



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN  
DIRECCIÓN DE POSTGRADO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE DOCTORADO EN ENERGÍAS**

**CARACTERIZACIÓN DEL ENSUCIAMIENTO Y DETERMINACIÓN DE LA  
CALIDAD SUPERFICIAL ÓPTIMA DEL VIDRIO SOLAR EXPUESTO A  
CONDICIONES DESÉRTICAS**

Tesis presentada a la Facultad de Ingeniería para optar al grado académico de  
Doctor en Energías

**POR: PABLO SEBASTIAN TOBOSQUE PEREIRA**  
Profesor Guía: Dr. Claudia Andrea Carrasco Carrasco  
Co-guía: Dr. Luis Morán Tamayo  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de Concepción

Mayo, 2023  
CONCEPCIÓN, CHILE,

© 2022, PABLO SEBASTIAN TOBOSQUE PEREIRA. Ninguna parte de esta tesis puede reproducirse o transmitirse bajo ninguna forma o por ningún medio o procedimiento, sin permiso por escrito del autor.

*Para Lorenzo y mi amada Valentina.*

*Para mi padre, Ramón.*

*Para mi familia.*

*Para Morita y Zorbas.*

*“But after a while*

*You realize time flies*

*And the best thing that you can do*

*Is take whatever comes to you”*

## Contenido

Capítulo 1 Introducción .....	11
1.2 Hipótesis y objetivos.....	16
1.2.1 Hipótesis de trabajo.....	16
1.2.2 Objetivos.....	16
Capítulo 2 Estudio de la relación entre las características fisicoquímicas del ensuciamiento, pérdida de transmitancia y condiciones climáticas .....	17
2.1 Identificación de sitios de interés/polos de desarrollo .....	18
2.1.2 Ensayos preliminares .....	21
2.2 Zona de estudio N°1: El Salvador PV .....	25
2.2.1 Caracterización climatológica .....	25
2.2.2 Análisis gravimétrico .....	28
2.2.3 Identificación mineralógica del polvo .....	32
2.2.4 Caracterización física del ensuciamiento .....	34
2.2.5 Relación entre las características del ensuciamiento y la transmitancia de los cupones analizados .....	42
2.2.6 Asociación entre las características del ensuciamiento y condiciones climáticas.....	46
2.3 Zona de estudio N°2: María Elena PV .....	49
2.4 Conclusiones generales capítulo 2 .....	63
Capítulo 3 Modificación superficial de vidrios FV como un método pasivo de mitigación del ensuciamiento .....	65
3.1 Introducción .....	66
3.3 Ensayo de ensuciamiento indoor .....	79
3.3.1 Caracterización física del ensuciamiento .....	80
3.3.2 Relación entre las características del ensuciamiento y la transmitancia de los vidrios modificados .....	86
3.4 Conclusiones generales capítulo 3 .....	93
Capítulo 4 Conclusiones .....	95
4.1 Conclusiones generales .....	96
4.2 Recomendaciones y trabajo futuro .....	97
Capítulo 5 Resultados de producción .....	98
Capítulo 6 Referencias .....	103
Anexos.....	111

## Tablas

Tabla 1. Valores promedios de parámetros atmosféricos en El Salvador PV. ....	26
Tabla 2. Nomenclatura de las muestras y condiciones experimentales usadas en el decapado químico de los vidrios. ....	70
Tabla 3. Carga de polvo acumulada para los vidrios modificados y los cupones de referencia en ambos ensayos de ensuciamiento. ....	87

## Figuras

Figura 1. Distribución de plantas FV en la zona norte de Chile: a) Plantas FV en operación y b) Plantas FV con RCA aprobada. ....	18
Figura 2. Polos de desarrollo de proyectos fotovoltaicos: a) Extensión geográfica del Desierto de Atacama y b) ubicación y clima predominante en María Elena PV y El Salvador PV. [31]. ....	20
Figura 3. Patrones de difracción de rayos X para muestras de suelo recolectadas en a) Salvador PV y b) María Elena PV. ....	21
Figura 4. Distribución de tamaño de partícula de las muestras de suelo analizadas. ....	22
Figura 5. Imágenes MEB de las muestras de suelo recolectadas en a) Salvador PV y b) María Elena PV. ....	23
Figura 6. Cupones de vidrio montados en la estructura de soporte en El Salvador PV. ....	25
Figura 7. Parámetros climáticos promedio registrados en El Salvador PV durante la segunda etapa de las campañas de a) verano y b) invierno. ....	27
Figura 8. Carga acumulativa de polvo para los vidrios LI y ArAs expuestos durante las campañas de (a) verano e (b) invierno en El Salvador PV. ....	29
Figura 9. Gráficos de caja para humedad relativa y velocidad de viento durante la segunda etapa de las campañas de verano e invierno. ....	30
Figura 10. Análisis de difracción de rayos X de muestras de polvo y de suelo en El Salvador PV: a) difractograma y b) cuantificación de fases mineralógicas. La denominación "otros" corresponde a halita, yeso, albita, anortita y hornblenda. ....	32
Figura 11. Imágenes MEB vidrio LI expuestos durante la campaña de verano en El Salvador PV, (a) 28, (b) 35, (c) 42 y (d) 49 días de exposición. ....	35
Figura 12. Análisis imágenes MEB para los cupones LI expuestos en El Salvador PV durante la campaña de verano: a) distribución de tamaño de partículas (q3) y b)	

distribución por cuartiles (gráficos de caja). .....	35
Figura 13. Imágenes MEB vidrio LI expuestos durante la campaña de invierno en El Salvador PV, (a) 28, (b) 35, (c) 42 y (d) 49 días de exposición. ....	37
Figura 14. Análisis de imágenes MEB para los cupones LI expuestos en El Salvador PV durante la campaña de invierno: a) distribución de tamaño de partículas (q3) y b) distribución por cuartiles (gráficos de caja). ....	37
Figura 15. Imágenes MEB vidrio ArAs expuestos durante la campaña de verano en El Salvador PV, (a) 28, (b) 35, (c) 42 y (d) 49 días de exposición. ....	39
Figura 16. Análisis de imágenes MEB para los cupones ArAs expuestos en El Salvador PV durante la campaña de verano: a) distribución de tamaño de partículas (q3) y b) distribución por cuartiles (gráficos de caja). ....	39
Figura 17. Imágenes MEB vidrio ArAs expuestos durante la campaña de invierno en El Salvador PV, (a) 28, (b) 35, (c) 42 y (d) 49 días de exposición. ....	41
Figura 18. Análisis de imágenes MEB para los cupones ArAs expuestos en El Salvador PV durante la campaña de invierno: a) distribución de tamaño de partículas (q3) y b) distribución por cuartiles (gráficos de caja). ....	41
Figura 19. Gráficos de pérdida de transmitancia en función del área cubierta en los vidrios expuestos en El Salvador PV: a) LI campaña de verano, b) LI campaña de invierno, c) ArAs campaña de verano y d) ArAs campaña de invierno. ....	43
Figura 20. Espectros de transmitancia de los cupones de vidrio expuestos en El Salvador PV: a) LI campaña de verano, b) LI campaña de invierno, c) ArAs campaña de verano y d) ArAs campaña de invierno. ....	44
Figura 21. Comportamiento diario de la humedad relativa y la velocidad del viento durante la segunda etapa en las campañas de verano (lado izquierdo) e invierno (lado derecho). ....	47
Figura 22. Comportamiento diario de la humedad relativa y la velocidad del viento en una semana representativa en las campañas de (a) verano y (b) invierno. ....	47
Figura 23. Carga acumulativa de polvo para los vidrios LI y ArAs expuestos durante las campañas de (a) verano e (b) invierno en María Elena PV. ....	50
Figura 24. Análisis de difracción de rayos X de muestras de polvo y de suelo en María Elena PV: a) difractograma y b) cuantificación de fases mineralógicas. La denominación "otros" corresponde a halita, yeso, anhidrita, ilita y anortita. ....	50
Figura 25. Imágenes MEB vidrio LI expuestos durante la campaña de verano en María Elena PV, (a) 28, (b) 35, (c) 42 y (d) 49 días de exposición. ....	52
Figura 26. Análisis de las imágenes MEB para los cupones LI expuestos en María Elena PV durante la campaña de verano: a) distribución de tamaño de partículas (q3) y b) distribución por cuartiles (gráficos de caja). ....	53

Figura 27. Imágenes MEB vidrio LI expuestos durante campaña invierno en María Elena PV, (a) 28, (b) 35, (c) 42 y (d) 49 días de exposición.....	54
Figura 28. Análisis de imágenes MEB para los cupones LI expuestos en María Elena PV durante la campaña de invierno: a) distribución de tamaño de partículas ( $q^3$ ) y b) distribución por cuartiles (gráficos de caja). ....	55
Figura 29. Imágenes MEB vidrio ArAs expuestos durante campaña de verano en María Elena PV, (a) 28, (b) 35, (c) 42 y (d) 49 días de exposición. ....	56
Figura 30: Análisis de las imágenes MEB para los cupones ArAs expuestos en María Elena PV durante la campaña de verano: a) curvas de distribución de tamaño de partículas ( $q^3$ ) y b) distribución por cuartiles (gráficos de caja).....	56
Figura 31. Imágenes MEB vidrio ArAs expuestos durante la campaña de invierno en María Elena PV, (a) 28, (b) 35, (c) 42 y (d) 49 días de exposición. ....	58
Figura 32. Análisis de las imágenes MEB para los cupones ArAs expuestos en María Elena PV durante la campaña de invierno: a) curvas de distribución de tamaño de partículas ( $q^3$ ) y b) distribución por cuartiles (gráficos de caja).....	58
Figura 33. Gráficos de pérdida de transmitancia en función del área cubierta en los vidrios, a) LI comparación campaña de verano, b) LI comparación campaña de invierno, c) ArAs comparación campaña de verano y d) ArAs comparación campaña de invierno. ....	60
Figura 34. Espectros de transmitancia de los cupones expuestos durante ambas campañas en María Elena PV a) LI campaña de verano, b) LI campaña de invierno, c) ArAs campaña de verano y d) ArAs campaña de invierno.....	62
Figura 35. Imágenes AFM y perfil de altura de las muestras a) RS, b) A-12M-30, c) A-12M-180, d) A-1,1M-120, e) B-12M-30, f) B-12M-120 y g) ArAs. ....	73
Figura 36. Parámetros morfológicos de la superficie de las muestras, rugosidad media cuadrática ( $S_q$ ) (barras azules), altura máxima ( $S_z$ ) (barras rojas) y rugosidad media aritmética ( $S_a$ ) (barras verdes). ....	75
Figura 37. Parámetros de rugosidad superficial de las muestras como asimetría ( $S_{sk}$ ) (barras granates) y curtosis ( $S_{ku}$ ) (barras azules). ....	76
Figura 38. Espectro de transmitancia de los cupones RS, ArAs y cupones modificados superficialmente. ....	77
Figura 39. Ensayo de ensuciamiento: a) Esquema del sistema de ensuciamiento, (b) etapa inicial donde el ventilador es activado, (c) la carga de polvo queda en suspensión debido a la acción del ventilador y (d) el experimento finaliza cuando todo el polvo en suspensión decanta.....	80
Figura 40 .Imágenes MEB de los cupones de vidrio modificado ensayados con polvo de El Salvador a) A-1,1M-120, b) A-12M-180, c) B-12M-30, d) RS y e) ArAs.....	81

Figura 41. Análisis de imágenes MEB para cupones ensayados utilizando polvo de El Salvador PV: a) distribución del tamaño de las partículas (q3) y b) distribución por cuartiles (gráficos de caja). .....	82
Figura 42. Imágenes MEB de los cupones de vidrio modificado ensayados con polvo de María Elena a) A-1,1M-120, b) A-12M-180, c) B- 12M-30, d) RS y e) ArAs.....	83
Figura 43. Análisis de imágenes MEB para cupones ensayados utilizando polvo de María Elena PV: a) distribución del tamaño de las partículas (q3) y b) distribución por cuartiles (gráficos de caja). .....	84
Figura 44. Relación entre carga acumulada de polvo y pérdida de transmitancia para los vidrios ensayados utilizando polvo a) El Salvador PV y b) María Elena PV.....	88
Figura 45. Relación entre superficie cubierta y pérdida de transmitancia para los vidrios probados utilizando polvo de a) El Salvador PV y b) María Elena PV.....	89
Figura 46. Esquema de interacción entre partículas de polvo y la superficie de distintos cupones de vidrio a) cupón RS, b) cupón B-12M-30 y c) cupón ArAs.....	92



## **AGRADECIMIENTOS**

Al Solar Energy Research Center (SERC) FONDAP proyecto No. 15110019 y al proyecto CORFO/Atamos-TeC 17PTECES-75830 por el apoyo financiero para el desarrollo de esta tesis doctoral.

A la agencia nacional de investigación y desarrollo (ANID) por el apoyo financiero durante el programa de doctorado a través de la beca CONICYT-PCHA/ Doctorado Nacional/2018-21181765.

A las empresas Sun Power y Sun Edison por facilitar sus instalaciones para el desarrollo de esta tesis doctoral.

A mi familia, Valentina, Lorenzo, Morita, Zorbas, Sasha, Jessie y Naranja. Gracias por todo su apoyo y entereza, por siempre entregarme amor y paciencia. Por todas esas noches en que no los dejé dormir.

A mi tutora y profesora la Dra. Claudia Carrasco por siempre incitarme a dar más y desafiar mis capacidades. Por creer en mí y nunca dejar de insistir.

A quienes conocí en el transcurso de este largo camino, compañeros en su momento y hoy amigos P. Arriagada, J. Morales, V. Rodríguez y C. Carroza.

A mis amigos del laboratorio M. Maril, J. Nuñez, N. Cisternas, C. Lara, L. Pizarro y A. Elgueda. Gracias, por aguantarme y por siempre tener tiempo para un café o una conversación sin sentido.

Al Profesor Gerardo Cabello y a Cristian Suarez, por siempre tener una buena disposición cada vez que requerí de su ayuda y equipos.

A todos quienes fueron parte de este largo camino, a veces desconocemos los alcances de nuestro actuar. A veces sólo basta una sonrisa para cambiar el curso de un día.

A la vida, por darme la oportunidad de crecer académica y profesionalmente. Por regalarme todo lo que hoy soy y tengo.

## Resumen

En la última década, se ha observado un incremento a nivel mundial del consumo de energía debido principalmente al crecimiento de la población y al desarrollo urbano. Organizaciones internacionales y muchos países se han puesto como meta suplir esta demanda energética con el menor perjuicio ambiental posible. En este contexto, la energía solar ha concentrado la mayor atención, debido a la gran disponibilidad del recurso y la baja en los costos de los módulos fotovoltaicos. El principal problema que enfrenta la tecnología solar es la disminución de la eficiencia debido a factores externos como por ejemplo el ensuciamiento o “soiling”. Esto último dificulta la implementación de soluciones universales, haciendo necesario el estudio de sus respectivas características. Al igual que en el resto del mundo, Chile ha experimentado un gran desarrollo en la energía fotovoltaica. Sin embargo, el ensuciamiento sólo se ha abordado mediante algunas investigaciones que tratan la temática desde el punto de vista de sus efectos en la producción de energía, dejando de lado su estudio fenomenológico.

En esta tesis se realiza un estudio del fenómeno del ensuciamiento en el desierto de Atacama. Inicialmente, se identificaron sitios de interés para realizar ensayos de campo con la finalidad de estudiar el desempeño de distintos tipos de vidrios protectores de módulos solares y las características fisicoquímicas del ensuciamiento depositado en condiciones reales. Paralelamente, se registraron variables climáticas para evaluar su relación con las características del ensuciamiento en los sitios de interés. Posterior a esto se desarrolló una técnica de mitigación pasiva del ensuciamiento, la cual fue probada en condiciones de laboratorio, mostrando resultados prometedores. Los resultados mostraron que algunas características del ensuciamiento tienen una dependencia estacional, como por ejemplo la cantidad de polvo depositado. Adicionalmente se observó que existen periodos de tiempo donde las condiciones climáticas favorecen el depósito de polvo. La modificación superficial realizada a los vidrios protectores mediante decapado químico, mostró ser una técnica de mitigación eficaz y sencilla.

# **Capítulo 1 Introducción**

En la última década el consumo mundial de energía se ha incrementado en forma acelerada debido al constante aumento en la población y al crecimiento urbano [1]. Como ha sido reportado por la IEA (International Energy Agency) en el World Energy Outlook (WEO), para el 2040 se requerirán alrededor de 7200 GW<sub>p</sub> de potencia instalada para poder suplir la demanda mundial. Diferentes países y organizaciones mundiales han celebrado el “Acuerdo de París”, pactando alcanzar la carbono-neutralidad para el 2050. Así, en la última década se ha generado un crecimiento en el desarrollo y aprovechamiento de fuentes alternativas de energía, como son la energía solar, eólica, biomasa, geotérmica y marina. Actualmente, las energías renovables constituyen un gran porcentaje de la matriz energética mundial, entre las cuales destacan la hidro generación (34%), seguido por la generación eólica (30%) y la generación solar (18%) [1]. Este último tipo de energía renovable ha tenido un gran crecimiento a nivel mundial en los últimos años, generando 821 TWh el año 2021, debido principalmente a la considerable baja en los costos de producción de los módulos solares, convirtiéndola en la opción de menor costo para la generación de electricidad en la mayor parte del mundo. Como consecuencia, varios países han promovido el desarrollo de centrales solares para abastecer su consumo energético interno, a través de políticas que favorecen la inserción de este tipo de tecnologías en la matriz energética; ejemplo de esto es la instalación en China, Estados Unidos y Vietnam de alrededor de 134 GW<sub>p</sub> [2].

El desempeño de los dispositivos fotovoltaicos es constantemente afectado por factores ambientales externos, los cuales pueden disminuir la generación eléctrica [3]. Entre estos factores se encuentran la irradiación solar, la temperatura y el “soiling”. La sedimentación de contaminantes como polvo, mugre, escombros, tierra y material particulado sobre la superficie de los paneles solares se conoce como ensuciamiento o “soiling” [4]. La degradación del rendimiento eléctrico de un módulo fotovoltaico debido al soiling es usualmente cuantificada mediante la comparación de dos módulos, uno en condición sucia y otro en condición limpia. A la razón entre la energía DC producida por los dos dispositivos es conocida como “Soiling loss” (SL) [5]. Los valores de SL han sido ampliamente reportados en la literatura. Se ha encontrado que este valor tiende a ser estacional, dependiente del clima y de la ubicación geográfica [6]. En general, el ensuciamiento disminuye la generación de energía de los dispositivos fotovoltaicos (FV) a través de la pérdida de transmisión del vidrio protector, la variación de temperatura (puntos calientes) y el sombreado parcial entre las celdas FV [7, 8, 9]. Las partículas de polvo que componen el ensuciamiento pueden bloquear, reflejar y dispersar parte de la radiación solar incidente, disminuyendo la intensidad de la radiación que alcanza a los módulos FV [10, 11, 12, 13]. De acuerdo con estimaciones realizadas por Ilse et al. [14],

durante el 2018 el ensuciamiento provocó pérdidas equivalentes al 3-4% de la producción eléctrica mundial con pérdidas económicas de al menos 3.000 a 5.000 millones de euros. En el mismo estudio se estimó que las pérdidas asociadas al soiling podrían elevarse entre un 4 a 7 % de la producción eléctrica mundial para el año 2023, con pérdidas económicas de hasta 7.000 millones de euros por año.

El ensuciamiento es un fenómeno complejo y multivariable, resultado de la interacción de parámetros climáticos, factores propios de la instalación de los módulos fotovoltaicos y de las características fisicoquímicas del polvo que lo compone [10, 15, 16]. Para su estudio se han desarrollado diferentes enfoques, sin embargo, la mayoría de los estudios disponibles en la literatura abordan el ensuciamiento exclusivamente como la degradación del rendimiento de los módulos FV [3, 17]. Solo algunos estudios se dedican a cuantificar y caracterizar la masa de polvo acumulada. De hecho, existen pocos trabajos que hayan puesto su atención en la acumulación de polvo en los paneles FV en función de factores climáticos. Entre estos estudios destacan los artículos publicados por M. Jaszczur, et al. [18] y W. Javed, et al. [19]. M. Jaszczur y su grupo de investigación, los que estudiaron el ensuciamiento en áreas urbanas de Polonia, cuantificando el efecto del ensuciamiento en módulos fotovoltaicos de silicio policristalino con distintas inclinaciones durante 18 meses. Por su parte W. Javed, et al. cuantificaron la tasa de acumulación de polvo y realizaron una caracterización precisa del polvo acumulado en los módulos fotovoltaicos durante dos periodos en Doha, Qatar. De sus investigaciones se desprende que la tasa de acumulación de polvo depende directamente del tiempo de exposición y de parámetros climáticos, exhibiendo comportamientos estacionales y/o locales.

En Chile se han desarrollado diversos estudios del ensuciamiento [20, 21, 22, 23]. En el 2015, P. Ferrada, et al. [20], desarrollaron un estudio utilizando paneles solares con dos distintas tecnologías (silicio amorfo y silicio monocristalino), ubicados en la zona costera de la región de Antofagasta. En su trabajo, realizaron la medición del índice de desempeño de los paneles durante 16 meses. Sus resultados reportaron pérdidas de rendimiento, con valores entre el 0,04 al 0,13% por día. En 2019, P. Ferrada, et al. [21], desarrollaron una caracterización fisicoquímica del ensuciamiento presente sobre los módulos solares, en el desierto de Atacama. En su estudio, se analizaron muestras de cuatro distintos lugares del desierto de Atacama. De los distintos lugares, se recolectaron muestras de polvo desde el suelo y de la superficie de los módulos. En sus resultados, concluyen que cada lugar determina las características fisicoquímicas del polvo que se deposita sobre la superficie de los paneles. En su reciente artículo D. Olivares, et al. [22] estudió el efecto del ensuciamiento sobre el rendimiento de dispositivos fotovoltaicos en distintas condiciones de ensuciamiento. El ensuciamiento

fue estudiado en condiciones de sedimentación natural y artificial, observando un detrimento similar sobre el rendimiento de los módulos fotovoltaicos en ambas condiciones, alcanzando una reducción del rendimiento de un 66,5% para una carga de polvo de 1,37 mg/cm<sup>2</sup>. Como se demuestra en estas investigaciones, el estudio del ensuciamiento de los paneles solares se ha centrado solamente en la cuantificación del detrimento que genera el soiling y no en el estudio comprensible de las variables que influyen directamente en el proceso de depósito y acumulación de polvo en condiciones reales.

El polvo que se deposita sobre los módulos fotovoltaicos se adhiere a su superficie dificultando su eliminación. La cantidad de polvo que permanece es resultado de los mecanismos y fuerzas de adhesión presentes en la interacción partícula-vidrio; las fuerzas capilares, de Van der Waals y electroestáticas son las fuerzas de adhesión más comunes y estudiadas [24]. Jiang et al. encontraron que la fuerza electrostática es 1-2 órdenes de magnitud mayor que las otras fuerzas de adhesión en módulos fotovoltaicos sometidos a altos voltajes [25] Isaifan et al. reportaron que la fuerza capilar era el factor dominante en la adhesión de las partículas de polvo y la superficie de los módulos con altas humedades relativas [26], mientras que la fuerza de Van der Waals es la fuerza de adhesión dominante en condiciones secas. Por otro lado, Kazmerski et al. determinaron experimentalmente que la adhesión de partículas de polvo a superficies de vidrios protectores de módulos FV está relacionada con la química específica de la superficie del vidrio y de las partículas de polvo [27]. Otro factor modulador de las fuerzas de adhesión es la calidad superficial del vidrio, especialmente su rugosidad superficial. En la literatura existen trabajos que demuestran que variaciones en la rugosidad superficial permiten reducir las fuerzas de adhesión entre las partículas de polvo y el vidrio protector especialmente las fuerzas de Van der Waals [28] y las fuerzas de capilaridad [26]. Lo anterior demuestra la importancia de la calidad superficial del vidrio en el fenómeno de ensuciamiento.

El ensuciamiento es un proceso reversible, ya que puede eliminarse de forma artificial o natural. Para ello se desarrollan y utilizan estrategias de mitigación adecuadas para reducir la velocidad con la que se ensucian los módulos FV. Entre estas estrategias se encuentran los métodos activos y los métodos pasivos. Es importante mencionar que no existe un método de mitigación universal, ya que su aplicabilidad y efectividad cambian según las condiciones de cada localidad. Partiendo de este principio, la estrategia o método de mitigación del ensuciamiento debe desarrollarse en función de las condiciones de ensuciamiento, es decir, de las características propias de cada sistema fotovoltaico, del emplazamiento y de las propiedades fisicoquímicas de las partículas que componen el ensuciamiento. La complejidad y variabilidad intrínseca que

presenta el ensuciamiento hacen que la caracterización de estos tres tipos de variables sea esencial para el desarrollo de un método de mitigación efectivo y eficiente. Actualmente los métodos de mitigación más utilizados por la industria corresponden a los métodos activos. Sin embargo, presentan algunas desventajas como son la difícil y costosa implementación y operación. Asimismo, la utilización de agua dificulta y encarece su implementación, ya que usualmente utilizan agua desmineralizada. Por otro lado, los métodos pasivos han demostrado ser una alternativa efectiva y más económica que los métodos activos. Sin embargo, para que los métodos pasivos tengan el desempeño deseado es necesario conocer las condiciones de ensuciamiento a las cuales estarán expuestos los paneles FV.

De acuerdo con lo mostrado anteriormente, para el desarrollo de una técnica de mitigación adecuada para el desierto de Atacama, se requiere un exhaustivo estudio de las características fisicoquímicas del polvo, condiciones atmosféricas presentes en las localidades de interés y de la influencia de la condición superficial inicial del vidrio protector de los módulos FV.

## **1.2 Hipótesis y objetivos**

### **1.2.1 Hipótesis de trabajo**

La condición superficial de los vidrios usados en los paneles solares fotovoltaicos tiene gran incidencia en su nivel de ensuciamiento, por lo que es posible determinar la condición superficial que disminuye el ensuciamiento considerando las características fisicoquímicas del polvo de una localidad determinada.

### **1.2.2 Objetivos**

#### **Objetivo General**

Modificar superficialmente el vidrio solar de acuerdo con las condiciones de ensuciamiento donde esté instalado (características fisicoquímicas del polvo y humedad relativa ambiente), con el fin de disminuir el ensuciamiento de su superficie.

#### **Objetivos Específicos**

- 1 Determinar las características fisicoquímicas del ensuciamiento en polos de desarrollo de energía FV en Chile.
- 2 Determinar la relación entre las características fisicoquímicas del ensuciamiento con los factores climáticos presentes en las localidades analizadas.
- 3 Desarrollar un método de mitigación pasiva del ensuciamiento a través de la modificación superficial del vidrio solar.



## **Capítulo 2 Estudio de la relación entre las características fisicoquímicas del ensuciamiento, pérdida de transmitancia y condiciones climáticas**

## 2.1 Identificación de sitios de interés/polos de desarrollo

En Chile la energía fotovoltaica ha mostrado un importante crecimiento en la última década. La principal motivación de este auge es el alto precio de la energía eléctrica en Chile, además de los altos niveles de radiación que existen en la zona centro-norte del país y la baja en los costos de los módulos FV. Así, Chile es uno de los primeros países en donde la energía fotovoltaica se ha logrado integrar económicamente a la red de energía sin ningún tipo de subvención estatal. Según el reporte presentado por la comisión nacional de energía (CNE) para abril del presente año, existen alrededor de 45,5 GWp de generación fotovoltaica divididos en construcción (8,08%), operación (11%), en pruebas (0,01%), aprobados (68,78 %) y en calificación ambiental (12,09%). La energía fotovoltaica alcanza un 17,25% de un total de 29,38 GWp de la participación en la matriz eléctrica nacional [29].

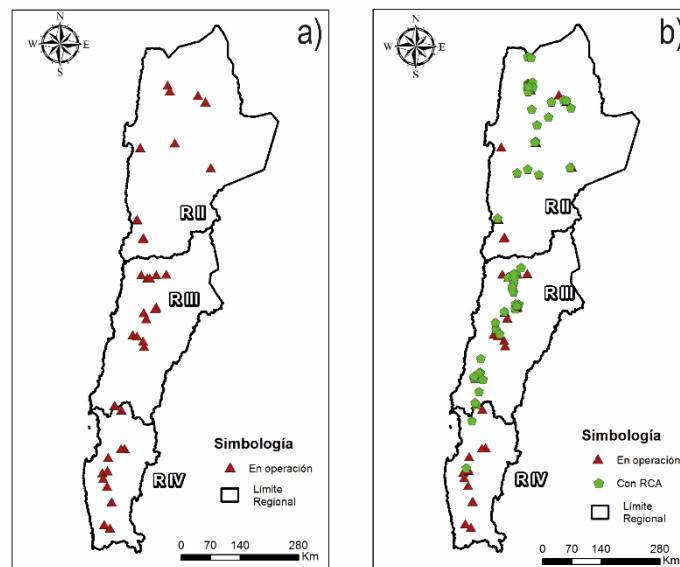


Figura 1. Distribución de plantas FV en la zona norte de Chile: a) Plantas FV en operación y b) Plantas FV con RCA aprobada.

La mayoría de las centrales solares FV están ubicadas en la región norte del país, específicamente en el Desierto de Atacama. El desierto de Atacama es el desierto no polar más árido del mundo. Se extiende desde la región de Arica en el norte hasta la región de Coquimbo en el sur, con una longitud de 1600 km y un área de 105.000 km<sup>2</sup>. La radiación media en el desierto de Atacama es de 2500 kWh/m<sup>2</sup>/año, con una media de 4000 horas de sol anuales y una precipitación media de sólo 2 mm [30]. Debido a estas características, en Chile, la mayoría de los parques fotovoltaicos se instalan en la zona que ocupa este desierto, principalmente en la Región de Antofagasta. En la Figura 1 a), se muestran las plantas fotovoltaicas en operación mientras que en la Figura 1 b) se muestran las plantas fotovoltaicas con RCA aprobada.

se muestran las plantas fotovoltaicas con resolución de calificación ambiental aprobada. En particular, destacan dos localidades en el desierto de Atacama para la instalación de plantas de gran potencia [31]:

- María Elena, situada a 200 km al noreste de Antofagasta, donde actualmente hay dos parques con una capacidad total de 206 MWp. Existen 13 parques con Resolución de Calificación Ambiental (RCA) aprobada para su instalación en esta zona, con una capacidad total de 1551 MWp. Siete de estos parques consideran una capacidad superior a los 100 MWp, destacando el proyecto Alfa Solar con 280 MWp.
- Diego de Almagro, ubicado a 150 km al norte de Copiapó, con una potencia instalada de 134 MWp en cuatro parques fotovoltaicos. La proyección para esta zona es la instalación de 10 nuevos parques FV con una capacidad total de 875 MWp. Tres de los parques proyectados consideran una potencia superior a los 100 MW, destacando el proyecto Sol Centro con 237 MWp.

Una vez identificados los polos de desarrollo, se realizó un catastro de las plantas fotovoltaicas operativas en dichas localidades, logrando establecer colaboraciones con las empresas Sun Power y Sun Edison. La empresa Sun Power es la propietaria de la planta fotovoltaica El Salvador PV emplazada en 26°18'47.0"S, 69°52'03.0"W, ubicada en la comuna de Diego de Almagro, región de Atacama. La empresa Sun Edison es propietaria de la planta fotovoltaica María Elena PV ubicada en 22°23'52.0"S, 69°57'66.0"W en la comuna de María Elena, región de Antofagasta. En la Figura 2 se muestra la ubicación de las plantas fotovoltaicas. Además, se indica el clima predominante en estas zonas, el cual corresponde a desiertos áridos y fríos (BWk), de acuerdo con la clasificación climática de Köppen [32].

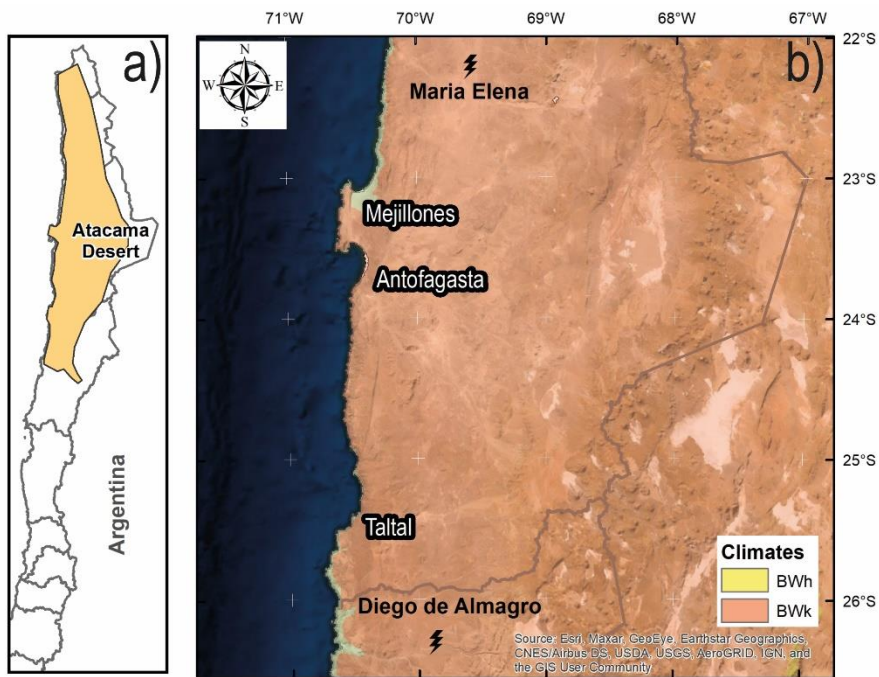


Figura 2. Polos de desarrollo de proyectos fotovoltaicos: a) Extensión geográfica del Desierto de Atacama y b) ubicación y clima predominante en María Elena PV y El Salvador PV. [31]

## 2.1.2 Ensayos preliminares

En una primera instancia, se recolectaron muestras del suelo aledaño a los módulos FV en ambas plantas fotovoltaicas. Se realizó una caracterización mineralógica y morfológica mediante difracción de rayos X (DRX) y microscopía electrónica de barrido (MEB), respectivamente. Adicionalmente se caracterizó la distribución de tamaño de partículas mediante espectroscopia de difracción láser (LD).

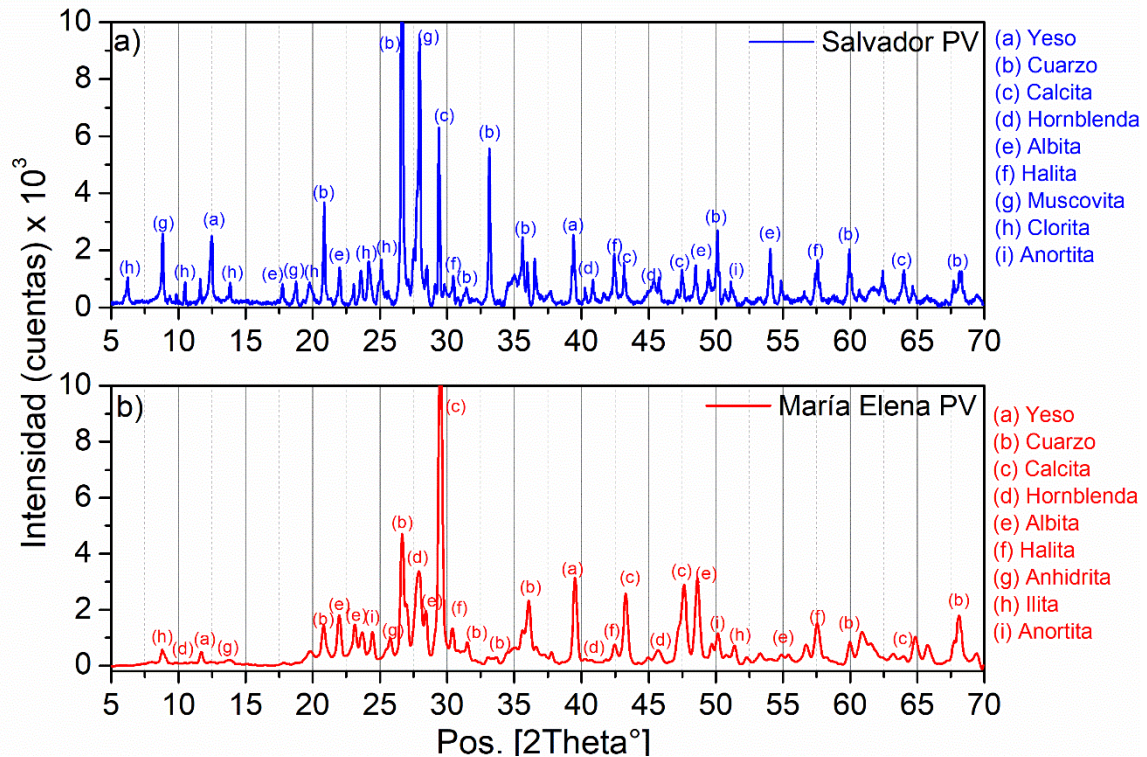


Figura 3. Patrones de difracción de rayos X para muestras de suelo recolectadas en a) Salvador PV y b) María Elena PV.

En la Figura 3 se muestran los patrones de difracción de rayos X de ambas muestras de suelo. De la Figura 3a) se observan picos de alta intensidad para las fases mineralógicas de moscovita ( $KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$ ), clorita ( $(Mg, Fe^{2+})_5Al(Si_3Al)O_{10}(OH)_8(H_2O)_2$ ), cuarzo ( $SiO_2$ ) y calcita ( $CaCO_3$ ). También se observan otros picos de menor intensidad relacionados con fases mineralógicas como la albita ( $Na(AlSi_3O_8)$ ), halita ( $NaCl$ ), yeso ( $Ca(SO_4)$ ), hornblenda ( $Ca_2(Mg, Fe, Al)_5(Al, Si)_8O_{22}(OH)_2$ ) y anortita ( $CaAl_2Si_2O_8$ ). Para el caso del suelo de María Elena PV (Figura 3b) se identificaron fases mineralógicas asociadas a picos de alta intensidad como son albita, calcita, cuarzo y hornblenda. Además, se identificaron fases mineralógicas asociadas a picos de baja intensidad como el yeso, ilita ( $(K, H_3O)(Al, Mg, Fe)_2(Si, Al)_4O_{10}$ ), anortita, anhidrita ( $Ca(SO_4)$ ) y halita. Ambas muestras de suelo están compuestas por fases mineralógicas similares, sin embargo, se pueden observar diferencias en la intensidad relativa de los

picos de difracción, lo que puede ser atribuido a la diferencia en la cantidad de cada fase en las muestras analizadas.

La composición mineralógica identificada en las muestras de suelo recolectado en El Salvador PV y María Elena PV coincide con la composición mineralógica típica del suelo del Desierto de Atacama. Esta composición está caracterizada por su salinidad debido a la presencia de cristales de sulfatos, cloruros y óxidos [33]. Se debe notar que la cantidad de cada mineral varía dependiendo de la localización [34, 35], esto fue demostrado en el trabajo de Ferrada et al. [21], donde se caracterizaron muestras de suelo de distintas instalaciones fotovoltaicas.

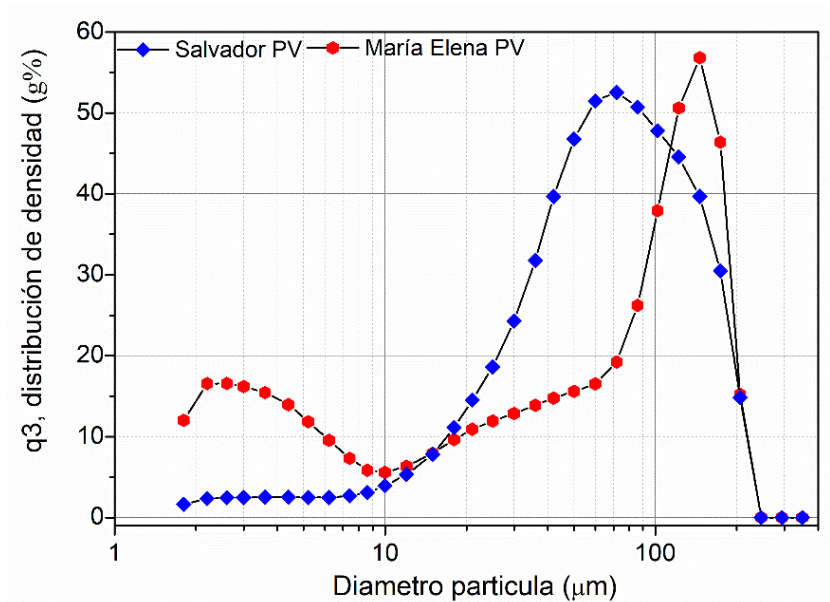


Figura 4. Distribución de tamaño de partícula de las muestras de suelo analizadas.

En la Figura 4 se muestran las distribuciones de tamaño de partículas de las muestras de suelo de ambos emplazamientos. De la Figura 4 es posible observar una notable diferencia entre ambas distribuciones, destacando el porcentaje de partículas finas (con un tamaño menor a 10 μm). Esto último corresponde a un 6,45% y 34% para Salvador PV y María Elena PV, respectivamente. Además, se puede observar que el suelo de María Elena PV presenta un 30% de partículas de mayor tamaño (con un diámetro entre 100 y 200 μm), mientras que Salvador PV sólo un 23% de las partículas pertenece a este segmento.

En la Figura 5 se muestran imágenes MEB de las muestras de suelo recolectadas en El Salvador PV y María Elena PV. En la Figura 5a) se muestra la imagen MEB correspondiente al suelo de Salvador PV. De esta Figura es posible observar la presencia de al menos dos grupos de partículas con diferentes morfologías y tamaño. Partículas con morfología angular o poliedrica de tamaño mayor a 50  $\mu\text{m}$  y partículas sub-redondeadas de tamaño inferior a 50  $\mu\text{m}$  (ver inserto en Figura 5a). En el caso del suelo de María Elena PV (Figura 5b) se pueden observar partículas redondeadas de gran tamaño (superior a 50  $\mu\text{m}$ ) y partículas angulares de tamaño menor a 50  $\mu\text{m}$  (ver inserto Figura 5b).

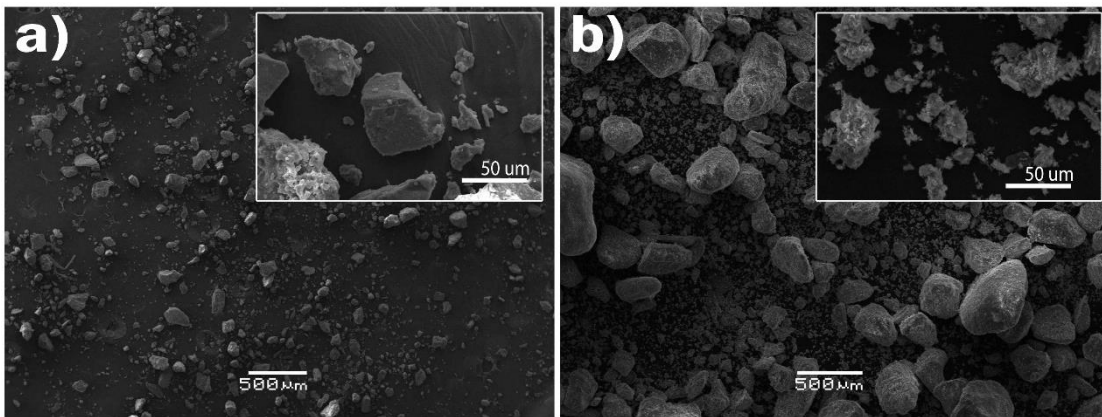


Figura 5. Imágenes MEB de las muestras de suelo recolectadas en a) Salvador PV y b) María Elena PV.

Cabe destacar que las partículas de polvo pueden ser transportadas por distintos medios, principalmente el viento y el agua. Las partículas de forma angular suelen ser transportadas por la acción del viento y la gravedad, recorriendo distancias cortas; mientras que las partículas con forma esferoidal son transportadas por la acción del viento o del agua a distancias más largas [36, 37, 38]. Las partículas de forma redondeada o esferoidal, debido a su forma, son inestables y más susceptibles a la meteorización estructural, como la consolidación, la cementación, la lixiviación y el intercambio de iones [38]. En el caso de las partículas angulares, algunos estudios reportaron [39, 40] que son susceptibles de ser removidas por la acción del viento debido a su gran tamaño y pequeña área de contacto (bajas fuerzas de adhesión).

De las Figuras 3, 4 y 5 se pueden observar diferencias significativas en la composición mineralógica, tamaño de partículas y morfología entre las muestras de suelo recolectadas en las plantas fotovoltaicas Salvador PV y María Elena PV. Esto sugiere que el ensuciamiento en ambas localidades debe ser notoriamente diferente. Esto último se sustenta en lo mostrado en los trabajos recopilatorios de Ahmed, et. al [10] y Mani y Pillai [12]. De ambos artículos se desprende que las características fisicoquímicas de las partículas de polvo determinan en gran parte los mecanismos por los cuales se forma el ensuciamiento, como también el efecto que tiene este sobre el desempeño de los módulos FV.

Para determinar la diferencia en las condiciones de ensuciamiento en estos dos polos de desarrollo, se llevaron a cabo dos campañas de muestreo. Las campañas se realizaron durante el verano (1 de febrero al 22 de marzo) y durante el invierno (14 de agosto al 2 de octubre). En ambas campañas cupones de vidrios low-iron (LI) de la empresa NSG Co., en la sección de Anexos se agregaron los datasheets y el brochure de estos vidrios. Estos cupones fueron expuestos a las condiciones atmosféricas presentes en estas plantas fotovoltaicas. Se utilizaron cupones con dimensiones de 10 x 10 cm<sup>2</sup> y 3 mm de espesor. Durante cada campaña se expusieron 8 cupones de vidrio LI con recubrimiento antirreflejo-antisoiling (ArAs) y 8 cupones de vidrio LI sin recubrir. Los cupones de vidrio fueron montados en una estructura de soporte, orientada hacia el norte y con una inclinación de 20° (ver Figura 6). Cada campaña fue realizada en dos pasos: el primero consistió en la exposición de todos los cupones a las condiciones atmosféricas de cada emplazamiento durante 28 días. El segundo correspondió a la recolección semanal de 2 cupones por cada tipo de vidrio, es decir, los cupones fueron recolectados después de 28, 35, 42 y 49 días de exposición.





Figura 6. Cupones de vidrio montados en la estructura de soporte en El Salvador PV.

## 2.2 Zona de estudio N°1: El Salvador PV

### 2.2.1 Caracterización climatológica

Para comprender a cabalidad como ocurre el proceso del ensuciamiento se decidió tomar registro de las condiciones climáticas presentes. Durante ambas campañas se midieron parámetros atmosféricos como la velocidad de viento (WS), dirección de viento (WD), temperatura ( $T^{\circ}$ ) y humedad relativa (RH). Los instrumentos utilizados para este propósito se describen en el ANEXO 1. Los datos de concentración de partículas en el aire (PM2.5) se estimaron a partir de las recuperaciones de la profundidad óptica del satélite (AOD). Los datos se promediaron diariamente para la región de interés a fin de obtener series temporales diarias para el período de estudio. Cabe mencionar que por razones contractuales con la empresa Sun Edison no se obtuvieron los datos climáticos correspondientes a las campañas realizadas en María Elena PV, por lo cual, sólo se trabajó con la información disponible.

En las Figuras 7a) y 7b) se muestran las condiciones climáticas medidas en la planta fotovoltaica El Salvador PV para las campañas de verano e invierno, respectivamente. En la Tabla 1, se muestran los valores promedios de los parámetros atmosféricos. De la Figura 7 y la Tabla 1 es posible observar diferencias notorias en las dos campañas analizadas. De los datos obtenidos se puede hacer el siguiente análisis: (i) La media del WS y su variabilidad disminuyen en el periodo invernal, (ii) la HR media aumenta en verano, pero es menos variable que en invierno, (iii) la temperatura muestra el mismo comportamiento que la HR, y (iv) los valores de PM2.5 fueron más variables y altos durante el verano que durante el invierno, concordante con los datos de viento.

Tabla 1. Valores promedios de parámetros atmosféricos en El Salvador PV.

Parámetro	Campaña verano	D.S.	Campaña invierno	D.S.
Velocidad de viento ( $\text{ms}^{-1}$ , WS)	1.95	$\pm 1.78$	1.87	$\pm 1.56$
Dirección predominante de viento (WD)	Noreste	-	Sureste	-
Humedad relativa (% , HR)	39.3	$\pm 16.8$	29.6	$\pm 23.7$
Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	21.0	$\pm 4.9$	16.4	$\pm 6.1$
Concentración material particulado, PM2.5 ( $\mu\text{g m}^{-3}$ )	5.28	$\pm 1.12$	4.19	$\pm 0.82$

\*D.S.: Desviación estándar

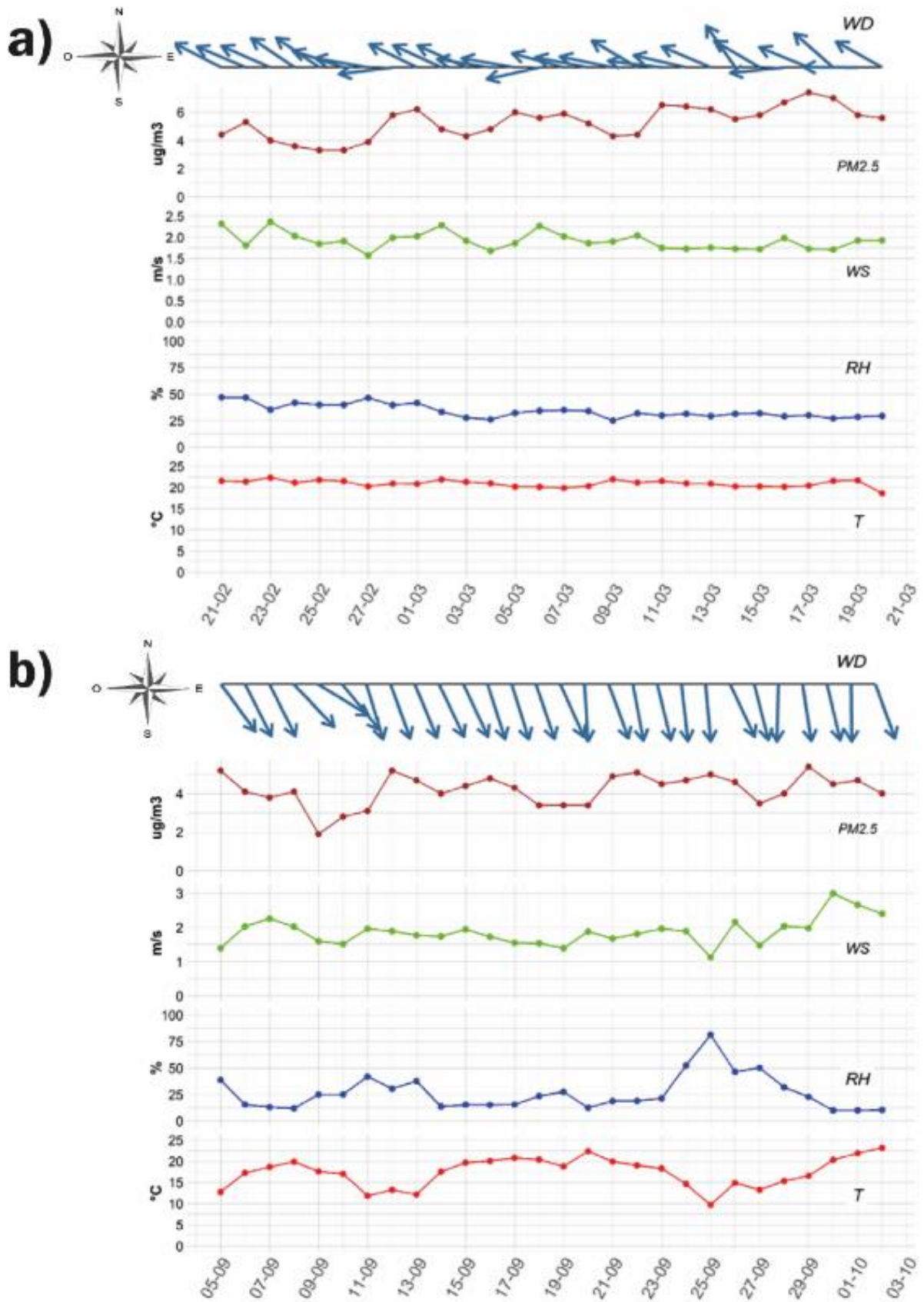


Figura 7. Parámetros climáticos promedio registrados en El Salvador PV durante la segunda etapa de las campañas de a) verano y b) invierno.

## 2.2.2 Análisis gravimétrico

Los cupones de vidrio expuestos fueron sometidos a diferentes métodos de caracterización. Primero, se calculó la carga acumulativa de polvo (CLD, cumulative load of dust) determinando la diferencia de peso de los cupones de vidrio antes y después de ser expuestos. La CLD de los cupones de vidrio se obtuvo gravimétricamente utilizando una balanza analítica PCE-ABI 220. Para obtener la carga por unidad de superficie, la carga de polvo medida se dividió por la superficie del cupón de la siguiente manera [41]:

$$CLD = \frac{(masa_{despues} - masa_{antes})}{Area\ superficial} \quad (1)$$

La carga acumulativa de polvo semanal (CLD) de los vidrios expuestos en la planta fotovoltaica Salvador PV durante las campañas de verano e invierno se muestran en la Figura 8. De esta Figura se observa una mayor acumulación de polvo para ambos tipos de vidrio durante la campaña de verano. Para los vidrios LI (Figura 8a) se observa que hacia el final del tiempo de exposición la carga acumulativa de polvo alcanzó valores de 7,2 y 5,8 g·m<sup>-2</sup> para los periodos de verano e invierno, respectivamente. En el caso de los vidrios ArAs (Figura 8b) la carga de polvo alcanzó valores de 14,1 y 9,8 g·m<sup>-2</sup>, para las campañas de verano e invierno, respectivamente. Es posible observar que los cupones ArAs acumularon una mayor cantidad de polvo en su superficie durante ambas campañas, indicando que el recubrimiento antisoiling, en esta localidad, no cumple su función.

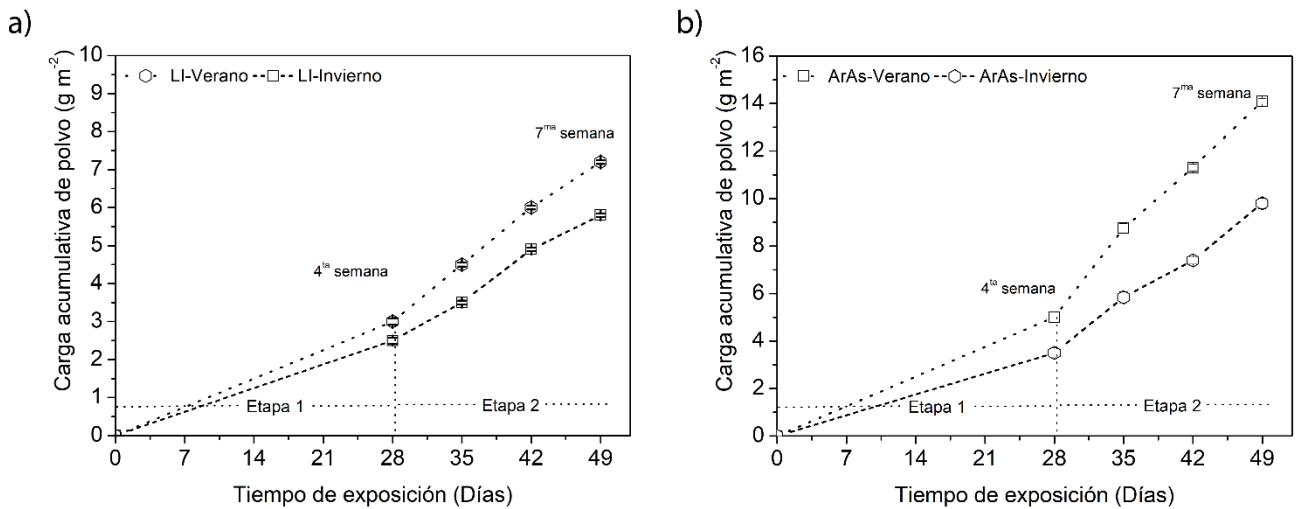


Figura 8. Carga acumulativa de polvo para los vidrios LI y ArAs expuestos durante las campañas de (a) verano e (b) invierno en El Salvador PV.

Para ambos tipos de cupones se observó una diferencia notoria entre la carga acumulativa durante la campaña de verano e invierno. Esta diferencia puede ser atribuida a diferencias en las condiciones climáticas entre ambos períodos. Esto ha sido reportado por estudios similares, por ejemplo, en el estudio realizado por Javed et al. [19] realizado en una planta solar ubicada en Doha, Qatar. Sus resultados muestran una mayor CLD durante el periodo de invierno, atribuido a mayores niveles de humedad relativa y bajas velocidades de viento. En efecto, investigadores afirman que la acumulación de polvo en los módulos fotovoltaicos depende principalmente de estas dos variables ambientales críticas [11, 6, 40, 42]. En particular Ilse y Yu-Ta Chen [4, 42], han reportado que estos parámetros críticos controlan el mecanismo de sedimentación y remoción de partículas de polvo, especialmente en zonas áridas.

Es importante notar, que, para el caso de El Salvador, la tendencia mostrada por Javed et al. se observa para el periodo de verano. En general, los desiertos poseen temporadas secas, la gran parte del año, y temporadas húmedas. Durante la temporada húmeda se presentan variaciones resultado de patrones climáticos regionales, como la influencia de monzones o corrientes oceánicas. En particular, en Doha esta temporada húmeda ocurre durante el invierno (entre diciembre y febrero) mientras que en el desierto de Atacama esta se presenta durante el verano (entre diciembre y marzo).

Para visualizar las diferencias entre las temporadas seca y húmedas presentes en El Salvador PV, se realizó un análisis estadístico descriptivo para estas variables durante la segunda etapa de cada campaña de recolección. Los índices estadísticos como la media, el mínimo, el máximo, el percentil 75 (P75), el percentil 50 (P50) y el percentil 25 (P25) para cada semana se muestran en gráficos de caja en la Figura 9. De esta Figura se observa que durante la campaña de verano la HR disminuye gradualmente, el P75 varía del 60% en la semana 1 al 40% en la semana 4. Para la misma campaña, la WS varió ligeramente, mostrando un P75 inferior a 4 ms<sup>-1</sup>. Para la campaña de invierno, la HR varió considerablemente en las semanas 2 y 3, mostrando un P75 inferior al 35%. En el caso de la WS, el P75 se comportó de forma similar al verano. Sin embargo, el comportamiento de los valores máximos es diferente, alcanzando valores de hasta 13 ms<sup>-1</sup> durante el periodo invernal. Notar que, en verano, los valores máximos alcanzaron hasta 8 ms<sup>-1</sup>. En síntesis, es evidente notar la diferencia en el comportamiento de la humedad relativa entre las dos campañas. Sin embargo, para las velocidades del viento, esta diferencia sólo se observa para los valores máximos de cada campaña.

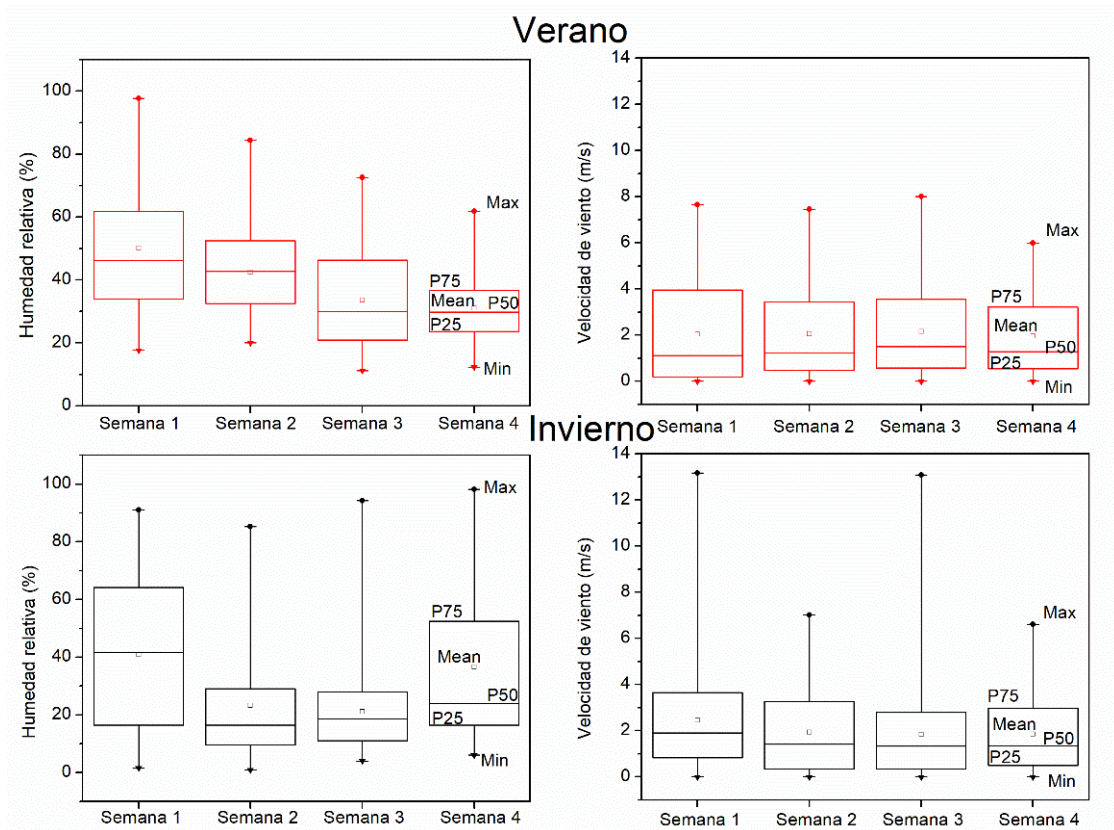


Figura 9. Gráficos de caja para humedad relativa y velocidad de viento durante la segunda etapa de las campañas de verano e invierno.

Volviendo a la carga acumulativa de polvo, para El Salvador PV se observaron niveles mayores de RH y velocidades de viento bajas durante la campaña de verano en comparación con el periodo de invierno. Esto último explica el comportamiento de la carga acumulativa de polvo en ambas campañas. Adicionalmente, al comparar el comportamiento de la carga acumulativa de polvo en los cupones LI y ArAs se nota que estos últimos mostraron mayores cargas de polvo acumulado, lo que puede ser atribuible a parámetros propios de la localidad, principalmente características del polvo presente [43]. Para dilucidar esto se realizó un estudio de las propiedades fisicoquímicas del polvo presente en Salvador PV, cuyos resultados se muestran a continuación.

## 2.2.3 Identificación mineralógica del polvo

Para determinar la composición mineralógica y el origen del polvo depositado se hizo un análisis de difracción de rayos X (DRX). El análisis se efectuó a muestras de polvo recolectado desde cupones de vidrio con 28 días de exposición en ambos periodos. Adicionalmente se cuantificaron las fases presentes, esto se realizó a partir de los refinamientos de Rietveld de los patrones de difracción de rayos X utilizando el software MAUD (Materials Analysis Using Diffraction) [44]. Cabe destacar que no se evidenciaron diferencias en las especies mineralógicas presentes en el ensuciamiento de los cupones LI y ArAs, por lo cual solo se muestran los resultados correspondientes a los cupones LI. En la Figura 10 se muestran los resultados del análisis de DRX realizado para las muestras obtenidas en El Salvador PV.

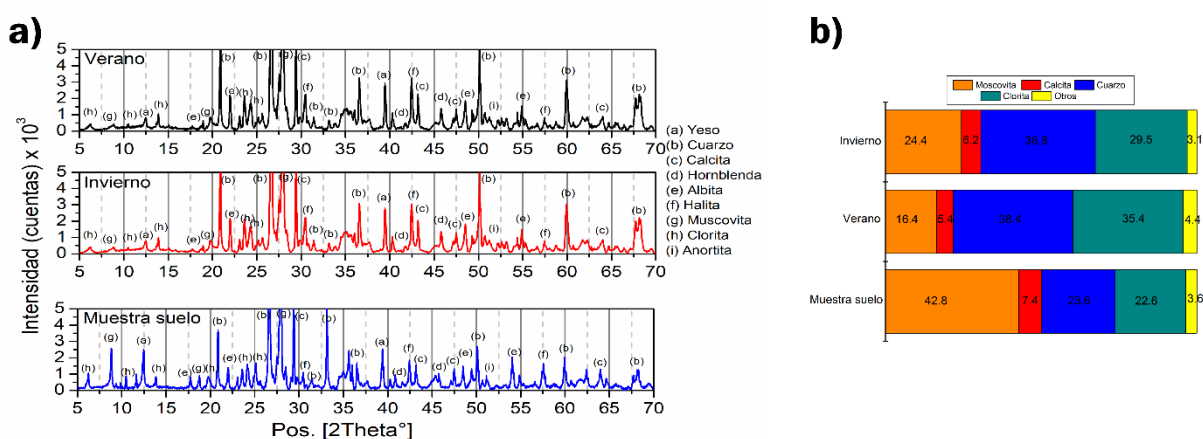


Figura 10. Análisis de difracción de rayos X de muestras de polvo y de suelo en El Salvador PV: a) difractograma y b) cuantificación de fases mineralógicas. La denominación "otros" corresponde a halita, yeso, albita, anortita y hornblenda.

En la Figura 10a) se muestran los patrones de difracción para los especímenes de ambas campañas. En esta Figura se observa que los ejemplares analizados presentan las mismas fases mineralógicas que la muestra de suelo analizada anteriormente. Sin embargo, se pueden observar diferencias en la intensidad relativa de los picos de difracción, lo que puede ser atribuido a la diferencia en las cantidades de cada fase en las muestras de polvo. En la Figura 10b) se presentan los resultados del análisis Rietveld para ambas muestras. El resultado indica que las muestras de polvo depositado están compuestas principalmente por moscovita, cuarzo, clorita y calcita. Las muestras de verano e invierno poseen similares porcentajes de las fases encontradas, mientras que la muestra de suelo está compuesta mayoritariamente por moscovita y partes iguales de cuarzo y clorita.



La determinación de la composición mineralógica del ensuciamiento permite conocer su susceptibilidad a ser meteorizado. La meteorización o *weathering* describe los efectos combinados de todos los procesos físicos y químicos que descomponen o disuelven las rocas y minerales [45]. Minerales como el yeso, calcita y halita son susceptibles a ser disueltos, ya que corresponden a minerales higroscópicos. Jackson, et al. [46], presentaron una secuencia de meteorización ampliamente aceptada. Esta secuencia está definida por 13 niveles, el primer nivel es donde se encuentran los minerales más propensos a ser meteorizados y en el nivel 13 los menos propensos. En esta escala, minerales como el yeso o la halita se encuentran en el primer nivel, mientras que la calcita está ubicada en el segundo nivel. La hornblenda se encuentra en el tercer nivel, mientras la clorita en el cuarto. En el caso de la albita y la anortita, estas están en el quinto nivel. Finalmente, el cuarzo y la moscovita se encuentran en los niveles seis y siete, respectivamente.

Es importante mencionar que los minerales, especialmente los higroscópicos, son susceptibles a procesos como la cementación, apelmazamiento o *caking* o el envejecimiento capilar [47, 48]. El proceso de cementación implica la disolución y precipitación del material depositado, formando enlaces de puente sólido entre las partículas y la superficie del vidrio. El *caking* o apelmazamiento de las partículas de polvo se debe a la reorganización, aglomeración y compactación de la capa de polvo con partículas pequeñas que llenan los espacios entre las partículas más grandes. Por último, el envejecimiento capilar describe el aumento de la adhesión causado por las fuerzas capilares que presionan la partícula contra la superficie, aumentando así el área de contacto. Todos estos procesos pueden ocurrir simultáneamente, aumentando significativamente la adhesión de las partículas y son el resultado de la variación de la humedad relativa y consiguiente formación de rocío [42].

## 2.2.4 Caracterización física del ensuciamiento

Se analizaron las superficies de los vidrios expuestos durante ambas campañas utilizando un microscopio electrónico de barrido (MEB) JEOL JSM-6380. Para conocer la distribución del tamaño de partícula del polvo las imágenes MEB se analizaron mediante el software Image J. En el análisis de imágenes se utilizó una metodología similar a la presentada por Ilse, et al. [49]. Estos autores en su trabajo utilizaron el software Image J para contar las partículas y medir su área. El área de cada partícula se convirtió en un diámetro equivalente, asumiendo una partícula esférica de la misma área proyectada. Después, las partículas se clasificaron respecto a su tamaño, obteniendo una distribución de tamaño de partícula para cada muestra. Los resultados del análisis de las imágenes MEB se muestran en curvas de densidad  $q^3$ , que corresponden a la distribución de frecuencia del tamaño de las partículas. Los índices estadísticos como la media, la mediana, el mínimo, el percentil 75 y el percentil 25 de la distribución del tamaño de las partículas para cada campaña y tipo de cupón se muestran en un gráfico de caja ubicado al lado derecho de las curvas  $q^3$ .

En general, en el análisis MEB, el cambio de color de la superficie del vidrio puede atribuirse a diferentes características de la superficie. Las áreas brillantes corresponden a partículas de polvo, mientras las áreas grises claro pueden asignarse a una fina capa de partículas más pequeñas distribuidas homogéneamente en la superficie. Finalmente, las zonas grises oscuro indican la superficie de vidrio desnuda [50].

La Figura 11 presenta áreas representativas de los cupones LI analizados para la campaña de verano. En las muestras expuestas durante 28 y 35 días se observaron grandes partículas de forma angular (hexágonos rojos) y partículas más pequeñas de forma redondeada o esferoidal (indicadas con flechas rojas). Para tiempos de exposición más prolongados (42 y 49 días), las partículas de polvo de forma angular tienden a ser cubiertas por partículas más pequeñas formando aglomerados de distintos tamaños. En general, para la campaña de verano, se puede observar que el patrón de ensuciamiento corresponde a una superficie homogéneamente cubierta por partículas de polvo (Figura 11), evidenciado por la presencia de un fondo gris claro en todas las imágenes MEB de los cupones LI.

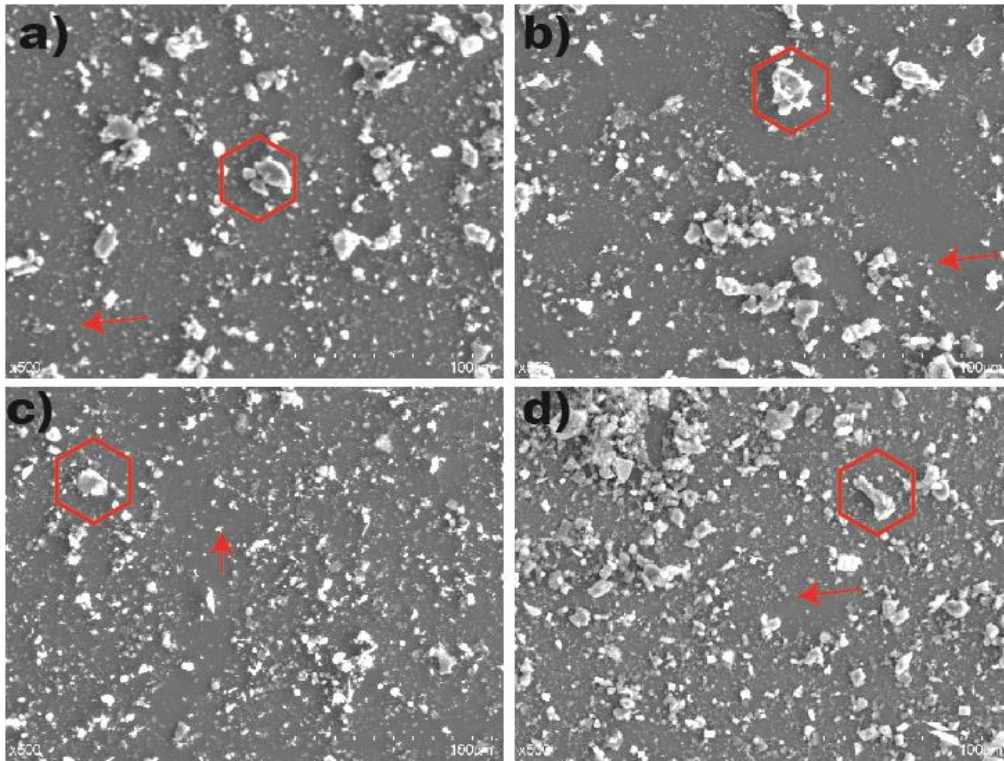


Figura 11. Imágenes MEB vidrio LI expuestos durante la campaña de verano en El Salvador PV, (a) 28, (b) 35, (c) 42 y (d) 49 días de exposición.

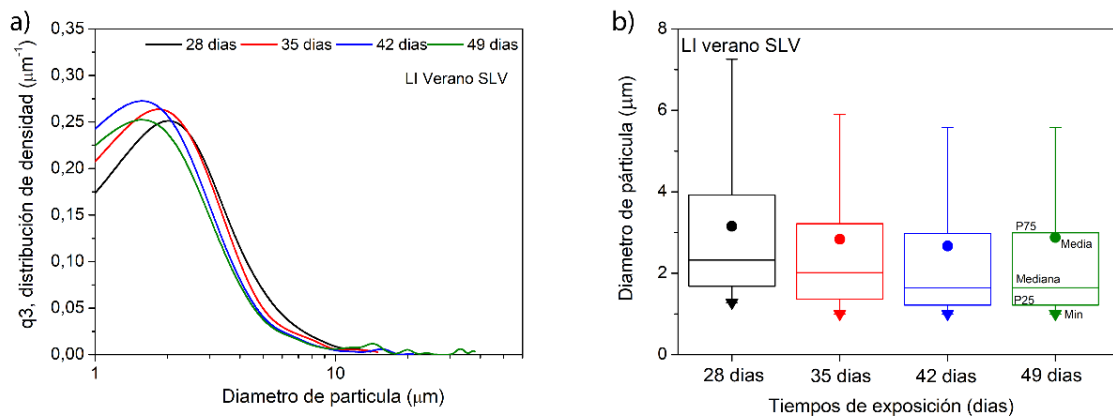


Figura 12. Análisis imágenes MEB para los cupones LI expuestos en El Salvador PV durante la campaña de verano: a) distribución de tamaño de partículas (q3) y b) distribución por cuartiles (gráficos de caja).

La Figura 12 presenta el análisis de las imágenes MEB para los cupones LI expuestos en El Salvador PV durante la campaña de verano. De la Figura 12a) es posible observar que todas las curvas de distribución son unimodales. La Figura 12b) muestra los gráficos de caja para todos los cupones LI analizados durante la campaña estival. De esta Figura se observa que el valor medio del tamaño de las partículas disminuye a medida que aumenta el tiempo de exposición, esta tendencia cambia para el cupón expuesto durante 49 días. La literatura indica que conforme aumenta el tiempo de exposición la media de los tamaños de partículas disminuye. Esta disparidad en el comportamiento reportado puede ser atribuido al vasto número de aglomerados de polvo encontrados en la superficie de los cupones analizados (ver Figura 11). Sin embargo, el índice estadístico que efectivamente presenta el comportamiento descrito en la literatura es la mediana.

La Figura 13 muestra las imágenes MEB de la superficie de los cupones LI expuestos durante de la campaña de invierno. Se observa que el patrón de ensuciamiento presente en las muestras comparte similitudes con lo observado en la campaña de verano como la presencia de partículas angulares, partículas esferoidales y aglomerados de estas partículas. Sin embargo, se pueden observar diferencias como grandes regiones de vidrio desnudo (zonas grises oscuras). Sólo para la muestra con 49 días de exposición es posible observar una superficie cubierta por una fina capa de partículas de polvo (véase el inserto de la Figura 13d). De la Figura 14 se observa que todos los cupones analizados poseen curvas de distribución de tamaño unimodales. Al igual que en la campaña de verano, se observó que el valor medio del tamaño de las partículas aumenta ligeramente a medida que aumenta el tiempo de exposición.

En general, todas las muestras LI mostraron un tamaño medio que osciló entre 3 y 2,5  $\mu\text{m}$  para la campaña de verano, mientras que para la campaña de invierno el tamaño medio estuvo entre 2,1 y 2,4  $\mu\text{m}$ . Adicionalmente los cupones LI presentaron una baja dispersión, con desviaciones estándar cercanas a 2  $\mu\text{m}$ . Para las muestras expuestas durante 49 días, se observó un ligero aumento de la desviación estándar, obteniendo valores de 6,6  $\mu\text{m}$  y 2,9  $\mu\text{m}$  para las campañas de verano e invierno, respectivamente. Es importante notar que, la mayor variabilidad durante el periodo de verano se atribuye a la mayor presencia de aglomerados de polvo en la superficie de estos cupones. Esto se debe a que, durante la campaña de verano, las condiciones climáticas fueron favorables (niveles mayores de RH y velocidades de viento bajas) para la ocurrencia de los procesos de cementación o de apelmazamiento de las partículas de polvo. Es decir, la formación de la capa fina de partículas de polvo y el crecimiento de los aglomerados.

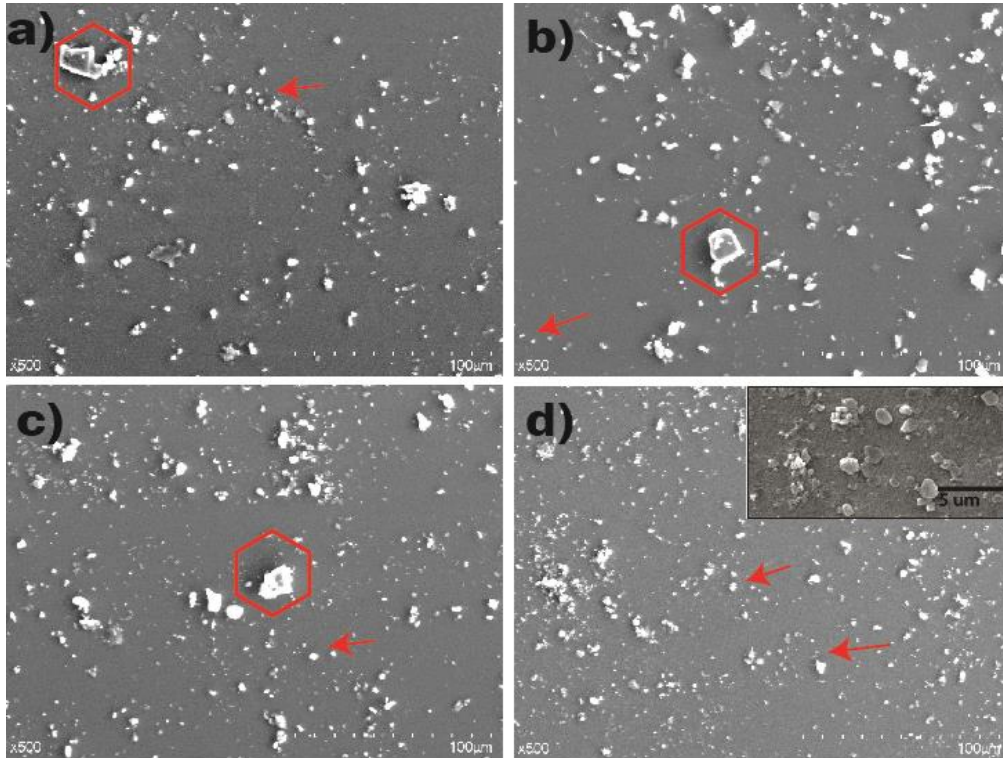


Figura 13. Imágenes MEB vidrio LI expuestos durante la campaña de invierno en El Salvador PV, (a) 28, (b) 35, (c) 42 y (d) 49 días de exposición.

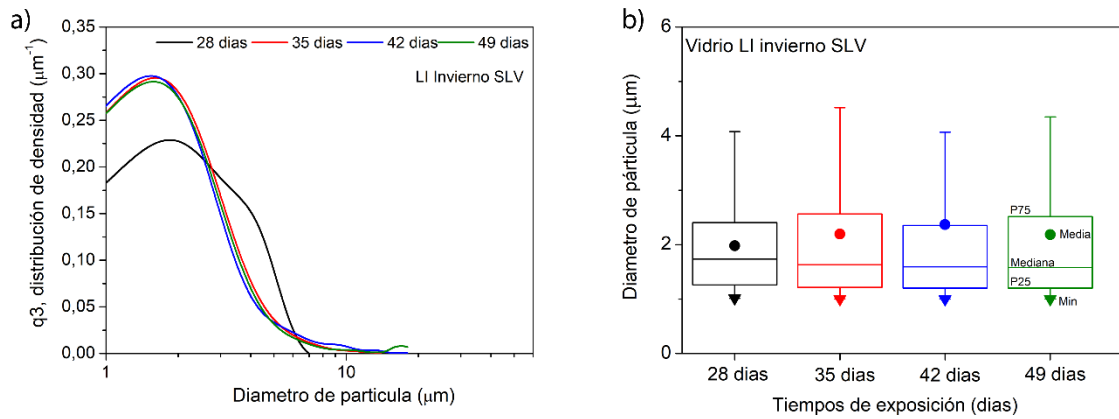


Figura 14. Análisis de imágenes MEB para los cupones LI expuestos en El Salvador PV durante la campaña de invierno: a) distribución de tamaño de partículas (q3) y b) distribución por cuartiles (gráficos de caja).

En la Figura 15, se muestran imágenes MEB de los cupones ArAs expuestos durante la campaña de verano en El Salvador PV. En las muestras expuestas durante 28 y 35 días (Figuras 15b y 15c) es posible observar la presencia de partículas angulares con tamaños superiores a  $10\ \mu\text{m}$  (flechas negras). También se observa la presencia de partículas pequeñas ( $< 10\ \mu\text{m}$ ) con forma redondeada o esférica distribuidas en toda la superficie. En las muestras con tiempo de exposición superior a 35 días se puede observar la presencia de aglomerados de partículas de polvo (indicados con círculos rojos y flechas verdes). Estos aglomerados están compuestos por los dos tipos de partículas anteriormente mencionadas.

La Figura 16 corresponde al análisis de las imágenes MEB de los cupones ArAs expuestos durante la campaña de verano en El Salvador PV. Las curvas de distribución de tamaño de partículas y los gráficos de caja se muestran en las Figuras 16a) y 16b), respectivamente. De estas Figuras es posible observar que las curvas de distribución son principalmente unimodales, como es el caso del cupón expuesto durante 28 días con una moda ubicada entre  $1\text{-}3\ \mu\text{m}$ . Los cupones expuestos durante 35 y 42 días durante la campaña de verano (Figura 16a) presentan curvas bimodales. Para estos cupones las curvas de distribución de frecuencias muestran que la mayoría de los datos se distribuyen entre  $1\text{-}6\ \mu\text{m}$ , adicionalmente, algunos datos se distribuyen en torno a valores entre  $12\ \text{y}\ 20\ \mu\text{m}$ . Esto se atribuye a la presencia de partículas de polvo angulares y de aglomerados (ver flechas negras y verdes) de partículas cuyos tamaños oscilan entre estos valores. Este hecho hace posible observar que para los cupones ArAs, la media, mediana y P75 aumentan durante 35 y 42 días de exposición para disminuir levemente hacia el final de dicha campaña.

Respecto de la campaña de invierno para los cupones ArAs, la Figura 17 muestra imágenes MEB representativas. De la Figura 17 se observa un patrón de ensuciamiento similar a los cupones LI en la misma campaña, el cual corresponde a contaminación confinada en espacios de diferentes tamaños limitados por espacios de vidrio desnudo (zonas de color gris oscuro en Figuras 17a y 17b). También se pueden observar partículas angulares, indicadas con flechas negras. Para los cupones con 42 y 49 días de exposición se observa una superficie parcialmente cubierta por numerosos aglomerados y partículas de polvo dispersas (indicados con flechas rojas y verdes, respectivamente) sobre un fondo de color gris claro (ver Figuras 17c y 17d).

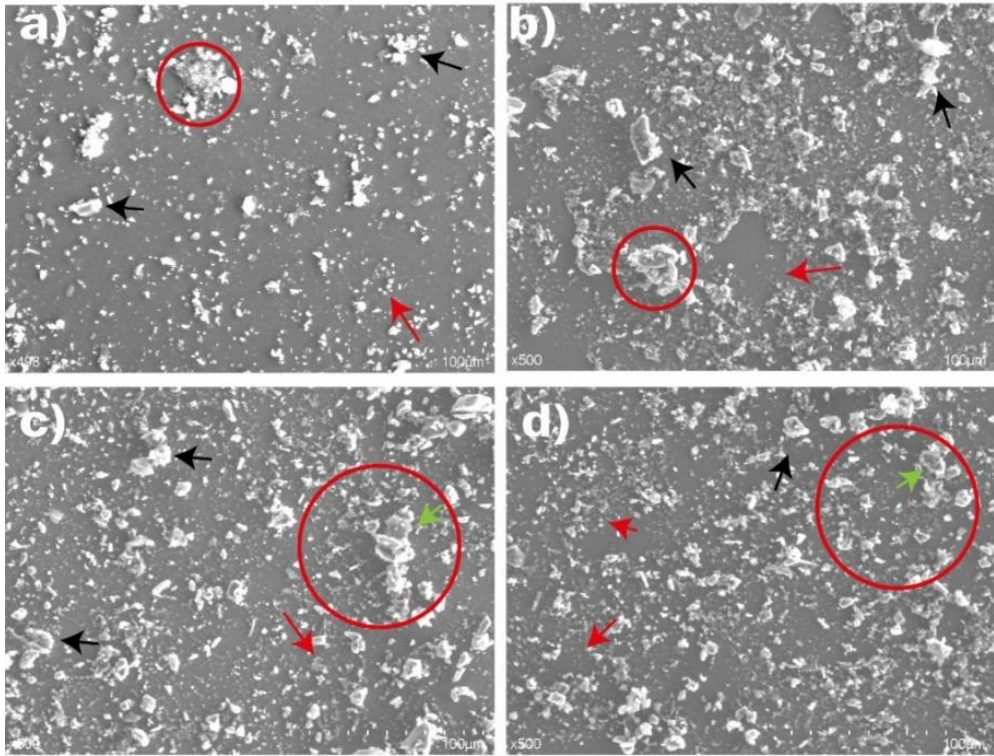


Figura 15. Imágenes MEB vidrio ArAs expuestos durante la campaña de verano en El Salvador PV, (a) 28, (b) 35, (c) 42 y (d) 49 días de exposición.

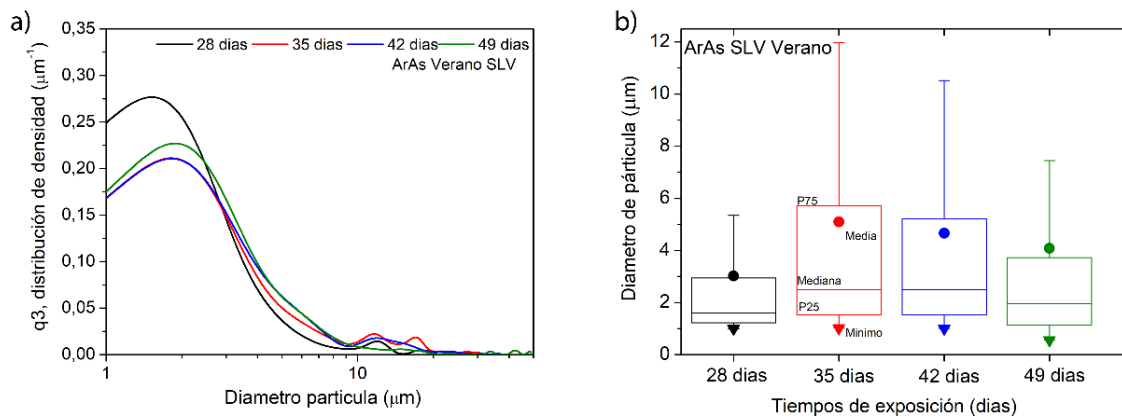


Figura 16. Análisis de imágenes MEB para los cupones ArAs expuestos en El Salvador PV durante la campaña de verano: a) distribución de tamaño de partículas (q3) y b) distribución por cuartiles (gráficos de caja).

La Figura 18a) muestra las curvas de distribución de tamaño de partículas de los cupones ArAs expuestos durante la campaña de invierno en El Salvador PV. En esta Figura se observa que las curvas de distribución son pseudo-unimodales para todos los cupones. En efecto, se puede observar que todas las curvas poseen acumulaciones de partículas de tamaños en distintos rangos de tamaño. Para el cupón expuesto durante 28 días se observa una acumulación de datos en el rango 5-12  $\mu\text{m}$ ; mientras que para el resto estos datos se distribuyen alrededor de 10-12  $\mu\text{m}$ . Este comportamiento es similar a lo observado para los cupones ArAs expuestos durante la campaña de verano. Se observa que el valor medio varía ligeramente para los cupones expuestos durante 28, 42 y 49 días, obteniendo valores cercanos a 3,6  $\mu\text{m}$ . Esta tendencia se invierte para el cupón de vidrio expuesto durante 35 días, donde el valor medio disminuye a 2,7  $\mu\text{m}$ . Esto último es atribuible a la acción de agentes externos, como el viento, sobre la superficie del vidrio. Es decir, algunas partículas de polvo de tamaño considerable ( $\sim 10 \mu\text{m}$ ) fueron removidas por ráfagas de viento de alta velocidad (ver Figura 9).

En general, los cupones ArAs expuestos en El Salvador PV durante ambas campañas mostraron una baja dispersión, con desviaciones estándar cercanas a 3  $\mu\text{m}$ . Para las muestras expuestas durante 49 días se observó un aumento de la desviación estándar obteniendo valores de 7,6  $\mu\text{m}$  y 4,6  $\mu\text{m}$  para las campañas de verano e invierno, respectivamente. Esta diferencia es similar a lo observado con los cupones LI y puede ser atribuida a las condiciones climáticas presentes durante la campaña de verano.

De los resultados obtenidos del análisis MEB se puede establecer que durante ambas campañas los cupones ArAs presentaron parámetros estadísticos levemente mayores que los cupones LI, especialmente para la media, mediana y P75. Se observó que el patrón de ensuciamiento de ambos tipos de cupones posee características similares para una misma campaña, es decir, que responde a las condiciones climáticas de cada campaña. Finalmente, se observó que durante la campaña de verano los índices estadísticos, como la media, mediana y P75, fueron mayores que durante la campaña de invierno, esto independiente del tipo de cupón. Como se mencionó anteriormente, este comportamiento es atribuible a los cambios en las condiciones climáticas de la campaña de verano, las cuales son favorables para la formación y crecimiento de los aglomerados. Estos aglomerados se forman debido a procesos como la cementación, el apelmazamiento o “caking” o el envejecimiento capilar. En este caso, los procesos más probables son la cementación o el apelmazamiento de las partículas. Ambos están relacionados con los cambios de HR detectados durante la campaña verano y se producen debido a la posible disolución de minerales higroscópicos como la calcita, la



halita o el yeso. Esto último se sustenta por la posición de estos minerales en la secuencia de meteorización de Jackson [46] y por los mayores niveles de humedad y temperatura durante el periodo estival que pueden haber acelerado el proceso de meteorización.

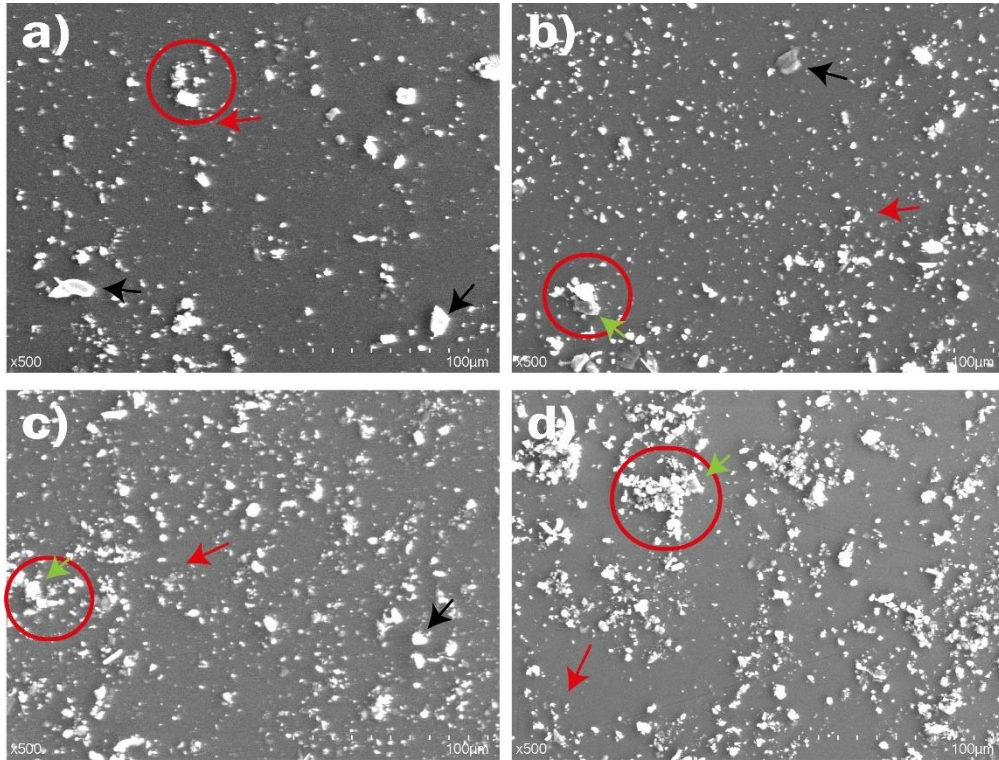


Figura 17. Imágenes MEB vidrio ArAs expuestos durante la campaña de invierno en El Salvador PV, (a) 28, (b) 35, (c) 42 y (d) 49 días de exposición

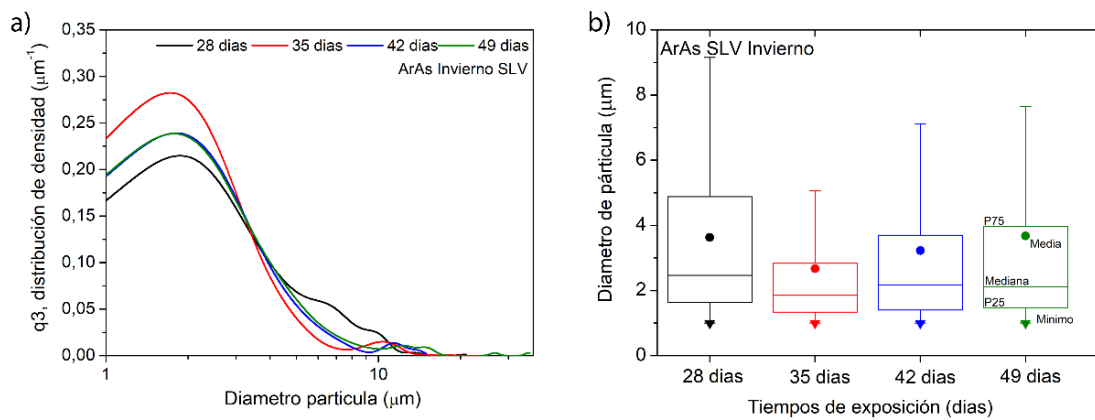


Figura 18. Análisis de imágenes MEB para los cupones ArAs expuestos en El Salvador PV durante la campaña de invierno: a) distribución de tamaño de partículas (q3) y b) distribución por cuartiles (gráficos de caja).

## 2.2.5 Relación entre las características del ensuciamiento y la transmitancia de los cupones analizados

Con la información recolectada del análisis de las imágenes MEB se calculó la cobertura de la superficie (SC). Este parámetro se calculó como la relación entre la superficie cubierta de polvo,  $A_{polvo}$ , y el área total de la imagen,  $A_{imagen}$ , de la siguiente manera [49]:

$$SC[\%] = \left( \frac{A_{polvo}}{A_{imagen}} \right) * 100 \quad (2)$$

Para la caracterización óptica de los vidrios sucios, se midió la transmitancia hemisférica de cada cupón de vidrio limpio ( $T_{limpio}$ ) mediante un espectrofotómetro V-770 Jasco UV-Visible/NIR en el rango de longitudes de onda ( $\lambda$ ) entre 300 y 1000 nm. Para esta medición se utilizó como blanco el aire, un haz con un ancho de banda y un paso de 1 nm. Tras el tiempo de exposición correspondiente a cada cupón, se midió la transmitancia en los cupones sucios, obteniendo la transmitancia de los vidrios sucios ( $T_{polvo}$ ). La pérdida de transmitancia se calculó como sigue [49]:

$$T_{perd}[\%] = \frac{\int_{300}^{1000} (T_{limpio} - T_{polvo}) d\lambda}{\int_{300}^{1000} T_{limpio} d\lambda} * 100 \quad (3)$$

La Figura 19 muestra las gráficas de pérdida de transmitancia en función del área cubierta en los vidrios durante las campañas de muestreo realizadas en El Salvador PV. Para el cupón LI expuesto durante la campaña de verano (Figura 19a) se observa que la SC y la pérdida de transmitancia están relacionadas por una curva polinómica que se satura, alcanzando una meseta para una SC entre un 15 a 21,2% y una pérdida de transmitancia del entre 33,3 y 36,2%. Esta tendencia es similar a la reportada por Elminir et al. [51]. Para el cupón LI expuesto durante la campaña de invierno (Figura 19b) se observó que su curva de ajuste no alcanza el punto de saturación. Sin embargo, se espera que su punto de saturación sea similar a lo observado en la Figura 19a, es decir, que alcance la meseta para valores dentro del rango anteriormente mencionado. Esta diferencia se explica por la formación de una fina capa de partículas (fondo gris claro en la Figura 11) en todas las muestras durante la campaña de verano, la cual no está presente en algunas muestras de la campaña de invierno, como se muestra en la sección 2.2.4.

Las Figuras 19c) y 19d) muestran las curvas de SC vs pérdida de transmitancia para los cupones ArAs expuestos durante las campañas de verano e invierno, respectivamente. De ambas Figuras se puede observar que el área cubierta y la pérdida de transmitancia poseen una correlación directamente proporcional [15]. En la Figura 19c) se observa que la SC y la pérdida de transmitancia están relacionadas por una curva logarítmica, similar comportamiento se observa en la Figura 19d). Estos resultados concuerdan con lo mostrado por Ilse, et al. en sus diversos trabajos [4, 52, 49, 53].

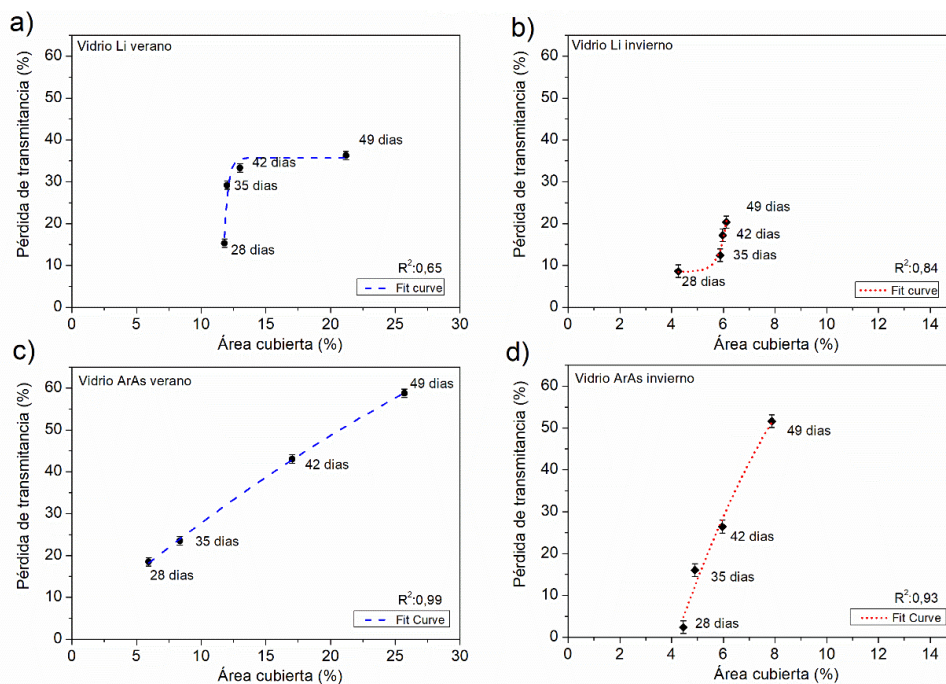


Figura 19. Gráficos de pérdida de transmitancia en función del área cubierta en los vidrios expuestos en El Salvador PV: a) LI campaña de verano, b) LI campaña de invierno, c) Aras campaña de verano y d) ArAs campaña de invierno.

En general, para ambos tipos de cupones, el área cubierta aumenta a medida que aumenta el tiempo de exposición. Se observa que el área cubierta de la superficie es más prominente en el periodo de verano que en el de invierno; esto se atribuye a la mayor presencia de aglomerados y la formación de una fina capa de partículas en la superficie de los cupones expuestos. También es posible observar una reducción sustancial de la transmitancia para ambos periodos de exposición a medida que aumenta la cobertura de la superficie.

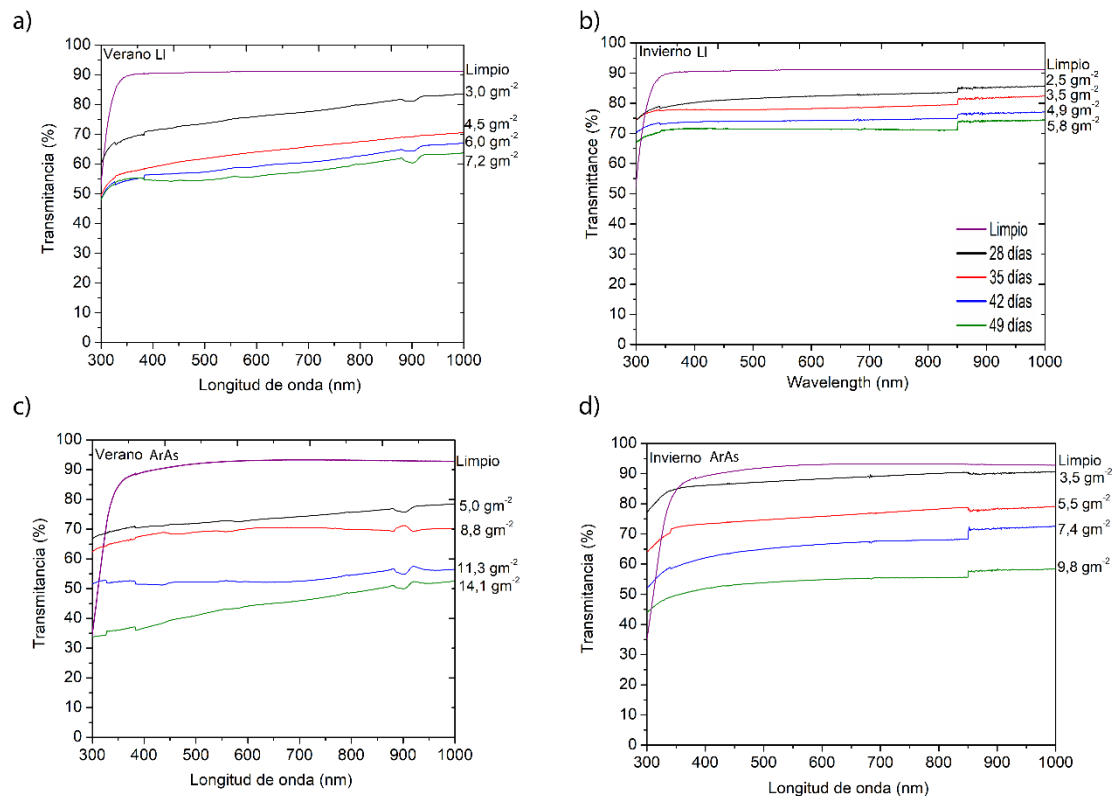


Figura 20. Espectros de transmitancia de los cupones de vidrio expuestos en El Salvador PV: a) LI campaña de verano, b) LI campaña de invierno, c) ArAs campaña de verano y d) ArAs campaña de invierno

Para comprender la relación entre los espectros de transmitancia y la carga acumulada de polvo, se midió la transmitancia hemisférica de cada cupón sucio, indicando la carga acumulada de polvo para cada cupón (Figura 20). Cabe señalar que en estas Figuras se observa una ligera discontinuidad cercana a los 350 nm, esta corresponde al borde de absorbancia propia del vidrio en su condición limpia [54]. Para el caso de los cupones de vidrios expuestos durante ambas campañas de muestreo se puede observar el borde de absorbancia, pero de manera atenuada. Este efecto puede atribuirse a propiedades fisicoquímicas propias de las partículas de polvo que componen el ensuciamiento, especialmente propiedades ópticas que podrían interactuar con la luz y reducir la cantidad que se absorbe en la región cercana a los 350 nm. De la sección 2.2.3 sabemos que el ensuciamiento de El Salvador PV está compuesto principalmente por moscovita, cuarzo, clorita y calcita. Estos minerales son anisótropos y presentan birrefringencia, la birrefringencia es una propiedad óptica donde la luz se divide en dos rayos al pasar por el material, y cada uno de ellos se desvía de forma diferente debido a la estructura cristalina del material [55]. Adicionalmente, de la sección 2.2.4 sabemos que el depósito de polvo sobre los vidrios es irregular y heterogéneo. Estas características fisicoquímicas del depósito de polvo explican la atenuación del borde de absorción del

vidrio en los espectros de transmitancia de los cupones de vidrios expuestos durante ambas campañas de muestreo. También explican las discontinuidades que se observan en los distintos espectros de transmitancia, especialmente en el rango de los 800-900 nm. La magnitud de este efecto depende de varios factores como la cantidad, concentración y distribución de las partículas de polvo. Esto queda en evidencia al observar los cupones con mayor carga de polvo acumulada. Por ejemplo, el cupón ArAs expuesto durante 49 días durante la campaña de verano, para el cual no se observa borde de absorción.

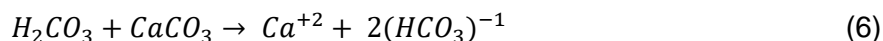
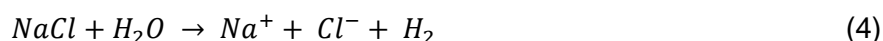
Otra característica fisicoquímica importante en la interacción luz-partícula es el tamaño de dicha partícula. La atenuación de la transmitancia puede atribuirse al tamaño de las partículas dispersas en la superficie de los cupones sucios, efecto que se acentúa con un tamaño de partícula pequeño [56]. Existen trabajos donde se ha reportado que la atenuación de la transmitancia se realiza cuando el tamaño de las partículas es inferior a 6  $\mu\text{m}$  [57]. En el caso de Salvador PV, se observó que más del 50% (P50) de las partículas eran menores de 2,5  $\mu\text{m}$  para los cupones LI y ArAs.

En general, se puede observar que a medida que aumenta la carga acumulada de polvo, la transmitancia del vidrio disminuye en todo el rango de longitudes de onda estudiado, pero especialmente en el rango UV y visible (300-700 nm). Para los cupones expuestos durante la campaña de verano, en las Figuras 20 a) y 20 c) se pueden observar espectros donde la pérdida de transmitancia es más significativa en las longitudes de onda más bajas (300-700 nm) que en las más largas (> 700 nm). Esto puede ser atribuido a que estos cupones acumularon una mayor carga de polvo en su superficie que los cupones expuestos durante la campaña de invierno y presentaron la formación de una capa fina de partículas sobre su superficie.

La pérdida de transmitancia, así como las variaciones de transmitancia a diferentes longitudes de onda se explican por las características fisicoquímicas de las partículas de polvo que componen el ensuciamiento. En base a los resultados de la caracterización de los cupones expuestos en El Salvador PV, es posible concluir que la reducción de la transmitancia de los cupones de vidrio es producida por un efecto combinado entre las características físicas y químicas de las partículas de polvo, especialmente el tamaño de partícula y de su mineralogía. Estos parámetros definen el mecanismo de interacción entre las partículas de polvo y la luz incidente. Además, definen la facilidad con la cual las partículas pueden disolverse o formar aglomerados, acciones que también se ven afectadas por las condiciones atmosféricas de cada estación.

## 2.2.6 Asociación entre las características del ensuciamiento y condiciones climáticas

Teniendo en cuenta lo anterior, es posible dilucidar que la humedad relativa activa la absorción de agua por las superficies de las partículas de polvo, en particular, las especies higroscópicas. Este proceso depende directamente del tamaño de las partículas de polvo y se produce debido a un campo de fuerzas desequilibrado entre el polvo, las moléculas de agua y los iones disueltos. La disolución de especies higroscópicas como la halita y la calcita se expresa mediante las ecuaciones 4 a 6 [58, 59].



La reacción de la halita (Ecuación 4) se produce por la separación del cloruro y el sodio en iones simples (disolución). El proceso de carbonatación se produce en la disolución de la calcita, donde el dióxido de carbono es atraído y disuelto por el agua, produciendo ácido carbónico (ecuaciones 5 y 6). Después, durante el secado, los iones disueltos ( $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Ca^{+2}$ ,  $Cl^-$ ,  $SiO^-$ ) son atraídos entre sí a través de la fuerza electrostática y de enlace iónico. Finalmente, estos iones se mantienen unidos, formando cristales. Estos mecanismos explican la formación de aglomerados en ambas campañas, especialmente en verano, debido a la mayor humedad relativa.

Como se puede observar, los resultados mostrados en este capítulo demuestran que las características del soiling se ven fuertemente afectadas por las condiciones climáticas. Para visualizarlo, se realizó un análisis del comportamiento diario de los parámetros climáticos registrados en El Salvador PV durante ambas campañas.

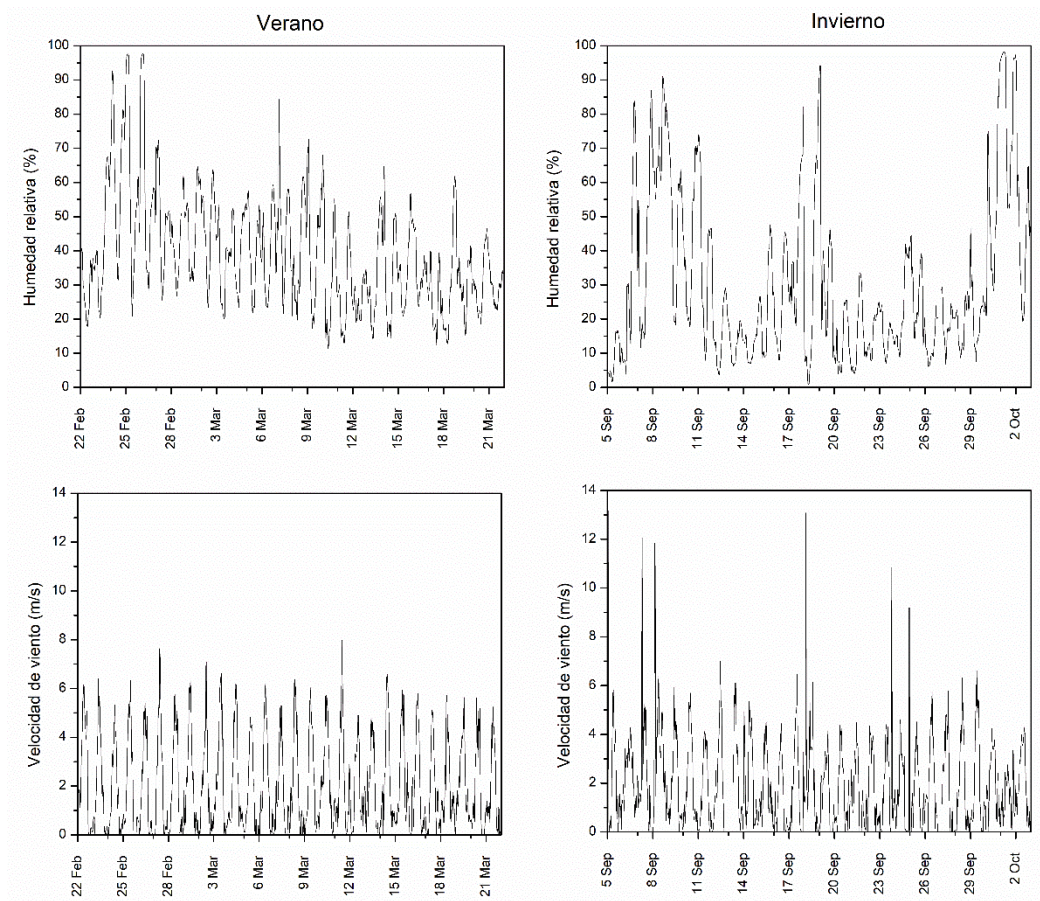


Figura 21. Comportamiento diario de la humedad relativa y la velocidad del viento durante la segunda etapa en las campañas de verano (lado izquierdo) e invierno (lado derecho).

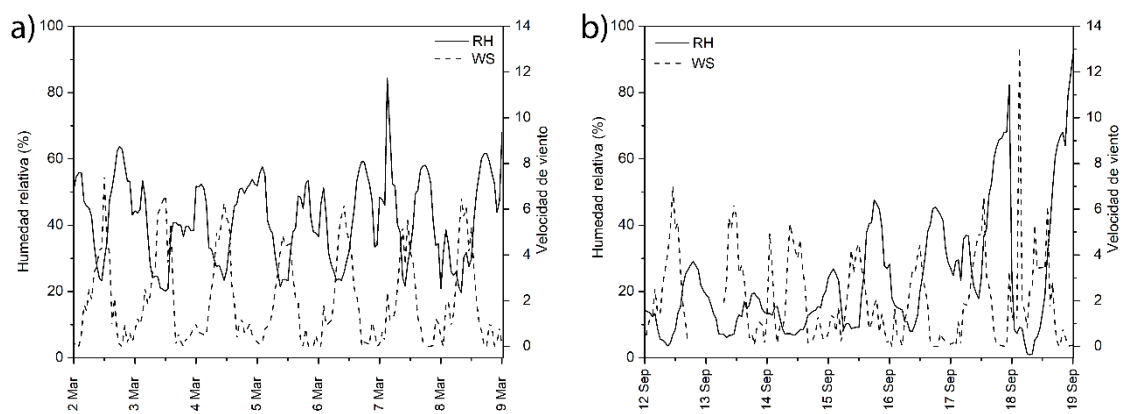


Figura 22. Comportamiento diario de la humedad relativa y la velocidad del viento en una semana representativa en las campañas de (a) verano y (b) invierno.

En la Figura 21 se muestran los cambios diarios de la humedad relativa (HR) y la velocidad de viento (WS) para ambas campañas. Durante la campaña de verano, se observan ciclos diarios estables en la velocidad del viento, mientras que la humedad relativa varía, disminuyendo hacia la semana 4. Mientras que en la campaña de invierno se observa una importante variabilidad en ambos parámetros, especialmente el WS con velocidades de viento invernales de hasta  $13 \text{ ms}^{-1}$ .

En la Figura 22 se presentan las mediciones de HR y WS para una semana representativa de cada campaña. En esta Figura se observa que durante ambos periodos existen ciclos diarios de variación de la HR y el WS. Además, se puede observar que a medida que aumenta un parámetro, el otro disminuye. Sin embargo, los ciclos presentes en el periodo de verano son más regulares y uniformes que los observados en invierno. En el caso del verano, la HR es siempre superior al 25 - 30% y el WS varía entre 0 y  $6 \text{ ms}^{-1}$ . En invierno, se observan periodos en los que la HR es inferior al 30% durante varios días y el WS es fluctuante, aunque con valores similares a los observados durante el verano. Considerando lo anterior, sólo durante el verano la HR es suficiente para aumentar la adhesión de las partículas de polvo, aumentando las fuerzas de capilaridad y promoviendo la cementación o apelmazamiento de los materiales higroscópicos, mientras que la velocidad del viento no es suficiente para eliminar el polvo depositado. En cambio, durante el invierno, cuando la HR es inferior al 30%, las únicas fuerzas que mantienen las partículas de polvo adheridas a los vidrios son las fuerzas de contacto, de ahí que las partículas de polvo se desprendan con mayor facilidad de los vidrios. Se debe tener en cuenta que estas fuerzas de contacto dependen de la mineralogía del polvo (energía superficial para los enlaces de Van der Waals) y de la forma y el tamaño de las partículas de polvo (puntos de contacto con el vidrio). Es importante observar que, incluso durante el invierno, hay días en los que se pueden encontrar valores de HR muy elevados (en torno al 80%), por lo tanto, es muy probable que se produzca la cementación o el apelmazamiento de las partículas de polvo. Por otro lado, hay días en los que se observan valores de WS muy elevados, y es muy probable que se produzca el desprendimiento o resuspensión de las partículas de polvo. Esto ocurre especialmente en el caso de las partículas más grandes, lo que se corrobora a través de la comparación de las imágenes MEB mostradas en la sección 2.2.4. La combinación de la humedad relativa y la velocidad del viento en verano explica muy bien las diferencias en la carga acumulativa de polvo con el periodo invernal, considerando la presencia de material higroscópico en el polvo.



Según los resultados, el ensuciamiento presenta características estacionales y su efecto es más marcado en los periodos en los que la HR es superior al 30% pero con una WS no tan elevada. La identificación y cuantificación de la incidencia de estos periodos podría considerarse como un indicador adicional a la hora de ajustar los programas de limpieza. Por ello, para El Salvador PV se recomienda utilizar sistemas de mitigación de la suciedad preventiva y ajustar los programas de limpieza en función de esta estacionalidad, es decir, aumentar el número de limpiezas durante el periodo estival.

### **2.3 Zona de estudio N°2: María Elena PV**

Como se mencionó anteriormente, para la planta fotovoltaica María Elena PV no se cuenta con el registro de los parámetros atmosféricos durante las campañas de muestreo realizadas en dicho emplazamiento. Sin embargo, los cupones de vidrio expuestos durante las campañas de verano e invierno fueron caracterizados mediante la misma metodología utilizada en El Salvador PV. Cabe destacar que estos emplazamientos comparten el mismo tipo de clima predominante según la clasificación climática de Köppen [32] .

En la Figura 23 se muestra la carga acumulativa de polvo para los vidrios LI y ArAs expuestos en la planta María Elena PV durante ambas campañas. Para el caso de los vidrios LI (Figura 23a), es posible observar que después de 49 días de exposición la carga de polvo alcanzó valores de 6,85 y 6,25 g·m<sup>-2</sup> para las campañas de verano e invierno, respectivamente. En el caso de los vidrios ArAs (Figura 23b) para el mismo tiempo de exposición las cargas acumulativas de polvo alcanzaron valores de 14,5 y 9,7 g·m<sup>-2</sup> para los periodos de verano e invierno, respectivamente. Para María Elena PV las diferencias en las cargas acumulativas de polvo entre las estaciones fueron pequeñas, contrario a lo observado en El Salvador PV. Sin embargo, en el caso de los cupones ArAs, la diferencia de carga acumulada fue menor en el caso de El Salvador PV.

A pesar de que ambas localidades comparten un mismo tipo de clima predominante, al igual que en El Salvador PV, en esta localidad el recubrimiento antisoiling no cumplió su función.

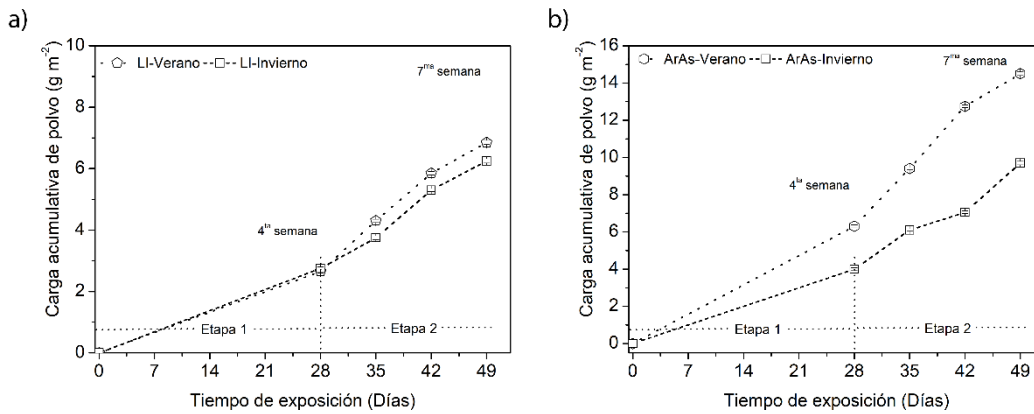


Figura 23. Carga acumulativa de polvo para los vidrios LI y ArAs expuestos durante las campañas de (a) verano e (b) invierno en María Elena PV.

En la Figura 24a) se muestran los resultados del análisis de DRX realizado para las muestras de polvo depositado recolectadas en María Elena PV. Se puede observar que los patrones de difracción son similares a lo exhibido por la muestra de suelo (Figura 3 de la primera parte, punto 2.1), pero con intensidades relativas ligeramente distintas. Los resultados del análisis Rietveld para las muestras de María Elena PV se muestran en la Figura 24b), donde se observa que la muestra de suelo está compuesta por partes iguales de albita y calcita, y una fracción menor de cuarzo y otras fases mineralógicas. Las muestras de verano e invierno tienen como componente principal la hornblenda (sobre el 70%), mientras la albita, calcita y cuarzo corresponden a componentes en menor proporción. Esto muestra que las muestras de polvo se componen de las mismas fases mineralógicas, pero en distintas proporciones. Esto último podría indicar diferencias en las características físicas del ensuciamiento, como también en su efecto sobre la transmitancia de los cupones de vidrio.

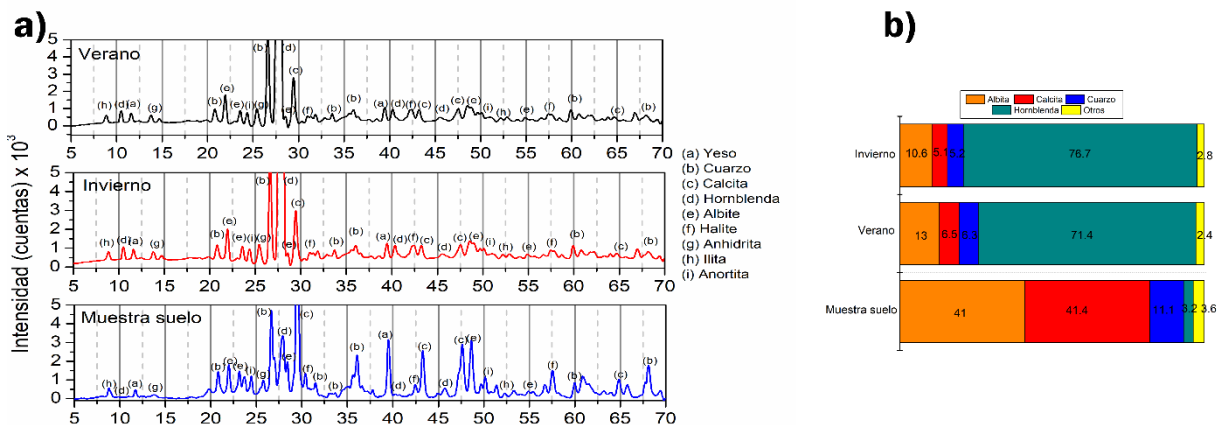


Figura 24. Análisis de difracción de rayos X de muestras de polvo y de suelo en María Elena PV: a) difractograma y b) cuantificación de fases mineralógicas. La denominación "otros" corresponde a halita, yeso, anhidrita, ilita y anortita.

De los resultados del análisis Rietveld para ambos emplazamientos, se puede concluir que el suelo circundante a los módulos fotovoltaicos es la principal, y probablemente la única, fuente de polvo de donde proviene el ensuciamiento, descartando otras fuentes como industrias o faenas mineras. Además, si se consideran los porcentajes de cada una de estas fases mineralógicas que presentan las muestras analizadas, se puede estimar que el ensuciamiento perteneciente a María Elena PV es más propenso a ser meteorizado que el perteneciente a El Salvador PV.

En la Figura 25 se muestran las imágenes MEB de los cupones de vidrio LI expuestos en la planta fotovoltaica María Elena PV durante la campaña de verano. Para las muestras expuestas a 28 y 35 días (Figuras 25a) y 25b) se observa la presencia de partículas angulares de tamaño superior a 10  $\mu\text{m}$  (flechas negras). Se observa la presencia de partículas de tamaño menor a 10  $\mu\text{m}$  con forma esferoidal distribuidas aleatoriamente en toda la superficie. Para las muestras expuestas durante 42 y 49 días se puede observar la presencia de aglomerados de partículas con distintos tamaños, compuestos por partículas angulares y/o esferoidales. Estos aglomerados crecen en número y en tamaño a medida que el tiempo de exposición aumenta, especialmente para el cupón expuesto durante 42 días (Figura 25c) cuya superficie mostró una gran cantidad de partículas angulares (>10  $\mu\text{m}$ ) y aglomerados. Se observa una evolución similar en el patrón de ensuciamiento a lo observado en los cupones LI expuestos en El Salvador PV durante la misma campaña. Es decir, un aumento del tamaño de las regiones que confinan a las partículas, reduciendo el espacio que las limita, pasando de un gris oscuro (Figura 25a) a un gris claro (Figura 25d). Sin embargo, cabe destacar que los que las Figuras 11 y 25 poseen diferencias notorias, especialmente en el número de partículas observadas en cada caso.

La Figura 26 presenta el análisis de las imágenes MEB de todos los cupones LI expuestos en María Elena PV durante la campaña de verano. La Figura 26a) presenta las curvas de distribución de frecuencias, las cuales son unimodales para todos los cupones de vidrio analizados. Sin embargo, la curva de distribución de tamaño del cupón expuesto durante 42 días en la campaña de verano, presenta una segunda moda (15  $\mu\text{m}$ ). Este comportamiento puede ser atribuido a la presencia de partículas angulares (ver flechas negras en Figura 25c) y aglomerados de polvo (ver cuadrado rojo en Figura 25c) en la superficie del vidrio analizado. Del gráfico de cajas (Figura 26b) es posible observar que el valor medio de los tamaños de partículas varía ligeramente en los

cupones expuestos durante 28, 35 y 49 días, alcanzando un valor cercano a  $4,4 \mu\text{m}$ . Mientras que para el cupón expuesto durante 42 días se observa un aumento, alcanzando un valor de  $7,7 \mu\text{m}$ . Esta diferencia hace suponer la acción de agentes externos, en este caso el viento. De la literatura se sabe que el viento puede transportar a las partículas de polvo desde o hacia la superficie del módulo, aumentando o disminuyendo la cantidad de polvo depositado [60]. Esta doble función se ve representada en la notoria diferencia anteriormente expuesta.

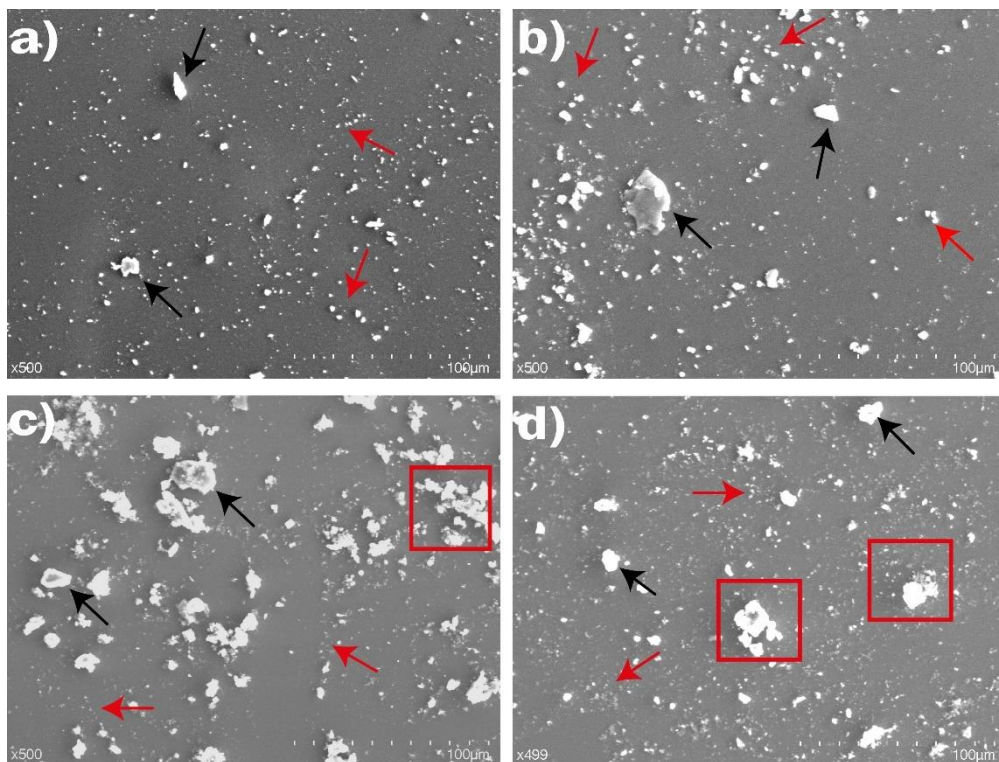


Figura 25. Imágenes MEB vidrio LI expuestos durante la campaña de verano en María Elena PV, (a) 28, (b) 35, (c) 42 y (d) 49 días de exposición.

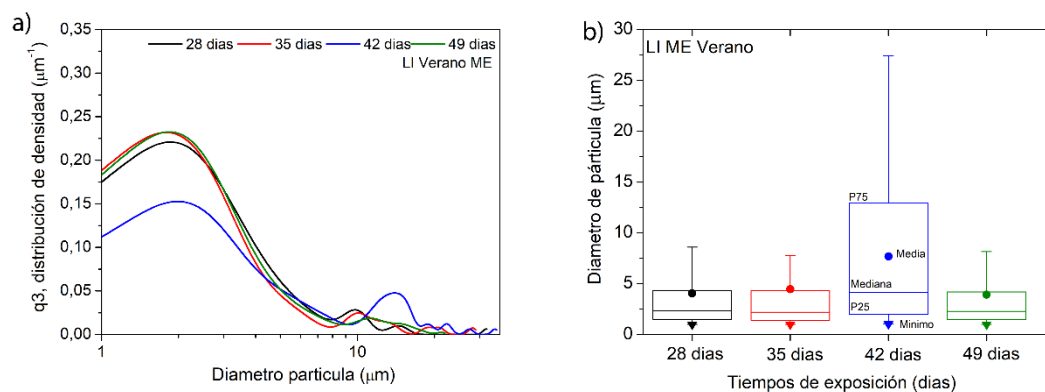


Figura 26. Análisis de las imágenes MEB para los cupones LI expuestos en María Elena PV durante la campaña de verano: a) distribución de tamaño de partículas (q3) y b) distribución por cuartiles (gráficos de caja).

Respecto a los cupones LI expuestos en la campaña de invierno en María Elena PV, se muestran sus imágenes MEB en la Figura 27. En la Figura 27a), se puede observar la presencia de partículas angulares de tamaño menor a 10  $\mu\text{m}$  dispersas en regiones acotadas en la superficie de los cupones analizados. En el caso de las Figuras 27b), 27c) y 27d), además de la presencia de partículas angulares, se observan partículas esféricas pequeñas distribuidas en toda la superficie (flechas rojas). Estos dos tipos de partículas se encuentran distribuidos de manera aleatoria en toda la superficie, predominando la presencia de partículas pequeñas y la formación de aglomerados. Se observa que estas imágenes poseen un fondo de color gris oscuro, mostrando un patrón de ensuciamiento similar a lo observado para el cupón LI expuesto durante 28 días (ver Figura 25a) en la campaña de verano. Es importante notar que para los cupones expuestos durante 42 y 49 días se logra observar un fondo gris claro con algunas porciones de superficie de color gris oscuro.

El análisis estadístico de las imágenes MEB de los cupones expuestos en María Elena PV durante la campaña de invierno se muestran en la Figura 28a) y 28b). En la Figura 28a) es posible observar que las curvas de distribución de tamaño son unimodales para todos los cupones. De los gráficos de caja (Figura 28b) se observa que el valor medio del tamaño de partícula varía ligeramente entre 2,0 y 2,6  $\mu\text{m}$ , aumentando hacia el final de la campaña; tendencia observada anteriormente para el cupón LI expuesto en El Salvador PV durante la campaña de invierno. Como se observa en la Figura 28b), el percentil 75 comienza cercano a 3  $\mu\text{m}$  para luego disminuir hasta los 2  $\mu\text{m}$ , terminando en un valor cercano a 3  $\mu\text{m}$ . Este comportamiento responde a que inicialmente (28 días de exposición) las partículas de polvo tienen un tamaño mayor a las observadas para los cupones restantes. Sin embargo, el P75 vuelve a subir debido a la presencia de aglomerados en la superficie del cupón expuesto por 49 días. Es importante notar que

el percentil 25 para el cupón expuesto durante 49 es mucho menor que el cupón expuesto durante 28 días, evidenciando la mayor presencia de partículas pequeñas en la superficie de los cupones a medida que el tiempo de exposición aumenta, tendencia ampliamente reportada en la literatura. Finalmente, todas las muestras mostraron una baja dispersión, con desviaciones estándar cercanas a 4,5  $\mu\text{m}$ .

De los resultados obtenidos del análisis MEB de los cupones LI se puede establecer que, al igual que lo observado en El Salvador PV, los parámetros estadísticos como la media y el percentil 75, son mayores durante la campaña de verano en comparación a la campaña invernal. Para ambas campañas de muestreo se observaron patrones de ensuciamientos similares a lo observado en El Salvador PV, sin embargo, existen diferencias notorias entre ambas localidades. Por ejemplo, al comparar las Figuras 13 y 27, se observa que en ambas Figuras predominan regiones de vidrio desnudo (zonas grises oscuras). No obstante, los índices estadísticos como la media y P75 de la distribución de tamaño de partículas son ligeramente superiores para los cupones expuestos en El Salvador PV. Al comparar las imágenes MEB de las campañas de verano para los cupones LI, se observa que la principal diferencia es la cantidad y el tamaño de los aglomerados presentes en la superficie de los cupones expuestos en El Salvador PV. Esto último se comprueba al comparar las Figuras 11 y 25.

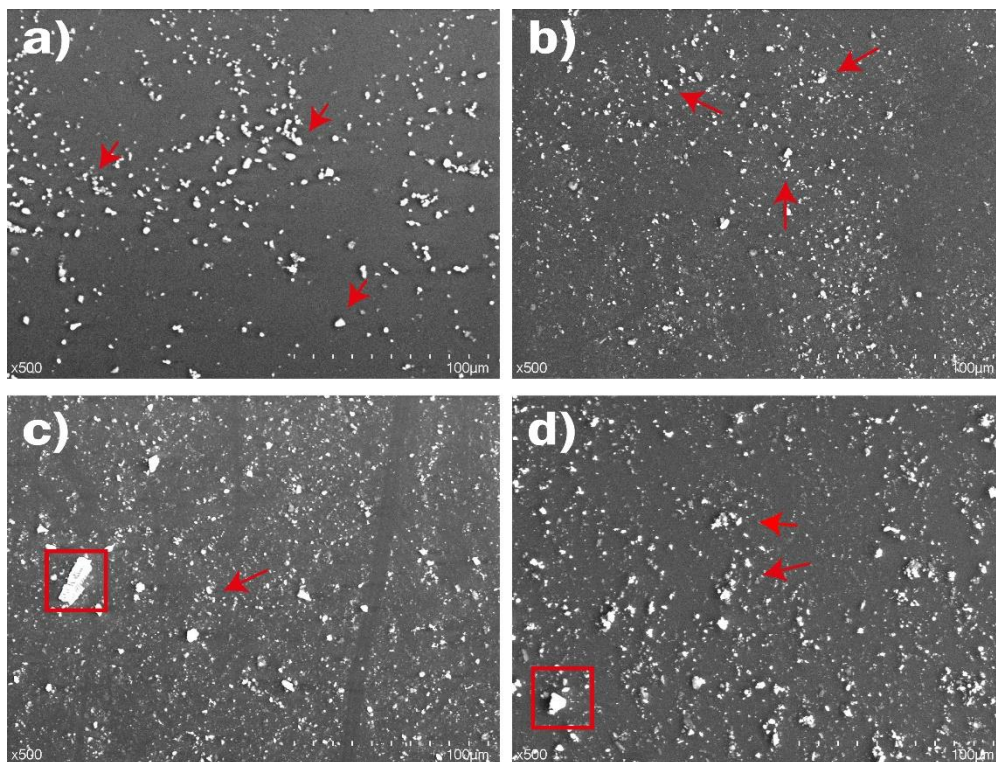


Figura 27. Imágenes MEB vidrio LI expuestos durante campaña invierno en María Elena PV, (a) 28, (b) 35, (c) 42 y (d) 49 días de exposición.

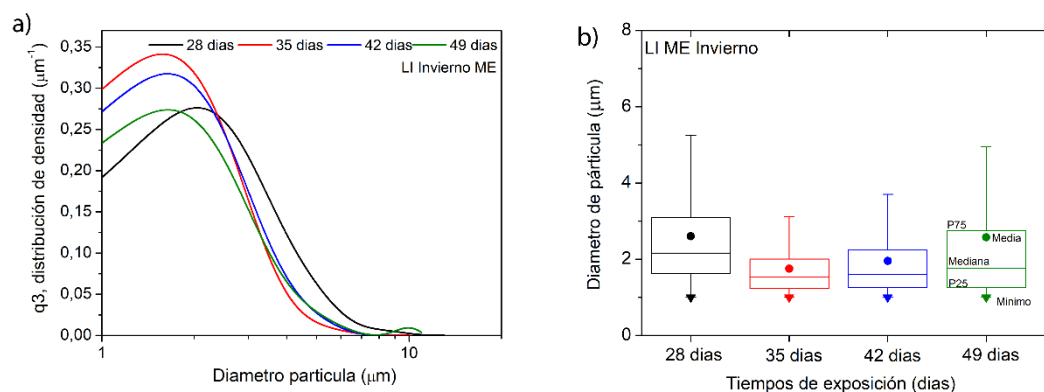


Figura 28. Análisis de imágenes MEB para los cupones LI expuestos en María Elena PV durante la campaña de invierno: a) distribución de tamaño de partículas ( $q^3$ ) y b) distribución por cuartiles (gráficos de caja).

Para los cupones de vidrio ArAs expuestos en María Elena PV (Figura 29) durante la campaña de verano se observó la presencia de dos tipos de partículas de polvo: esferoidales de tamaño menor a 10 µm (flechas rojas) y partículas angulares dispersas de tamaño mayor a 10 µm (flechas negras). Es posible observar un patrón de ensuciamiento similar al observado para los cupones ArAs de El Salvador PV. Sin embargo, a diferencia de lo observado en El Salvador PV, la superficie de los cupones de María Elena PV muestra una mayor cantidad de partículas angulares. Se observa que a medida que el tiempo de exposición aumenta, el número de partículas angulares disminuye, dando paso a una superficie mayoritariamente cubierta por partículas esferoidales (Figura 29d). Esto último se produce debido a la acción de algún agente externo como el viento, efectivamente, esto concuerda con lo observado en los cupones LI durante el periodo estival.

Para los cupones ArAs expuestos en María Elena PV durante la campaña de verano la Figura 30 muestra el análisis de las imágenes MEB. Se observa que todos los cupones de vidrio ArAs presentaron curvas de distribución de frecuencias unimodales (Figura 30a). De la Figura 30b) se puede observar un aumento progresivo en el valor medio, partiendo en un valor de 4 µm hasta llegar a un valor de 5,8 µm. Es importante notar que para los cupones expuestos durante 42 y 49 días se observa que la media de los datos es superior al P75, lo que es atribuible a la presencia de aglomerados o partículas de gran tamaño en la superficie de los cupones analizados que desplazan la media de los datos por sobre el percentil 75. Esto último queda en evidencia al observar el gráfico de caja (verde) para el cupón expuesto durante 49 días, donde además se observa una disminución en el P75. Finalmente, todos los cupones analizados presentaron una alta dispersión, con desviaciones estándar entre 3,7 y 9,8 µm en la campaña de verano.

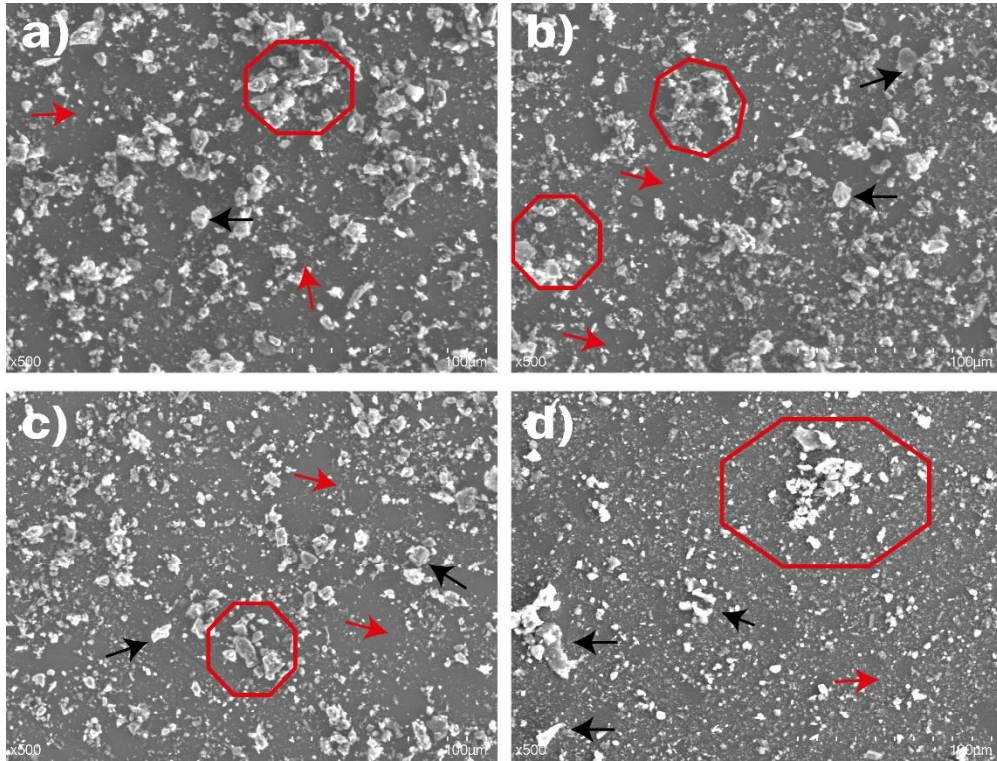


Figura 29. Imágenes MEB vidrio ArAs expuestos durante campaña de verano en María Elena PV, (a) 28, (b) 35, (c) 42 y (d) 49 días de exposición.

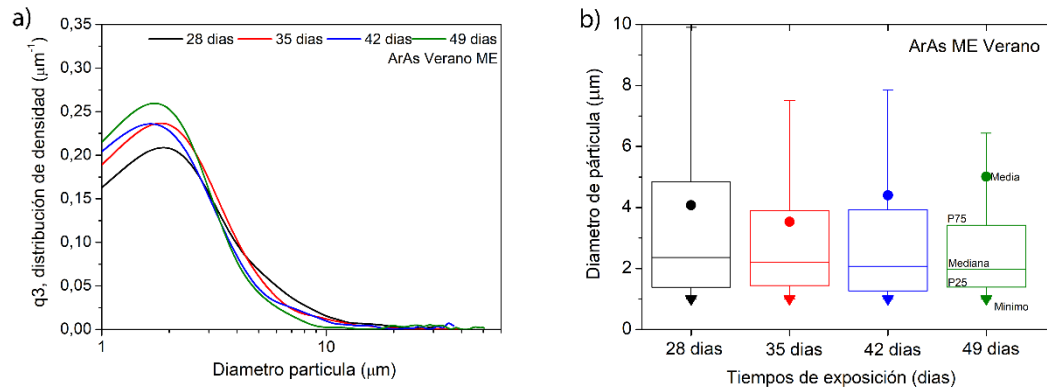


Figura 30: Análisis de las imágenes MEB para los cupones ArAs expuestos en María Elena PV durante la campaña de verano: a) curvas de distribución de tamaño de partículas (q3) y b) distribución por cuartiles (gráficos de caja).



Las imágenes MEB de los cupones ArAs expuestos en María Elena PV durante la campaña de invierno se muestran en la Figura 31. En esta Figura se observa un patrón de ensuciamiento similar al presentado por los cupones expuestos en El Salvador PV durante la misma estación. Este corresponde a partículas esféricas y angulares dispersas, además de aglomerados compuestos por estas partículas dispersos en la superficie de los cupones. Cabe destacar que el patrón de ensuciamiento varía a medida que aumenta el tiempo de exposición, aumentando el tamaño de las regiones cubiertas de polvo, el tamaño y el número de aglomerados. Gradualmente se reduce el espacio entre ellos. En las Figuras 31a) y 31b) se observan zonas con daños al recubrimiento ArAs (flechas azules).

El análisis estadístico de las imágenes MEB de los cupones ArAs expuestos en María Elena PV durante la campaña de invierno se muestra en la Figura 32. De la Figura 32a) se observa que todas las curvas de distribución de tamaño de partículas son pseudo unimodales, ya que poseen una acumulación de partículas con tamaños entre 10-30  $\mu\text{m}$ . En la Figura 32b) se observa que los valores medios oscilan ligeramente a medida que el tiempo de exposición aumenta. Mientras, la mediana de los cupones se mantiene casi constante cercana a un valor de 2  $\mu\text{m}$ . Es posible observar un aumento paulatino del P75 a medida que el tiempo de exposición aumenta. Esto último se atribuye al aumento progresivo en la cantidad y tamaño de los aglomerados presente en la superficie de los cupones estudiados. Todas las muestras presentaron desviaciones estándar que oscilaron entre 3,6 y 4,7  $\mu\text{m}$ .

Cabe mencionar, que al igual que en El Salvador PV, en María Elena PV se encontró una notoria diferencia entre los parámetros estadísticos del tamaño de partícula para ambas campañas de muestreo. Por ejemplo, la media de los tamaños de partículas para los cupones LI durante la campaña de verano fue menor a 7,5  $\mu\text{m}$ , mientras que para la campaña de invierno fue menor a 3,5  $\mu\text{m}$ . Una diferencia similar se observó en la media entre los cupones ArAs y LI para una misma campaña.

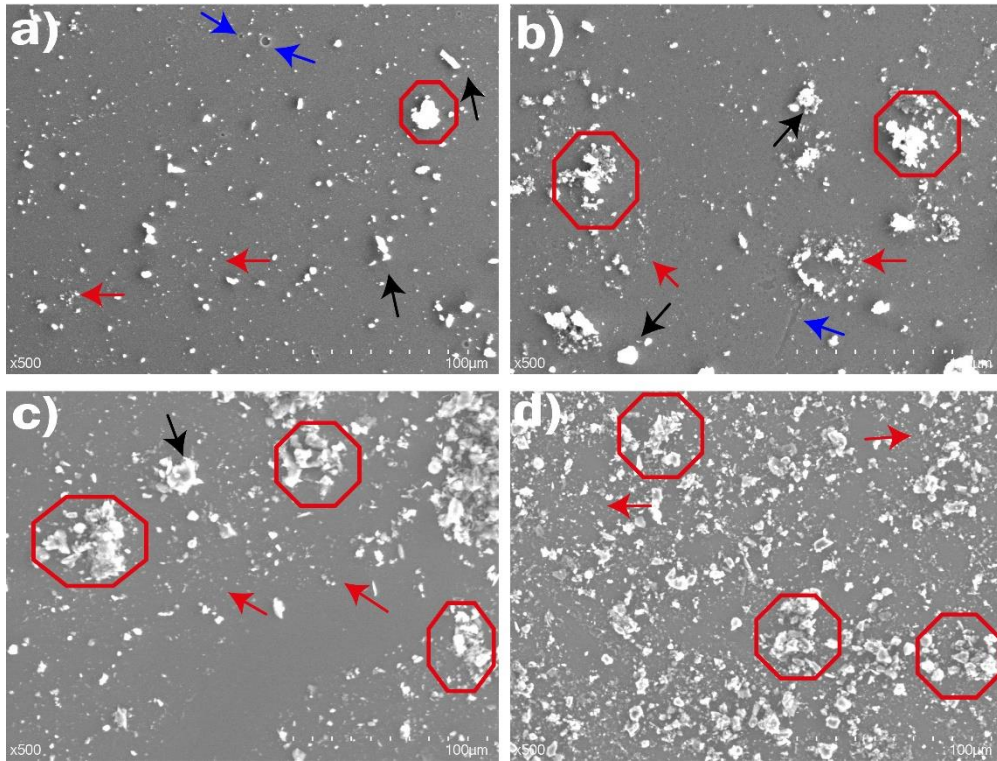


Figura 31. Imágenes MEB vidrio ArAs expuestos durante la campaña de invierno en María Elena PV, (a) 28, (b) 35, (c) 42 y (d) 49 días de exposición.

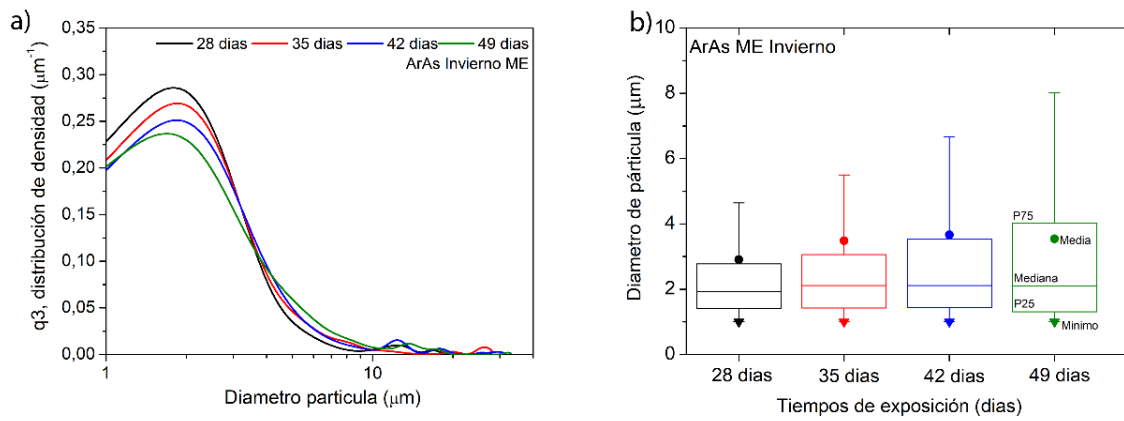


Figura 32. Análisis de las imágenes MEB para los cupones ArAs expuestos en María Elena PV durante la campaña de invierno: a) curvas de distribución de tamaño de partículas (q3) y b) distribución por cuartiles (gráficos de caja).

En general, todos los cupones expuestos en ambas localidades presentaron una mediana (P50) menor a  $2,5 \mu\text{m}$ , demostrando la naturaleza fina de las partículas de polvo presentes en ambas localidades. Sin embargo, los demás parámetros estadísticos como la media, percentil 25 y percentil 75 presentaron comportamientos variados relacionados a la presencia de partículas de mayor tamaño y/o la presencia de aglomerados de partículas de polvo.

Durante ambas campañas de muestreo (ver curvas  $q^3$ ) se encontraron diferencias entre la cantidad y el tamaño de los aglomerados presentes en cada cupón, lo que se atribuye principalmente a las condiciones climáticas. Como se mencionó anteriormente, en el caso de El Salvador PV, las condiciones climáticas durante el verano son favorables para la ocurrencia de la cementación o el apelmazamiento de las partículas de polvo, lo cual se traduce en una mayor formación y crecimiento preferencial de los aglomerados durante la campaña estival que en el periodo invernal. Esto se puede extrapolar al comportamiento de los cupones de vidrio expuestos en María Elena, ya que se observaron patrones de ensuciamientos similares entre estas localidades para una campaña en particular. Como se mencionó, ambas localidades comparten el mismo tipo de clima, por lo cual se esperaría que el comportamiento observado en la Figura 22 también se presente en las variables climáticas de María Elena PV, es decir, que cuando la velocidad de viento aumenta la humedad relativa disminuye y viceversa.

Para María Elena PV, durante la campaña de verano, se observaron variaciones atribuibles a la acción de agentes externos, en este caso el viento. El viento actuaría removiendo partículas de polvo de mayor tamaño y transportando otras más pequeñas hacia la superficie de los cupones (ver Figuras 25c, 25 d, 29c y 29d). Si se considera que el comportamiento de la WS y la RH también ocurre en María Elena PV de igual forma que en El Salvador PV, se esperaría que durante la sexta semana de exposición se registrasen condiciones climáticas que promuevan la remoción o resuspensión de partículas de polvo, es decir, velocidades de viento superiores a  $10 \text{ ms}^{-1}$  y valores de humedad relativa menores al 20%. De igual forma, para la séptima semana se habrían presentado condiciones climáticas que fomenten el depósito de partículas sobre los cupones, es decir, se registrasen velocidades de viento cercanas a los  $3 \text{ ms}^{-1}$  y valores de humedad relativa superiores al 30%. Finalmente, y como se ha demostrado en este trabajo, la distribución del tamaño de partículas del polvo acumulado depende principalmente de las condiciones climáticas y del tiempo de exposición [3].

De igual forma a lo realizado en la sección 2.2.5, se calculó la cobertura de la superficie y la pérdida de transmitancia para los cupones LI y ArAs expuestos en María Elena durante ambas campañas de muestreo.

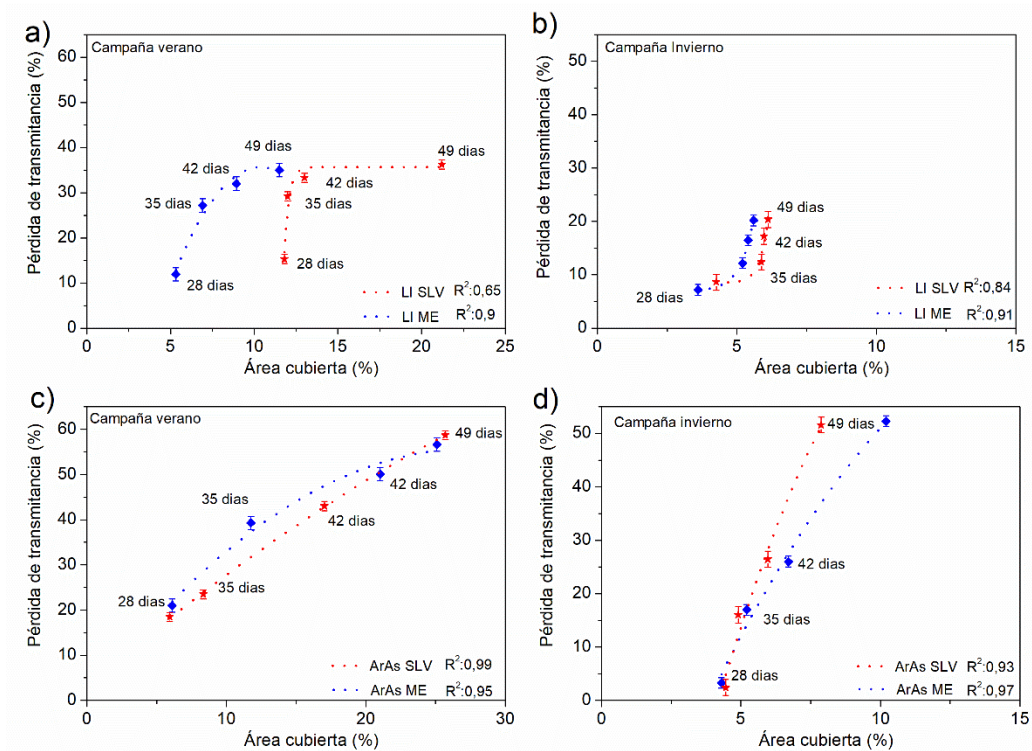


Figura 33. Gráficos de pérdida de transmitancia en función del área cubierta en los vidrios, a) LI comparación campaña de verano, b) LI comparación campaña de invierno, c) ArAs comparación campaña de verano y d) ArAs comparación campaña de invierno.

En la Figura 33 se muestran las gráficas de pérdida de transmitancia en función del área cubierta para todos los cupones expuestos en Salvador PV (curvas rojas) y María Elena PV (curvas azules). De esta Figura se observa que las curvas correspondientes a María Elena PV muestran un comportamiento similar a lo observado en El Salvador PV. Sin embargo, se observan diferencias entre las gráficas. Para los cupones LI expuestos durante la campaña de verano (Figura 33a) se observa que el cupón de María Elena PV alcanza pérdidas de transmitancia similares a los cupones de Salvador PV, pero con una menor área cubierta. Esto también ocurre para el mismo tipo de cupones expuestos durante la campaña invernal (Figura 33b) y en los cupones ArAs expuestos durante la campaña estival (Figura 33c). Mientras que los cupones ArAs expuestos durante el invierno (Figura 33d) muestran el comportamiento inverso, es decir, los cupones de Salvador PV alcanzan valores de pérdida de transmitancia similares a los de María

Elena PV con una menor área cubierta. Esta disparidad puede ser atribuida a las diferencias en las propiedades fisicoquímicas del polvo depositado en ambas localidades. Recordar las diferencias en la carga acumulada de polvo, distribución de tamaño de partículas y mineralogía del ensuciamiento. Sin embargo, es difícil dilucidar cuál de ellas predominante por sobre el resto, ya que la interacción entre la luz y las partículas de polvo es complejo y multivariable.

De la literatura se sabe que la interacción entre un haz de luz y una partícula de polvo depende de la razón entre la longitud de onda y el tamaño de la partícula, razón que es conocida como “parámetro de tamaño” [61]. Otro parámetro involucrado en esta interacción es el índice de refracción del material que compone la partícula, lo que está dado por la composición mineralógica del ensuciamiento [61, 57, 62]. Asimismo, el tamaño de las partículas es un factor determinante, por ejemplo, para el mismo tipo de mineral y a igual carga de polvo, las partículas pequeñas son más dañinas, en términos de pérdida de transmitancia, que las de mayor tamaño. Esto sucede ya que las partículas pequeñas logran cubrir una mayor área superficial del vidrio, bloqueando la transmisión de la luz a través de él [3, 10].

Los espectros de transmitancia de los cupones expuestos en María Elena durante ambas campañas se muestran en la Figura 34. En esta Figura se observa que los espectros de transmitancia poseen comportamientos similares a lo observado en los cupones expuestos en El Salvador PV (Figura 20). Sin embargo, se puede observar que para ciertos cupones se alcanzan similares pérdidas de transmitancia, pero con cargas de polvo menores. Esto se concluye al comparar los cupones LI expuestos durante 49 días en la campaña de verano, donde ambos cupones alcanzan pérdidas de transmitancia cercanas al 37%, pero el cupón de María Elena PV posee una CLD de  $6,85 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$  mientras que el cupón de Salvador PV posee una carga de  $7,2 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ . Además, al observar la Figura 33a) es posible notar que el área cubierta del cupón de María Elena PV es menor que su contraparte de Salvador PV. Esto puede ser atribuido a diversas causas. Primero, que el ensuciamiento en el cupón de María Elena PV esté más densificado (mayor CLD, pero menor área cubierta) permitiendo un menor paso de luz a través de él. Segundo, puede ser atribuido a la mineralogía del ensuciamiento de María Elena PV, donde la principal fase mineralógica presente es la hornblenda. La hornblenda presenta un índice de refracción 1.618-1.680 mientras que el cuarzo y moscovita tienen un índice de refracción de 1.544-1.553 y 1.555-1.610 [63]. Esto implica que la hornblenda interactúa más con la luz que el cuarzo o la moscovita (componentes principales del ensuciamiento de Salvador PV). O en tercer lugar, y lo más probable, la

acción conjunta de las dos opciones mencionadas. Esto reafirma que el efecto del ensuciamiento sobre la transmitancia de los cupones se debe a la acción conjunta de las propiedades fisicoquímicas propias del ensuciamiento.

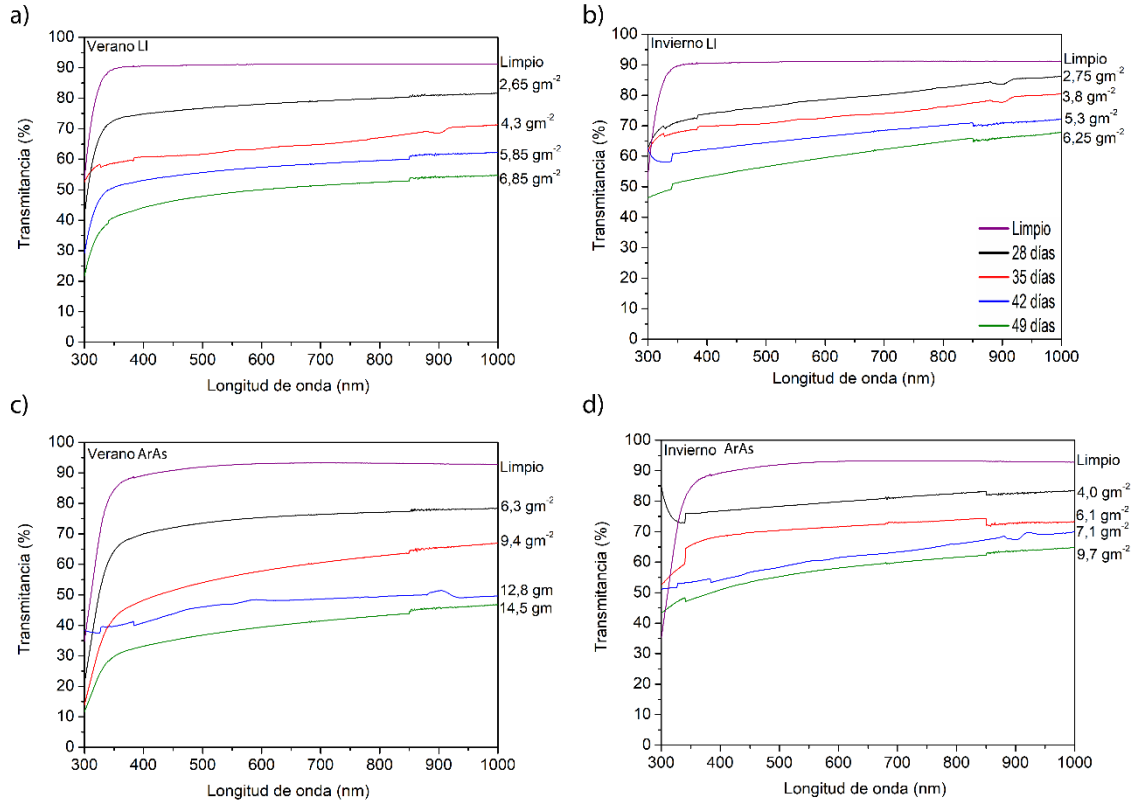


Figura 34. Espectros de transmitancia de los cupones expuestos durante ambas campañas en María Elena PV a) LI campaña de verano, b) LI campaña de invierno, c) ArAs campaña de verano y d) ArAs campaña de invierno.

## 2.4 Conclusiones generales capítulo 2

El estudio del ensuciamiento de vidrios fotovoltaicos expuestos en el desierto de Atacama, realizado en condiciones reales de sedimentación de partículas, en el exterior de las plantas fotovoltaicas Salvador PV y María Elena PV permite concluir que:

- Los ensayos gravimétricos realizados a los cupones expuestos en las plantas Salvador PV y María Elena PV mostraron mayores cargas de polvo acumulado durante las campañas de verano. Contra lo previsto, los cupones de vidrio con recubrimiento antireflejo-antisoiling (ArAs) acumularon mayores cargas de polvo que los cupones LI.
- En la caracterización del polvo realizada por DRX se detectaron las fases mineralógicas típicas del Desierto de Atacama: yeso, calcita, halita, hornblenda, clorita, moscovita, albita, anortita, ilita y cuarzo, siendo las cuatro primeras las más propensas a disolverse debido a la meteorización.
- El ensuciamiento que presenta Salvador PV está compuesto principalmente por moscovita, cuarzo, clorita y calcita. El ensuciamiento presente en ambas campañas posee proporciones similares de estas fases. En el caso de María Elena PV, los resultados mostraron que el ensuciamiento presente en ambas campañas posee composiciones similares para verano e invierno y está compuesto principalmente hornblenda, seguido por albita, calcita y cuarzo.
- En ambas localidades se identificó al suelo aledaño de los módulos fotovoltaicos como la principal y única fuente de polvo, descartando otras fuentes como industrias o faenas mineras. En El Salvador PV el suelo aledaño está compuesto principalmente por moscovita seguida por el cuarzo y la clorita. En el caso de María Elena PV la muestra de suelo está compuesta por partes iguales de albita y calcita; y una tercera parte (<18%) compuesto por cuarzo, hornblenda y otros.
- En el análisis de las imágenes MEB de los cupones ensuciados se observó la presencia de partículas de polvo de diferentes tamaños y formas. En general, se identificaron dos patrones de ensuciamiento, uno asociado a las campañas de verano y otro a las de invierno. Ambos patrones comparten características comunes como la presencia de partículas de polvo angulares, partículas esféricas y aglomerados de estas partículas. Sin embargo, se observaron diferencias notorias entre estos patrones, el patrón de ensuciamiento asociado a las campañas de verano corresponde a una superficie homogéneamente con un fondo de color gris claro. Mientras que el patrón de ensuciamiento asociado a las campañas de invierno corresponde una superficie heterogénea con

grandes áreas de vidrio desnudo (fondo gris oscuro). Adicionalmente, el patrón de las campañas de verano mostró aglomerados de mayor tamaño que a lo observado durante las campañas de invierno.

- Los parámetros estadísticos de las distribuciones de tamaño de partículas presentaron variaciones entre las dos campañas y entre los tipos de cupones analizados. En general, para las campañas de verano y los cupones ArAs se midieron valores mayores para los índices estadísticos media, mediana y percentil 75.
- En general, los cupones ArAs presentaron un menor desempeño que su contraparte LI. En ambas localidades los cupones ArAs mostraron una mayor acumulación de polvo en superficie, mayor área cubierta y, por consecuencia, una mayor pérdida de transmitancia.
- Las condiciones climáticas juegan un rol predominante en las características del polvo depositado y, por consecuencia, en el efecto del ensuciamiento en la transmitancia de los cupones de vidrio.
- La reducción de la transmitancia de los cupones de vidrio se produce por un efecto combinado de las características físicas y químicas de las partículas de polvo, principalmente el tamaño de las partículas y de su mineralogía. Estos parámetros definen el mecanismo de interacción entre las partículas de polvo y la luz incidente. Sin embargo, estos parámetros también definen la facilidad con la que las partículas pueden disolverse o formar aglomerados, acciones que también se ven afectadas por las condiciones atmosféricas.

A la vista de los resultados obtenidos, es posible determinar que el desempeño de los cupones de vidrio depende directamente de las condiciones de ensuciamiento de la localidad, como también de su superficie. En este caso, se demostró que la utilización de un recubrimiento anti reflejo y anti soiling no genera un mejor desempeño en ninguna de las localidades estudiadas. Esto demuestra que, como existe una condición superficial que promueve el depósito de polvo (recubrimiento ArAs), debe existir una condición superficial para la cual se disminuya el ensuciamiento.



## **Capítulo 3 Modificación superficial de vidrios FV como un método pasivo de mitigación del ensuciamiento**

### 3.1 Introducción

Para disminuir el detrimento que provoca el soiling en los paneles fotovoltaicos se han estudiado diferentes métodos de mitigación, que se escogen en función de las características del sistema fotovoltaico y del entorno al que se encuentran expuestos [41]. Es importante mencionar que no existe un método de mitigación universal, ya que su aplicabilidad y efectividad cambian según las condiciones de cada localidad. Las técnicas de mitigación suelen estar divididas en dos grupos, métodos activos y métodos pasivos. Los primeros corresponden a las técnicas ampliamente utilizadas en los parques fotovoltaicos, entre las cuales destaca la limpieza manual y limpieza mecánica, donde esta última utiliza sistemas mecánicos semi y/o automatizados, como robots o drones, los cuales por medio del uso de rodillos o cepillos y en conjunto con agua limpian la superficie [64]. Entre algunas desventajas de esta tecnología, está la difícil operación en grandes parques solares debido a sus dimensiones y/o lejanías con centros urbanos como es el caso de las que se localizan en zonas desérticas. Asimismo, la utilización de agua en estos métodos dificulta y encarece su implementación, ya que estos sistemas usualmente utilizan agua desmineralizada, recurso escaso y caro en la mitad del desierto.

Los métodos pasivos se fundamentan en las características de la instalación fotovoltaica, las condiciones meteorológicas y las propiedades de la superficie del vidrio. Esta estrategia se basa en la modificación de las propiedades de la superficie de los vidrios solares para otorgarles propiedades autolimpiantes [65]. Usualmente esto se logra al otorgarle propiedades hidrofóbicas o hidrofílicas a la superficie [66, 67]. Estas tecnologías permiten aumentar la efectividad de la acción del agua, ya sea natural o del proceso de limpieza, mediante la disminución de la adherencia del polvo en la superficie del vidrio.

Entre los materiales utilizados para los recubrimientos hidrofóbicos se encuentran nanopartículas de sílice, fluoro carbonos, óxido de zinc (ZnO), metales policristalinos como Al/Cu y materiales compuestos de Au entre otros. Estos materiales pueden obtenerse mediante diferentes rutas, tales como electrospinning, litografía y procesos sol-gel [68]. Por su parte, los materiales hidrofílicos corresponden a óxido de titanio (TiO<sub>2</sub>), óxido de zinc y óxido de tungsteno, usualmente sintetizados mediante *Chemical vapor deposition* (CVD), *Physical vapor deposition* (PVD), sol-gel y *spray coating* [67]. Cabe mencionar que estos procesos de síntesis son métodos caros o de varias etapas, lo que hace que sean caros y complejos de producir en forma masiva. Sin embargo, la

mayor desventaja que presentan este tipo de tecnologías es su limitada durabilidad en condiciones de servicio ya que son susceptibles a la degradación química provocada por la larga exposición a la radiación UV o a la ocasionada por el propio soiling [65, 69], además de la degradación mecánica originada por abrasión natural provocada por la interacción con el viento o la abrasión debido a las técnicas de limpieza convencionales, como por ejemplo la limpieza manual [16].

Otra estrategia de mitigación del ensuciamiento es la utilizada por los recubrimientos anti-ensuciamiento [66]. Su funcionamiento está enfocado en modificar la rugosidad del vidrio con tal de disminuir las fuerzas de adhesión entre las partículas del polvo y la superficie del vidrio. Así, agentes externos como el viento o el propio movimiento de los módulos, podría remover las partículas de polvo evitando su acumulación [62, 60]. Esto se puede lograr modificando superficialmente el vidrio con tal de disminuir el área de contacto entre las partículas de polvo y la superficie del vidrio, lo que se ha demostrado, por ejemplo, en el trabajo de H.R. Moutinho, et al [28], quienes modificaron la rugosidad del vidrio solar mediante pulido con láminas de lapeado de diamante. Se demostró a través de mediciones en AFM, que al aumentar la rugosidad las fuerzas de Van der Waals se ven atenuadas. Por otro lado, R. J. Isaifan, et al [26] demostró que el aumento de la rugosidad también afecta a las fuerzas capilares, ya que impide la formación del menisco capilar completo en el punto de contacto entre las partículas y la superficie. Estos autores modificaron la rugosidad mediante el depósito de un recubrimiento de nanopartículas de  $\text{TiO}_2$ . En estos trabajos se muestra el aumento de rugosidad del vidrio solar como una solución viable para mitigar pasivamente el ensuciamiento, pero no consideran las características del polvo en distintas localidades alrededor del mundo.

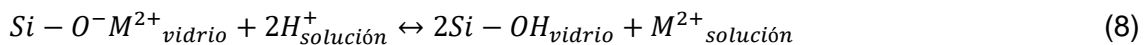
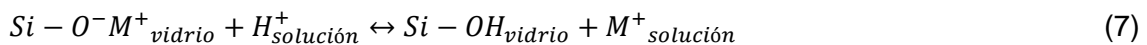
De lo anterior se desprende la necesidad de contar con un método de modificación superficial de vidrios protectores de módulos fotovoltaicos que ofrezca un alto grado de control de la rugosidad superficial asegurando la uniformidad de la rugosidad, que posea una alta reproducibilidad, que sea rápido y de bajo costo económico. En este contexto el decapado químico ha sido recientemente estudiado para aplicaciones en la industria fotovoltaica. En el 2014, Pichon et al. [70], desarrollaron un trabajo donde utilizaron diferentes agentes de decapado químico para modificar la superficie de los vidrios y se evaluaron los efectos de estos tratamientos en la transmisión de luz, la reflectividad y la eficiencia de las células solares. Los resultados mostraron que la aplicación de un agente de decapado químico específico mejoró significativamente la transmisión de luz y redujo la reflectividad, lo que a su vez aumentó la eficiencia de conversión de energía solar de las células solares sensibilizadas por colorante. Durante el 2015 Di Franco et

al. [71], investigaron la influencia de la técnica de decapado químico en la morfología de la superficie de vidrios utilizados en aplicaciones fotovoltaicas. Los investigadores aplicaron una solución de ácido fluorhídrico (HF) a diferentes tipos de vidrio y analizaron las propiedades de la superficie mediante técnicas de microscopía (AFM). Los resultados mostraron que el decapado químico puede reducir la rugosidad de la superficie del vidrio y mejorar la uniformidad de la capa depositada en la superficie. Estos cambios en la morfología de la superficie pueden mejorar la eficiencia del panel fotovoltaico al permitir una mejor absorción de la luz y una deposición uniforme de los materiales fotovoltaicos. Finalmente, en el estudio de Sadhu et al. [72], se demostró que el uso de ácido nítrico para el decapado químico puede mejorar la adhesión de las capas depositadas en la superficie del vidrio, lo que puede aumentar la durabilidad y estabilidad de los paneles fotovoltaicos. En conjunto, estos estudios demuestran que el decapado químico es un método eficaz para mejorar las propiedades de los vidrios utilizados en aplicaciones fotovoltaicas.

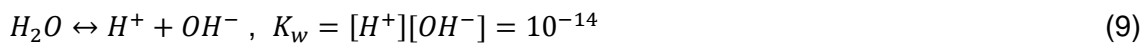
En el siguiente capítulo, se abordará el decapado químico como un método de mitigación pasiva del ensuciamiento, a través de la modificación superficial de cupones de vidrio Low-Iron y su ensayo en condiciones de ensuciamiento indoor.

### 3.2 Modificación superficial de vidrios

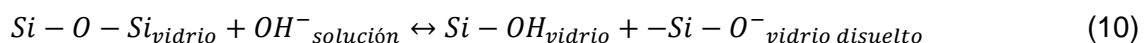
En general, la corrosión de los vidrios ocurre mediante intercambio iónico, la disolución de la red de SiO<sub>2</sub>, o una combinación de ambos mecanismos. Según la literatura, la corrosión del vidrio comienza por un proceso de intercambio iónico controlado por difusión que involucra el intercambio de iones alcalinos en el vidrio (M<sup>+</sup> =Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup> y M<sup>2+</sup> = Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>) e iones de hidrógeno del medio acuoso. Es decir, el agua del medio acuoso lixivia, o toma, iones alcalinos del vidrio. Esta etapa está dada por la siguiente Ecuación [73, 74]:



Posterior a esto, y debido al proceso de lixiviación, los niveles de pH aumentan gradualmente debido a la acumulación de iones hidróxido en la superficie del vidrio. La razón del aumento de pH corresponde a que el agua es un electrolito débil que se descompone espontánea y parcialmente en iones de hidrógeno (H<sup>+</sup>) e iones hidróxido (OH<sup>-</sup>). El equilibrio de esta descomposición responde a la constante de ionización del agua, la cual está dada por la siguiente Ecuación:



Mientras los niveles de pH de la solución permanezcan por debajo de 9, la corrosión se lleva a cabo principalmente por el proceso de lixiviación. Para niveles de pH mayores a 9, ocurre un cambio de mecanismo en la corrosión del vidrio comenzando la disolución de la red de SiO<sub>2</sub>, conocido como la segunda etapa de corrosión. Este mecanismo ocurre debido a la alta concentración de iones hidróxidos presentes en la solución, los cuales generan la ruptura de los enlaces silicio-oxígeno. Esta etapa está dada por la siguiente Ecuación [73, 74]:



En base a estos mecanismos de corrosión del vidrio, se decidió realizar un decapado químico de los vidrios solares, con el fin de modificar la rugosidad superficial y estudiar

su influencia en el proceso de ensuciamiento considerando polvo obtenido de las dos localidades en estudio.

Se utilizaron cupones de vidrio Low-Iron (LI) de 3 mm de espesor proporcionados por SNG Co. Ltda. con una superficie expuesta de 6 cm<sup>2</sup>. Para realizar el ataque químico se escogieron el hidróxido de sodio al 99% (NaOH) y el ácido clorhídrico al 37% (HCl), ya que esto permite aislar los diferentes mecanismos de corrosión. Al utilizar NaOH el mecanismo predominante será la disolución de la red, mientras que para el HCl será la lixiviación.

Los cupones de vidrio se sumergieron en soluciones con distintas concentraciones de NaOH y HCl. La composición de la solución de decapado seleccionada y el tiempo de inmersión se basaron en el informe de Cedillo-González et al [75], quienes modificaron la rugosidad de vidrio con el fin de mejorar la adherencia de un recubrimiento de TiO<sub>2</sub>. La nomenclatura de las muestras, así como las condiciones experimentales utilizadas para el decapado, se muestran en la Tabla 2. Obsérvese en esta Tabla que las muestras decapadas en una solución ácida utilizan una denominación que comienza con la letra "A"; mientras que las muestras decapadas en una solución alcalina emplean un nombre que comienza con la letra "B" (básica). RS indica el vidrio solar de referencia, no tratado.

Tabla 2. Nomenclatura de las muestras y condiciones experimentales usadas en el decapado químico de los vidrios.

Nomenclatura muestra	Reactivo	Concentración	Tiempo de inmersión
RS	-	-	-
A-12M-30	HCl	12M	30 min
A-12M-180	HCl	12M	180 min
A-1,1M-120	HCl	1,1M	120 min
B- 12M-30	NaOH	12M	30 min
B-12M-120	NaOH	12M	120 min

La rugosidad de la superficie de las muestras se caracterizó con un microscopio de fuerza atómica (AFM), modelo AIST-NT, operado en modo semi-contacto en condiciones atmosféricas. Se realizaron cinco barridos de 20 x 20 μm<sup>2</sup> en sectores elegidos al azar de cada muestra, para garantizar un promedio espacial de la rugosidad, misma metodología previamente reportada por Tan, et. al. [76]. Los parámetros morfológicos de la superficie - altura media aritmética (Sa), altura media cuadrática (Sq), altura máxima (Sz) - se obtuvieron utilizando el software WSxM 5.0.

El parámetro de rugosidad más utilizado en la descripción de una superficie es la rugosidad media aritmética ( $S_a$ ), la que se define como la desviación media absoluta de las irregularidades de la rugosidad con respecto a la línea media [77, 78]:

$$S_a = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx \quad (11)$$

La rugosidad media cuadrática ( $S_q$ ) o también conocida como RMS, representa la desviación estándar de la distribución de las alturas de la superficie. Describe la rugosidad de la superficie por el método estadístico dado por la siguiente Ecuación:

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l Z^2(x) dx} \quad (12)$$

Donde  $Z(x)$  es el perfil de altura y  $l$  es la longitud del perfil. La altura máxima ( $S_z$ ) representa la suma de la altura máxima del pico ( $S_p$ ) y la profundidad máxima del valle ( $S_v$ ) de un perfil:

$$S_z = S_p + S_v \quad (13)$$

Los parámetros de rugosidad superficial, curtosis y asimetría se utilizan para describir la distribución de alturas, proporcionando una mejor descripción de las formas de los perfiles superficiales, lo que complementa a la información entregada por la rugosidad aritmética ( $S_a$ ) y la rugosidad media cuadrática ( $S_q$ ). La curtosis ( $S_{ku}$ ) describe la agudeza de la distribución de la altura del perfil y se calcula como [82]:

La curtosis ( $S_{ku}$ ) describe estadísticamente la distribución en altura del perfil y se representa mediante la Ecuación 14 [79]:

$$S_{ku} = \frac{1}{\sigma_l^4} \frac{1}{n_l} \sum_{i=1}^{n_l} \left( \frac{1}{p_l} \sum_{j=1}^{p_l} Z_j^4 \right) \quad (14)$$

La asimetría ( $S_{sk}$ ) describe la simetría del perfil con respecto a la línea media y se calcula de la siguiente manera [79]:

$$S_{sk} = \frac{1}{\sigma_l^3} \frac{1}{n_l} \sum_{i=1}^{n_l} \left( \frac{1}{p_l} \sum_{j=1}^{p_l} Z_j^3 \right) \quad (15)$$

En las ecuaciones 14 a 15,  $l$  es la longitud de muestreo,  $\sigma_l$  es la rugosidad dependiente de la longitud de muestreo,  $n_l$  es el número de intervalos de longitud  $l$ ,  $p_l$  es el número de puntos dentro de  $l$  y  $z_j$  corresponde a la  $j$ -ésima variación de altura desde la línea de mejor ajuste dentro del intervalo  $i$ .

En general, una curtosis igual a 3 ( $S_{ku} = 3$ ) indica que los perfiles de altura son mesocúrticos, es decir, la rugosidad de la superficie posee distribución normal de alturas. Los valores de  $S_{ku} > 3$  indican que los perfiles de la superficie tienden a tener picos más agudos, lo que también se denomina leptocúrtico. Valores de  $S_{ku} < 3$  indica que los perfiles de altura de la superficie son platicúrticos, es decir, la superficie es más redondeada. Respecto a la asimetría, cuando este valor es igual a cero significa que hay una distribución de altura normal. En el caso de que  $S_{sk} > 0$ , indica un predominio de picos en la superficie, mientras que para valores negativos ( $S_{sk} < 0$ ), esto representa una superficie con más valles.

La topografía superficial de los cupones analizados mediante AFM se muestra Figura 35. En estos análisis se incluyeron cupones de vidrio ArAs como vidrio de referencia, cabe destacar que este vidrio no fue modificado superficialmente mediante decapado químico. Nótese que en esta Figura las escalas en los ejes horizontales y verticales son diferentes; el eje de las abscisas está en micrómetros mientras que las alturas están trazadas en nanómetros. Este cambio permite dar mayor énfasis a las irregularidades de la superficie.



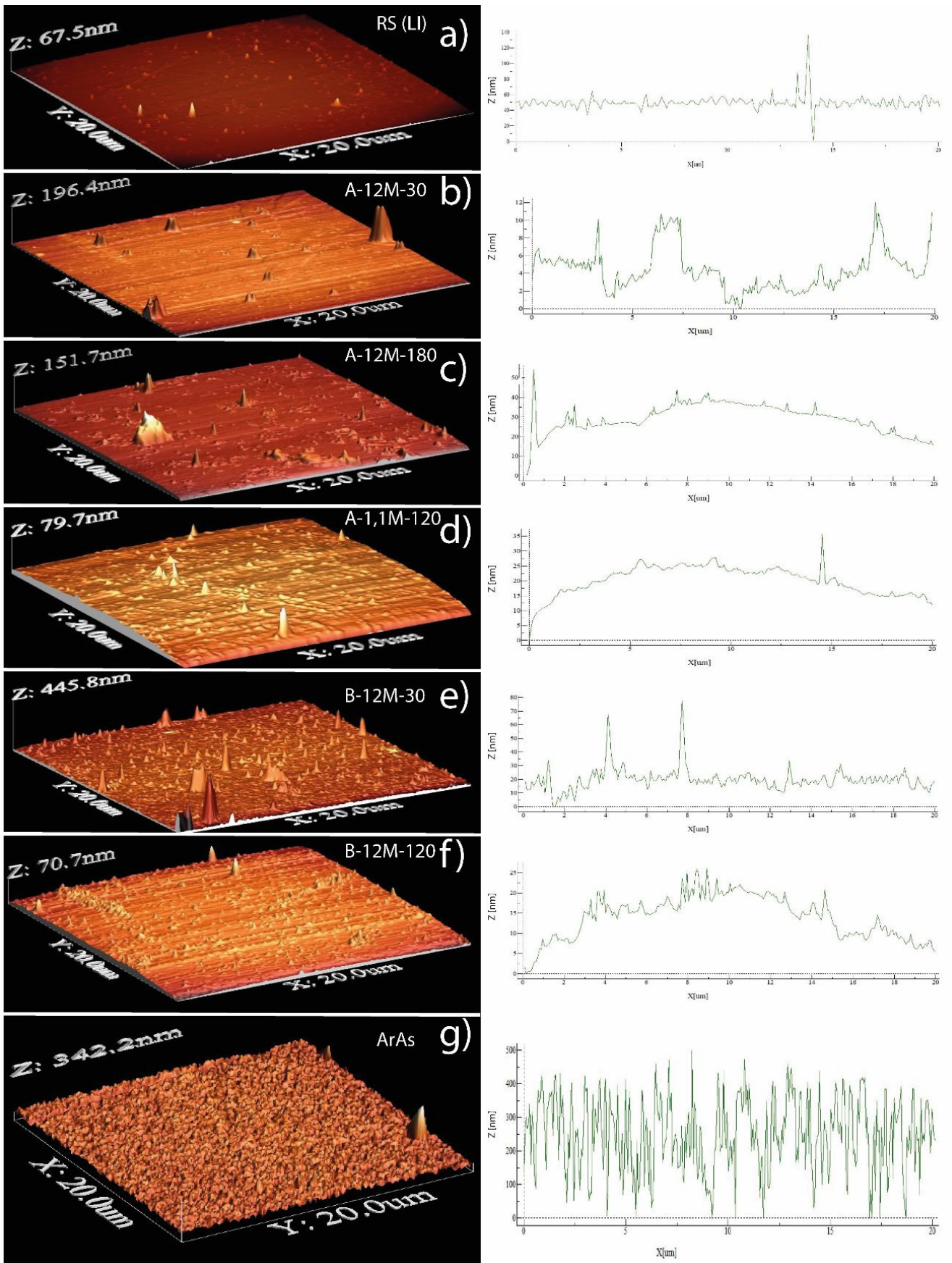


Figura 35. Imágenes AFM y perfil de altura de las muestras a) RS, b) A-12M-30, c) A-12M-180, d) A-1,1M-120, e) B-12M-30, f) B-12M-120 y g) ArAs.

Los parámetros morfológicos superficiales de todas las muestras se presentan en la Figura 36. De esta Figura se puede observar que la muestra de referencia (RS) posee los valores más bajos de rugosidad en comparación con las muestras decapadas, indicando su condición de superficie plana con baja o ligera rugosidad como se ha descrito en la literatura [75]. Para el cupón ArAs (Figura 35g) se observa una topografía uniforme en toda su superficie, con parámetros morfológicos notoriamente mayores en comparación con las demás muestras analizadas.

El cupón A-1,1M-120, decapado en solución ácida 1,1 M durante 120 minutos presentó valores bajos de rugosidad (Figura. 35d), al igual que el cupón RS utilizado como referencia (Figura. 35a). Esto podría estar relacionado con la menor concentración del reactivo ácido en el proceso de decapado en comparación con los demás decapados ácidos, lo que podría generar que la interfaz vidrio-solución esté más cerca del equilibrio termodinámico, es decir, la concentración de iones  $H^+$  corresponde al reactivo limitante de la reacción (ver Ecuación 7). Con esto, la reacción de lixiviación se hace más lenta, afectando ligeramente a la rugosidad de la superficie [80]. Las muestras decapadas con reactivo alcalino durante un tiempo prolongado (B-12M-120) presentaron los mayores cambios en la rugosidad de la superficie en comparación con las muestras decapadas con reactivo ácido (A-1,1M-120, A-12M-30 y A-12M-180). Este comportamiento se puede atribuir al hecho de que el decapado químico en medios básicos promueve la reacción de disolución de la red de sílice ( $SiO_2$ ). Esta reacción (Ecuación 10) está relacionada con cambios evidentes en la rugosidad de la superficie, ya que este proceso es más agresivo con la superficie del vidrio en comparación con el proceso de lixiviación [80]. Esto último responde a que a medida que aumenta el pH en la solución (a temperatura constante,  $25^\circ C$ ) la solubilidad de la red de sílice aumenta. Por ejemplo, la solubilidad a pH 2 es tan solo de  $1,5 \times 10^4$  g  $SiO_2$ /g solución, mientras que para un pH 10,3 es de  $8,8 \times 10^4$  g  $SiO_2$ /g solución [81]. Este proceso disolutivo está controlado por una dependencia lineal con el tiempo de reacción [80]. La muestra tratada con el reactivo básico durante un tiempo acotado (B-12M-30) exhibió una rugosidad sólo mayor a la muestra A-1,1M-120. Esto demuestra que la exposición prolongada de la superficie del vidrio provoca cambios notorios en la rugosidad, mientras que una exposición acotada no genera grandes cambios de rugosidad. Este comportamiento concuerda con lo reportado anteriormente por E. I. Cedillo-González [75].

Por otro lado, para el caso del decapado en medio ácido (A-12M-30 y A-12M-180) se observa una relación inversamente proporcional, es decir, para tiempos menores se obtiene una mayor rugosidad. En el caso del decapado básico (B-12M-30 y B-12M-120) se observa un comportamiento opuesto a lo observado en el decapado ácido. Esta diferencia puede atribuirse principalmente a la diferencia en el mecanismo de corrosión

preferente que ocurre en cada caso. Para el decapado ácido se puede atribuir principalmente al hecho de que al principio de las reacciones químicas la concentración del reactivo del decapado es extremadamente alta, es decir, la interfaz vidrio-solución está muy lejos del equilibrio termodinámico. Esto da lugar a una alta velocidad de decapado en las zonas preferentes de la superficie del vidrio, lo que provoca un cambio notable en la topografía de la superficie.

En general, para todos los cupones de vidrio modificados superficialmente, los parámetros morfológicos  $S_q$ ,  $S_a$  y  $S_z$  siguen la misma tendencia anteriormente mostrada respecto al tipo de reactivo, concentración y tiempo de exposición. A su vez, estos parámetros morfológicos coincide con lo observado en las imágenes AFM y el perfil de alturas (Figura 35) de cada cupón analizado.

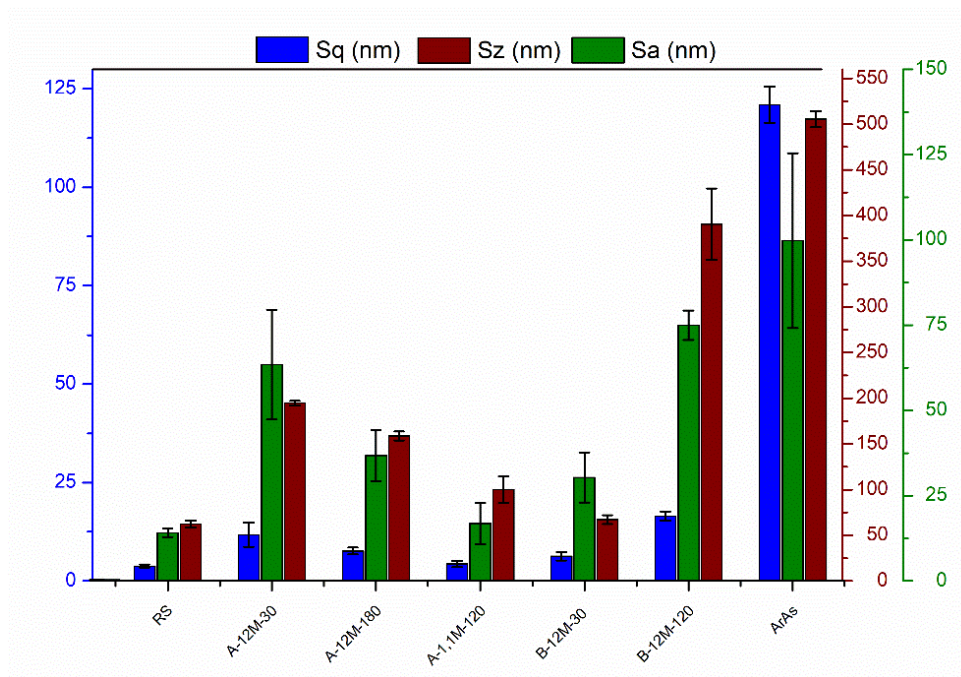


Figura 36. Parámetros morfológicos de la superficie de las muestras, rugosidad media cuadrática ( $S_q$ ) (barras azules), altura máxima ( $S_z$ ) (barras rojas) y rugosidad media aritmética ( $S_a$ ) (barras verdes).

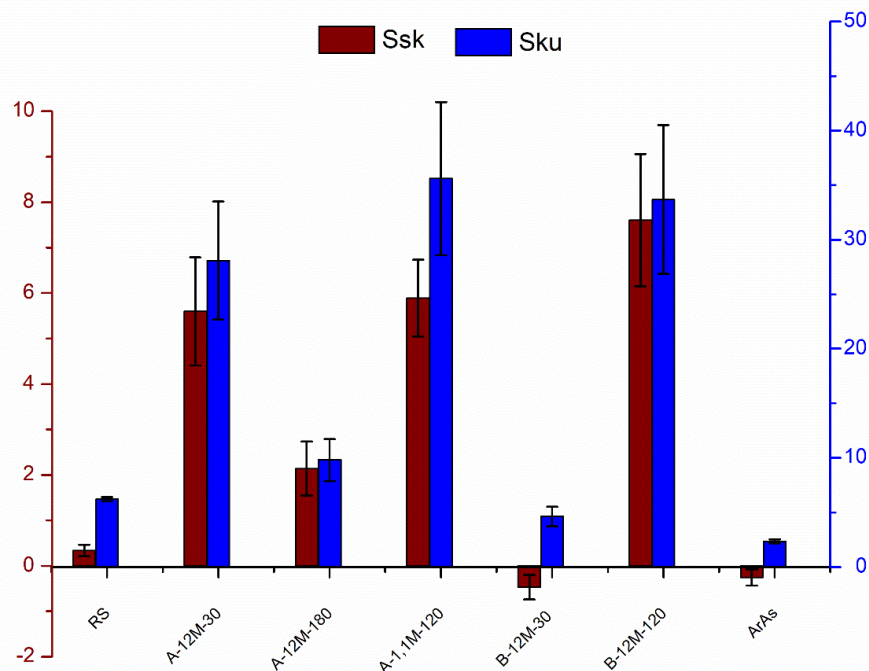


Figura 37. Parámetros de rugosidad superficial de las muestras como asimetría (Ssk) (barras granates) y curtosis (Sku) (barras azules).

En la Figura 37 se muestran los parámetros de rugosidad superficial de los cupones decapados, RS y ArAs. Se observa que la muestra de referencia presentó valores de Ssk cercanos a cero, lo que indica que la superficie posee un número similar de picos y valles y que son de tamaños similares. En cuanto a Sku, presentó un valor cercano a cinco, indicando que los picos de su superficie son predominantemente puntiagudos. Es decir, la muestra de referencia presenta una superficie plana, pero con la presencia de algunos picos de menor altura. Estos resultados complementan lo mostrado en la Figura 36, ambos resultados en conjunto cuantifican lo mostrado en la Figura 35 a). El cupón ArAs (Figura 35 g) presentó valores de Ssk negativos, indicando una superficie con predominancia de valles por sobre picos. Para el caso de la curtosis, el cupón ArAs mostró un valor cercano a 3, indicando que la muestra presenta una distribución normal de alturas. En el caso de las muestras A-12M-30, A-1,1M-120 y B-12M-120, presentaron valores elevados en ambos parámetros ( $Sku \gg 3$ ,  $Ssk \gg 0$ ), indicando que su distribución de alturas es puntiaguda y una predominancia de picos en sus superficies. En el caso las muestras A-12M-180 y B-12M-30, estas presentaron valores de curtosis levemente sobre 3, es decir, poseen una distribución de alturas puntiaguda. No obstante, el valor de asimetría de la muestra B-12M-30 es negativo, al igual que el cupón ArAs, lo que indica que la predominancia de valles en su superficie. Es importante señalar que estas características superficiales son relevantes en las propiedades de anti-ensuciamiento y

ópticas de los vidrios FV. Como se mencionó con anterioridad, la rugosidad de la superficie juega un papel relevante en la modulación de las fuerzas de adhesión entre las partículas de polvo y la superficie del vidrio [83, 84].

Para analizar el efecto del cambio de rugosidad de los vidrios FV en sus propiedades ópticas, se cuantificó la transmitancia de cada cupón mediante la utilización de un espectrofotómetro. La Figura 38 muestra el espectro de transmitancia obtenido del análisis de cada muestra en el rango de longitudes de onda de 300 a 1000 nm. De esta Figura se puede observar que la muestra de referencia (RS) presenta un porcentaje de transmitancia del 91,2%, mientras que el cupón de vidrio ArAs mostró un porcentaje de transmitancia de un 93%. Un comportamiento similar se observó en las muestras A-12M-180, A-1,1M-120 y B-12M-30 (91,1%, 91,1% y 91,2% respectivamente), mientras que las muestras A-12M-30 y B-12M-120 mostraron una considerable disminución de la transmitancia, con pérdidas de alrededor del 8 %.

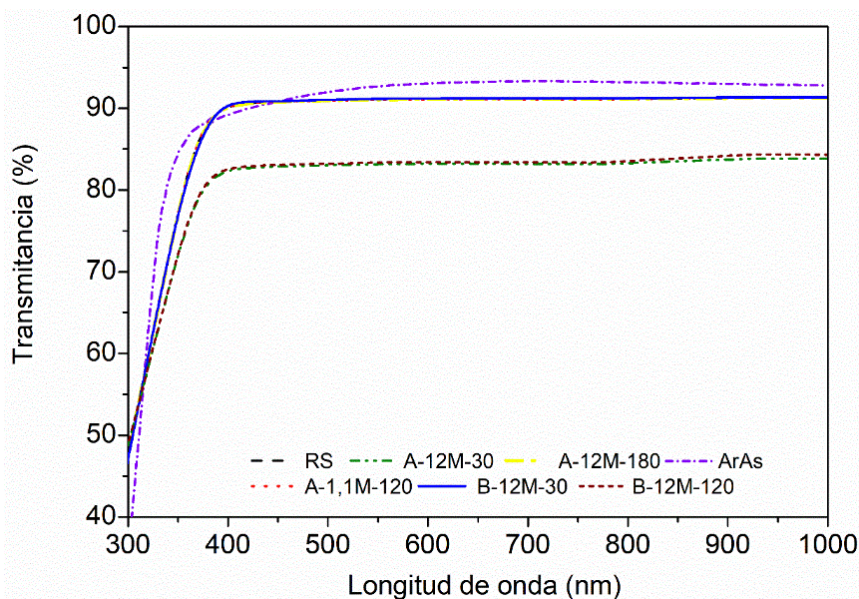


Figura 38. Espectro de transmitancia de los cupones RS, ArAs y cupones modificados superficialmente.

Las propiedades ópticas de una superficie son una función sensible de su rugosidad [85]. El comportamiento observado en las muestras A-12M-30 y B-12M-120 se puede explicar por la presencia de partículas residuales incrustadas en su superficie. Sin embargo, estas partículas no se logran visualizar en las imágenes AFM, por lo que la presencia de estas partículas se comprueba a través de la diferencia en los valores de  $S_z$  y  $S_a$  [75], siendo mayores para estos dos cupones en comparación con los demás vidrios modificados (ver Figura 36). Según la literatura, estas partículas residuales son

productos de la corrosión del vidrio y corresponden principalmente a sulfatos como el yeso, la arcanita ( $K_2SO_4$ ) o singenita ( $CaSO_4 \cdot K_2SO_4 \cdot H_2O$ ), aunque también se han reportado carbonatos como la calcita o cloruros como el cloruro de potasio (KCl) [86]. Es importante destacar que la composición química de estas partículas influye directamente en la interacción con la luz incidente, y dado que los mecanismos de corrosión son diferentes, cabría esperar una composición química diferente de estas partículas residuales para estas muestras en particular. Además, ambas muestras poseen parámetros de rugosidad superficial similares. En efecto, la superficie de estas muestras presenta una forma redondeada (Figura 35b y 35f), esta forma puede inducir a que la luz sea dispersada o reflejada y no transmitida completamente por la superficie del vidrio.

En base a los resultados obtenidos, se decidió descartar las muestras que presentaban una disminución de sus propiedades ópticas (transmitancia) y, por tanto, sólo se sometieron al ensayo de ensuciamiento las muestras A-1, 1M-120, A-12M-180 y B- 12M-30, además de la muestra patrón (RS) y la con recubrimiento ArAs (antireflejo-antisoiling), ambas utilizadas como referencia.

### 3.3 Ensayo de ensuciamiento indoor

Con el objetivo de evaluar el comportamiento de los vidrios modificados se realizó un ensayo de ensuciamiento indoor. Se utilizaron cupones de vidrio RS y ArAs como muestras de control.

El sistema de ensuciamiento y sus componentes se muestran en el esquema de la Figura 39. Un cupón de vidrio con un área de 12 cm<sup>2</sup> es posicionado en el soporte de muestra con una inclinación de 20°, similar a la estructura utilizada en las campañas de muestreo en terreno. Durante la prueba, se activa un ventilador durante 10 segundos (Figura 39b) hasta remover la carga inicial de polvo (10 gramos). Posterior a esto, la cámara se mantiene cerrada hasta que el material en suspensión decanta totalmente. Parámetros atmosféricos como la humedad relativa y la temperatura dentro de la cámara fueron medidos con un termohigrómetro. Cabe mencionar que, para imitar la acción de fuerzas externas, después de la prueba de ensuciamiento se aplicaron 10 desplazamientos verticales antes del ensayo gravimétrico en las muestras. El desempeño de los cupones se cuantificó de manera similar a lo realizado en la sección 2.2 y 2.3, esto es, mediante análisis MEB, análisis gravimétricos y caracterización óptica.

El parámetro más importante en la interacción entre las características de una superficie y la partícula adherida es el tamaño relativo entre ellas, es decir, su rugosidad y el tamaño de la partícula [87]. Por ello, es importante mencionar las características del polvo utilizado para las pruebas de ensuciamiento. El polvo utilizado correspondió a tierra aledaña a los módulos fotovoltaicos instalados en las plantas El Salvador PV y María Elena PV, su caracterización fisicoquímica se mostró en la sección 2.1.2. Es importante notar la notable diferencia entre las distribuciones de tamaño de partículas de ambas muestras, especialmente, en el porcentaje de partículas finas (tamaño menor a 10 µm) siendo un 6,45% y 34% para Salvador PV y María Elena PV, respectivamente. Por otro lado, para ambos casos la composición mineralógica es similar a lo reportado en las secciones 2.2 y 2.3, respectivamente.

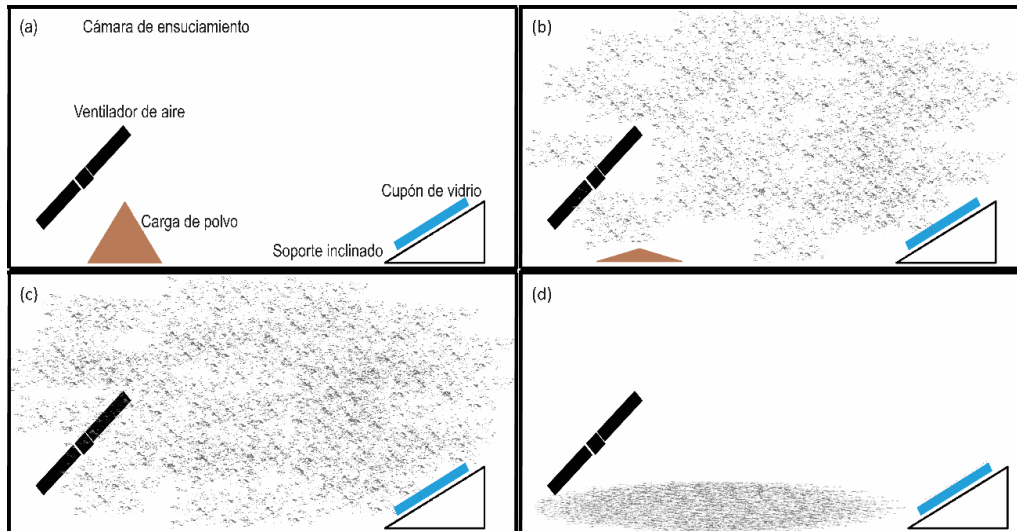


Figura 39. Ensayo de ensuciamiento: a) Esquema del sistema de ensuciamiento, (b) etapa inicial donde el ventilador es activado, (c) la carga de polvo queda en suspensión debido a la acción del ventilador y (d) el experimento finaliza cuando todo el polvo en suspensión decanta.

### 3.3.1 Caracterización física del ensuciamiento

Al igual que en la sección 2.2.4, se realizaron análisis a las imágenes MEB de los cupones testeados en el ensayo de ensuciamiento. Para estos análisis se utilizó el software de procesamiento de imágenes Image J y una metodología similar a la empleada en la sección 2.2.4. Estos análisis mostraron diferencias entre la muestra de referencia y los vidrios modificados en cuanto a las características físicas del polvo depositado.

En la Figura 40 se muestran imágenes MEB representativas para el ensayo realizado con polvo de El Salvador PV tras la eliminación artificial del polvo en cada muestra. Se puede observar la presencia de partículas de polvo individuales y aglomerados con diferentes formas. Estas partículas de polvo se dividen en dos grupos: partículas grandes de forma angular (flechas azules) y partículas más pequeñas de forma esferoidal (flechas rojas). Las partículas de polvo más pequeñas tienden a formar aglomerados (flechas negras) entre ellas o cubriendo las partículas más grandes. Cabe mencionar, que estas características morfológicas de las partículas de polvo coinciden con lo observado anteriormente en la sección 2.2.4.



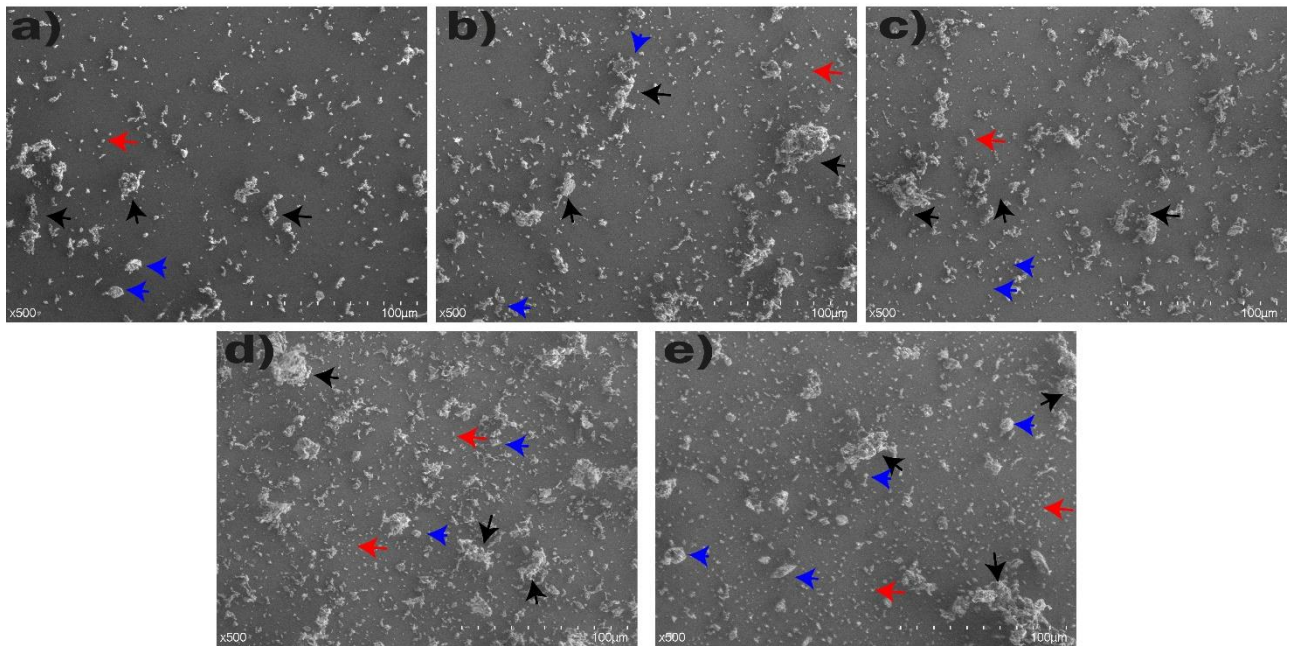


Figura 40 .Imágenes MEB de los cupones de vidrio modificado ensayados con polvo de El Salvador a) A-1,1M-120, b) A-12M-180, c) B-12M-30, d) RS y e) ArAs.

La Figura 41a) muestra las curvas de distribución de frecuencias de tamaño de partículas para los cupones ensayados utilizando polvo de Salvador PV. De esta Figura, se puede observar que todas son pseudo-unimodales pequeños con picos ubicados en el rango de 40 a 110  $\mu\text{m}$ . Estos picos se atribuyen a aglomerados de partículas con tamaños en este rango como los que se indican con flechas negras en la Figura 40. Se puede observar que en las muestras RS y A-1,1M-120 poseen una mayor cantidad de aglomerados o aglomerados de mayor tamaño en su superficie que las demás muestras. Esto último queda en evidencia al analizar el inserto de la Figura 41a), donde es posible observar que el cupón RS posee aglomerados de mayor tamaño ( $\sim 110 \mu\text{m}$ ); mientras que el cupón A-1,1M-120 posee la mayor cantidad de aglomerados de tamaño 40  $\mu\text{m}$ . Por su parte, la Figura 41b) muestra parámetros estadísticos como la media, mediana, mínimo y los percentiles 75 y 25. De esta última Figura es posible observar la diferencia que existe entre valores medios y la mediana ( $\text{media} > \text{mediana}$ ). Esto es atribuible a la presencia de valores extremos que desplazan la media, es decir, la presencia de aglomerados de gran tamaño en la superficie de los cupones analizados. Es importante notar que para el cupón ArAs se observó que el 75% de las partículas de polvo depositadas en su superficie poseen un tamaño menor a 3  $\mu\text{m}$ .

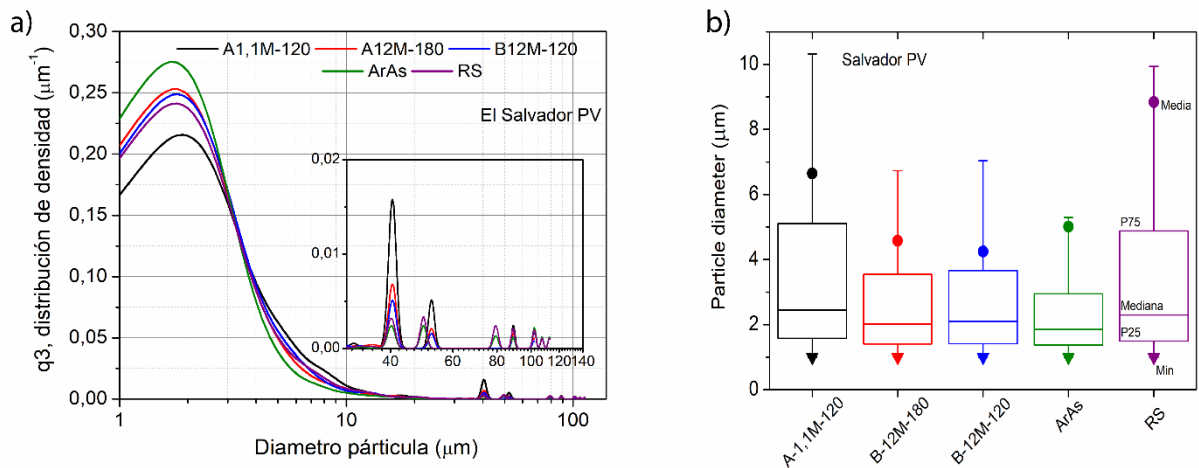


Figura 41. Análisis de imágenes MEB para cupones ensayados utilizando polvo de El Salvador PV: a) distribución del tamaño de las partículas (q3) y b) distribución por cuartiles (gráficos de caja).

Las imágenes MEB de los cupones ensayados con polvo de María Elena PV se muestran en la Figura 42. De esta Figura, y al igual que en la Figura 40, se pueden observar los dos tipos de partículas mencionadas, como también la presencia de aglomerados con diferentes tamaños en la superficie de las muestras ensayadas. Cabe destacar que el fondo de las imágenes MEB mostradas en las Figuras 40 y 42 poseen un color gris oscuro, descartando así la formación de una pequeña capa de partículas sobre las muestras ensayadas. Esto último debido a que a pesar de que existen alguna de las condiciones necesarias para que ocurran los procesos de *caking* o cementación, estos ocurren de manera parcial, al menos el apelmazamiento, ya que no existe una variación cíclica de los parámetros ambientales (humedad relativa y temperatura), como si ocurre en las imágenes MEB de las campañas de muestreo mostradas en la sección 2.2.4 y 2.3.

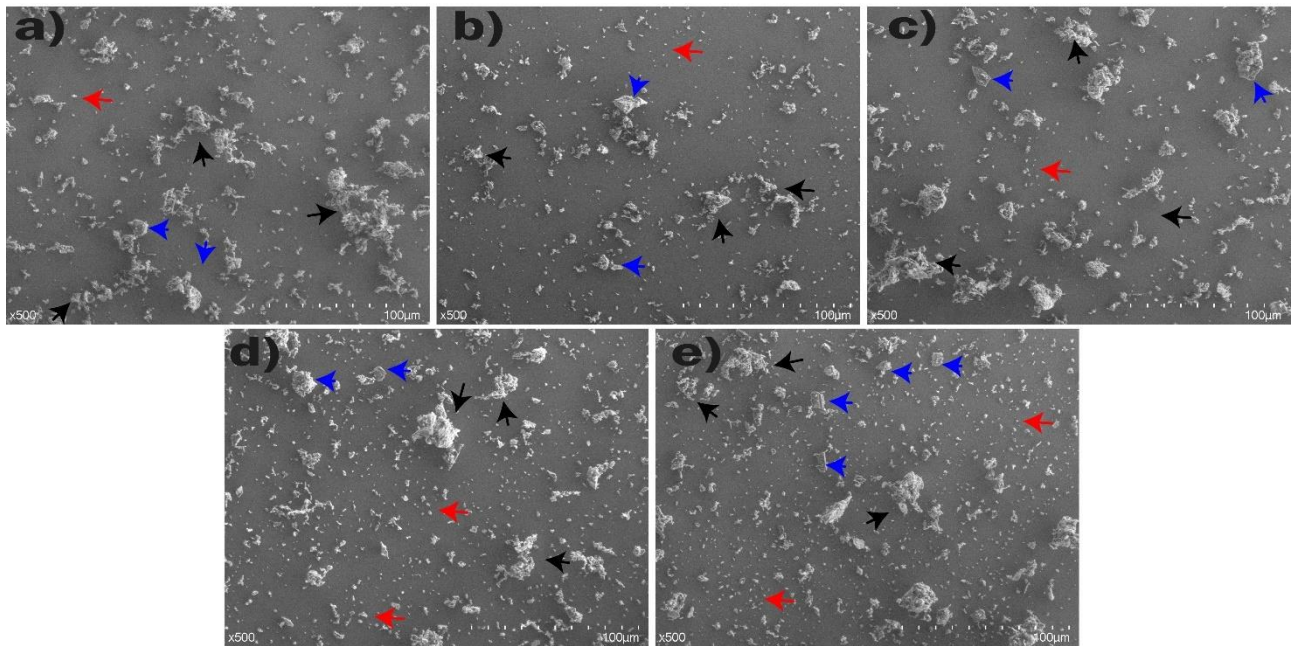


Figura 42. Imágenes MEB de los cupones de vidrio modificado ensayados con polvo de María Elena a) A-1,1M-120, b) A-12M-180, c) B- 12M-30, d) RS y e) ArAs.

Las curvas de distribución de tamaño de las partículas de los cupones ensayados con polvo de María Elena PV, se muestran en la Figura 43a). Se observa un comportamiento similar a la Figura 41a), es decir, curvas de distribución pseudo-unimodales. Sin embargo, se observan picos que están en el rango entre 20 a 112  $\mu\text{m}$  (ver inserto Figura 43 a). En particular, se observa que los cupones A-12M-180 y B-12M-180 (curva roja y azul, respectivamente) presentan partículas angulares (flechas azules en Figuras 42b) y 42c) distribuidas de manera aleatoria en su superficie. De la Figura 44b) es posible observar que los valores medios y la mediana se comportan de manera similar a lo observado en el ensayo de ensuciamiento con polvo de El Salvador PV. En particular, los cupones ArAs y RS poseen un mayor número de aglomerados en su superficie mostrando una mayor diferencia entre los valores medios y sus respectivas medianas. A pesar de esto, el tamaño y el número de aglomerados presente en la superficie de estos cupones son totalmente distintos. En el inserto de la Figura 43a) es posible observar que el cupón ArAs posee aglomerados con tamaños entre los 60 y 75  $\mu\text{m}$ , mientras que el cupón RS presenta aglomerados con tamaños entre los 40 y 112  $\mu\text{m}$ .

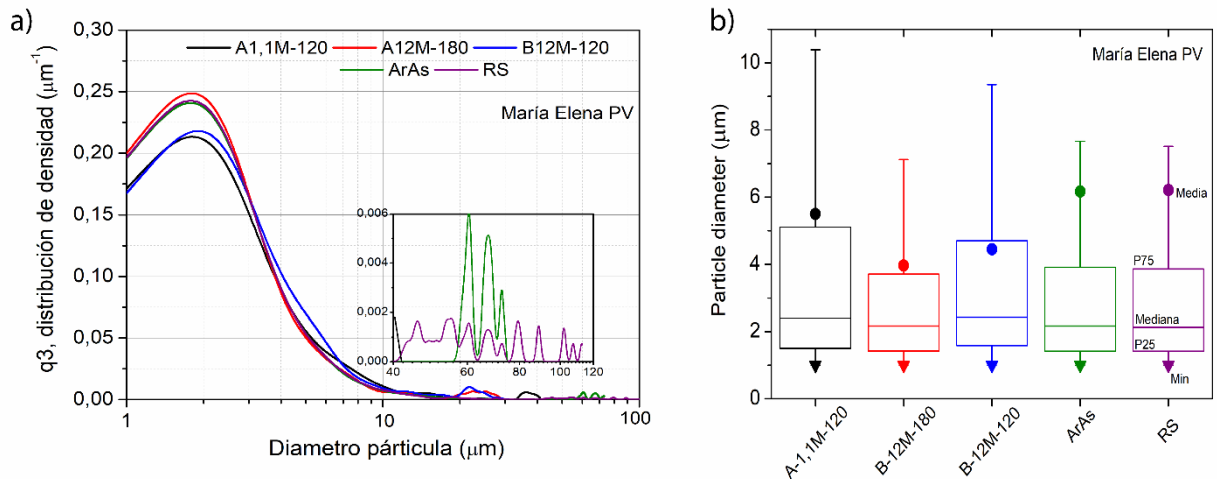


Figura 43. Análisis de imágenes MEB para cupones ensayados utilizando polvo de María Elena PV: a) distribución del tamaño de las partículas (q3) y b) distribución por cuartiles (gráficos de caja).

En general, las principales diferencias entre las distribuciones de tamaño de partículas entre ambos ensayos corresponden al número y tamaño de los aglomerados presentes en la superficie de cada cupón. Esto se atribuye a las diferencias superficiales de cada cupón y al tamaño de las partículas de polvo de cada ensayo. En efecto, para el ensayo realizado con polvo de El Salvador PV, la diferencia en los parámetros morfológicos y de rugosidad hacen que los cupones modificados superficialmente acumulen una proporción de aglomerados en su superficie en comparación a los cupones de referencia (ArAs y RS). Por su parte, en el ensayo realizado con polvo de María Elena PV, estas diferencias permiten a los vidrios modificados superficialmente, no tan solo acumular un menor número de aglomerados de polvo sino también de menor tamaño. Esto último se observa al comparar los insertos de las Figuras 41a) y 43a).

Al comparar los resultados de ambos ensayos es posible observar que los cupones ensayados con polvo de El Salvador PV mostraron un mayor número de aglomerados de polvo, como también aglomerados de mayor tamaño que en los cupones ensayados con polvo de María Elena PV. Esto último debido a las características fisicoquímicas del polvo de El Salvador PV, en particular a la diferencia de tamaño que existe entre ambos polvos (Figura 4) y a los valores de humedad relativa en la cámara de ensuciamiento (HR ~40%). Es importante mencionar, que para todos los cupones de vidrio ensayados con polvo de El Salvador PV se observó que la mediana es menor a 2,5  $\mu\text{m}$ , es decir, el 50% de las partículas de polvo depositadas posee un tamaño menor a este valor, mientras que para los cupones ensayados con polvo de María Elena PV las medianas fueron menores a 2,4  $\mu\text{m}$ . Esto muestra que para ambos casos la mayoría de las partículas depositadas sobre los cupones de vidrio corresponde a material particulado PM2.5. Este hecho concuerda con lo observado en los cupones expuestos en condiciones reales en ambos emplazamientos en las secciones 2.2.4 y 2.3.

### **3.3.2 Relación entre las características del ensuciamiento y la transmitancia de los vidrios modificados**

Mediante ensayos gravimétricos se cuantificaron las cargas de polvo acumuladas por los cupones probados en ambos ensayos de ensuciamiento. La metodología utilizada fue similar a la de la sección 2.2.2, con la diferencia que las masas de los cupones se midieron antes y después de los desplazamientos verticales. También se cuantificó la pérdida de transmitancia utilizando un espectrofotómetro de la misma manera que la sección 2.2.5. Es importante señalar que la pérdida de transmitancia de los cupones modificados se calculó tomando como referencia un vidrio solar limpio (RS).

Para el caso del cupón ArAs se calculó en base a su condición limpia.

En la Tabla 3 se muestran las carga de polvo acumuladas por los cupones de vidrio ensayados antes y después de la aplicación de los desplazamientos verticales. De esta Tabla es importante notar la efectividad que tuvieron los desplazamientos verticales en la remoción de polvo, es decir, la diferencia de peso entre la condición inicial y su condición final. Para el ensayo realizado con polvo de El Salvador PV, se observó que los vidrios modificados obtuvieron un mayor porcentaje de remoción en comparación con los cupones ArAs y RS alcanzando un 23 y 14%, respectivamente. En el caso del ensayo realizado con polvo de María Elena PV se observó que las muestras de referencia alcanzaron porcentajes de remoción cercanos al 50%, similar desempeño que los cupones A-1,1M-120 y B-12M-30. A pesar de esto, los cupones ArAs y RS mostraron mayores cargas de polvo acumulado después de la aplicación de los desplazamientos verticales, indicando que la adherencia del polvo a estos vidrios es mayor que en el caso de las muestras modificadas.

Tabla 3. Carga de polvo acumulada para los vidros modificados y los cupones de referencia en ambos ensayos de ensuciamiento.

Cupón	Salvador PV			María Elena PV		
	Carga de polvo (gm <sup>-2</sup> )			Carga de polvo (gm <sup>-2</sup> )		
	Antes	Después	% Remoción	Antes	Después	% Remoción
A-1,1M-120	2,4 ± 0,27	1,2 ± 0,2	50%	3,5 ± 0,17	1,8 ± 0,2	49%
A-12M-180	2,9 ± 0,33	1,7 ± 0,3	41%	3,8 ± 0,3	1,3 ± 0,35	66%
B-12M-30	2,0 ± 0,3	0,7 ± 0,28	65%	1,1 ± 0,2	0,5 ± 0,1	55%
ArAs	2,85 ± 0,43	2,2 ± 0,4	23%	5,9 ± 0,2	2,9 ± 0,3	51%
RS	3,5 ± 0,7	3,0 ± 0,6	14%	6,7 ± 0,6	3,6 ± 0,5	46%

Para visualizar de mejor manera el efecto de la carga de polvo sobre las propiedades ópticas de los cupones, se graficó la pérdida de transmitancia de cada cupón en función de la carga acumulada final (Figura 44). De esta Figura se puede observar que la pérdida de transmitancia y la carga de polvo tienen una relación directa en ambos ensayos de ensuciamiento. Los cupones referencia (RS) fueron los que más polvo acumularon y mayor pérdida de transmitancia presentaron, seguidos por los cupones ArAs.

Al comparar las cargas acumuladas por los cupones de vidrio en ambos ensayos, es posible observar que los cupones A-1,1M-120, ArAs y RS acumularon una mayor carga de polvo para el ensayo realizado con polvo de María Elena PV, mientras que los cupones A-12M-180, ArAs y RS, acumularon una mayor carga de polvo para el ensayo realizado con polvo de El Salvador PV. Este comportamiento demuestra que la rugosidad de la superficie del cupón afecta directamente las características del ensuciamiento. Es decir, las propiedades superficiales de los cupones A-1,1M-120 y A-12M-180 resultan tener comportamientos distintos al ser evaluados bajo distintos tipos de polvo. Mientras que las propiedades superficiales del cupón B-12M-30 resultan ser efectivas independiente del tipo de polvo utilizado en el ensayo.

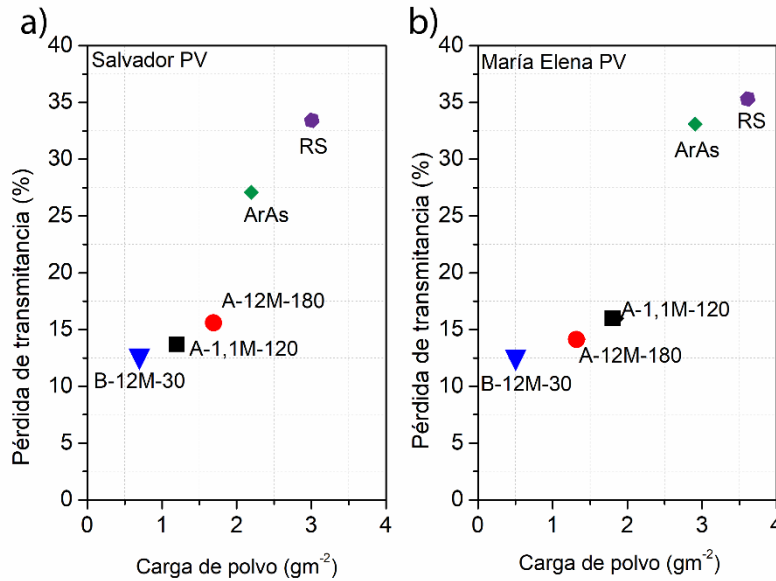


Figura 44. Relación entre carga acumulada de polvo y pérdida de transmitancia para los vidrios ensayados utilizando polvo a) El Salvador PV y b) María Elena PV.

Mediante el análisis de las imágenes de MEB se determinaron los porcentajes de cobertura superficial (SC) de cada cupón de vidrio. En la Figura 45 se muestran los porcentajes de pérdida de transmitancia en función de los valores de cobertura superficial de los vidrios ensayados con ambos tipos de polvo. Esta Figura muestra que la cobertura superficial y la pérdida de transmitancia tienen una relación 69 Al igual a lo observado en la Figura 44, las muestras de referencia (RS) obtuvieron la mayor pérdida de transmitancia en ambos casos, alcanzando reducciones de 33,4 y 35,3% para Salvador PV y María Elena PV, respectivamente. También es posible observar que el desempeño de los cupones ArAs es levemente superior al de los cupones RS en ambos ensayos. Esto último difiere con los resultados obtenidos en terreno, este comportamiento se atribuye a la gran diferencia en el tiempo de exposición al ensuciamiento entre los ensayos de terreno e indoor.

En general, los cupones modificados superficialmente obtuvieron menores reducciones en sus transmitancias al compararlos con los cupones ArAs y RS. Esto último debido a las características superficiales que poseen estos cupones, las cuales les permiten acumular menores cantidades de polvo, obtener menores áreas de vidrio cubiertas por polvo y, en consecuencia, menores pérdidas de transmitancia.



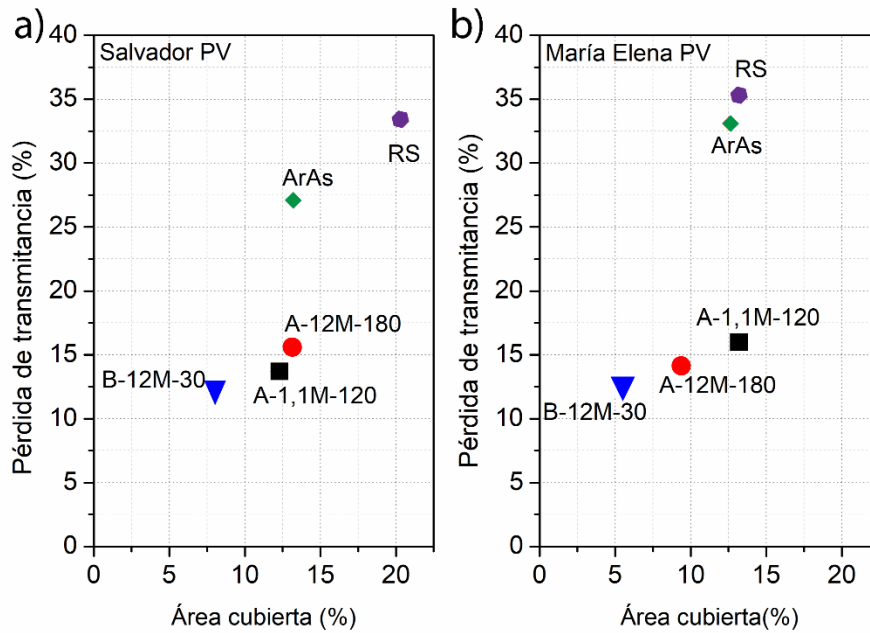


Figura 45. Relación entre superficie cubierta y pérdida de transmitancia para los vidrios probados utilizando polvo de a) El Salvador PV y b) María Elena PV.

Es sabido que un mayor detrimento de la transmitancia de los vidrios FV está asociado a una mayor carga de polvo y a una mayor área de vidrio cubierta por este [14, 61]. Sin embargo, de los resultados de ambos ensayos se observa que los cupones ensayados con polvo de María Elena PV mostraron una mayor reducción de su transmitancia ante menores valores de cobertura superficial. Esto se observa en los resultados de los cupones RS en ambos ensayos, como también para los cupones ArAs, A-12M-180 y B-12M-30. Esto puede ser atribuido a las características físicas de las partículas de polvo, especialmente su forma y tamaño. Sin embargo, la principal diferencia entre los dos ensayos de ensuciamiento corresponde a la cantidad y el tamaño de los aglomerados presentes en la superficie de los cupones. Otra característica del ensuciamiento que puede explicar este comportamiento es la carga de polvo acumulada por cada cupón. No obstante, al considerar este parámetro para los cupones A-12M-180 y B-12M-30 se observa que las cargas de polvo son menores respecto al ensayo realizado con polvo de El Salvador PV (ver Figura 44). Así, el hecho de que el ensayo realizado con polvo de María Elena PV muestre este comportamiento debe ser atribuido a características químicas propias del polvo de María Elena PV. Esto concuerda con lo observado en la sección 2.3, donde se comprobó que la mineralogía del polvo de María Elena PV es especialmente perjudicial para los vidrios FV, ya que la hornblenda posee un índice de refracción mayor que los otros minerales identificados. Esto indica que el efecto detrimental del ensuciamiento sobre los cupones depende de la acción combinada de

las propiedades fisicoquímicas de las partículas de polvo que forman el ensuciamiento. En particular, para María Elena PV el efecto del ensuciamiento depende directamente la mineralogía del polvo.

Para ambos ensayos de ensuciamiento artificial, se observó que el cupón RS fue el que menor rendimiento mostró. Este comportamiento es debido a las características de su superficie, la cual es homogénea y plana. En efecto, los cupones modificados como también el cupón ArAs poseen características superficiales que hacen que los agentes externos, en este caso los desplazamientos verticales o el viento y/o el movimiento de los paneles con sistema de tracking en paneles reales, sean más efectivos que en el cupón RS. Estas características superficiales corresponden a parámetros morfológicos y de rugosidad superficial mayores a los del cupón RS. Por ejemplo, al comparar los parámetros morfológicos ( $S_q$ ,  $S_z$  y  $S_a$ ) de los cupones ArAs y los cupones modificados, es posible observar que el cupón ArAs posee los parámetros más altos, siendo 121 nm, 505 nm y 100 nm, respectivamente. Mientras que para los cupones modificados,  $S_q$  oscila entre 4,35 - 7,63 nm,  $S_z$  varía entre 67 - 158 nm y  $S_a$  se mueve en el rango 17-37 nm. Esto concuerda con lo propuesto por Chen, E.Y., et al. [79], en su trabajo "*Effects of surface morphological parameters on cleaning efficiency of PV panels*", donde se presentó un modelo físico que representa las diferentes interacciones de las partículas de polvo con la superficie del vidrio. Estos autores sostienen la existencia de 3 escenarios probables: Primero, en una superficie plana las partículas de polvo podrían ser fácilmente removidas por agentes externos, en su caso, la punta del AFM. Sin embargo, este punto queda nulo al observar el desempeño de los cupones RS tanto en condiciones de sedimentación natural como artificial con polvo del Desierto de Atacama. Segundo, para ciertos valores de rugosidad, las asperezas, huecos o valles permiten la fácil remoción de las partículas de polvo, ya que su tamaño solamente ayuda a reducir su adhesión a la superficie del vidrio y no a entrapar las partículas de polvo. Tercero, para una superficie con una alta rugosidad, las partículas de polvo podrían quedar atrapadas entre las asperezas, huecos o valles de la superficie del vidrio.

En la Figura 46 se esquematiza el modelo físico propuesto Chen, E.Y., et al. [79], mediante la interacción entre los diferentes cupones de vidrios ensayados en este trabajo y partículas de polvo de diferente tamaño. De esta Figura se observa como las características superficiales de los vidrios modificados permiten atenuar las fuerzas de adhesión entre la superficie del vidrio FV y las partículas de polvo, facilitando su remoción y evitando su acumulación.

Los cupones A-1,1M-120 y A-12M-180 mostraron comportamientos similares en ambos ensayos de ensuciamiento. Esto está asociado a su valor en la curtosis ( $S_{ku}>3$ ) el cual indica que su perfil de alturas es puntiagudo. Esta característica favorece la remoción de partículas de sus superficies, ya que el área de contacto entre las partículas de polvo y su superficie disminuye. Además, al comparar sus parámetros morfológicos es posible notar que se encuentran dentro de un rango de rugosidades tal que las partículas de polvo no se entrampan en su superficie. Estas dos condiciones les permiten a las partículas de polvo su movimiento y posterior desprendimiento de la superficie. Por su parte, el cupón B-12M-30 mostró el mejor rendimiento en ambos ensayos de ensuciamiento. Esto se debe a su combinación de parámetros morfológicos y parámetros de rugosidad [79]. Al comparar sus propiedades superficiales con las del cupón ArAs, se observa que ambos cupones poseen un valor de asimetría similar ( $S_{sk}<0$ ) y una notoria diferencia en la rugosidad media cuadrática ( $S_q$ ), siendo la  $S_q$  del cupón ArAs alrededor de 100 veces mayor que la del cupón B- 12M-30. Esta diferencia permite que los picos y valles presentes en la superficie del cupón ArAs sirvan de barrera para las partículas de polvo promoviendo su acumulación, especialmente para partículas de polvo con un tamaño menor a  $2,5 \mu\text{m}$  (ver Figura 46 c). Esto afecta directamente la cantidad de polvo acumulado y el porcentaje de área cubierta por este, alcanzando una disminución de la carga de polvo acumulada en un 76 y 86% para el polvo de El Salvador PV y María Elena PV, respectivamente. Asimismo, produciendo una reducción en la pérdida de transmitancia un 62 y 64% menor que el cupón de control (RS) para los ensayos con polvo de El Salvador PV y María Elena PV, respectivamente.

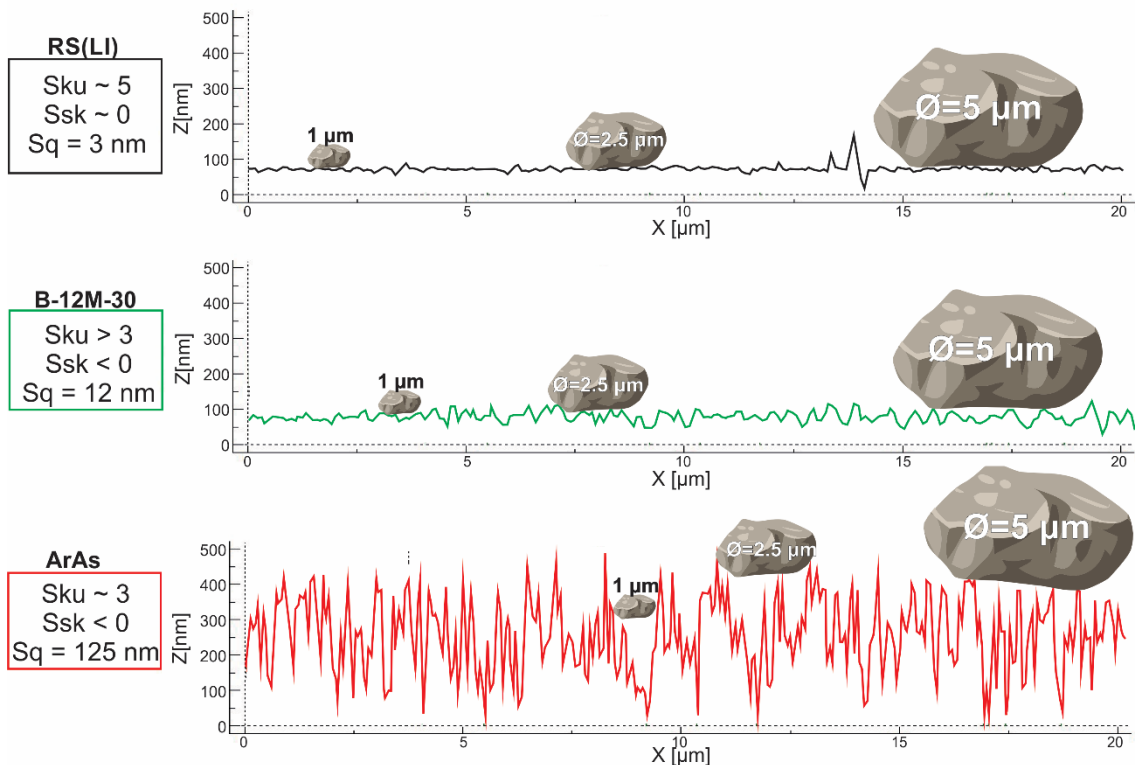


Figura 46. Esquema de interacción entre partículas de polvo y la superficie de distintos cupones de vidrio a) cupón RS, b) cupón B-12M-30 y c) cupón ArAs

En general, las propiedades superficiales mostradas por el cupón RS permiten que las partículas de polvo se adhieran de manera efectiva a su superficie, ya que como se observa en la Figura 46 a), el área de contacto entre ellas es mayor en comparación con los demás cupones ensayados. Mientras que, para rugosidades superiores a las del cupón RS, se esperaría que las partículas de polvo se removieran con mayor facilidad, ya que como se observa en la Figura 46 b), estas asperezas, picos o valles, reducen el área de contacto entre las partículas de polvo y la superficie del vidrio, es decir, reducen las fuerzas de adherencia entre estos cuerpos. Finalmente, para rugosidades superiores al rango mostrado por los cupones modificados, como ocurre con cupón ArAs en la Figura 46 c), las partículas de polvo podrían quedar encajonadas en los recodos de la superficie haciendo más difícil su remoción.

En conclusión, dada el tipo de polvo presente en los dos polos de desarrollo del Desierto de Atacama, la condición superficial adecuada para vidrio solar, es decir, que disminuye el ensuciamiento en El Salvador PV y María Elena PV corresponde a parámetros de rugosidad  $S_{sk} < 0$  y  $S_{ku} > 3$ ; y rugosidades aritmética y cuadrática media en el rango entre 3 y 37 nm.

### 3.4 Conclusiones generales capítulo 3

De acuerdo con los resultados obtenidos en este capítulo, se puede concluir lo siguiente:

- Es posible utilizar la modificación superficial del vidrio solar como un método de mitigación pasivo del ensuciamiento.
- La cuantificación de la rugosidad de los vidrios solares modificados mostró que el decapado químico provocado por las reacciones en un medio básico genera un gran cambio en la rugosidad, en relación con las muestras decapadas en un medio ácido.
- La caracterización MEB mostró que todos los cupones ensayados presentaron superficies cubiertas por 2 tipos de partículas, partículas pequeñas esferoidales y partículas angulares de mayor tamaño. También se observó la presencia de aglomerados de partículas de polvo en la superficie de todos los cupones ensayados, esto debido al 40% de humedad relativa con el cual se realizaron los ensayos.
- Se observaron diferencias en las distribuciones de tamaño de partículas en la superficie de un mismo tipo de cupón, pero ensayado con diferentes tipos de polvo. Esto último atribuido a las distintas propiedades superficiales de cada cupón como también a las propiedades fisicoquímicas de cada tipo de polvo.
- La modificación superficial realizada a los cupones de vidrio FV produjo una considerable disminución en la carga acumulada de polvo y área cubierta por el ensuciamiento. Los cupones ensayados con polvo de El Salvador PV mostraron una relación directa entre estos parámetros y la pérdida de transmitancia. Mientras que para el ensayo realizado con polvo de María Elena PV, la relación fue inversamente proporcional, esto atribuido a la mineralogía propia del polvo. Demostrando que la carga acumulada de polvo, el área cubierta por el ensuciamiento y la mineralogía de este son factores que deben ser considerados de manera conjunta al momento de desarrollar un método de mitigación del ensuciamiento que sea efectivo y eficaz.
- Se comprobó que el ensuciamiento de María Elena PV, debido a su mineralogía, exhibe un efecto perjudicial más pronunciado que el ensuciamiento de El Salvador PV tanto en condiciones de sedimentación natural como artificial.
- Se comprobó que distintas combinaciones de parámetros de rugosidad y morfológicos ayudan a disminuir la cantidad de polvo acumulado como también el área del vidrio cubierta por el ensuciamiento. En general, valores de curtosis  $Sku > 3$  y asimetría  $Ssk < 0$  combinadas con parámetros morfológicos en el rango

entre 3 y 37 nm facilitan la remoción del polvo de la superficie de los cupones de vidrio FV.

- El cupón B-12M-30 mostró el mejor desempeño en ambos ensayos de ensuciamiento artificial. Este comportamiento se debe a su valor de asimetría negativo, el cual está relacionado con mayores eficiencias de limpieza si se compara con un  $S_{sk} > 0$ . Mostrando una disminución en la carga de polvo acumulada en un 76 y 86% para el polvo de El Salvador PV y María Elena PV, respectivamente. Asimismo, produciendo una reducción de la pérdida de transmitancia un 62 y 64% menor que el cupón de control (RS) para los ensayos con polvo de El Salvador PV y María Elena PV, respectivamente.
- Finalmente, la condición superficial adecuada para el vidrio solar expuesto en El Salvador PV o María Elena PV corresponde a parámetros de rugosidad  $S_{sk} < 0$  y  $S_{ku} > 3$ ; y rugosidades aritmética y cuadrática media en el rango entre 3 y 37 nm.

## **Capítulo 4 Conclusiones**

## 4.1 Conclusiones generales

El trabajo realizado durante esta tesis de doctorado, cuyo objetivo general era modificar superficialmente el vidrio solar de acuerdo con las condiciones de ensuciamiento de dos zonas de interés para disminuir el ensuciamiento de su superficie, permite obtener las siguientes conclusiones:

- Los polos de desarrollo de proyectos de generación fotovoltaica están ubicados principalmente en las comunas de Diego de Almagro y María Elena, ambas localidades ubicadas en el desierto de Atacama. A pesar de que estas localidades comparten un mismo tipo de clima, pequeñas variaciones en los parámetros climáticos como la humedad relativa y la velocidad de viento hacen que las características del ensuciamiento sean disímiles.
- El ensuciamiento y su efecto sobre las propiedades ópticas de los vidrios FV depende directamente de las propiedades fisicoquímicas del polvo, por lo que la cantidad de polvo acumulada, el área de vidrio cubierta por el ensuciamiento, el tamaño y la mineralogía del polvo deben ser consideradas en conjunto al momento de desarrollar un método de mitigación del ensuciamiento.
- La calidad superficial de un vidrio FV afecta directamente las características del ensuciamiento, principalmente a la cantidad de polvo que se adhiere a la superficie y también al área del vidrio que termina siendo cubierta por el ensuciamiento. En consecuencia, la calidad superficial determina el efecto del ensuciamiento en las propiedades ópticas del vidrio FV.
- Conocer los parámetros morfológicos y de rugosidad adecuados para un determinado tipo de polvo permite mitigar de manera pasiva el ensuciamiento, esto mediante el debilitamiento de las fuerzas de adhesión entre la superficie del vidrio y las partículas de polvo. Esto posibilita que las partículas de polvo sean fáciles de remover frente a la acción de agentes externos como el viento o el movimiento del tracking.
- Es posible modificar superficialmente vidrios fotovoltaicos mediante métodos económicos y sencillos, siendo el decapado químico en medio básico el que mejor resultados obtuvo. Esto debido a que, para la misma concentración de reactivo, el decapado químico en medio básico permite un proceso de disolución del vidrio más controlado que en medio ácido.



## 4.2 Recomendaciones y trabajo futuro

Los resultados obtenidos de esta tesis contribuyen al conocimiento y entendimiento del fenómeno del ensuciamiento de módulos fotovoltaicos expuestos en condiciones desérticas, especialmente en el Desierto de Atacama. También colaboran en la búsqueda y desarrollo de métodos de mitigación que sean eficaces, de fácil aplicación y de bajo costo como es el método de decapado químico con NaOH. Sin embargo, se necesitan desarrollar varias etapas adicionales para desarrollar esta tecnología, actualmente se encuentra en un nivel de madurez TRL 3. Para que este método pueda aplicarse masivamente se necesitan desarrollar los siguientes pasos:

- Evaluar su desempeño en condiciones de operación real, es decir con ciclos diarios de condiciones climáticas (principalmente humedad relativa y velocidad de viento).
- Habilitar técnicamente la incorporación de vidrios modificados a la estructura de un módulo fotovoltaico y cuantificar su posible efecto en el desempeño eléctrico de estos dispositivos.
- Desarrollar prototipos capaces de aplicar el decapado químico a vidrios solares de mayor tamaño.
- Finalmente, ensamblar módulos fotovoltaicos y evaluar su desempeño en términos energéticos y su necesidad de mantenimiento (calendario de limpieza) en diferentes localidades de interés.

## **Capítulo 5 Productividad científica**

## Publicaciones durante el doctorado.

- C. Carrasco, C. A. Rodríguez, **P. Tobosque**, M. Maril, C. Camurri, L. Basaez, M. P. Delplancke, Effect of different complexing agents on Pb–Co thin-film electrodeposition, *Journal of Materials Science*, 52, 6, ISSN: 00222461, Editorial: Springer US, 2016, 33883401
- **Tobosque, P.**, Maril, M., Maril, Y., Camurri, C., Delplancke, J. L., Delplancke, M. P., & Carrasco, C. (2017). Electrodeposition of Lead–Cobalt Anodes: The Effect of Electrolyte pH on Film Properties. *Journal of The Electrochemical Society*, 164(9), D621-D625.
- Maril, M., **Tobosque, P.**, Núñez, J., Rodríguez, C. A., Delplancke, M. P., Delplancke, J. L., Delplancke, Yacaman, M., Arellano, M.J., Soldera, F., Carrasco, C. (2019). Synthesis and structural analysis of electrodeposited Pb-Co films for oxygen evolution applications. *Materials Characterization*, 148, 323-329.
- **Tobosque, P.**, Maril, M., Cisternas, N., Lara, C., Delplancke, M. P., Delplancke, J. L., Pinto, H., Pereira, E., Slawik, S., Carrasco, C. (2021). Synthesis and characterization of nanostructured Pb-Co-Sn film for the oxygen evolution reaction in sulfuric acid media. *Journal of Nanoparticle Research*, 23(7), 1-11.
- Maril, M., **Tobosque, P.**, Cisternas, N., Delplancke, M. P., Delplancke, J. L., Carrasco, C. (2021). Low-Cost Pb-Co-Sn film for the Oxygen Evolution Reaction in Acid Media. *Journal of The Electrochemical Society*, 168(5), 052505.
- Salvo, C., Chicardi, E., Poyato, R., García-Garrido, C., Jiménez, J. A., López-Pernía, C., **P. Tobosque** & Mangalaraja, R. V. (2021). Synthesis and Characterization of a Nearly Single Bulk  $Ti_2AlN$  MAX Phase Obtained from Ti/AlN Powder Mixture through Spark Plasma Sintering. *Materials*, 14(9), 2217.
- Maril, M., Delplancke, J. L., Cisternas, N., **Tobosque, P.**, Maril, Y., Carrasco, C. (2022) Critical aspects in the development of anodes for use in seawater electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(6), 3532-3549
- Cisternas, N., **Tobosque, P.**, Sbarbaro, D., Munnier, C., Kracht, W., & Carrasco, C. (2022). Heating Pre-Treatment of Copper Ores and Its Effects on the Bond Work Index. *Minerals*, 12(5), 593.
- **Tobosque, P.**, Arriagada, P., Maril, M., Salvo C., Cabello-Guzmán, G., Astaburuaga, E., Morán, L., Carrasco, C. (2022) Extreme arid conditions: Association among soiling characteristics, transmittance loss and climatic conditions. *Solar Energy*, 240, 13-26.
- **P. Tobosque**, A. Elgueda, J. Nuñez, Matias I. Volke, Rodrigo Abarca-del-Rio, L.

Morán, C. Carrasco. Modifying the surface roughness of solar glass: a passive mitigation method of soiling. Enviado

### **Presentaciones en eventos científicos**

- Estudio del comportamiento y degradación de baterías de iones de litio en condiciones de operación asociadas al Desierto de Atacama. C. Lara, I. Vargas, P. Tobosque, J. Núñez, M. Maril, C. Carrasco. 20° SAMCONAMET, Mar del Plata, Argentina, 2022.
- "Relation of soiling features and environmental parameters: effects on optical properties of solar glasses exposed in arid zones," P. Tobosque, J. Núñez, P. Arriagada, M. Maril, C. Salvo, G. Cabello-Guzmán, E. Astaburuaga, L. Morán, C. Carrasco. Euromat 2021, virtual conference.
- Implementation of a lithium-ion battery charge-discharge system and analysis of the effect of microstructural degradation. C. Lara, I. Vargas, J. Núñez, M. Maril, P. Tobosque, C. Carrasco. EUROMAT 2021.
- "Analysis of fracture generation due to a conventional Heating pre-treatment for the process of comminution," N. Cisternas C. Carrasco, W. Kracht, D. Sbarbaro, P. Tobosque, Euromat 2021, virtual conference.
- "Surface Modification of Solar Glass as a method of passive soiling mitigation", P. Tobosque, C. Claudia, A. Elgueda, C. Lara, M. Maril, J. Núñez Euromat 2021, virtual conference.
- Study of soiling on different photovoltaic glasses exposed in Atacama Desert. P. Tobosque, M. Maril, J. Núñez, C. Carrasco. Materials Science and Engineering Congress MSE 2020, Alemania, 2020.
- Electrochemical oxidation of Mn-Mo-Fe anodes for use in seawater electrolysis. M. Maril, C. Salvo, P. Tobosque, J. L. Delplancke, C. Lara, J. Núñez, C. Carrasco. Materials Science and Engineering Congress MSE 2020, Alemania, 2020.
- Synthesis of copper thin films by free-toxic chemical bath deposition. P. Tobosque, J. Núñez, P. Padilla, N. Cisternas, M. Maril, R. Navalón, C. Carrasco Euromat 2019, Estocolmo, Suecia.
- Modelling the thermal stress on a mireral-composed material for mining applications. P. Tobosque, N.Cisternas, M.Maril, C.Carrasco.Euromat 2019, Estocolmo, Suecia.
- Obtención de tubos para uso estructural a partir de latas de bebida de aluminio.

- R. Navalón, J. Núñez, C. Lara, P. Tobosque, M. Maril, C. Carrasco, Congreso Internacional de Metalurgia y Materiales CONAMETSAM 2019, Chile, Valdivia, 2019
- Caracterización del ensuciamiento de distintas superficies de vidrio grado solar expuestas en el Desierto de Atacama. P. Tobosque, C. Carrasco, Congreso Internacional de Metalurgia y Materiales CONAMETSAM 2019, Chile, Valdivia, 2019
  - Obtaining tubes with high mechanical properties from used aluminum beverage cans. R. Navalón, M. Maril, N. Cisternas, P. Tobosque, J. Núñez, C. Carrasco. EUROMAT 2019, Estocolmo, Suecia, 2019.
  - Síntesis de película delgada de cobre mediante depósito por baño químico libre de sustancias tóxicas. P. Padilla, M. Maril, P. Tobosque, C. Lara, N. Cisternas, C. Carrasco. Congreso Internacional de Metalurgia y Materiales 19° SAMCONAMET, Valdivia, Chile, 2019.
  - Obtención de tubos para uso estructural a partir de latas de bebida de aluminio. R. Navalón, J. Núñez, C. Lara, P. Tobosque, M. Maril, C. Carrasco. Congreso Internacional de Metalurgia y Materiales 19° SAMCONAMET, Valdivia, Chile, 2019.
  - Efecto del tiempo de depósito en las características morfológicas y electrocatalíticas del recubrimiento PbCoSn anódico, P. Tobosque, M. Maril, C. Carrasco, C. Santelice, C. Lara, Congreso Internacional de Metalurgia y Materiales SAMCONAMET 2018, ARGENTINA, San Carlos de Bariloche, 2018
  - Influence of bath composition on morphology and electrocatalytic properties of anodic PbCoSn film, Materials Science and Engineering Congress, Darmstadt, Alemania, 2018.
  - Efecto del tiempo de depósito en las características morfológicas y electrocatalíticas del recubrimiento PbCoSn anódico, Congreso Internacional de Metalurgia y Materiales 18° SAMCONAMET, Bariloche, Argentina, 2018.
  - Anodically electrodeposited Pb-Co-Sn as electrocatalyst for oxygen evolution reaction, EUROMAT 2017, Thessaloniki, Grecia, 2017.
  - Cathodic and anodic electrodeposition of PbCoSn thin films as electrocatalyst of the oxygen evolution reaction, Energy, Efficiency and Environmental Sustainability Conference, La Serena, Chile, 2017.
  - Análisis morfológico y microestructural de electrodepositos de Pb-Co, P. Tobosque, C. A. Rodríguez, M. Maril, M.P. Delplancke, Jean-Luc Delplancke, M.J. Yacaman, C. Carrasco, M.J. Arellano-Jiménez, IV Congreso Nacional de

Nanotecnología, CHILE, Olmue, 2016

- Influencia de la concentración de especies electroactivas en la morfología, composición química y comportamiento catalítico de Pb-Co obtenidos por electrodeposición, P. Tobosque, M. Maril, C. Carrasco, P. Padilla, C.A. Rodríguez, V. Coll, Congreso Internacional de Metalurgia y Materiales, ARGENTINA, Córdoba, 2016
- Efecto del pH en el electrodeposición de recubrimientos PbCo, M. Maril, P. Tobosque, C. Carrasco, V. Cornejo, K. Ormeño, Congreso Internacional de Metalurgia y Materiales, ARGENTINA, Córdoba, 2016
- Efecto de distintos agentes complejantes no-tóxicos en la electrodeposición de recubrimientos Pb-Co, C.A. Rodríguez, P. Tobosque, M. Maril, C. Carrasco, Congreso Internacional de Metalurgia y Materiales, ARGENTINA, Córdoba, 2016
- Morphological and microstructural analysis of Pb-Co Electrodeposits, P. Tobosque, M. Maril, C. Carrasco, C. Camurri, C.A. Rodríguez, XV Brazil MRS Meeting, BRASIL, Campinas, 2016

## Capítulo 6 Referencias

- [1] I. e. agency, «International energy agency,» International energy agency , 01 mayo 2021. [En línea]. Available: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021>. [Último acceso: 27 Julio 2022].
- [2] I. E. Agency, «International Energy Agency,» International Energy Agency, 01 mayo 2021. [En línea]. Available: <https://www.iea.org/reports/solar-pv>. [Último acceso: 27 julio 2022].
- [3] R. Conceição, J. González-Aguilar, A. A. Merrouni y M. Romero, «Soiling effect in solar energy conversion systems: A review.,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 162, p. 112434, 2022.
- [4] K. K. Ilse, B. W. Figgis, V. Naumann, C. Hagendorf y J. Bagdahn, «Fundamentals of soiling processes on photovoltaic modules.,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 98, pp. 239-254, , 2018.
- [5] M. Valerino, M. Bergin, C. Ghoroi, A. Ratnaparkhi y G. P. Smestad, «Low-cost solar PV soiling sensor validation and size resolved soiling impacts: A comprehensive field study in Western India.,» *Solar Energy*, vol. 204, pp. 307-315, 2020.
- [6] W. Javed, B. Guo, B. Figgis y B. Aïssa, «Dust potency in the context of solar photovoltaic (PV) soiling loss,» *Solar Energy*, vol. 220, pp. 1040-1052, 2021.
- [7] M. Bressan, Y. El-Basri y C. Alonso, «A new method for fault detection and identification of shadows based on electrical signature of defects,» *17th European Conference on Power Electronics and Applications* , pp. 1-8, 2015.
- [8] C. Schill, S. Brachmann, M. Heck, K.-A. Weiss y M. Koehl, «Impact of heavy soiling on the power output of PV modules,» *Reliability of Photovoltaic Cells, Modules, Components, and Systems IV*, vol. 8112, pp. 53-58, 2011.
- [9] R. Roth, C. Ballif y V. Chapuis, «Effect of soiling on performances of crystalline silicon PV modules deployed in an arid climate in relation to front glass texture and treatment.,» *Ecole Polytechnique Federale de Lausanne.*, 2012.
- [10] Z. Ahmed, H. A. Kazem y K. Sopian, «Effect of dust on photovoltaic performance: Review and research status.,» *Latest Trends in Renewable Energy and Environmental Informatics*, vol. 34, nº 6, pp. 93-199, 2013.
- [11] S. C. Costa, A. S. A. Diniz y L. L. Kazmerski, «Dust and soiling issues and impacts relating to solar energy systems: Literature review update for 2012–2015.,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 63, pp. 33-61, 2016.
- [12] M. Mani y R. Pillai, «Impact of dust on solar photovoltaic (PV) performance: Research status, challenges and recommendations,» *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 14, nº 9, pp. 3124-3131, 2010.
- [13] R. Siddiqui y U. Bajpai, «Correlation between thicknesses of dust collected on photovoltaic module and difference in efficiencies in composite climate,» *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, vol. 3, nº 1, pp. 1-7, 2012.
- [14] K. Ilse, L. Micheli, B. W. Figgis, K. Lange, D. Daßler, H. Hanifi y J. Bagdahn, «Techno-economic assessment of soiling losses and mitigation strategies for solar power generation.,» *Joule*, vol. 3, nº 10, pp. 2303-2321, 2019.
- [15] M. A. Bahattab, I. A. Alhomoudi, M. I. Alhussaini, M. Mirza, H. J. W. Gläubitt y P. Löbmann, « Anti-soiling surfaces for PV applications prepared by sol-gel processing: Comparison of laboratory testing and outdoor exposure.,» *Solar*

*Energy Materials and Solar Cells*, vol. 157, pp. 422-428, 2016.

- [16] S. Bhaduri, R. Bajhal, S. Mallick, N. Shiradkar y A. Kottantharayil, « Degradation of anti-soiling coatings: mechanical impact of rainfall,» *47th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, pp. 1098-1101, 2020.
- [17] R. Appels, B. Lefevre, B. Herteleer, H. Goverde, A. Beerten, R. Paesen y J. Poortmans, «Effect of soiling on photovoltaic modules,» *Solar energy*, vol. 96, pp. 283-291, 2013.
- [18] M. Jaszczur, A. Koshti y W. Nawrot, « An investigation of the dust accumulation on photovoltaic panels.,» *Environ Sci Pollut Res* , vol. 27, p. 2001–2014 , 2020.
- [19] W. Javed, Y. Wubulikasimu, B. Figgis y B. Guo, «Characterization of dust accumulated on photovoltaic panels in Doha, Qatar,» *Solar Energy* , vol. 142, pp. 123-135, 2017 .
- [20] P. Ferrada, F. Araya, A. Marzo y E. Fuentealba, «Performance analysis of photovoltaic systems of two different technologies in a coastal desert climate zone of Chile.,» *Solar Energy*, vol. 14, pp. 356-363, 2015.
- [21] P. Ferrada, D. Olivares, V. d. Campo, A. Marzo, F. Araya, E. Cabrera y M. Trigo-Gonzalez, «Physicochemical characterization of soiling from photovoltaic facilities in arid locations in the Atacama Desert,» *Solar Energy*, vol. 187, pp. 47-56, 2019.
- [22] D. Olivares, P. Ferrada, A. Marzo, K. Pinto, D. Espinoza, J. Rabanal-Arabach y J. Llanos, «Study of the effects of soiling on PV devices using the spin-coating technique in accelerated indoor exposures.,» *Solar Energy*, vol. 231, pp. 317-327., 2022.
- [23] P. Tobosque, P. Arriagada, M. M., C. Salvo, G. Cabello-Guzmán, E. Astaburuaga, M. L y C. Carrasco, «Extreme arid conditions: Association among soiling characteristics, transmittance loss and climatic conditions.,» *Solar Energy*, vol. 240, pp. 13-26, 2022.
- [24] M. Corn, «The adhesion of solid particles to solid surfaces, I. A review.,» *Journal of the Air Pollution Control Association*, vol. 11, nº 11, pp. 523-528, 1961.
- [25] C. S. Jiang, H. R. Moutinho, B. To, C. Xiao, L. J. Simpson y M. M. Al-Jassim, «Long-lasting strong electrostatic attraction and adhesion forces of dust particles on photovoltaic modules.,» *Solar Energy Materials and Solar Cells*, , vol. 204, p. 110206., 2020.
- [26] R. J. Isaifan, D. Johnson, L. Ackermann, B. Figgis y M. Ayoub, « Evaluation of the adhesion forces between dust particles and photovoltaic module surfaces.,» *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 191, pp. 413-421, 2019.
- [27] L. L. Kazmerski, A. S. A. Diniz, C. B. Maia, M. M. Viana, S. C. Costa, P. P. Brito y L. R. de Oliveira Cruz, «Fundamental studies of adhesion of dust to PV module surfaces: Chemical and physical relationships at the microscale.,» *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 6, nº 3, pp. 719-729, 2016.
- [28] H. R. Moutinho, C. S. Jiang, B. To, C. Perkins, M. Muller, M. M. Al-Jassim y L. Simpson, «dhesion mechanisms on solar glass: Effects of relative humidity, surface roughness, and particle shape and size.,» *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 172, pp. 145-153, 2017.
- [29] C. N. d. Energía, «cne.cl,» energía abierta, 05 abril 2022. [En línea]. Available: [https://www.cne.cl/wp-content/uploads/2022/04/RMensual\\_ERNC\\_v202204.pdf](https://www.cne.cl/wp-content/uploads/2022/04/RMensual_ERNC_v202204.pdf). [Último acceso: 08 abril 2022].
- [30] J. A. Rech, C. B. S., E. D. Shullenberger, S. P. Dunagan, T. E. Jordan, N. Blanco y J. Houston, «Evidence for the development of the Andean rain shadow from a Neogene isotopic record in the Atacama Desert, Chile,» *Earth and Planetary Science letters*, vol. 292, nº 3-4, pp. 371-382, 2010.
- [31] C. n. d. energía, «cne.cl,» Energía abierta, 01 marzo 2018. [En línea]. Available:



- [32] H. E. Beck, N. E. Zimmermann, T. R. McVicar, N. B. A. Vergopolan y E. F. Wood, «Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution.,» *Scientific data*, vol. 5, pp. 180-214, 2018.
- [33] S. Ewing, B. Sutter, J. Owen, K. Nishiizumi, W. Sharp, S. Cliff, K. Perry, W. D. C. M. y R. Amundson, «A threshold in soil formation at Earth's arid-hyperarid transition,» *Cosmochim. Acta*, vol. 70, pp. 5293-5322, 2006.
- [34] F. Wang, G. Michalski, J. H. Seo y W. Ge, «Geochemical, isotopic, and mineralogical constraints on atmospheric deposition in the hyper-arid Atacama Desert, Chile.,» *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 135, pp. 29-48, 2014.
- [35] B. Sutter, R. Amundson, S. Ewing, K. W. Rhodes y C. McKay, «The chemistry and mineralogy of Atacama Desert soils: A possible analog for Mars soils.,» *AGUFM*, vol. 71A, p. 0443, 2002.
- [36] T. J. Hutton, J. B. Dixon y S. B. Weed, «Minerals in Soil Environments.,» *SOil Science Society of America*, pp. 673-688, 1977.
- [37] D. M. P. y K. G. H. R. J. Jardine, «Advances in Geotechnical Engineering: The Skempton Conference: Proceedings of a Three Day Conference on Advances in Geotechnical Engineering, Organised by the Institution of Civil Engineers and Held at the Royal Geographical Society, London,» de *Advances in Geotechnical Engineering*, London, UK, 2004.
- [38] J. C. Santamarina, K. A. Klein y M. A. Fam, *Soils and waves.*, New York: J. Wiley & Sons, 2001.
- [39] G. Ahmadi, «Mechanics of particle adhesion and removal.,» de *Particle adhesion and removal*, Massachusetts, John Wiley and sons, 2015, pp. 81-104.
- [40] B. Figgis, A. Ennaoui, S. Ahzi y Y. Rémond, «Review of PV soiling particle mechanics in desert environments,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 76, pp. 872-881, 2017.
- [41] J. J. John, S. Warade, G. Tamizhmani y A. Kottantharayil, «Study of soiling loss on photovoltaic modules with artificially deposited dust of different gravimetric densities and compositions collected from different locations in India,» *IEEE journal of photovoltaics*, 6(1), 236-243., vol. 6, nº 1, pp. 236-243, 2015.
- [42] K. Ilse, B. Figgis, M. Z. Khan, V. Naumann y C. Hagendorf, «Dew as a detrimental influencing factor for soiling of PV modules,» *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 9, nº 1, pp. 287-294, 2018.
- [43] M. Z. Khan, A. Ghaffar, M. A. Bahattab, M. Mirza, K. Lange, I. M. S. Abaalkheel y K. Ilse, «Outdoor performance of anti-soiling coatings in various climates of Saudi Arabia,» . *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 235, p. 111470, 2022.
- [44] M. S. W. L. L y H. MAUD, «A Friendly Java Program for Material Analysis Using Diffraction,» *Newsl. CPD*, vol. 21, pp. 14-15, 1999.
- [45] D. Hillel y J. L. Hatfield, *Encyclopedia of Soils in the Environment (Vol. 3)*, Amsterdam: Elsevier, 2005.
- [46] M. L. T. Jackson, G. A. Bourbeau y R. P. Pennington, «Weathering sequence of clay-size minerals in soils and sediments. I. Fundamental generalizations,» *The Journal of Physical Chemistry*, vol. 52, nº 7, pp. 1237-1260, 1948.
- [47] M. Horenstein, M. Mazumder, R. C. Sumner, J. Stark, T. Abuhamed y R. Boxman, «Modeling of trajectories in an electrodynamic screen for obtaining maximum particle removal efficiency.,» *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 49, nº 2, pp. 707-713, 2013.
- [48] M. K. Mazumder, M. N. Horenstein, C. Heiling, J. W. Stark, A. Sayyah, J. Yellowhair

- y A. Raychowdhury, «Environmental degradation of the optical surface of PV modules and solar mirrors by soiling and high RH and mitigation methods for minimizing energy yield losses,» *IEEE 42nd Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, pp. 1-6, 2015.
- [49] K. Ilse, M. Z. Khan, N. Voicu, V. Naumann, C. Hagendorf y J. Bagdahn, «Advanced performance testing of anti-soiling coatings—Part I: Sequential laboratory test methodology covering the physics of natural soiling processes.,» *Solar Energy Materials and solar cells*, vol. 202, pp. 110-148, 2019.
- [50] K. Ilse, M. Werner, V. Naumann, B. W. Figgis, C. Hagendorf y J. Bagdahn, «Microstructural analysis of the cementation process during soiling on glass surfaces in arid and semi-arid climates,» *Physica status solidi (RRL)—Rapid Research Letters*, vol. 10, n° 7, pp. 252-259, 2016.
- [51] H. K. Elminir, A. E. Ghitas, R. H. Hamid, F. El-Hussainy, M. M. Beheary y K. M. Abdel-Moneim, «Effect of dust on the transparent cover of solar collectors,» *Energy conversion and management*, vol. 47, n° 18-19, pp. 3192-3203, 2006.
- [52] K. K. Ilse, B. W. Figgis, M. Werner, V. Naumann, C. Hagendorf, H. Pöllmann y J. Bagdahn, «Comprehensive analysis of soiling and cementation processes on PV modules in Qatar.,» *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 186, pp. 309-323, 2018.
- [53] K. Ilse, M. Z. Khan, N. Voicu, V. Naumann, C. Hagendorf y J. Bagdahn, «Advanced performance testing of anti-soiling coatings-part II: particle-size dependent analysis for physical understanding of dust removal processes and determination of adhesion forces,» *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 202, p. 110049, 2019.
- [54] C. A. Rodríguez, F. M., M. Sandoval-Paz, M. P. Delplancke, G. Cabello-Guzmán y C. Carrasco, «Study of the early growth stages of chemically deposited ZnS thin films from a non-toxic solution.,» *Materials Research Express*, vol. 5, n° 7, p. 076404., 2018.
- [55] E. D. Palik, *Handbook of optical constants of solids (Vol. 3)*., Maryland: Academic press., 1998.
- [56] M. Abderrezek y M. Fathi, «Experimental study of the dust effect on photovoltaic panels' energy yield,» *Solar Energy*, vol. 142, pp. 308-320, 2017.
- [57] H. Qasem, T. R. Betts, H. Müllejans, H. AlBusairi y R. Gottschalg, «Dust-induced shading in photovoltaic modules,» *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 22, n° 2, pp. 218-226, 2014.
- [58] B. S. Yilbas, G. Hassan, A. H. y N. Al-Aqeeli, «Environmental dust effects on aluminum surfaces in humid air ambient.,» *Scientific Reports*, vol. 7, n° 1, pp. 1-12, 2017.
- [59] R. L. Sass y R. Lal, «Methane emissions from rice paddies, factors affecting.,» de *Encyclopedia of soil science*, Columbus, Ohio, Taylor and Francis, 2006, pp. 1057-1059..
- [60] B. Figgis, B. Guo, W. Javed, S. Ahzi y Y. Rémond, «Dominant environmental parameters for dust deposition and resuspension in desert climates,» *Aerosol Science and Technology*, vol. 52, n° 12, pp. 788-798, 2018.
- [61] A. Y. Al-Hasan, «A new correlation for direct beam solar radiation received by photovoltaic panel with sand dust accumulated on its surface.,» *Solar energy*, vol. 63, n° 5, pp. 323-333, 1998.
- [62] S. A. Said y H. M. Walwil, «Fundamental studies on dust fouling effects on PV module performance,» *Solar Energy*, vol. 107, pp. 328-337, 2014.
- [63] R. B. Cook, *Handbook of mineralogy. Rocks and Minerals*, Washington: Mineral Data Pub, 2001.

- [64] H. A. Kazem, M. T. Chaichan, A. H. Al-Waeli y K. Sopian, «A review of dust accumulation and cleaning methods for solar photovoltaic systems.,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 276, pp. 123-187, 2020.
- [65] M. I. A. A. B. B. V. F. B. & A. B. Hossain, «Anti-Soiling Coatings for Enhancement of PV Panel Performance in Desert Environment: A Critical Review and Market Overview.,» *Materials*, vol. 15, nº 20, p. 7139, 2022.
- [66] M. A. M. L. de Jesus, T. G., Agustín-Sáenz, B. C., C. M. I. y A. de Mello Ferreira, «Anti-soiling coatings for solar cell cover glass: Climate and surface properties influence.,» *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 185, pp. 517-523, 2018.
- [67] W. A. Daoud, *Self-cleaning materials and surfaces: a nanotechnology approach.*, John Wiley and Sons, 2013.
- [68] B. S. Yilbas, G. Hassan y A. Al-Sharafi, *Dust Repellent Materials.*, Elsevier, 2018.
- [69] F. Lisco, F. Bukhari, S. Uličná, K. Isbilir, K. L. Barth, A. Taylor y J. M. Walls, «Degradation of hydrophobic, anti-soiling coatings for solar module cover glass,» *Energies*, vol. 13, nº 15, p. 3811, 2020.
- [70] L. Pichon, C. Labrune, S. Vedraïne, M. Boujtita, P. Masson y B. Ratier., «Surface treatments of glass substrates for improved photovoltaic performance of dye-sensitized solar cells.,» *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 124, pp. 143-151, 2014.
- [71] F. D. Franco, A. L. Bassi, M. G. Grimaldi, L. Tapfer, M. Rapisarda, G. Mannino, G. D. Marco y S. Lombardo., «Influence of chemical etching on the morphological properties of glass substrates for photovoltaic applications,» *Journal of Non-Crystalline Solids*, vol. 409, pp. 45-50, 2015.
- [72] S. Sadhu, M. Jayaraj y S. Basu, «Nanocrystalline TiO<sub>2</sub> thin films deposited on chemically treated glass substrates for dye-sensitized solar cell applications,» *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, vol. 28, nº 15, pp. 11439-11448, 2017.
- [73] D. E. Clark y E. L. Yen-Bower, «Corrosion of glass surfaces,» *Surface Science*, vol. 100, nº 1, pp. 53-70, 1980.
- [74] A. Tournié, P. Ricciardi y P. Colomban, «Glass corrosion mechanisms: A multiscale analysis,» *Solid State Ionics*, vol. 179, nº 38, pp. 2142-2154, 2008.
- [75] E. I. Cedillo-Gonzalez, M. Montorsi, C. Mugoni, M. Montorsi y C. Siligardi, «Improvement of the adhesion between TiO<sub>2</sub> nanofilm and glass substrate by roughness modifications.,» *Physics Procedia*, vol. 40, pp. 19-29, 2013.
- [76] C. L. C. Tan, S. Gao, B. S. Wee, A. Asa-Awuku y B. J. R. Thio, «Adhesion of dust particles to common indoor surfaces in an air-conditioned environment.,» *Aerosol Science and Technology*, vol. 48, nº 5, pp. 541-551, 2014.
- [77] E. S. Gadelmawla, M. M. Koura, T. M. A. Maksoud, I. M. Elewa y H. H. Soliman, «Roughness parameters,» *Journal of materials processing Technology*, vol. 123, nº 1, pp. 133-145, 2014.
- [78] D. J. Whitehouse, «Chapter Surface Geometry, Scale of Size Effects, Nanometrology.,» de *Handbook of Surface and Nanometrology*, CRC Press., 2010, pp. 861-964.
- [79] E. Y. T. Chen, Y. Chen, B. Guo y H. Liang, «Effects of surface morphological parameters on cleaning efficiency of PV panels.,» *Solar Energy*, vol. 194, pp. 840-847, 2019.
- [80] B. VIDR, «Transformaciones de la superficie del vidrio.,» *Bol. Soc. Esp. Cerám. Vidr*, vol. 26, nº 2, pp. 83-92, 1987.
- [81] N. P. Bansal y R. H. Doremus, *Handbook of glass properties*, Elsevier., 2013.
- [82] E. Y. T. Chen, Y. Chen, B. Guo y H. Liang, «Effects of surface morphological

- parameters on cleaning efficiency of PV panels.,» *Solar Energy*, vol. 194, pp. 840-847, 2019.
- [83] D. Tabor, « Surface forces and surface interactions. In Plenary and invited lectures,» *Academic Press.*, pp. 3-14, 1977.
- [84] B. J. & P. S. S. Briscoe, «The effect of surface topography on the adhesion of poly (urethane)-metal contacts.,» *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 25, n° 1A, p. A20, 1992.
- [85] H. E. J. Bennett y J. Porteus, «Relation between surface roughness and specular reflectance at normal incidence,» *JOSA*, vol. 51, n° 2, pp. 123-129, 1961.
- [86] M. Melcher y M. Schreiner, « Statistical evaluation of potash-lime-silica glass weathering.,» *Analytical and bioanalytical chemistry*, vol. 379, n° 4, pp. 628-639., 2004.
- [87] J. P. M. A. E. P. V. & L. J. Katainen, «Adhesion as an interplay between particle size and surface roughness.,» *Journal of colloid and interface science*, vol. 304, n° 2, pp. 524-529, 2006.
- [88] B. Figgis, A. Ennaoui, B. Guo, W. Javed y E. Chen, «Outdoor soiling microscope for measuring particle deposition and resuspension,» *Solar Energy*, vol. 137, pp. 158-164, 2016.
- [89] Y. Kim, G. Wellum, K. Mello, K. Strawhecker, R. Thoms, A. Giaya y B. Wyslouzil, «Effects of relative humidity and particle and surface properties on particle resuspension rates.,» *Aerosol Sci. Technol.*, vol. 50, n° 4, pp. 339-352, 2016.
- [90] L. Xu, S. Li, J. Jiang, T. Liu, H. Wu, J. Wang y X. Li, ««The influence of dust deposition on the temperature of soiling photovoltaic glass under lighting and windy conditions,» *Solar Energy*, vol. 199, pp. 491-496, 2020.
- [91] H. Jiang, L. Lu y K. Sun, «Experimental investigation of the impact of airborne dust deposition on the performance of solar photovoltaic (PV) modules.,» *Atmospheric environment*, vol. 45, n° 25, pp. 4299-1304, 2011.
- [92] J. J. John, V. Rajasekar, S. Boppana, S. Chattopadhyay, A. Kottantharayil y G. TamizhMani, «Quantification and modeling of spectral and angular losses of naturally soiled PV modules.,» *IEEE journal of photovoltaics*, vol. 5, n° 6, pp. 1727-1734, 2015.
- [93] T. Khatib, H. Kazem, K. Sopian, F. E. W. Buttinger y A. S. Albusaidi, «Effect of dust deposition on the performance of multi-crystalline photovoltaic modules based on experimental measurements.,» *International Journal of Renewable Energy*, vol. 3, n° 4, pp. 850-853, 2013.
- [94] M. S. El-Shobokshy y F. M. Hussein, «Effect of dust with different physical properties on the performance of photovoltaic cells.,» *Solar energy*, vol. 51, n° 6, pp. 505-511, 1993.
- [95] T. Sarver, A. Al-Qaraghuli y L. L. Kazmerski, «A comprehensive review of the impact of dust on the use of solar energy: History, investigations, results, literature, and mitigation approaches,» *Renewable and sustainable energy Reviews*, vol. 22, pp. 698-733, 2013.
- [96] L. Kazmerski, A. S. A. Diniz, C. B. Maia, M. M. Viana, S. C. Costa, P. P. Brito y L. R. d. O. Cruz, «Fundamental studies of adhesion of dust to PV module surfaces: Chemical and physical relationships at the microscale.,» *IEEE Journal of photovoltaics*, vol. 6, n° 3, pp. 716-729, 2016.
- [97] B. Weber, A. Quiñones, R. Almanza y M. D. Duran, «Performance reduction of PV systems by dust deposition.,» *Energy Procedia*, vol. 57, pp. 99-108, 2014.
- [98] J. Tanesab, D. Parlevliet, J. Whale, T. Urmees y T. Pryor, «The contribution of dust to performance degradation of PV modules in a temperate climate zone.,» *Solar Energy*, vol. 120, pp. 147-157, 2015.

- [99] H. Lu y W. Zhao, «Effects of particle sizes and tilt angles on dust deposition characteristics of a ground-mounted solar photovoltaic system,» *Applied Energy*, vol. 220, pp. 514-526, 2018.
- [10 H. WC y Y. Zhu, *Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of*  
0] *airborne particles*, 2nd edition, John Wiley & Sons, 2022.
- [101 C. Henry y J. P. Minier, «Progress in particle resuspension from rough  
surfaces by turbulent flows.,» *Progress in Energy and Combustion Science*, vol.  
45, pp. 1-53, 2014.
- [10 H. Lu, L. Lu y Y. Wang, «Numerical investigation of dust pollution on a solar  
2] photovoltaic (PV) system mounted on an isolated building,» *Applied Energy*, vol.  
180, pp. 27-36, 2016.
- [10 O. Aluko y K. E. Noll, «Deposition and suspension of large, airborne particles.,»  
3] *Aerosol science and technology*, vol. 40, nº 7, pp. 503-513, 2006.
- [10 A. Khachatourian, H. K. Chan, A. J. Stace y E. Bichoutskaia, «Electrostatic force  
4] between a charged sphere and a planar surface: A general solution for dielectric  
materials,» *The Journal of chemical physics*, vol. 140, nº 7, pp. 74-107, 2014.
- [10 J. N. Israelachvili, *Intermolecular and surface forces*, San Diego: Academic press.,  
5] 2011.
- [10 E. F. Cuddihy, «Surface soiling: theoretical mechanisms and evaluation of low  
6] soiling coatings.,» *RESEARCH FORUM ON QUANTIFYING DEGRADATION* , p.  
383, 1983.
- [10 R. Jones, H. M. Pollock, J. A. Cleaver y C. S. Hodges, «Adhesion forces between  
7] glass and silicon surfaces in air studied by AFM: Effects of relative humidity, particle  
size, roughness, and surface treatment,» *Langmuir*, vol. 18, nº 21, pp. 8045-8055,  
2002.
- [10 B. H-J y K. M., « Normal capillary forces.,» *Adv Colloid Interface Sci* , vol. 146, nº  
8] 1-2, pp. 48-60, 2009.
- [10 A. S. & C. C. Vahdat, «Characterization of Single Particle Adhesion: A Review of  
9] Recent Progress,» de *Particle Adhesion and Removal*, 2015, pp. 157-200.
- [11 S. Beaudoin, P. Jaiswal, A. Harrison, J. Laster, K. Smith, M. Sweat y M. Thomas,  
0] « Fundamental forces in particle adhesion,» de *Particle adhesion and removal*,  
2015, pp. 3-79..
- [11 K. N. G. a. T. F. R. S. Fuller, «, Proc. R. Soc. London.,» *A: Math. Phys. Sci.*, pp.  
1] 345-327 , 1975.
- [11 Y. I. Rabinovich, J. J. Adler, A. Ata, R. K. Singh y B. M. Moudgil, « Adhesion  
2] between nanoscale rough surfaces: II. Measurement and comparison with  
theory.,» *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 232, nº 1, pp. 17-24, 2000.
- [11 B. AP, B. H y M. ST., « Impactor apparatus for the study of particle rebound: relative  
3] humidity and capillary forces.,» *Aerosol Sci Technol*, vol. 48, pp. 42-52, 2014.
- [11 Z. G, F. M y G. C., «Resuspension of particulates from surfaces to turbulent flows-  
4] Review and analysis.,» *J Aerosol Sci* , vol. 26, nº 6, pp. 13-44, 1995.
- [11 H. C, G. K y G. N., « Coupling CFD and analytical modeling for investigation of  
5] monolayer particle resuspension by transient flows.,» *Build Environ* , vol. 105, pp.  
1-12, 2016.
- [11 R. W, D. CI y N. KW., «Dry deposition of particles – Implications and  
6] recommendations for mapping of deposition over Europe.,» *Tellus Ser B-Chem  
Phys Meteor* , vol. 47, pp. 587-601, 1995.
- [11 S. V. S. y D. S. K., «Solar Photovoltaic panels cleaning methods: A Review.,» *Int.  
7] J. Pure Appl. Math.*, vol. 118, pp. 1-17, 2018.
- [11 N. M. Kumar, K. Sudhakar, M. Samykano y S. Sukumaran, «(2018). Dust cleaning

- 8] robots (DCR) for BIPV and Dust cleaning robots (DCR) for BIPV and BAPV solar power plants: A conceptual framework and research challenges,» *Procedia Computer Science*, 133, 746-754., vol. 133, pp. 746-754, 2018.
- [11 A. Syafiq, A. K. Pandey, N. N. Adzman y N. Abd Rahim, « Advances in approaches and methods for self-cleaning of solar photovoltaic panels.,» *Solar Energy*, vol. 162, pp. 597-619, 2018.
- [12 P. Xie, L. J. Ni, W. L. O, L. K. Zheng y K. Sun, « Reducing the effect of dust deposition on the generating efficiency of solar PV modules by super-hydrophobic films.,» *Solar Energy*, vol. 169, pp. 277-283, 2018.
- [12 S. Sutha, S. Suresh, B. Raj y K. R. Ravi, «Transparent alumina based superhydrophobic self-cleaning coatings for solar cell cover glass applications.,» *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 165, pp. 128-137, 2017.
- [12 J. Wei, Y. Peng, J. Guo y L. Sun, «Performance of MODIS Collection 6.1 Level 3 aerosol products in spatial-temporal variations over land.,» *Atmospheric Environment*, vol. 206, pp. 30-44, 2019.
- [12 M. J. Garay, M. L. Witek, R. A. Kahn, F. C. Seidel, J. A. Limbacher, M. A. Bull y Y. Yu, «Introducing the 4.4 km spatial resolution Multi-Angle Imaging SpectroRadiometer (MISR) aerosol product.,» *Atmospheric Measurement Techniques*, vol. 13, nº 2, pp. 593-628, 2020.
- [12 CAMS, «atmosphere.copernicus.eu,» 2021. [En línea]. Available: [https://atmosphere.copernicus.eu/sites/default/files/202006/21\\_CAMS84\\_2018SC2\\_D1.1.1\\_DJF2020.pdf](https://atmosphere.copernicus.eu/sites/default/files/202006/21_CAMS84_2018SC2_D1.1.1_DJF2020.pdf). [Último acceso: 15 junio 2021].
- [12 W. K. Middleton y G. Wyszecski, «Colors produced by reflection at grazing incidence from rough surfaces.,» *JOSA*, vol. 47, nº 11, pp. 1020-1023, 1957.
- [12 J. Halling, «A reflectometer for the assessment of surface texture,» *Journal of Scientific Instruments*, vol. 9, nº 31, p. 318, 1954.
- [12 P. P. Gil-Crespo, «Atlas de Mineralogía Óptica,» Departamento de Geología, Universidad del País Vasco- Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU), 14 Junio 2022. [En línea]. Available: <https://www.ehu.eus/mineralogiaoptica/hornblenda.html>. [Último acceso: 15 Agosto 2022].
- [12 B. Aïssa, R. J. Isaifan, V. E. Madhavan y A. A. Abdallah, «Structural and physical properties of the dust particles in Qatar and their influence on the PV panel performance.,» *Scientific reports*, vol. 6, pp. 1-12, 2016.
- [12 J. J. John, S. Warade, G. Tamizhmani y A. Kottantharayil, «Study of soiling loss on photovoltaic modules with artificially deposited dust of different gravimetric densities and compositions collected from different locations in India,» *IEEE journal of photovoltaics*, vol. 6, nº 1, pp. 236-243, 2015.

## Anexos.

Tabla. Instrumentación utilizada en la medición de los parámetros atmosféricos.

Instrumento	Parámetros atmosféricos	Precisión
Global Water Instrumentation model WE550 wind speed transmitter	Velocidad de viento	0.09 m/s sobre el rango de 4.9 hasta 24.6 m/s
Global Water Instrumentation model WE570 wind direction transmitter	Dirección de viento	1%
Global Water Instrumentation model WE600	Humedad Relativa	±2% RH
Global Water Instrumentation model WE700	Temperatura	±0.2°F o ±0.1°C

## ANEXO 2. Data sheet NSG

### Solar energy glass

#### NSG TEC™

#### Performance data summary

Product	Thickness (mm)	Light Transmittance (%)	Solar Direct Transmittance (%)	Sheet Resistance (Ohms/sq)	Haze (%)
NSG TEC™ A7	2.2	82	70	7	5
NSG TEC™ A7	3.0	81	69	7	5
NSG TEC™ A9	3.1	80	70	8	8-12
NSG TEC™ A9X	4.0	80	72	8	8-12
NSG TEC™ A10	3.2	80	70	9	9-15
NSG TEC™ T11X	3.1	81	76	12	11-15
NSG TEC™ T12X	3.2	82	76	12	11-15
NSG TEC™ C10	3.2	83	72	10	1
NSG TEC™ C10X	3.2	84	75	10	1
NSG TEC™ C15	3.2	84	74	< 15	0.6
NSG TEC™ C15D	3.2	81	71	< 15	1-2
NSG TEC™ C15M	3.2	81	69	< 15	1-2
NSG TEC™ Sodium Block	3.2	91	87	N/A	0.5

All measurements have been carried out by UKAS accredited laboratory and have been calculated to ISO9050:2003 AM1.5 and D65 (2dg obs). All figures quoted in this datasheet are indicative of typical product properties.

#### Blocking performance summary

Product	Leaching test results*
NSG TEC Sodium	< 5 µg/dm <sup>2</sup> of Na <sub>2</sub> O < 5 µg/dm <sup>2</sup> of K <sub>2</sub> O

\* 48 hour leaching in water at 96°C.



**This publication provides only a general description of the products. Further, more detailed information may be obtained from your local NSG Group Solar Energy representative. It is the responsibility of the user to ensure that the use of these products is appropriate for any particular application and that such use complies with all relevant legislation, standards, code of practice and other requirements. To the fullest extent permitted by applicable laws, Nippon Sheet Glass Co. Ltd. and its subsidiary companies disclaim all liability for any error in or omission from this publication and for all consequences of relying on it. Pilkington and TEC are trade marks of the Nippon Sheet Glass Co. Ltd.**



**CE marking confirms that a product complies with its relevant harmonised European Norm.**  
**The CE marking label for each product, including declared values, can be found at [www.pilkington.com/CE](http://www.pilkington.com/CE)**



**Pilkington Group Limited**  
**European Technical Centre**  
Hall Lane, Lathom Nr Ormskirk L40 5UF, United Kingdom  
[marketing.communications@nsg.com](mailto:marketing.communications@nsg.com)  
[www.pilkington.com/solarenergy](http://www.pilkington.com/solarenergy)

**ANEXO 3. Brochure NSG**



# Solar Energy range

- NSG **TEC**<sup>™</sup>
- Pilkington **Microwhite**<sup>™</sup>
- Pilkington **Optiwhite**<sup>™</sup>
- Pilkington **Sunplus**<sup>™</sup>



## **Moving from hydrocarbon dependency to renewable energy The use of solar energy glass and the NSG Group**

**Over the past few years, legislation has been introduced around the world to address the issue of renewable energy, spurred on by the Kyoto protocol and subsequent national targets.**

**It is increasingly recognized that a move from hydrocarbons is essential as supplies are finite and global warming is a reality.**

**Solar energy panels offer alternative solutions for a range of energy requirements, from small scale domestic applications to large scale solar power stations, from cloudy northern rooftops to hot sunny deserts.**

**Glass is an integral and important element of these solar panels.**

**Our wide range of high quality products are used in the three leading solar technologies aimed at converting solar energy into electricity: thin film photovoltaics, crystalline silicon photovoltaics and concentrated solar power applications.**

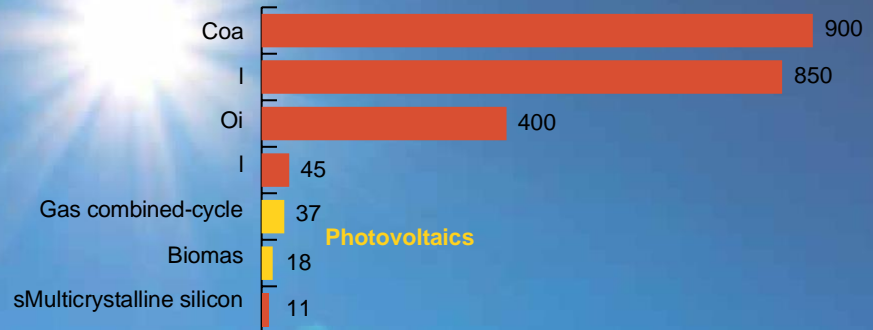
**In addition to the generation of electricity, our glass products are also used in solar applications that generate hot water.**

# Solar Energy – the environmentally friendly technology

1 hour of sunshine = 1 year of global energy consumption

## Renewable and Reliable

Greenhouse gases (g/kwh of CO<sub>2</sub> equivalent)





## Converting solar energy into electricity

### Thin Film Photovoltaics

#### Characteristics

Thin film photovoltaic modules produce power at low cost per watt. They are ideal for large scale solar farms, as well as Building Integrated Photovoltaic applications (BIPV). They benefit from generating consistent power, not only at elevated temperatures, but also on cloudy, overcast days and at low sun angles. For BIPV applications, thin film modules have excellent aesthetics. They also benefit from a relatively small drop in power output under partial shadowing when compared with crystalline silicon modules. This gives thin film modules greater design flexibility when integrated into the building envelope.

Thin film photovoltaic (PV) modules consist of a stack of extremely thin photosensitive layers sandwiched between a top Transparent ConductiveOxide (TCO) coating and a



**back contact. The photovoltaic layers are laminated between a TCO coated front glass such as NSG TEC™, and a low cost backing material, such as standard or thermally strengthened Pilkington Optifloat™ Clear glass.**

There are a number of thin film photovoltaic technologies including amorphous silicon (a-Si), tandem (a-Si/ $\mu$ -Si) – a combination of amorphous and microcrystalline silicon, cadmium telluride (CdTe), copper indium (gallium) diselenide (CIS, CIGS) and dye-sensitised solar cells (DSSC).

a-Si, a-Si/ $\mu$ -Si, CdTe and DSSC are deposited directly onto NSG TEC™; CIS and CIGS tend to be deposited onto a molybdenum coated glass substrate.

## Our products

NSG TEC™ is a group of products, including a comprehensive range of TCO (Transparent Conductive Oxide) coated glass, optimised to suit a variety of thin film photovoltaic technologies,

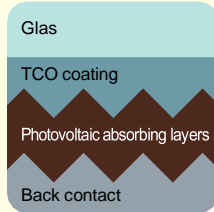
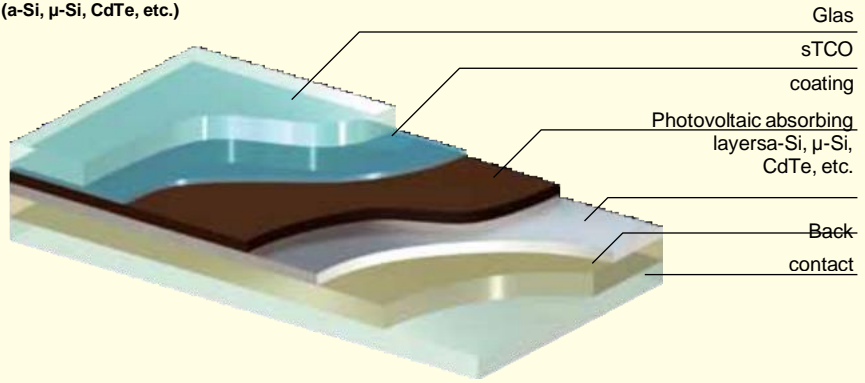
with different haze and conductivity levels. All our NSG TEC™ products are manufactured using a patented chemical vapour deposition process to produce a durable, on-line pyrolytic coating that may be heat strengthened or fully tempered, providing complete flexibility for module production.

Each of our products within the range is targeted at a particular thin film photovoltaic technology. For a-Si, a-Si/ $\mu$ -Si, CdTe and DSSC technologies, properties such as light transmittance, TCO conductivity (sheet resistance) and light trapping (haze) can be optimized to meet individual customer requirements.



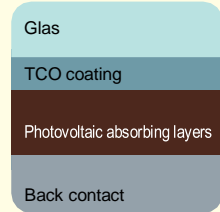
## Thin Film Photovoltaics

### Generic superstrate construction (a-Si, $\mu$ -Si, CdTe, etc.)

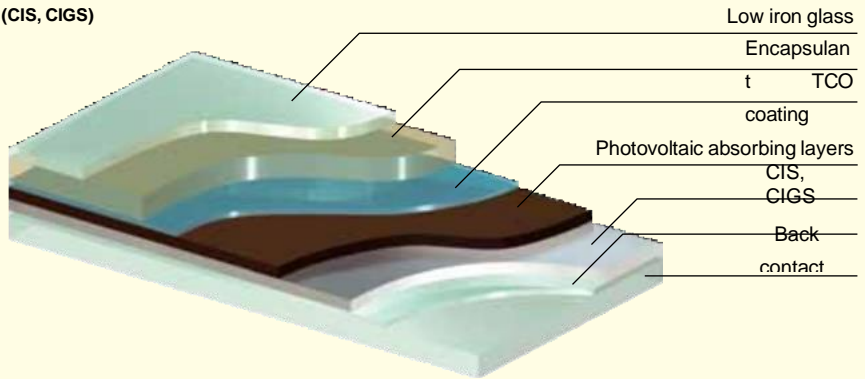


Amorphous and microcrystalline silicon

Cadmium telluride



### Generic substrate construction (CIS, CIGS)



**NSG TEC™ Sodium Block is used for CIS/CIGS applications. It includes a sodium barrier layer, which offers manufacturers improved product stability and increased process throughput.**

**Our NSG TEC™ products are available in either standard or low iron glass composition depending on the substrate/coating combination.**

**NSG TEC™ range product features summary:**

- high light transmittance, medium to high conductivity, low to high haze properties **to suit all thin film photovoltaic applications;**
- coating properties are resistant to heat (i.e. unaffected by very high processing temperature);
- can be fully tempered/toughened or heat strengthened without damage to the coating or drop in performance;
- durable on-line pyrolytic coating, making

**the product easy to transport, store, handle and process, reducing costs and lead times;**

- available on standard clear or low iron glass, depending on the coating type;
- NSG TEC™ C15 available with a choice of buffer layers (NSG TEC™ C15M and NSG TEC™ C15D);
- sodium blocking performance;
- unlimited shelf-life;
- available in a wide range of thicknesses, from 2.2 mm to 6 mm.

**The properties of our main NSG TEC™ products are summarised in the table below:**

	NSG TEC™ A7	NSG TEC™ A9 NSG TEC™ A10	NSG TEC™ C10 NSG TEC™ C10X	NSG TEC™ C15 NSG TEC™ C15D NSG TEC™ C15M	NSG TEC™ A9X NSG TEC™ T11X NSG TEC™ 12X	NSG TEC™ Sodium Block
Light transmittance	High	High	High	High	High	Very High
Conductivity	High	High	High	Medium	High	None
Haze	Medium	High	Low	Low	High	Very Low
Sodium blocking layers	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Technologies	Amorphous silicon DSSC	Amorphous silicon	Cadmium telluride DSSC	Cadmium telluride DSSC	Tandem Amorphous silicon	CIS/CIGS

The NSG TEC™ descriptive names indicate the technology to which the products are most suited as well as the corresponding technical values.

	Technolog	Sheet resistance	Glass
NSG	A = amorphous silicon (a-Si) T = tandem (a-Si/μ-Si) C = cadmium telluride (CdTe)	7 to 15 Ohms/sq	X for low iron

**Pilkington Optiwhite™ may also be used as a base for TCO deposition, or as a top coverplate for CIS and CIGS thin film PV.**

**Pilkington Optiwhite™ is an ultra clear float glass with a very low iron content,**

**Pilkington Optiwhite™ and Pilkington Optiwhite™ S features summary:**

- very high light transmittance and solar heat transmittance;
- consistent lifetime performance following prolonged exposure to the sun (no solarisation);
- available in annealed or tempered/toughened form;
- available in a wide range of cut-sizes and jumbo plates, from 2 mm thickness and upwards.

which maximises the solar energy transmittance and, therefore, the efficiency of the module.

Our range of products includes the standard and well established low iron Pilkington Optiwhite™ and Pilkington Optiwhite™ S, which was developed especially for the solar industry and offers even greater solar transmission.



## Crystalline Silicon Photovoltaics

### Characteristics

Developed from the microelectronics technology industry, crystalline silicon (c-Si) is the most widely used solar technology. Due to their high efficiency, crystalline silicon modules are best suited to applications where space is at a premium.

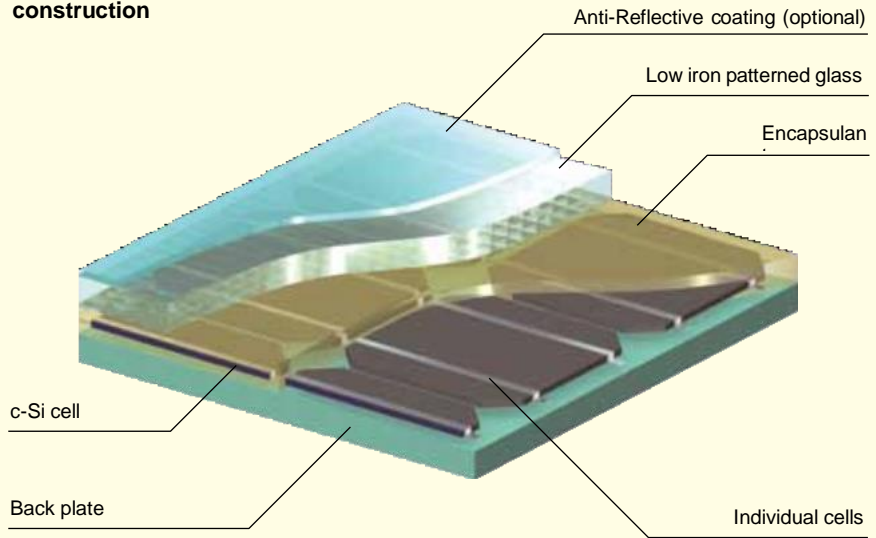
In crystalline silicon modules, cells are connected together and then laminated under toughened, high transmission glass to produce reliable, weather resistant modules.

**There are two types of crystalline silicon modules:**

- mono-crystalline silicon, produced by slicing wafers from a high-purity single crystal ingot;
- multi-crystalline silicon, made by sawing a cast block of silicon first into bars and then into wafers.

**Mono-crystalline modules typically have higher efficiencies than those of multi-crystalline.**

**Crystalline Silicon Photovoltaics  
using a patterned surface Generic  
construction**





The glass type normally used for this technology is low iron rolled glass such as Pilkington Sunplus™, often in toughened form, combined with an Anti-Reflective (AR) coating, to ensure that the maximum solar radiation reaches the PV cells.

It is also possible to use low iron float glass such as Pilkington Optiwhite™.

### Our products

Pilkington Sunplus™ is a glass specifically developed for use in crystalline silicon modules. This high performance low iron glass has very high solar energy transmittance. When toughened, its strength and durability make it the ideal choice for this application.

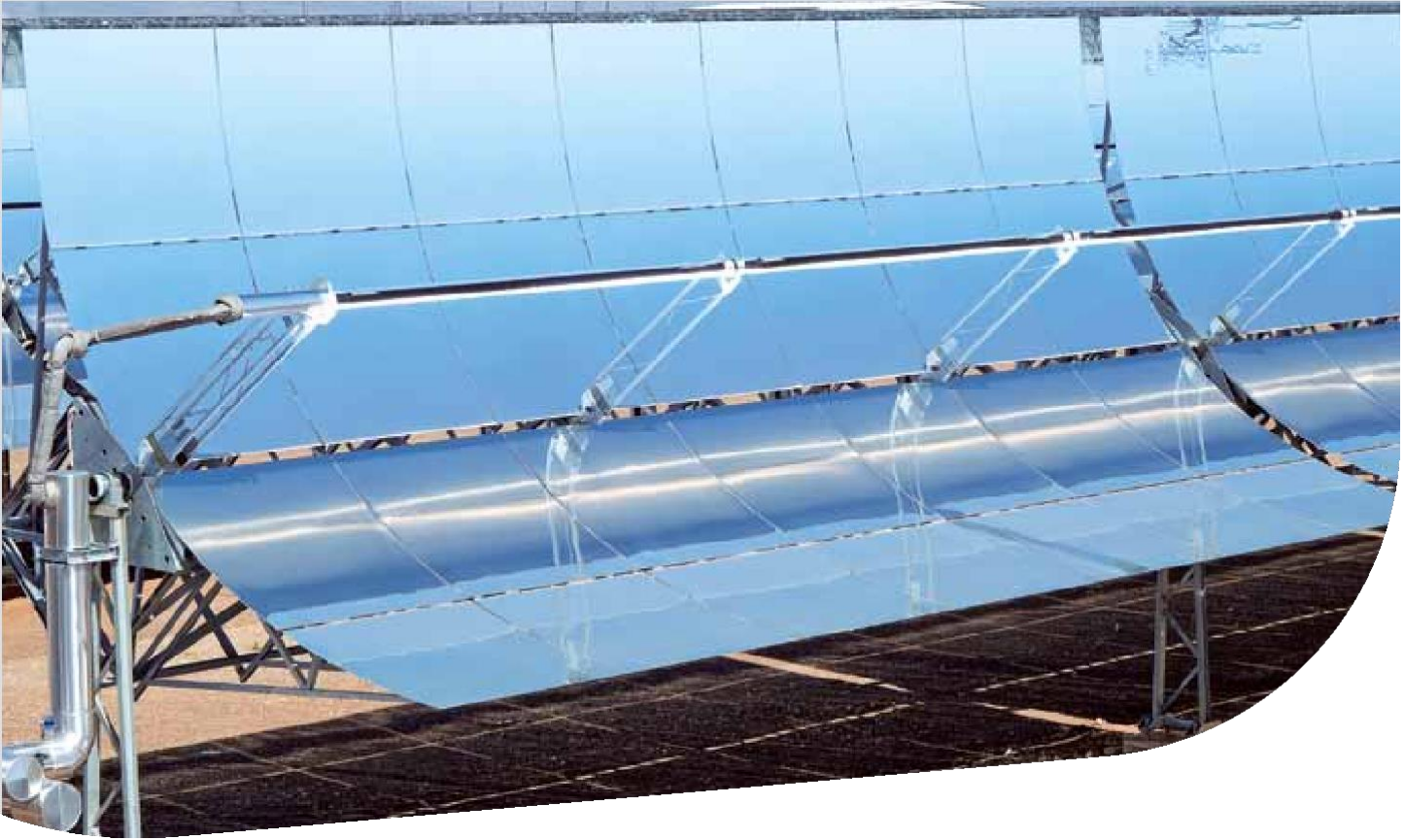
### Our range of Pilkington Sunplus™ products includes:

- Pilkington Sunplus™ SM: ultra high solar energy transmittance and low light reflectance due to a combination of a prismatic pyramidal pattern on one surface (S), and a matt pattern on the other (M);
- Pilkington Sunplus™ MM: ultra high solar energy transmittance and low light reflectance due to the matt pattern surfaces on both sides;
- Pilkington Sunplus™ SM AR: ultra high solar energy transmittance with Anti-Reflective properties due to the application of an AR coating, designed and optimised for crystalline silicon technologies.

Pilkington Sunplus™ is used extensively for the cover glass in crystalline silicon solar modules. Where there is a need to match other building components, toughened Pilkington Optiwhite™ can be used as an alternative cover plate.

### Pilkington Sunplus™ range features summary:

- ultra high solar energy transmittance and low light reflectance;
- choice of patterns, either SM or MM to suit the specific application;
- the pyramidal pattern can assist in the laminating process during module manufacture, but can be used on the external surface if desired;
- SM product available with Anti-Reflective (AR) coating for optimal solar energy conversion;
- consistent lifetime performance following prolonged exposure to the sun (no solarisation);
- available in fully tempered/toughened form to provide excellent strength with resistance to hail, mechanical impact and thermal stress;
- available in various cut-sizes or stock sizes in standard thicknesses of 3.2 mm and 4.0 mm; other thicknesses available on special request.



Source: Flabeg

## Concentrated Solar Power Technology

### Characteristics

Concentrated solar power technology uses mirrors to concentrate sunlight. The concentrated sunlight can either be directed onto a heat transfer material which generates electricity through a turbine, or onto a very high performance photovoltaic cell, which converts it into electricity. Concentrator systems require

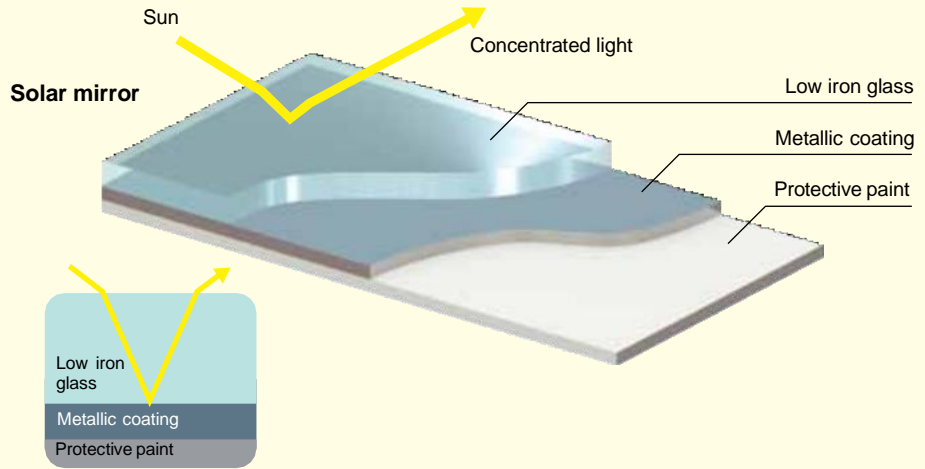
direct sunlight and they generally follow the sun's path during the day through an axis tracking system. Typical examples are parabolic troughs and heliostat power towers. The high performance mirrors are manufactured using metallic reflective coatings and weather protective paints deposited onto very high performance low iron float glass.

**Concentrated Solar Power Technology  
Generic construction**

Heat transfer material  
(water, molten  
sodium salts, etc.)

Heat

Vapou  
rdriven  
turbine





Since the sunlight has to travel through the glasstwic before reaching the heat transfer material, very high light transmittance, low absorptance glass such as Pilkington Optiwhite™ S, Pilkington Microwhite™ or low iron NSG TEC™ Sodium Block is required for this application.

### Our products

Pilkington Microwhite™ is our Pilkington Optiwhite™ in its extremely thin version (glass thicknesses down to 1.0 mm). Pilkington Microwhite™ is a low iron float glass substrate used for solar mirrors. It is particularly suited to parabolic dish technologies in concentrator solar thermal applications.

NSG TEC™ Sodium Block on low iron glass can also be used as substrate for solar mirrors.

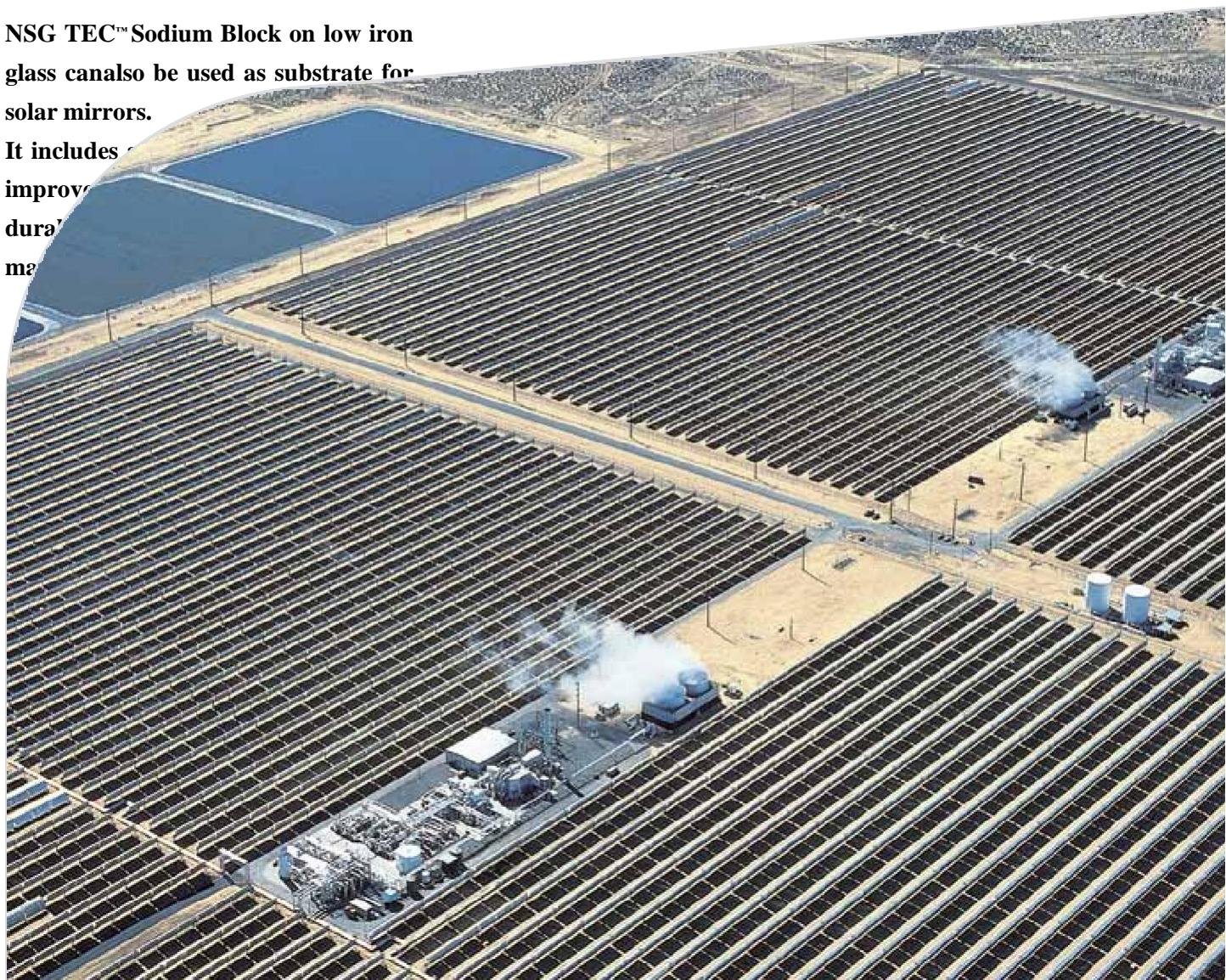
It includes improved durability and maintenance.

Pilkington Optiwhite™ S and Pilkington Microwhite™ features summary:

- very high solar heat transmittance;
- very high light transmittance;
- consistent lifetime performance following prolonged exposure to the sun (no solarisation);
- available in annealed or tempered/toughened form for Pilkington Optiwhite™ S; available in annealed form only for Pilkington Microwhite™;
- available in a wide range of cut-sizes and jumbo plates from 2 mm thickness and upwards for Pilkington Optiwhite™ S; available in cut-sizes from 400 × 600 mm up to 1000 × 1800 mm, and in thicknesses down to 1.0 mm for Pilkington Microwhite™.

NSG TEC™ Sodium Block

- available on low iron glass with very high solar heat transmittance and light transmittance;
- consistent lifetime performance following prolonged exposure to the sun (no solarisation);
- durable on-line pyrolytic coating, making the product easy to transport, store, handle and process, reducing costs and lead times;
- sodium blocking performance
- unlimited shelf-life
- available in annealed or tempered/toughened form
- available in a wide range of cut-sizes and thicknesses, from 2.2 mm to 6 mm.





## Converting solar energy into hot water

### Solar Thermal Collectors

#### Characteristics

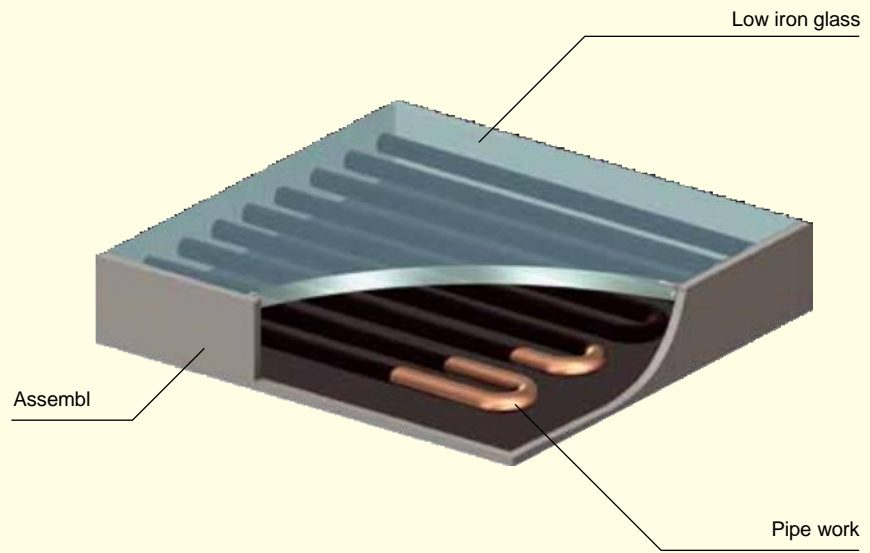
Solar heating systems are generally composed of solar thermal collectors, a water storage tank or interconnecting pipes and a fluid system to move the heat from the collector to the tank.

The sun's energy is used to heat water flowing through the interconnecting pipes. The water can be heated for a wide variety of uses, including domestic, commercial and industrial applications.

Flat-plate solar collectors consist of an insulated box which contains a dark absorber plate under a glass cover, that hermetically seals the system while maximizing the energy input. The glass cover plate will transmit the sunlight while protecting the system from harsh weather.

Toughened, high transmittance glass is required for this application; our Pilkington Sunplus™ and Pilkington Optiwhite™ are ideal for such applications.

**Solar Thermal Collectors**  
**Generic construction**



## Our expertise in solar technology

**Drawing on the combined strengths of Nippon Sheet Glass and Pilkington, NSG Group has been closely associated with the**

leading companies within the crystalline silicon and thin film photovoltaic industries for many years. This collaboration has come about, in part, as a result of the historical expertise in on-line coating of both Pilkington and NSG, which has enabled us to become the worldwide leading producer of high quality, high volume TCO glass, with manufacturing sites in all main regions.

**Furthermore, we have been a technological leader in low iron glass compositions for twenty-five years. This is why we are able**

to offer all the support and guidance required by our valued solar customers.

**NSG Group has a global solar energy organisation, delivered through a local presence, that enables us to give one face to our customers wherever they are based and regardless of their solar technology. With offices across the world, including Japan, China, Germany, USA, India and the UK, we provide the first class service that our customers deserve.**



This publication provides only a general description of the products. Further, more detailed information may be obtained from your local NSG Group Solar Energy representative. It is the responsibility of the user to ensure that the use of these products is appropriate for any particular application and that such use complies with all relevant legislation, standards, code of practice and other requirements. To the fullest extent permitted by applicable laws, Nippon Sheet Glass Co. Ltd. and its subsidiary companies disclaim all liability for any error in or omission from this publication and for all consequences of relying on it. Pilkington, Microwhite, Optiwhite, Optifloat, Sunplus and TEC are trade marks of the Nippon Sheet Glass Co. Ltd.



CE marking confirms that a product complies with its relevant harmonised European Norm.  
The CE marking label for each product, including declared values, can be found at [www.pilkington.com/CE](http://www.pilkington.com/CE)



**Pilkington Group Limited**

European Technical Centre

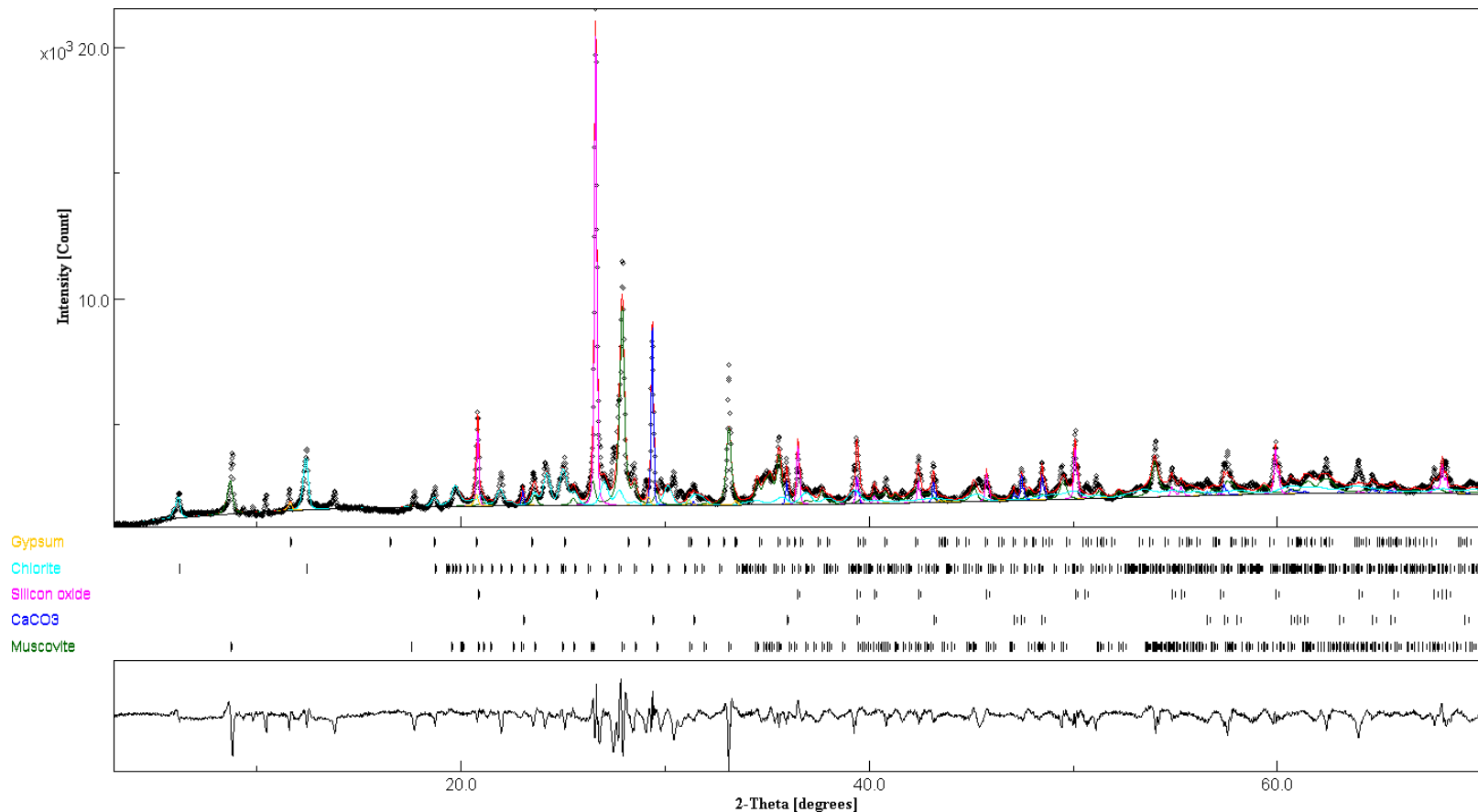
Hall Lane, Lathom Nr Ormskirk L40 5UF, United Kingdom [marketing.communications@nsg.com](mailto:marketing.communications@nsg.com) [www.pilkington.com/solarenergy](http://www.pilkington.com/solarenergy)

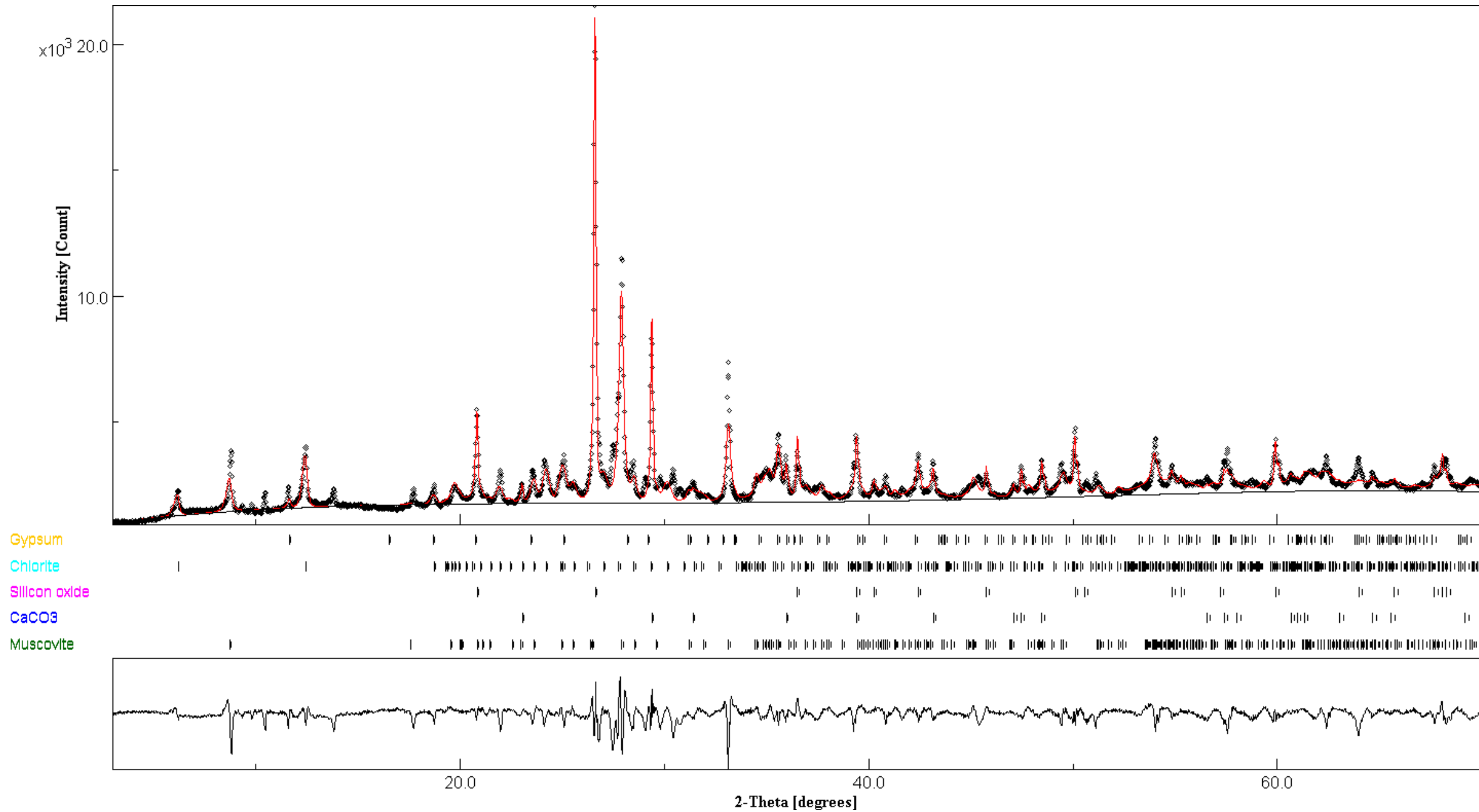
# ANEXO 4. Cálculos Rietveld El Salvador PV

S1

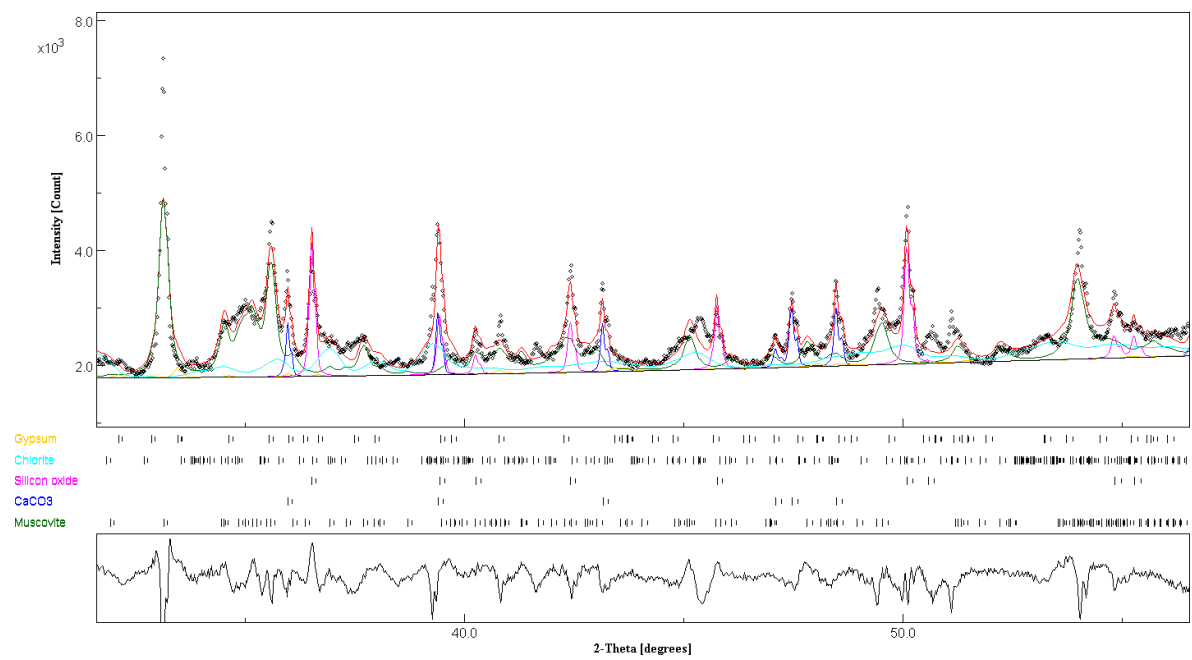
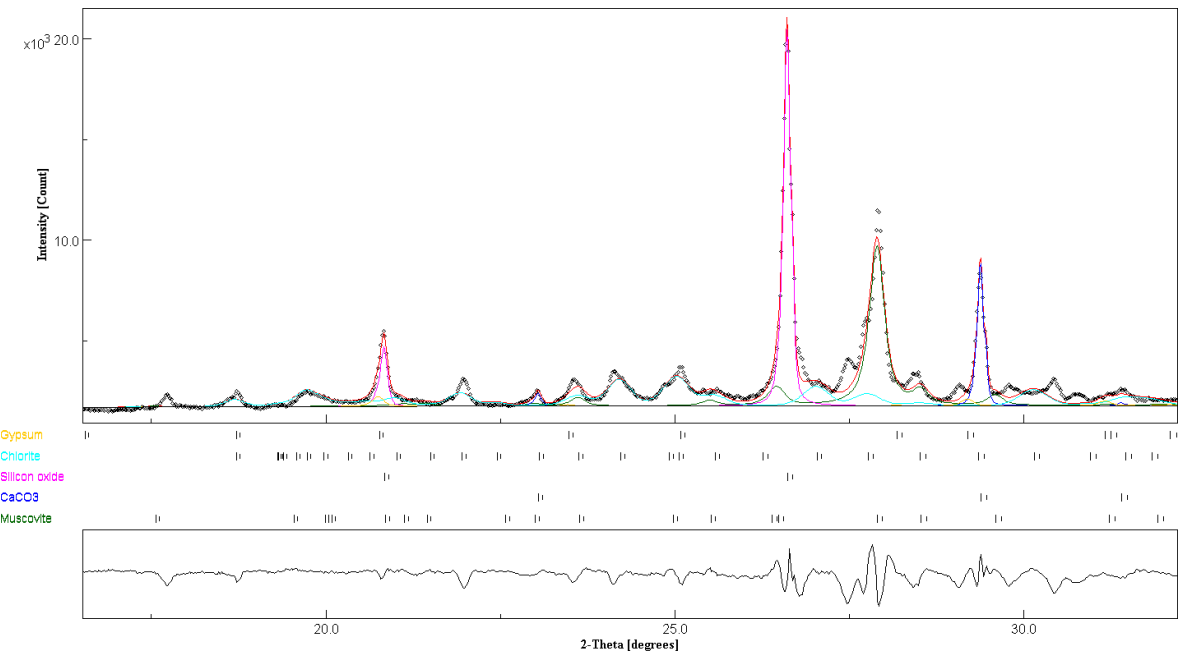
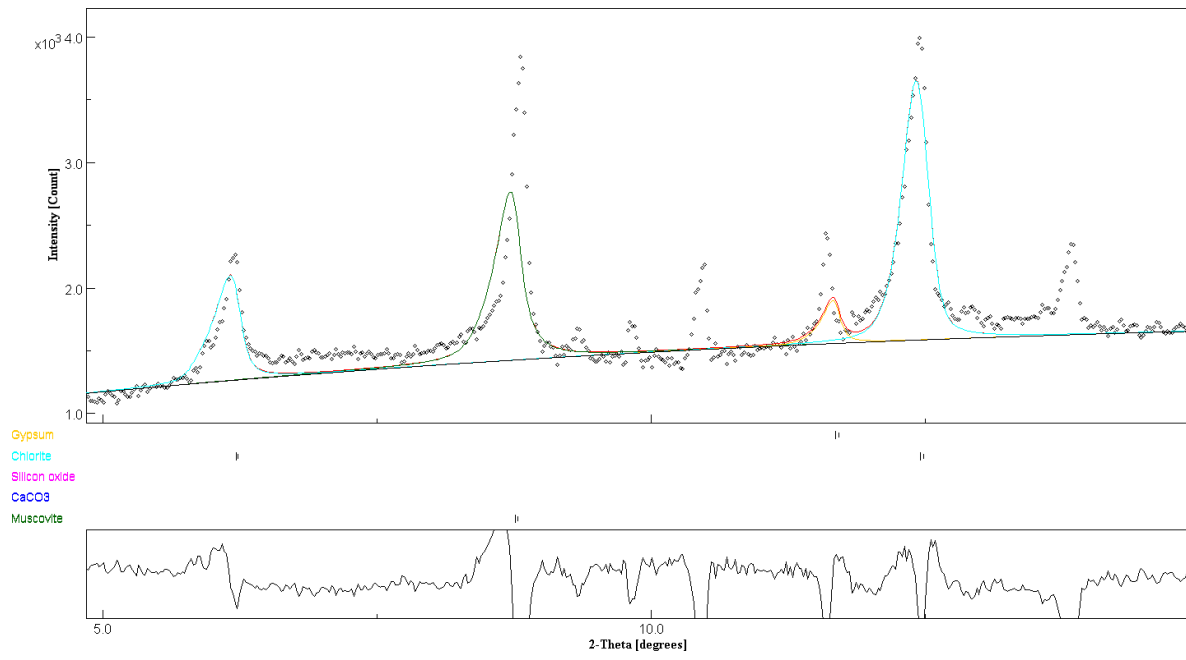
```
convergence reached
# of params fit = 6
# of params converged = 6
lambda/1(min) = 3.162278E-14
sig= 4.0055614
Rwp (%) = 8.204397
Rwpnb (% , no bkg) = 27.337673
Rwpnb1 (% , no bkg rescaled) = 16.350033
Rwpnb2 (% , no bkg rescaled^2) = 11.305764
Rb (%) = 6.095
Rexp (%) = 2.0482516
# iterations = 4
```

```
Muscovite , weight %: 44.779034 +- 4.4809747
CaCO3 , weight %: 7.3840094 +- 0.61823654
Silicon oxide , weight %: 23.552261 +- 2.1294024
Chlorite , weight %: 22.687681 +- 4.3237257
Gypsum , weight %: 1.5970144 +- 0.2461234
```









5, iterations - pause

sig= 4.9619594

Rwp (%) = 11.259285

Rwpnb (% , no bkg) = 28.65963

Rwpnb1 (% , no bkg rescaled) = 17.108755

Rwpnb2 (% , no bkg rescaled^2) = 12.278629

Rb (%) = 8.895897

Rexp (%) = 2.2691207

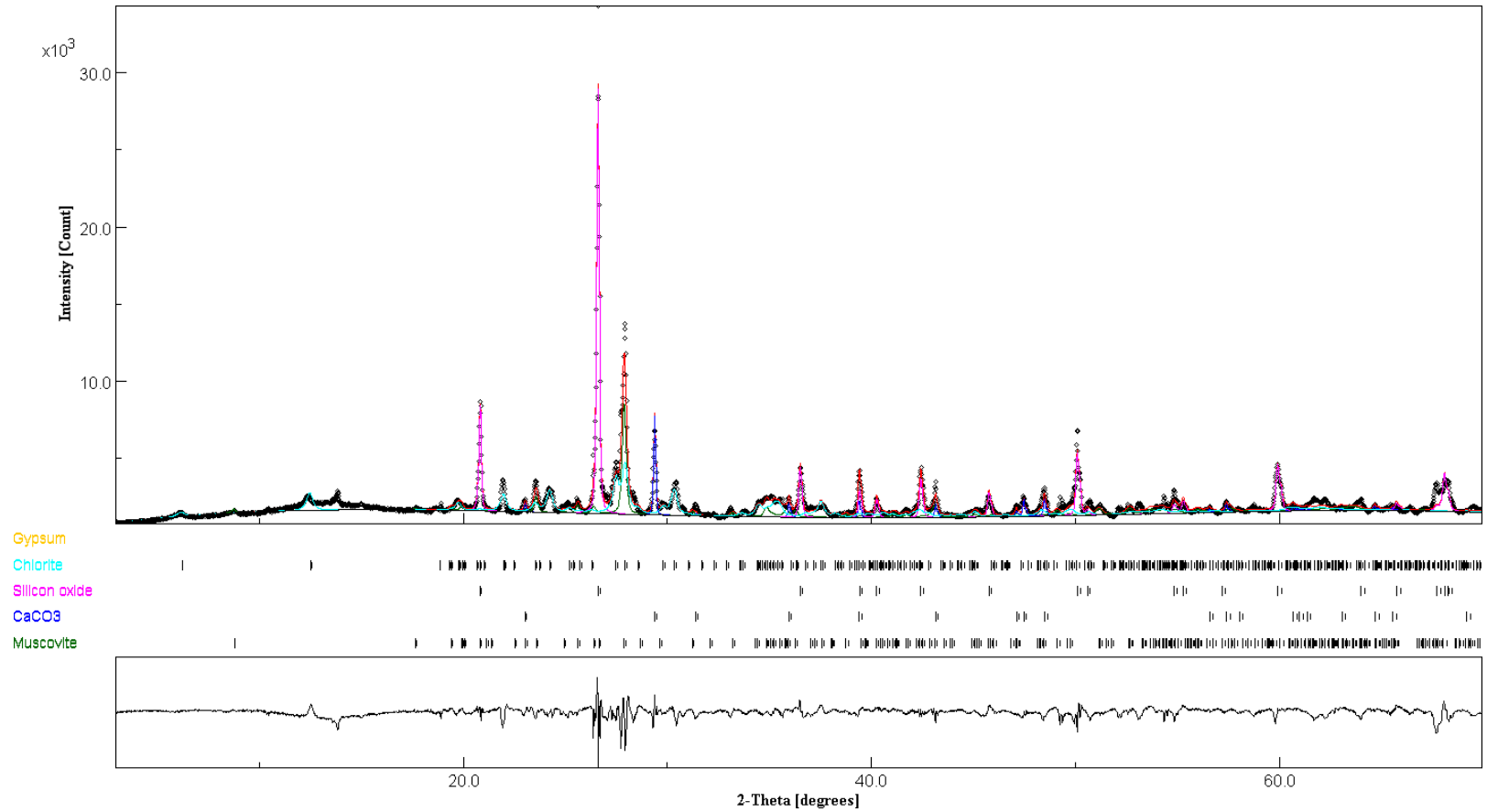
# iterations = 5

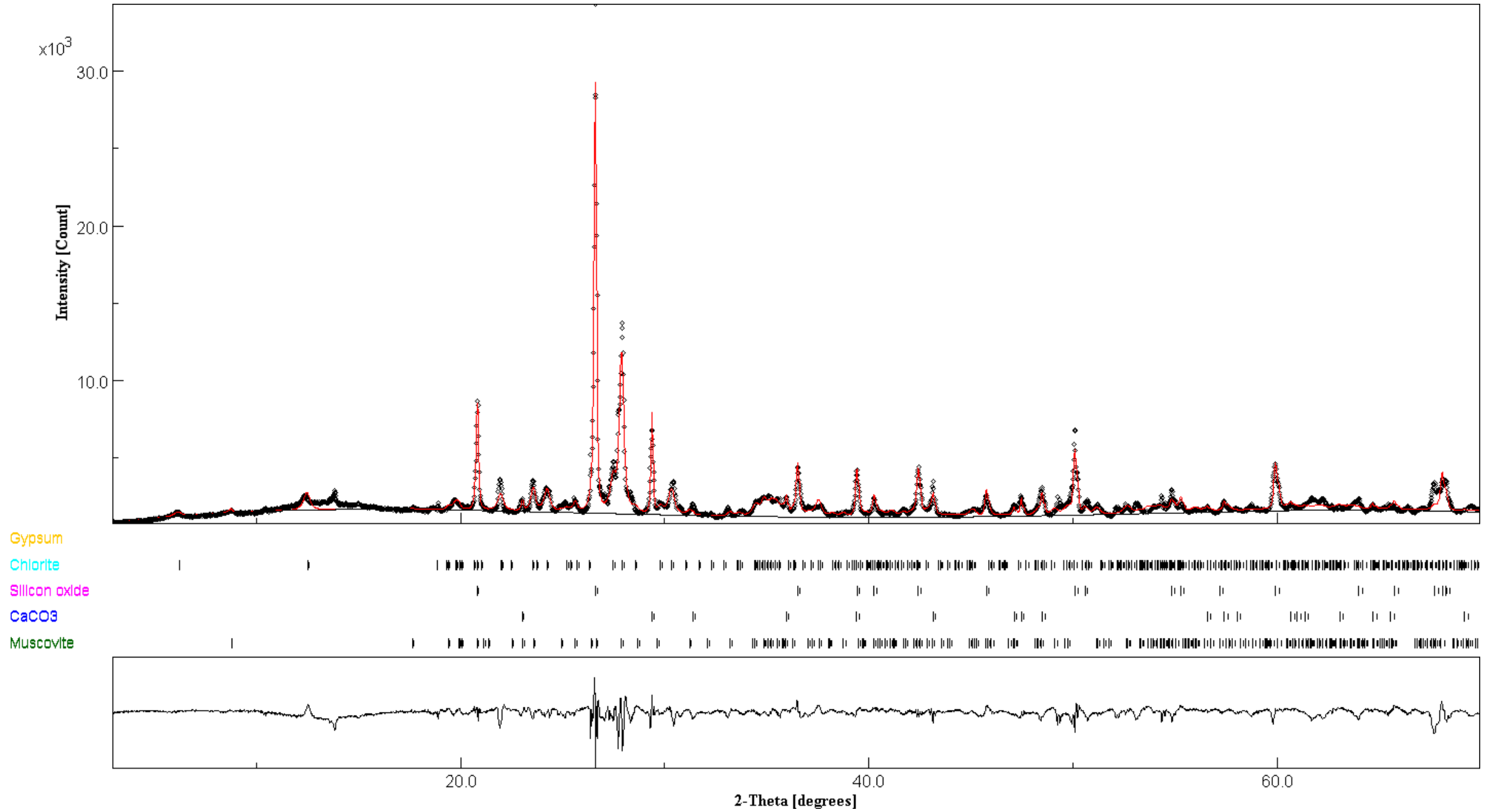
Muscovite , weight %: 16.394411 +- 4.2503357

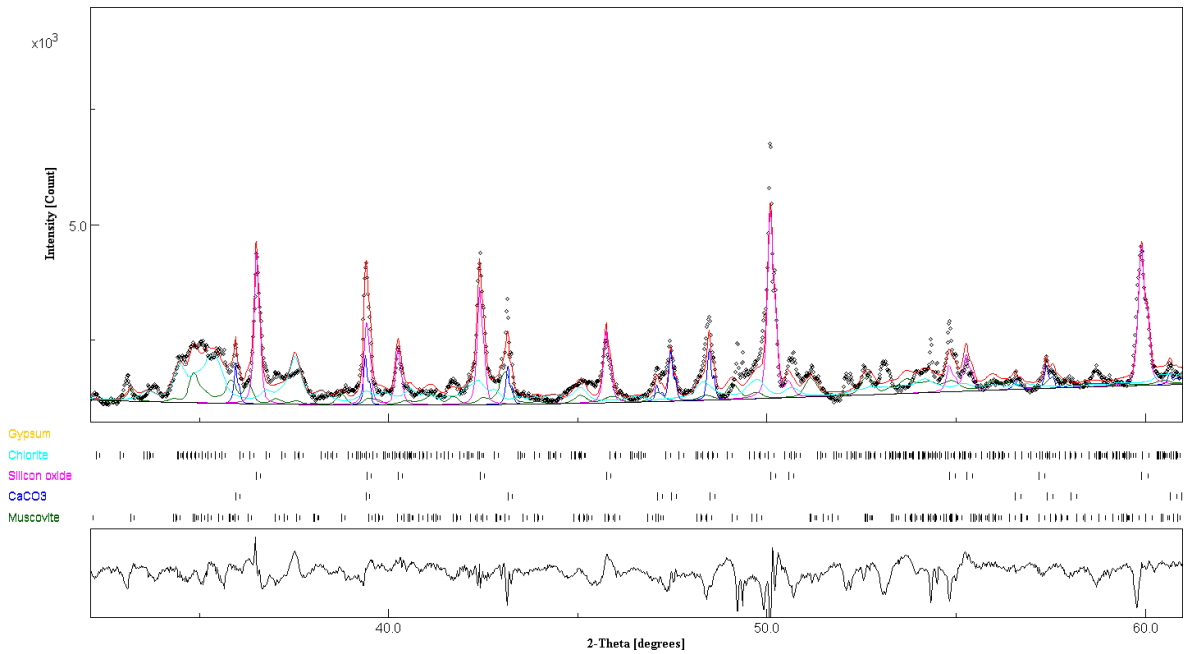
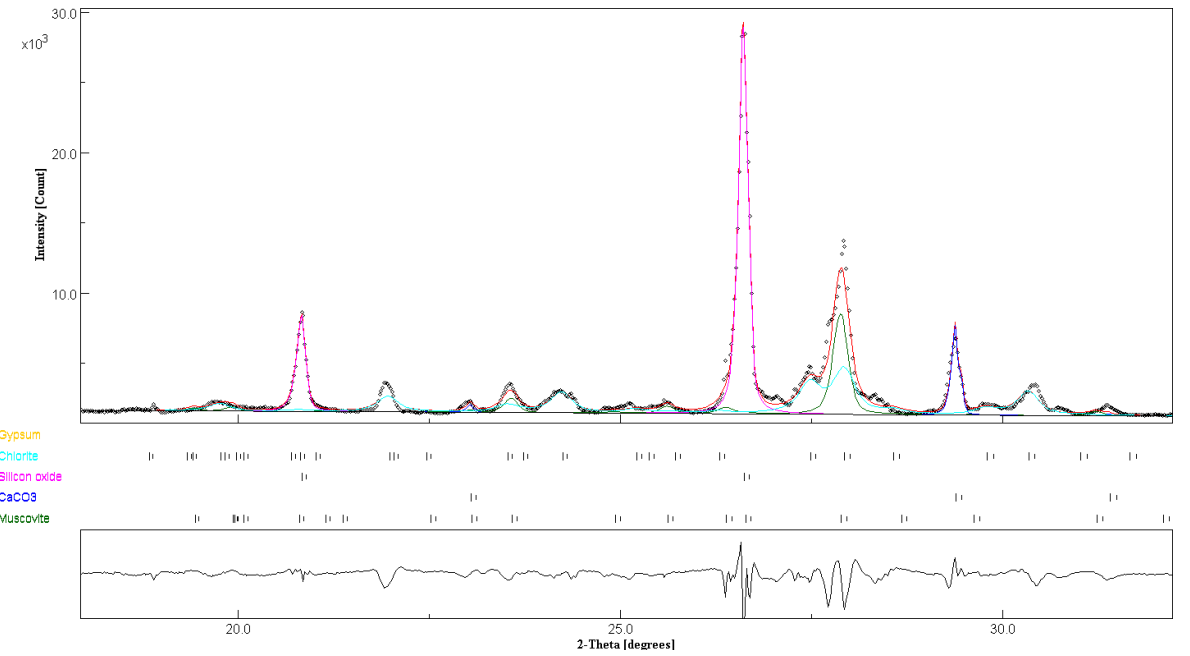
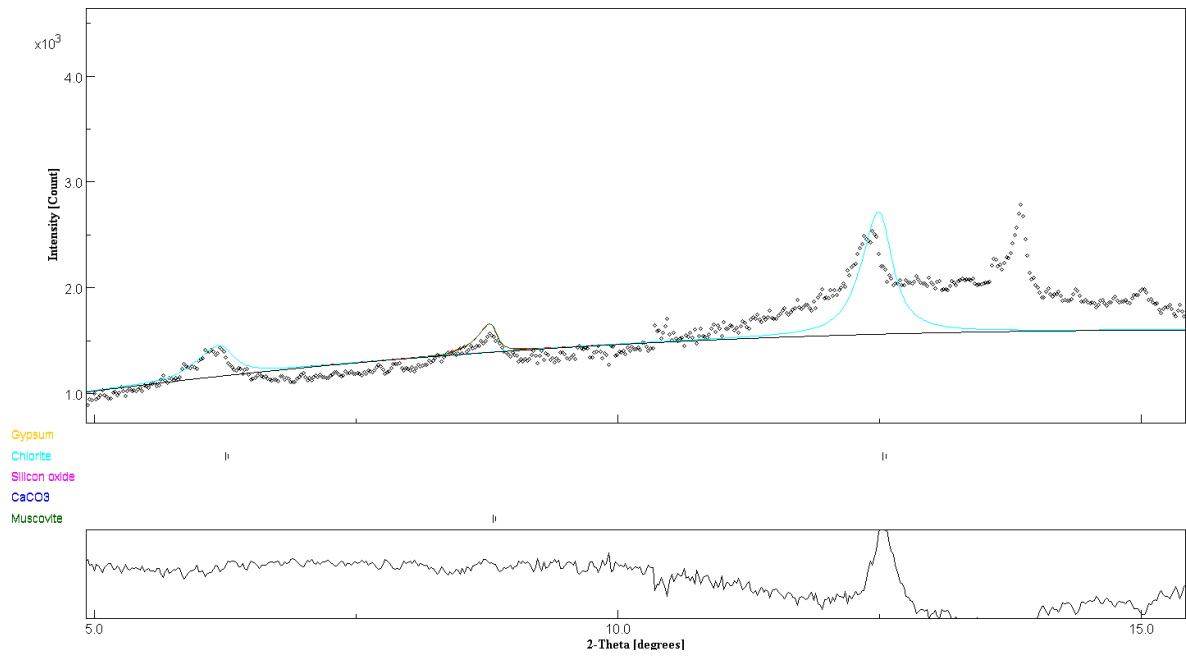
CaCO<sub>3</sub> , weight %: 5.289376 +- 0.65661615

Silicon oxide , weight %: 38.420002 +- 4.7146177

Chlorite , weight %: 39.896214 +- 6.742682

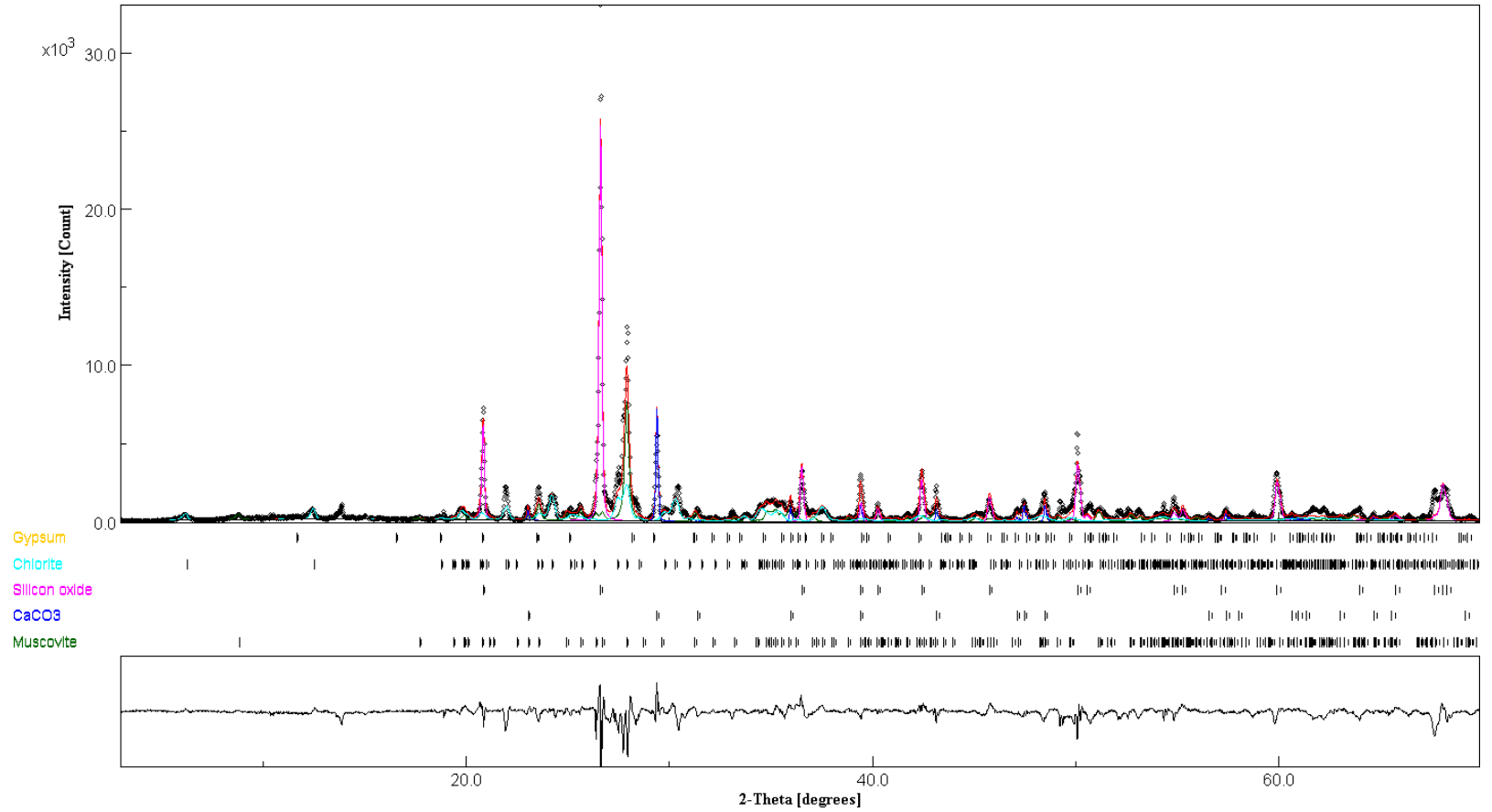


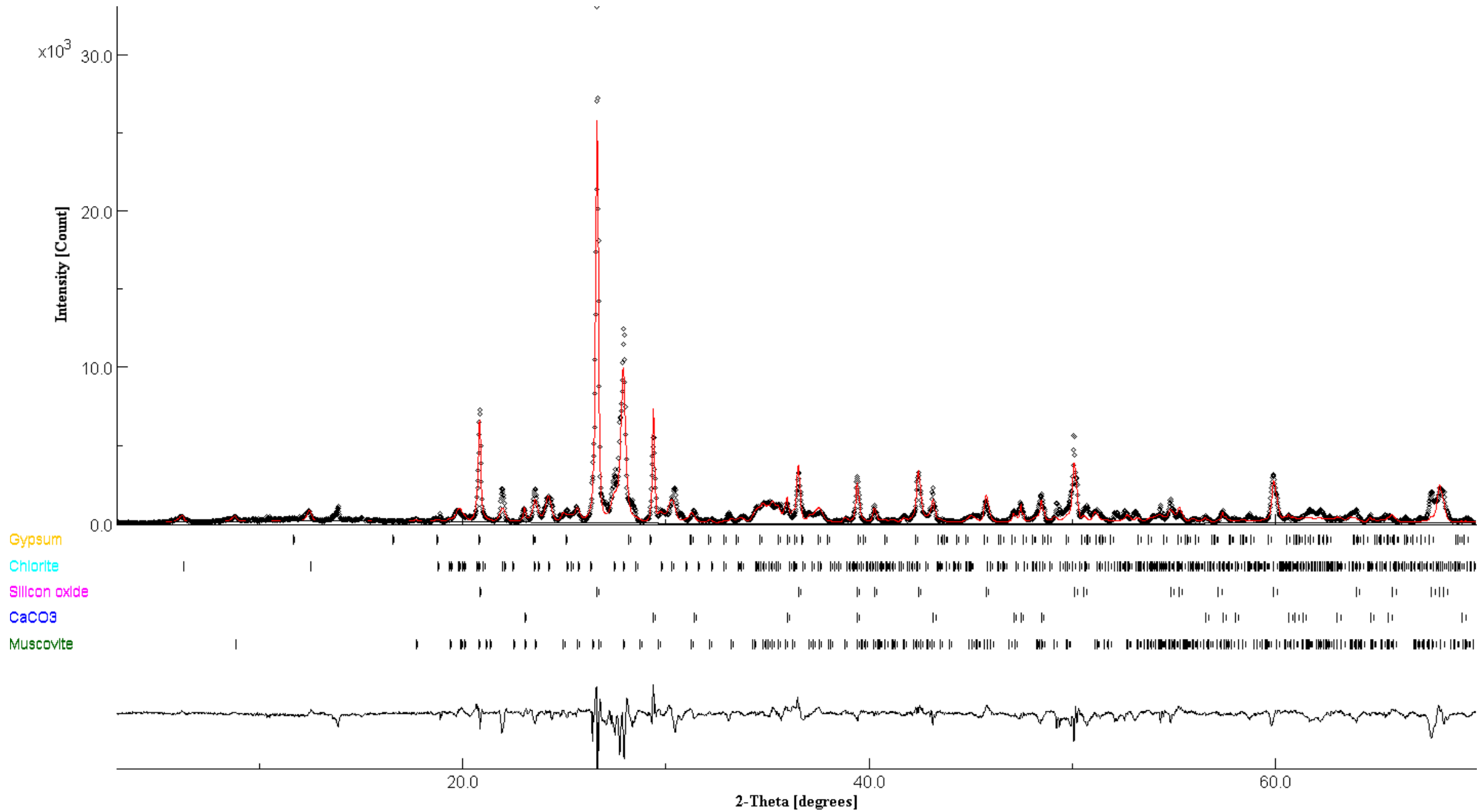


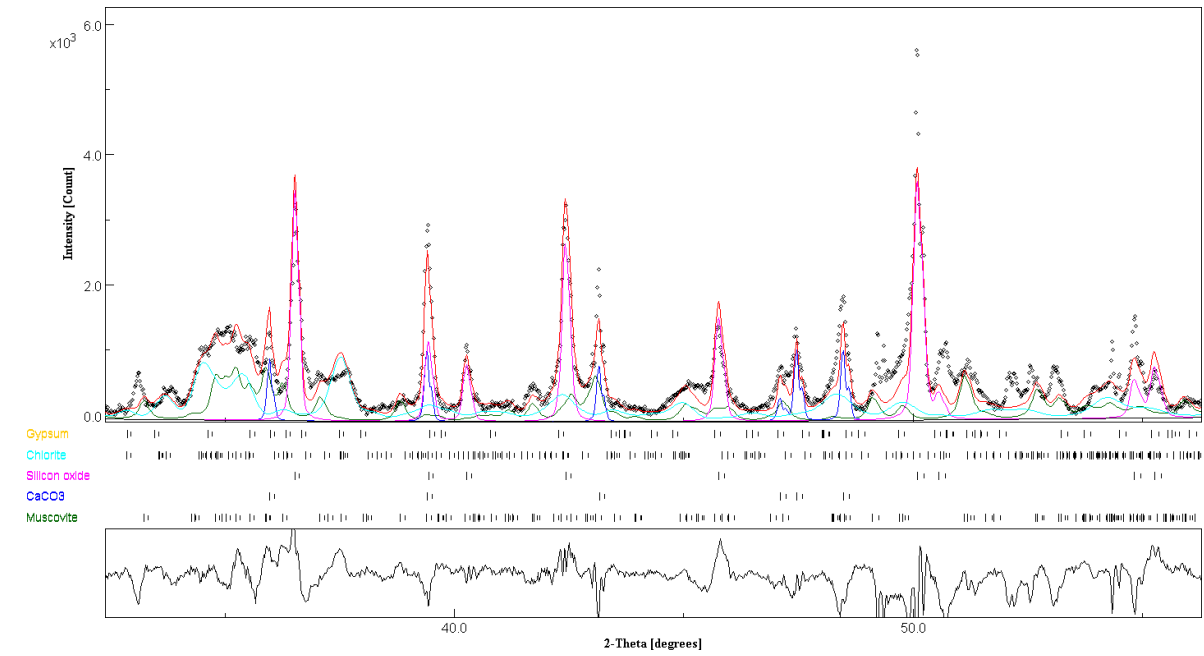
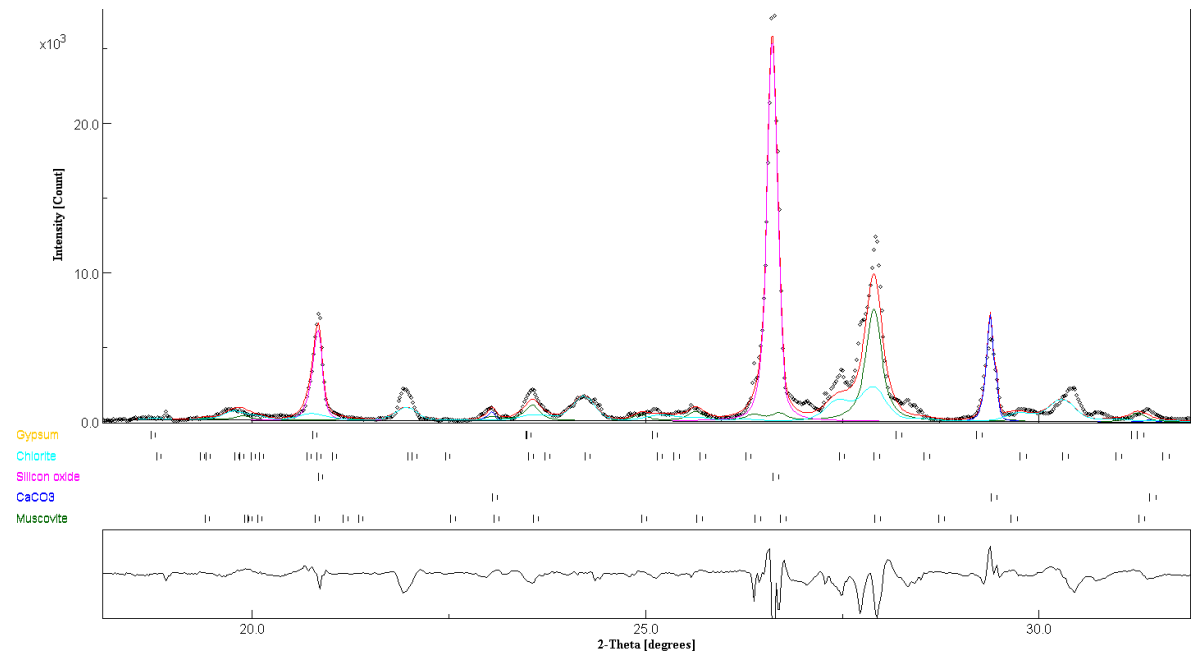
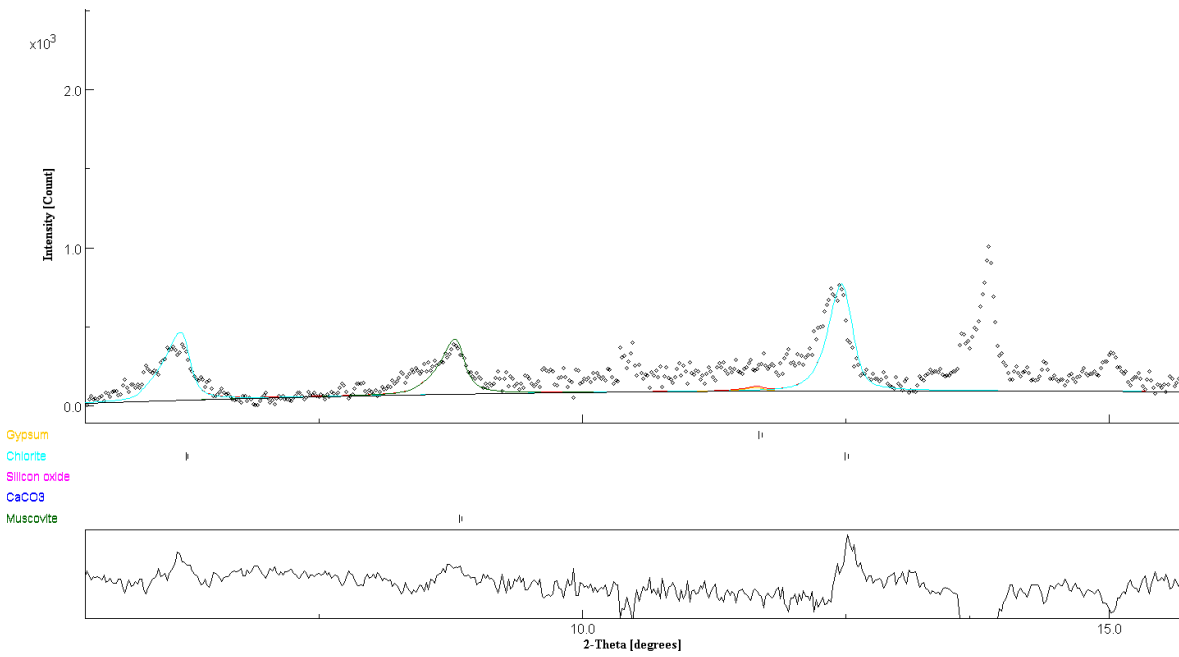


```
5, iterations - pause
sig= 9.248899
Rwp (%) = 37.600594
Rwpnb (% , no bkg) = 35.24859
Rwpnb1 (% , no bkg rescaled) = 46.212936
Rwpnb2 (% , no bkg rescaled^2) = 160.31967
Rb (%) = 27.650618
Rexp (%) = 4.0654125
# iterations = 5
```

```
Muscovite , weight %: 27.387281 +- 4.270762
CaCO3 , weight %: 6.1736073 +- 0.87777054
Silicon oxide , weight %: 36.76231 +- 5.5872107
Chlorite , weight %: 29.581486 +- 6.2635646
Gypsum , weight %: 0.09531449 +- 0.15862356
```







Resumen análisis cuantitativo por Rietveld

---

	<b>S1</b>	<b>S2</b>	<b>S3</b>
<b>Muscovite</b>	44.8 ± 4.4	16.4 ± 4.2	27.4 ± 4.2
<b>CaCO<sub>3</sub></b>	7.4 ± 0.6	5.2 ± 0.6	6.2 ± 0.8
<b>SiO<sub>2</sub></b>	23.6 ± 2.1	38.4 ± 4.7	36.8 ± 5.6
<b>Chlorite</b>	22.6 ± 4.3	39.9 ± 6.7	29.5 ± 6.3
<b>Gypsum</b>	1.6 ± 0.2	0.1 ± 0.1	0.1 ± 0.1



## ANEXO 5. Cálculos Rietveld María Elena PV

sig= 6.164564

Rwp (%) = 26.185373

Rwpnb (% , no bkg) = 23.548279

Rwpnb1 (% , no bkg rescaled) = 25.08381

Rwpnb2 (% , no bkg rescaled^2) = 27.901

Rb (%) = 17.332582

Rexp (%) = 4.247725

# iterations = 0

CaCO3 , weight %: 41.476055 +- 0.0

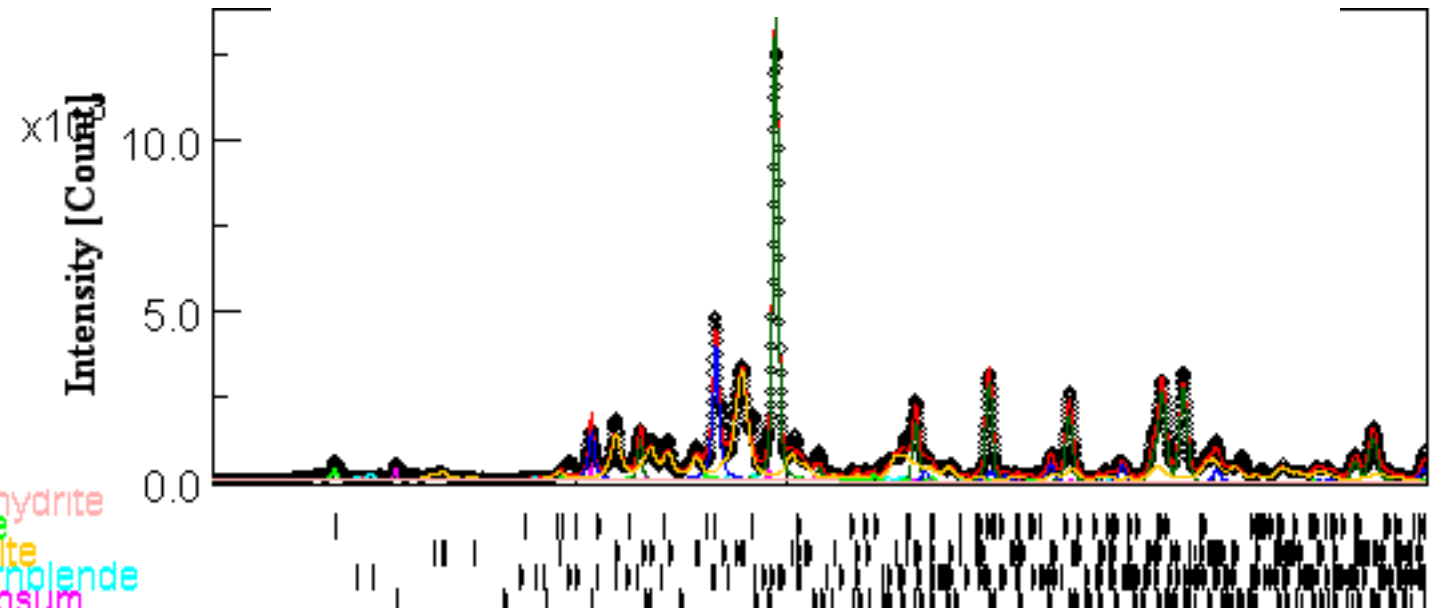
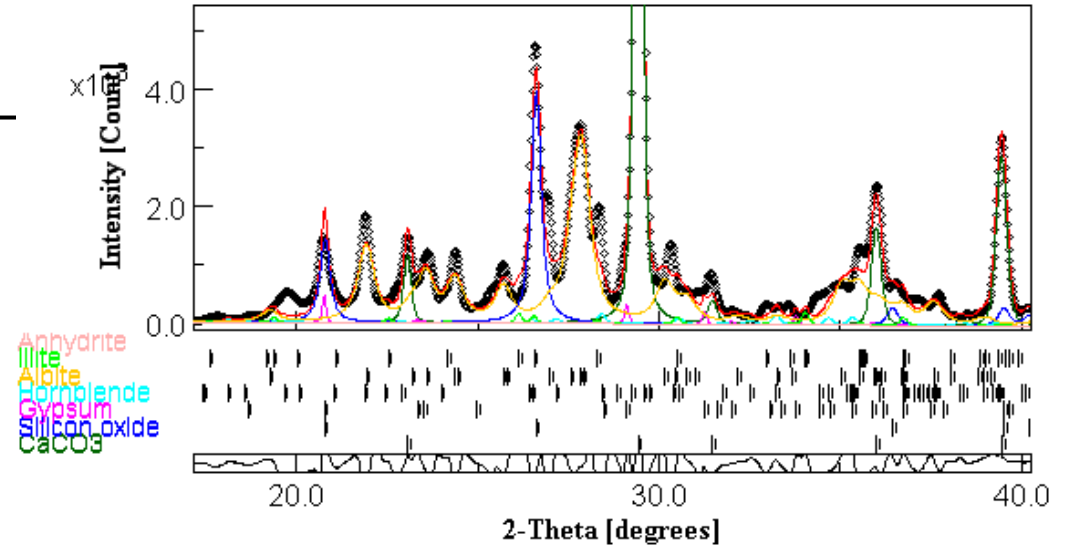
Silicon oxide , weight %: 11.139098 +-

Gypsum , weight %: 1.1922034 +- 0.1286

Hornblende , weight %: 3.2033138 +- 0.

Albite , weight %: 41.02983 +- 2.49928

Illite , weight %: 1.9594983 +- 0.1573



sig= 3.7653003

Rwp (%) = 13.080236

Rwpnb (% , no bkg) = 11.783696

Rwpnb1 (% , no bkg rescaled) = 11.33548

Rwpnb2 (% , no bkg rescaled^2) = 11.770396

Rb (%) = 8.871001

Rexp (%) = 3.4738894

# iterations = 5

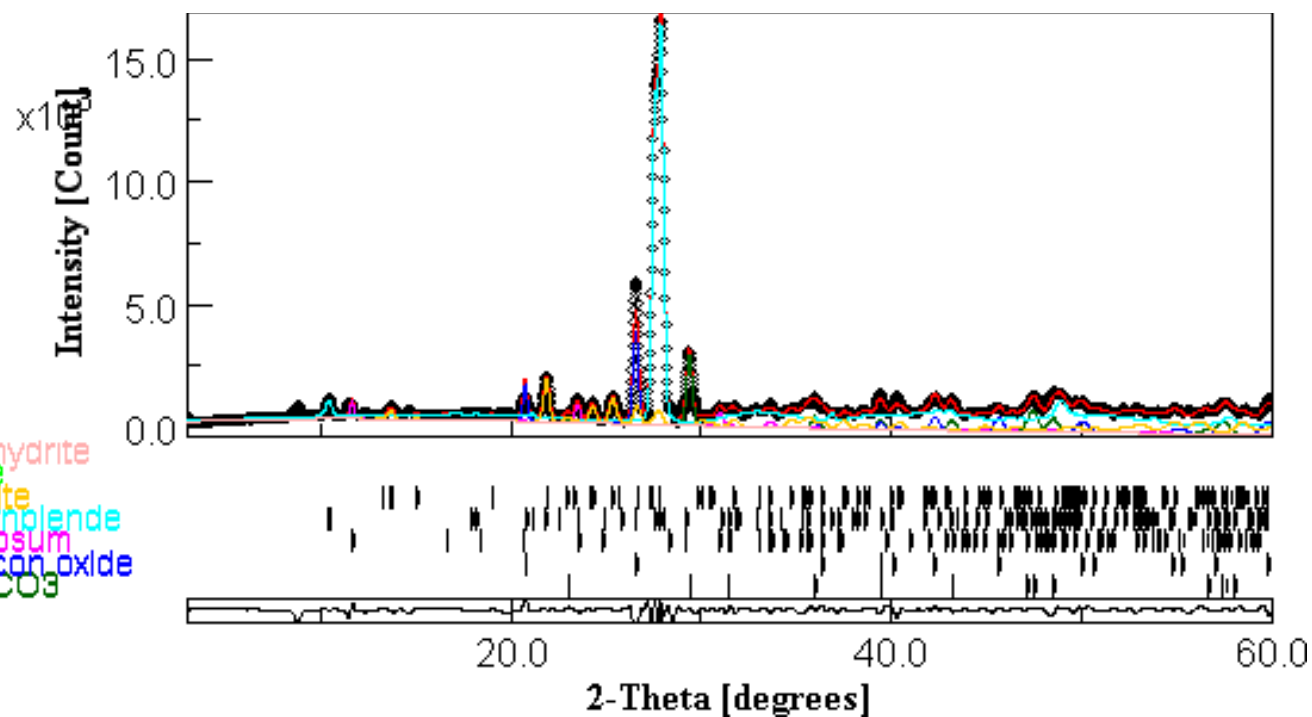
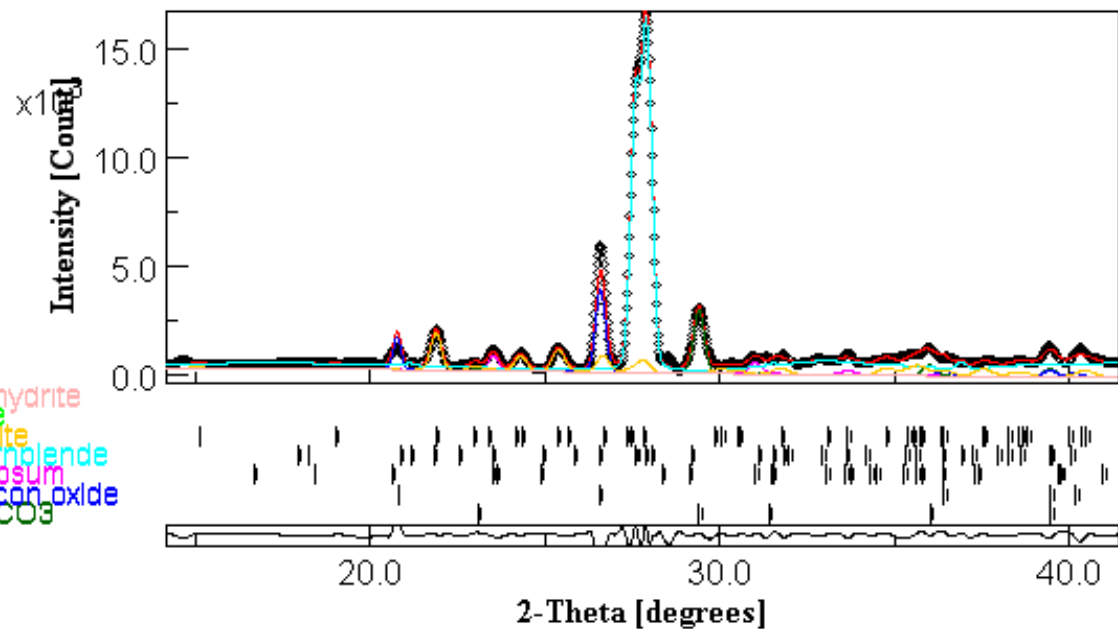
CaCO3 , weight %: 5.127114 +- 0.0

Silicon oxide , weight %: 5.233863 +- 0.30683

Gypsum , weight %: 2.2460415 +- 0.22635134

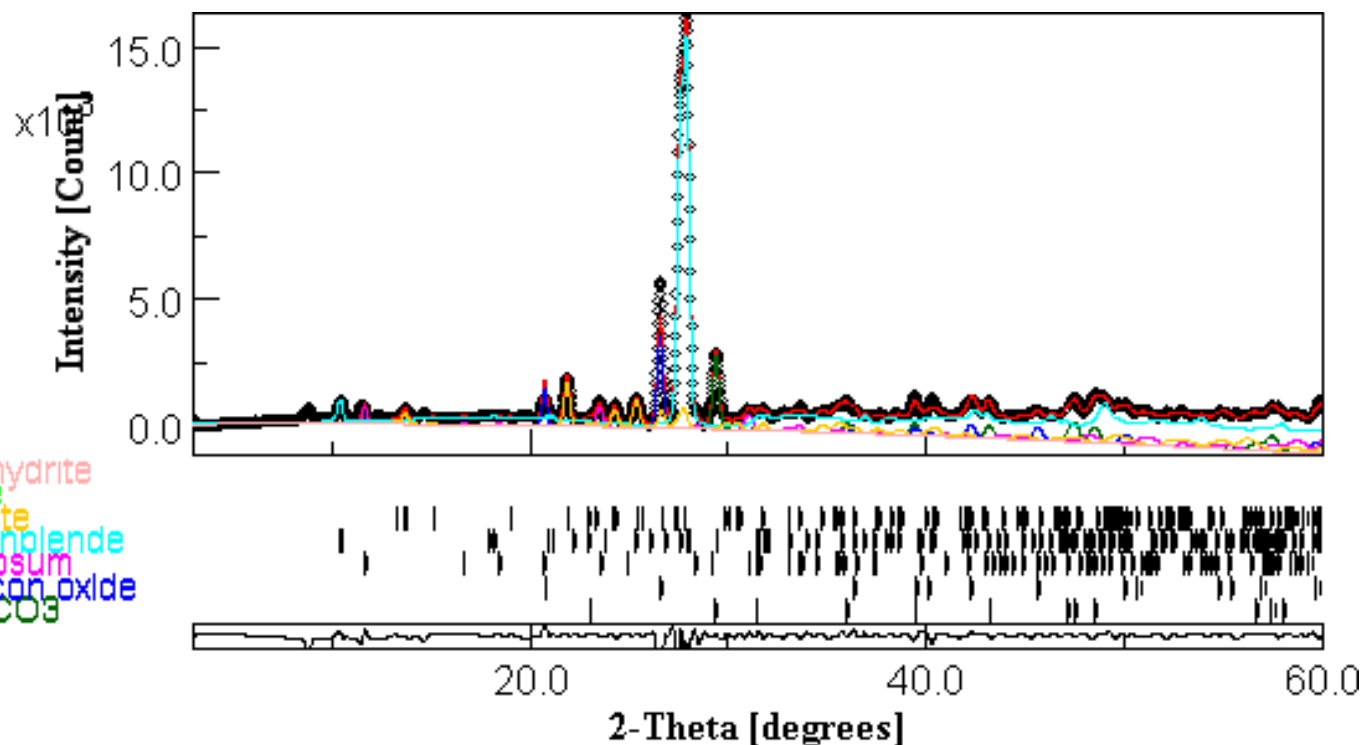
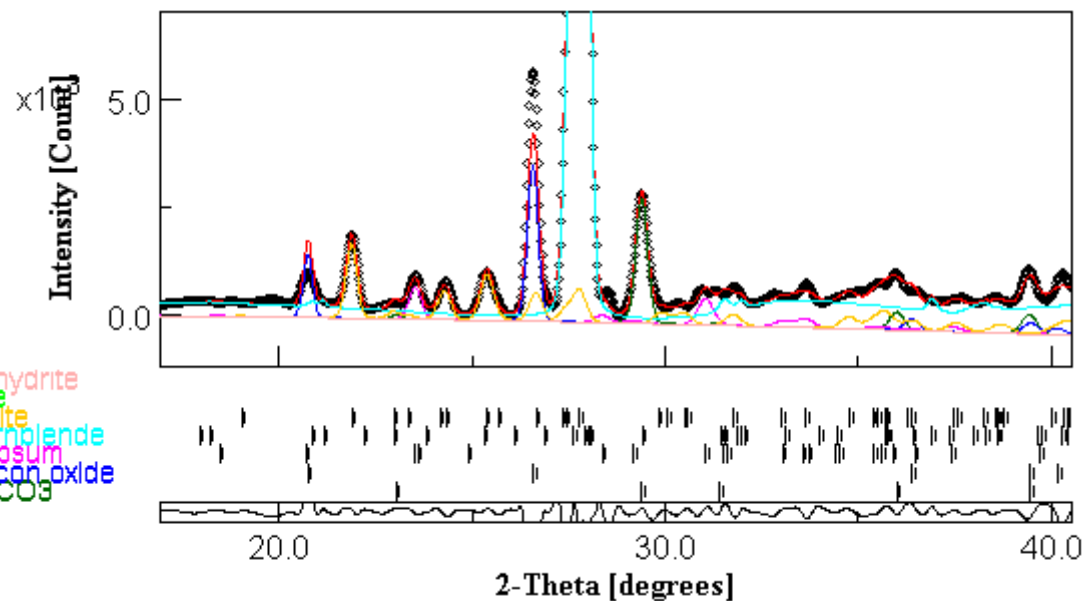
Hornblende , weight %: 76.76899 +- 15.036736

Albite , weight %: 10.623994 +- 1.6893268



sig= 5.4101367  
Rwp (%) = 21.622341  
Rwpnb (% , no bkg) = 11.362128  
Rwpnb1 (% , no bkg rescaled) = 16.080361  
Rwpnb2 (% , no bkg rescaled^2) = 88.4431  
Rb (%) = 13.489923  
Rexp (%) = 3.996635  
# iterations = 5  
CaCO<sub>3</sub> , weight %: 6.538807 +- 0.0  
Silicon oxide , weight %: 6.305861 +- 0.0  
Gypsum , weight %: 2.3822033 +- 1.7117  
Hornblende , weight %: 71.74651 +- 26.0  
Albite , weight %: 13.026618 +- 3.7991

Anhydrite  
Albite  
Albite  
Hornblende  
Gypsum  
Silicon oxide  
CaCO<sub>3</sub>



---

<b>% en peso</b>	<b>Suelo</b>	<b>Invierno</b>	<b>Verano</b>
<b>CaCO3</b>	41.4	5.1	6.5
<b>SiO2</b>	11.1	5.2	6.3
<b>Gypsum</b>	1.1	2.2	2.3
<b>Hornblende</b>	3.2	76.7	71.4
<b>Albite</b>	41.0	10.6	13.0
<b>Illite</b>	1.9		
<b>Anhydrite</b>			