., and Zhang, R., 2006, "Study progress and application of phase change energy storage materials.," *Jieneng Jishu*, **24**, pp. 460–463.
- [72] Taylor, R. A., Phelan, P. E., Otanicar, T. P., Adrian, R., and Prasher, R., 2011, "Nanofluid optical property characterization: towards efficient direct absorption solar collectors.," *Nanoscale Res. Lett.*, **6**(1), p. 225.
- [73] Dennis, M., and Brownrigg, W., 2006, "Development of Micro-Encapsulated Phase Change Materials," *Proceedings of the 44th Conference of the Australia and New Zealand Solar Energy Society*, pp. 1–12.
- [74] Wang, X., Niu, J., Li, Y., Zhang, Y., Wang, X., Chen, B., Zeng, R., and Song, Q., 2008, "Heat transfer of microencapsulated PCM slurry flow in a circular tube," *AIChE J.*, **54**(4), pp. 1110–1120.
- [75] Wuttig, M., and Yamada, N., 2007, "Phase-change materials for rewriteable data storage.," *Nat. Mater.*, **6**(11), pp. 824–832.
- [76] ASHRAE, 2011, "ASHRAE Handbook: Heating, Ventilating & Air-Conditioning Applications", American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, GA.
- [77] Hanks, R. W., and Dadia, B. H., 1971, "Theoretical analysis of the turbulent flow of non-newtonian slurries in pipes," *AIChE J.*, **17**(3), pp. 554–557.
- [78] Wen, D., Lin, G., Vafaei, S., and Zhang, K., 2009, "Review of nanofluids for heat transfer applications," *Particuology*, **7**(2), pp. 141–150.
- [79] Jeong, S. G., Jeon, J., Lee, J. H., and Kim, S., 2013, "Optimal preparation of PCM/diatomite composites for enhancing thermal properties," *Int. J. Heat Mass Transf.*, **62**(1), pp. 711–717.
- [80] Li, J., Xue, P., Ding, W., Han, J., and Sun, G., 2009, "Micro-encapsulated paraffin/high-density polyethylene/wood flour composite as form-stable

phase change material for thermal energy storage,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **93**(10), pp. 1761–1767.

- [81] Oliver, A., 2009, “PCM Integration in gypsum boards reinforced with polypropylene fibers.”
- [82] Pokhrel, R., González, J. E., Hight, T., and Adalsteinsson, T., 2010, “Analysis and Design of a Paraffin/Graphite Composite PCM Integrated in a Thermal Storage Unit,” *J. Sol. Energy Eng.*, **132**(4), p. 41006.
- [83] Schossig, P., Henning, H. M., Gschwander, S., and Haussmann, T., 2005, “Micro-encapsulated phase-change materials integrated into construction materials,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, pp. 297–306.
- [84] Tyagi, H., Phelan, P., and Prasher, R., 2009, “Predicted Efficiency of a Low-Temperature Nanofluid-Based Direct Absorption Solar Collector,” *J. Sol. Energy Eng.*, **131**(4), p. 041004.
- [85] Wang, X., Niu, J., Li, Y., Wang, X., Chen, B., Zeng, R., Song, Q., and Zhang, Y., 2007, “Flow and heat transfer behaviors of phase change material slurries in a horizontal circular tube,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, **50**(13-14), pp. 2480–2491.
- [86] Bayés-García, L., Ventolà, L., Cordobilla, R., Benages, R., Calvet, T., and Cuevas-Diarte, M. A., 2010, “Phase Change Materials (PCM) microcapsules with different shell compositions: Preparation, characterization and thermal stability,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **94**(7), pp. 1235–1240.
- [87] Han, B., Zhang, K., and Yu, X., 2013, “Enhance the Thermal Storage of Cement-Based Composites With Phase Change Materials and Carbon Nanotubes,” *J. Sol. Energy Eng.*, **135**(2), p. 24505.
- [88] Philip, J., and Shima, P. D., 2012, “Thermal properties of nanofluids,” *Adv. Colloid Interface Sci.*, **183-184**, pp. 30–45.
- [89] Sabbah, R., Yagoobi, J., and Al Hallaj, S., 2010, “Natural Convection with Micro-Encapsulated Phase Change Material,” *IMECE 2009: Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, VOL 9, PTS A-C*, pp. 1637–1646.
- [90] Zhang, X., Niu, J., Wu, J., and Zhang, S., 2014, “Proceedings of the 8th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning,” **262**, pp. 19–27.

- [91] Zhang, Z., Zhang, N., Peng, J., Fang, X., Gao, X., and Fang, Y., 2012, "Preparation and thermal energy storage properties of paraffin/expanded graphite composite phase change material," *Appl. Energy*, **91**(1), pp. 426–431.