

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS



DESARROLLO DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN CON PROPIEDADES  
FOTOVOLTAICAS A PARTIR DE RESIDUOS DE VIDRIO DE PANELES SOLARES  
COMO MATERIA PRIMA PRINCIPAL

Por:

Karina Treviño Rodríguez

Como requisito parcial para la obtención del grado de:

DOCTORADO EN CIENCIAS con orientación

en Procesos Sustentables

Agosto, 2024

**DESARROLLO DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN CON PROPIEDADES  
FOTOVOLTAICAS A PARTIR DE RESIDUOS DE VIDRIO DE PANELES SOLARES  
COMO MATERIA PRIMA PRINCIPAL**

**Revisión de la Tesis:**

---

**DRA. ANABEL ÁLVAREZ MÉNDEZ**  
Directora de Tesis

---

**DRA. ASTRID IRIANA SÁNCHEZ VÁZQUEZ**  
Co-Directora de Tesis

---

**DR. JUAN JACOBO RUIZ VALDÉS**  
Evaluador de Tesis

---

**DR. JORGE IBARRA RODRÍGUEZ**  
Evaluador de Tesis

---

**DRA. MARÍA GUADALUPE PAREDES FIGUEROA**  
Evaluadora de Tesis

---

**DRA. MARÍA ELENA CANTÚ CÁRDENAS**  
Sub-Directora de Posgrado

## **RESUMEN**

**Karina Treviño Rodríguez**

**Fecha de graduación: Agosto 2024**

**Universidad Autónoma de Nuevo León**

**Facultad de Ciencias Químicas**

**Título del Estudio: DESARROLLO DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN CON PROPIEDADES FOTOVOLTAICAS A PARTIR DE RESIDUOS DE VIDRIO DE PANELES SOLARES COMO MATERIA PRIMA PRINCIPAL**

**Número de páginas: 122**

**Candidato para el grado de Doctorado en Ciencias con orientación en Procesos Sustentables**

**Área de Estudio: Procesos Sustentables**

**Propósito y método de estudio:** El propósito de este estudio fue la valoración de material vítreo proveniente de residuos de paneles fotovoltaicos para ser utilizado en el desarrollo de sustratos destinados a celdas fotovoltaicas de capa fina. El vidrio recuperado fue caracterizado por difracción de rayos X, fluorescencia de rayos X y análisis térmico diferencial. Una vez conocidas sus propiedades químicas, térmicas y estructurales, el vidrio recuperado fue utilizado para producir sustratos de diversa composición química: Se produjeron muestras utilizando solamente el vidrio de panel fotovoltaico y vidrios con bajo contenido de  $\text{Na}_2\text{O}$  utilizando otros materiales como arena de cuarzo y dolomita. Por otro lado, se evaluó el efecto del álcali mixto y su impacto en películas delgadas de óxido de estaño dopado con flúor depositadas en los sustratos; para ello, los sustratos fueron desarrollados a partir de residuos de vidrio de paneles solares y con la incorporación de carbonatos de litio y potasio. Finalmente se realizó un estudio de impactos ambientales del proceso propuesto en base a la metodología del análisis de ciclo de vida.

**Conclusiones y contribuciones:** Se recuperó el vidrio de paneles solares estrellados de desecho, representando el 80% de la masa de estos. Dicho vidrio fotovoltaico presentó propiedades químicas y térmicas similares a las de un vidrio sódico cálcico comercial, pero con una alta transmitancia en comparación con el vidrio comercial. A partir de este material recuperado, se sintetizaron sustratos de vidrio los cuales presentaron la mayor transmitancia ( $90.15 \pm 0.98\%$ ); sin embargo, presentaron mayor resistencia de lámina ( $10.13 \pm 3.47 \Omega/\text{sq}$ ) y la menor cristalización de óxido de estaño dopado con flúor (FTO) en comparación con las de los otros sustratos sintetizados y analizados, por lo que en este estudio su uso en dispositivos fotovoltaicos de película delgada no es recomendado. Por otro lado, los sustratos de vidrio de residuos fotovoltaicos de vidrio y otros residuos industriales presentaron una transmitancia de  $83.60 \pm 1.52 \%$ , que es similar a la del vidrio sódico cálcico comercial ( $84.76 \pm 3.60\%$ ), la resistencia de lámina más baja ( $7.84 \pm 3.11 \Omega/\text{sq}$ ) y la mayor cristalización de FTO en comparación con las de los otros sustratos de vidrio, incluido el vidrio comercial ( $8.48 \pm 3.67 \Omega/\text{sq}$ ). En cuanto a la elaboración de una celda fotovoltaica de configuración Sustrato/FTO/CdS/CuAlS<sub>2</sub>/Mo, aquella elaborada a partir del sustrato preparado a partir de residuos presentó una respuesta similar a la luz solar con respecto a una celda elaborada a partir del sustrato comercial.

Respecto al estudio del efecto de álcali mixto, se observaron mejores propiedades eléctricas en los sustratos con litio incorporado a la fórmula vítrea, sin embargo, el estudio de espectroscopia de energía dispersiva (EDS por sus siglas en inglés) reveló que la incorporación de K<sup>+</sup> al vidrio de residuos de paneles solares presentó menor difusión del Na<sup>+</sup> a través de la película del FTO, por lo que se sugieren estudios futuros con otras técnicas de detección sobre la migración del Li<sup>+</sup> a través de la película depositada.

Se determinó que la mayor causa de impactos ambientales se encuentra en el proceso de deposición de FTO y de molibdeno, principalmente en las categorías de ecotoxicidad terrestre y acuática, esto debido principalmente a los procesos de extracción minera de los metales requeridos para la construcción de la celda fotovoltaica. Por otro lado, la producción del sustrato vítreo a partir de los

residuos fotovoltaicos presentó menor grado de impactos ambientales que la producción de este a partir del vidrio sódico cálcico comercial. Sin embargo, la generación de residuos, así como las emisiones al aire que genera el proceso de separación deben ser consideradas en futuras investigaciones.

FIRMA DEL ASESOR: \_\_\_\_\_

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad Autónoma de Nuevo León y a la Facultad de Ciencias Químicas por darme la oportunidad de realizar el doctorado en ciencias. Así como a CONACYT por el apoyo económico otorgado.

A mi asesora, la Dra. Anabel Álvarez Méndez, por darme la oportunidad de ser nuevamente su alumna de tesis, por ser una asesora excepcional, y todo el tiempo, apoyo, orientación y paciencia, durante todo este periodo del doctorado.

A mi co-asesora, Dra. Astrid Sánchez y a mi comité tutorial, el Dr. Juan Jacobo Ruiz Valdés, Dr. Jorge Ibarra y Dra. María Guadalupe Paredes Figuera por todo su apoyo, orientación y por qué siempre me exigieron ser mejor y sacar lo mejor de mí. Así también, a los miembros del jurado, a la Nayely Pineda y al Dr. David Avellaneda.

Al laboratorio de Materiales II: Al Doctor Eduardo Sánchez, a la Dra. Salomé de la Parra, Dra. Lorena Garza Tovar y al Dr. Luis Carlos Torres, por su apoyo en parte experimental de este proyecto.

Al Dr. Antonio Zaldívar Cadena de la Facultad de Ingeniería Civil, por su valioso apoyo en este proyecto, por su valiosa ayuda en caracterización experimental en el laboratorio de Materiales de la construcción.

A la Dra. Ana María Guzmán por su apoyo en los análisis térmicos de este proyecto.

Al Prof. Juan Carda Castelló por darme la oportunidad de realizar mi estancia de investigación con su grupo de trabajo, por todo el gran apoyo y la experiencia dada durante la misma, así como al Dr. Diego Fraga, a Samuel Porcar García y a Jaime Cuadra por todo su apoyo y orientación en el desarrollo de este proyecto de tesis y su valiosa amistad, así también a Abde y a Héctor, por toda su compañía, amistad brindada y los buenos momentos vividos en los seis meses de estancia.

# ÍNDICE

|   |      |
|---|------|
| LISTA DE FIGURAS .....  | X    |
| LISTA DE TABLAS .....   | XII  |
| NOMENCLATURA .....  | XIII |
| 1. INTRODUCCIÓN .....   | 1    |
| 1.1 Energía fotovoltaica y su creciente demanda .....                               | 1    |
| 1.2 Proyección de los residuos de paneles solares .....                             | 2    |
| 1.3 Análisis de los residuos de paneles fotovoltaicos .....                         | 3    |
| 2. ANTECEDENTES .....   | 6    |
| 2.1 Materiales de construcción con propiedades fotovoltaicas .....                  | 6    |
| 2.2 Sistemas fotovoltaicos de capa fina .....                                       | 8    |
| 2.3 Sustratos vítreos y fenómenos del vidrio .....                                  | 11   |
| 2.4 Efecto álcali mixto .....   | 14   |
| 2.5 Evaluación de Impactos ambientales por medio de Análisis de Ciclo de Vida ..... | 17   |
| 3. HIPÓTESIS, OBJETIVOS, METAS Y APORTACIÓN CIENTÍFICA .....                        | 22   |
| 3.1. Hipótesis .....  | 22   |
| 3.2. Objetivos y metas .....  | 22   |
| 3.2.1. Objetivo general.....  | 22   |
| 3.2.2. Objetivos particulares .....   | 22   |
| 3.2.3. Metas .....  | 23   |
| 3.3 Aportación científica.....  | 23   |
| 4. METODOLOGÍA.....   | 24   |
| 4.1 Procedimientos experimentales .....   | 24   |

|   |    |
|---|----|
| 4.1.1 Recolección de residuos y extracción del vidrio de los paneles<br>solares.....                  | 24 |
| 4.1.2 Preparación de sustratos vítreos.....   | 25 |
| 4.1.2.1 Formulación de composiciones a partir de VPFV y otros<br>residuos .....                       | 25 |
| 4.1.2.2 Formulación de composiciones para el estudio del efecto<br>de álcali mixto .....              | 25 |
| 4.1.2.3 Fusión, vaciado y preparación de sustratos.....   | 26 |
| 4.1.3 Deposición.....   | 26 |
| 4.1.3.1 FTO.....  | 27 |
| 4.1.3.2 Deposición por aspersion pirolítica .....   | 27 |
| 4.1.3.3 <i>Elaboración de celda solar de capa fina</i> .....  | 29 |
| 4.2 Caracterización .....   | 34 |
| 4.2.1 Caracterización química, térmica y estructural.....   | 34 |
| 4.2.1.1 Fluorescencia de rayos X (FRX).....   | 34 |
| 4.2.1.2 Análisis térmicos.....  | 35 |
| 4.2.1.3 Difracción de rayos X (DRX) .....   | 37 |
| 4.2.1.4 Microscopia electrónica de barrido con espectroscopia de<br>energía dispersiva (SEM-EDS)..... | 38 |
| 4.2.2 Caracterización optoelectrónica.....  | 41 |
| 4.2.2.1 Espectrometría UV-VIS.....  | 41 |
| 4.2.2.2 Resistencia eléctrica laminar .....   | 43 |
| 4.2.2.3 Cronoamperometría.....  | 44 |
| 4.3. Evaluación de Impactos ambientales.....  | 46 |
| 4.3.1. Delimitaciones del estudio.....  | 46 |
| 4.3.1.1 Delimitación del sistema .....  | 46 |
| 4.3.1.2 Límites geográficos y temporales .....  | 49 |

|  |    |
|--|----|
| 4.3.2 Categorías de Impacto analizadas .....                                     | 49 |
| 4.3.2.1 Calentamiento global .....   | 49 |
| 4.3.2.2 Acidificación.....   | 50 |
| 4.3.2.3 Eutrofización .....  | 51 |
| 4.3.2.4 Ecotoxicidad .....   | 51 |
| 4.3.2.5 Toxicidad humana .....   | 52 |
| 4.3.3. Datos Utilizados .....  | 53 |
| 4.3.3.1 Criterios de corte .....   | 53 |
| 4.3.3.2 Calidad de datos.....  | 54 |
| 4.3.3.3 Procedimiento para las recopilaciones de datos y/o<br>estimaciones:..... | 55 |
| 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....  | 58 |
| 5.1 Extracción del vidrio de los paneles solares .....                           | 58 |
| 5.2 Caracterización del vidrio de paneles solares.....                           | 59 |
| 5.2.1 Difracción de rayos X .....  | 59 |
| 5.2.2 Fluorescencia de rayos X.....  | 60 |
| 5.2.3 Estabilidad térmica .....  | 60 |
| 5.3. Vidrio transparente a partir de residuos (VAD) .....                        | 61 |
| 5.3.1 Preparación de sustratos vítreos.....                                      | 61 |
| 5.3.1.1 Formulación .....  | 61 |
| 5.3.1.2 FRX.....   | 63 |
| 5.3.1.3 DTA.....   | 63 |
| 5.3.1.4 Transmitancia .....  | 64 |
| 5.3.1.5 SEM.....   | 66 |
| 5.3.2 Depositiones de FTO.....   | 67 |
| 5.3.3 Celda fotovoltaica.....  | 70 |

|   |     |
|---|-----|
| 5.3.4 Evaluación de impactos ambientales por medio de Análisis de Ciclo de Vida ..... | 72  |
| 5.3.4.1 Objetivo y alcance .....  | 72  |
| 5.3.4.2. Inventario .....   | 75  |
| 5.3.4.3 Análisis de impactos ambientales .....  | 82  |
| 5.4 Vidrios para el estudio del efecto del álcali mixto .....                         | 88  |
| 5.4.1 Preparación de sustratos vítreos .....  | 88  |
| 5.4.1.1 FRX.....  | 88  |
| 5.4.1.2 DRX.....  | 90  |
| 5.4.1.3 DSC .....   | 91  |
| 5.4.1.4 Transmitancia .....   | 92  |
| 5.4.1.5 SEM.....  | 94  |
| 5.4.2 Depositiones de FTO.....  | 95  |
| 5.4.3 Análisis EDS.....   | 101 |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....  | 104 |
| PROSPECTIVA .....   | 107 |
| REFERENCIAS.....  | 109 |

## LISTA DE FIGURAS

| Figura   | Página |
|--|--------|
| 1. Estructura típica de un panel solar de Si, tomada de [10] .....   | 3      |
| 2. Distribución de los materiales de residuos de paneles fotovoltaicos, tomado de [3]. 4   |        |
| 3. Distribución del valor de los materiales de los residuos de paneles fotovoltaicos, tomada de [3]. .....   | 4      |
| 4. Estructura básica de una configuración fotovoltaica. ....   | 8      |
| 5. Diagrama de Volumen Específico vs. Temperatura de un Vidrio [39]. ....  | 12     |
| 6. Resistividad iónica con respecto a proporciones de iones alcalinos, tomada de [42] .....  | 15     |
| 7. Temperatura en función del porcentaje molar de $K_2O$ y $Na_2O$ para una viscosidad constante de $\log \eta = 10$ en vidrios binarios de silicato alcalino según Poole, tomada de [39,48]. .... | 16     |
| 8. Etapas del análisis de ciclo de vida, tomada de [51]. ....  | 18     |
| 9. Residuos de paneles solares estrellados. ....   | 24     |
| 10. Aspersión pirolítica. ....   | 28     |
| 11. Deposición por Baño Químico. ....  | 29     |
| 12. Deposición por capa Química[66] .....  | 31     |
| 13. Proceso físico de la pulverización catódica, tomada de [70]. ....  | 32     |
| 14. Difracción de rayos X en un sólido cristalino. ....  | 38     |
| 15. Esquema de los tipos de electrones producidos por la colisión de los electrones primarios con la muestra a analizar por SEM, tomada de [77]. ....  | 39     |
| 16. Paso de un haz de luz a través de un cuerpo. ....  | 41     |
| 17. Esquemas de configuraciones de celdas fotovoltaicas. ....  | 42     |
| 18. Dibujo esquemático de un medidor de cuatro puntas. [78] .....  | 44     |
| 19. Esquema de la elaboración de la celda fotovoltaica. ....   | 47     |
| 20. Proceso de recuperación de VPFV. ....  | 58     |
| 21. Patrón de difracción de VPFV. ....   | 59     |
| 22. DTA de VPFV. ....  | 61     |

|   |     |
|---|-----|
| 23. Imágenes de los sustratos vítreos sintetizados (a) VPFV y (b) VAD.....  | 62  |
| 24. Análisis DTA de VAD. ....   | 64  |
| 25. Transmitancia UV-VIS de VPFV, VAD y SLG. ....   | 65  |
| 26. Imágenes SEM de (a) VAD (b) VPFV.....   | 66  |
| 27. DRX de FTO depositado en vidrio comercial, VPFV y VAD.....  | 68  |
| 28. Imágenes SEM del FTO depositado sobre los sustratos vítreos:.....   | 69  |
| 29. Celdas solares de CuAIS <sub>2</sub> sintetizadas sobre el sustrato VAD.....  | 70  |
| 30. Cronoamperometría con diferentes ciclos de oscuridad-luz de las celdas solares sintetizadas. ....                               | 71  |
| 31. Sistema de producción de la celda fotovoltaica.....   | 74  |
| 32. Categorías de Impacto para una celda de 2.54 cm <sup>2</sup> de área con configuración VAD/FTO/CdS/CuAIS <sub>2</sub> /Mo. .... | 85  |
| 33. Categorías de impacto normalizadas ....   | 87  |
| 34. DRX de vidrios con adición de potasio.....  | 90  |
| 35. DRX de vidrios con adición de Litio.....  | 90  |
| 36. DSC de vidrios VPFV, L1, L2, K2, K2. ....   | 91  |
| 37. Transmitancia UV-VIS de los vidrios con potasio añadido. ....   | 92  |
| 38. Transmitancia UV-VIS de los vidrios con litio añadido. ....   | 93  |
| 39. Imágenes SEM de (a)K1 (b)K2 (c)L1 (d)L2.....  | 94  |
| 40. DRX de FTO depositado en vidrios con potasio añadido.....   | 96  |
| 41. Imágenes SEM del FTO depositado sobre los sustratos vítreos.....  | 97  |
| 42. DRX de FTO depositado en vidrios con litio añadido. ....  | 99  |
| 43. Imágenes SEM del FTO depositado sobre el sustrato vítreo L1. ....   | 100 |

## LISTA DE TABLAS

| TABLA  | Página |
|--|--------|
| I. CLASIFICACIÓN DE LOS COMPONENTES DEL VIDRIO.....                              | 13     |
| II. PROPORCIONES DE SODIO Y ION ALCALINO (K <sup>+</sup> /Li <sup>+</sup> )..... | 26     |
| III. ANÁLISIS FRX DE VPFV.....   | 60     |
| IV. FORMULACIÓN DE VAD.....  | 62     |
| V. ANÁLISIS FRX DEL SUSTRATO VAD.....  | 63     |
| VI. RESISTENCIAS LAMINARES DE LAS MUESTRAS A PARTIR DE RESIDUOS....              | 69     |
| VII. INVENTARIO ETAPA 1. SEPARACIÓN DE VPFV.....                                 | 75     |
| VIII. INVENTARIO ETAPA 2. FUSIÓN DEL VIDRIO.....                                 | 76     |
| IX. INVENTARIO ETAPA 3. DEPOSICIÓN DE FTO.....                                   | 77     |
| X. INVENTARIO ETAPA 4. DEPOSICIÓN DE CdS.....                                    | 79     |
| XI. INVENTARIO ETAPA 5. DEPOSICIÓN DE CuAlS <sub>2</sub> .....                   | 80     |
| XII. INVENTARIO ETAPA 6. DEPOSICIÓN DE MOLIBDENO.....                            | 81     |
| XIII. ANÁLISIS FRX DE LOS SUSTRATOS VÍTREOS CON K <sup>+</sup> (% MASA).....     | 88     |
| XIV. ANÁLISIS FRX DE LOS SUSTRATOS VÍTREOS CON Li <sup>+</sup> (% MASA).....     | 89     |
| XV. RESISTENCIAS LAMINARES DEL FTO DE LOS SUSTRATOS CON POTASIO<br>AÑADIDO.....  | 97     |
| XVI. RESISTENCIAS LAMINARES DEL FTO DE LOS SUSTRATOS CON LITIO<br>AÑADIDO.....   | 100    |
| XVII. ANALISIS EDS DEL FTO DEPOSITADO.....                                       | 102    |

## NOMENCLATURA

| <b>SIGLA</b> | <b>SIGNIFICADO</b>                                       |
|--------------|--|
| ACV          | Análisis de ciclo de vida                                |
| AZO          | ZNO dopado con aluminio                                  |
| BSE          | Electrones retrodispersados                              |
| CBD          | Deposición por baño químico                              |
| CET          | Coefficiente de expansión térmica                        |
| CFE          | Comisión Federal de Electricidad (México)                |
| CIGS         | Seleniuro de cobre, indio y galio                        |
| CSD          | Deposición por capa química                              |
| c-Si         | Silicio cristalino                                       |
| DRX          | Difracción de rayos X                                    |
| DSC          | Calorimetría diferencial de barrido                      |
| DTA          | Análisis térmico diferencial                             |
| EDS          | Espectroscopia de energía dispersiva                     |
| $E_g$        | Energía de banda prohibida                               |
| EVA          | Etilvinilacetato   |
| FRX          | Fluorescencia de rayos X                                 |
| FTO          | Óxido de estaño dopado con fluoruro                      |
| GEI          | Gases de Efecto invernadero                              |
| IRENA        | Agencia Internacional de Energía Renovable               |
| ITO          | $\text{In}_2\text{O}_3$ dopado con estaño                |
| MCFV         | Materiales de construcción con propiedades fotovoltaicas |
| RF           | Radiofrecuencia  |
| $R_s$        | Resistencia laminar                                      |
| SE           | Electrones secundarios                                   |
| SEM          | Microscopía electrónica de barrido                       |

|                |  |
|----------------|--|
| SENER          | Secretaría de Energía (México)                 |
| SLG            | Vidrio sódico-cálcico                          |
| STA            | Analizador térmico simultáneo                  |
| TCO            | Óxidos conductores transparentes               |
| T <sub>g</sub> | Intervalo de temperatura de transición vítrea  |
| TGA            | Análisis termogravimétrico                     |
| TRE            | Tasa de retorno energético                     |
| VAD            | Vidrio arena dolomita                          |
| VPFV           | Vidrio de panel fotovoltaico                   |
| WEEE           | Residuos de aparatos eléctricos y electrónicos |

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 Energía fotovoltaica y su creciente demanda

Uno de los retos científicos y tecnológicos actuales es la búsqueda de energías alternas a las producidas por fuentes no renovables, las cuales satisfagan la creciente demanda energética de la humanidad, pero sin perjudicar al medio ambiente. Una de las tecnologías más prometedoras para lograr este objetivo es la energía fotovoltaica, la cual se presenta como una fuente sustentable y renovable que permite proveer de energía eléctrica a la población, pero sin generar gases de efecto invernadero durante su operación [1]. Actualmente esta fuente energética es ampliamente utilizada alrededor del mundo, ya que, de acuerdo con la Agencia Internacional de Energía Renovable (IRENA por sus siglas en inglés) [2], la capacidad de energía fotovoltaica instalada a nivel mundial es de 480 GW, y se pronostica que para el 2030 aumente a 2,840 GW para el 2050 sea de 8,519 GW, es decir, casi dieciocho veces mayor que en 2018. De acuerdo con el estudio de Peplow[3], realizado en el 2022, se pronostica un servicio de 4.5 TW de energía fotovoltaica para el año 2050.

En el caso particular de México, se ha dado un fuerte crecimiento en la capacidad fotovoltaica solar instalada, actualmente tiene más de 100,000 techos con paneles solares en hogares y en edificios. La competitividad de la energía fotovoltaica en México está respaldada por sus bajos costos de instalación y el ahorro de hasta 95% por mes sobre las tarifas de electricidad pagadas por los usuarios [2], esto debido además a las disposiciones legales mexicanas que permiten a los usuarios domiciliarios realizar contratos de interconexión con la

Comisión Federal de Electricidad (CFE) para la instalación de paneles y el aprovechamiento de la energía solar fotovoltaica [4]. De acuerdo con la Secretaría de Energía (SENER)[5] se pronostica que la participación de la energía fotovoltaica con respecto al total de las fuentes de energía eléctricas utilizadas en el país sea del 0.4% (2018) al 4.1% para el 2030.

## **1.2 Proyección de los residuos de paneles solares**

Un aspecto importante que se debe tratar con respecto a un producto es su destino al finalizar su vida útil, esto implicando su reutilización, tratamiento, reciclaje y disposición final del producto o sus componentes [6].

Particularmente, los paneles fotovoltaicos poseen un promedio de vida de 25 a 30 años [7] y se encuentran clasificados y contemplados como Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (WEEE por sus siglas en inglés) por la Unión Europea [8].

De acuerdo con la IRENA [7], se pronostica a nivel mundial la acumulación de 8 millones de toneladas de residuos de sistemas fotovoltaicos para el 2030 y 78 millón de toneladas para el año 2050. Por otro lado, Peplow pronostica la generación de 4.5 millones de toneladas para el 2030, mientras que para el año 2050, se pronostican 80 millones de toneladas[3]. En el caso particular de México, de acuerdo con lo reportado por Domínguez y col. [1] se pronostica que para el 2045 se generarán 690,907 toneladas de residuos de sistemas fotovoltaicos en el territorio mexicano.

### 1.3 Análisis de los residuos de paneles fotovoltaicos

Un panel fotovoltaico se compone de diferentes materiales como se puede apreciar en la Figura 1. Entre los más destacables se encuentran los marcos de aluminio para sostener la estructura del panel fotovoltaico, contactos metálicos de cobre y plata, materiales semiconductores como silicio puro o telururo de cadmio, materiales poliméricos protectores como etilvinilacetato (EVA) y polifluoruro de vinilo, conocido comercialmente como Tedlar® [9] y finalmente vidrio que funge como protector del panel fotovoltaico.

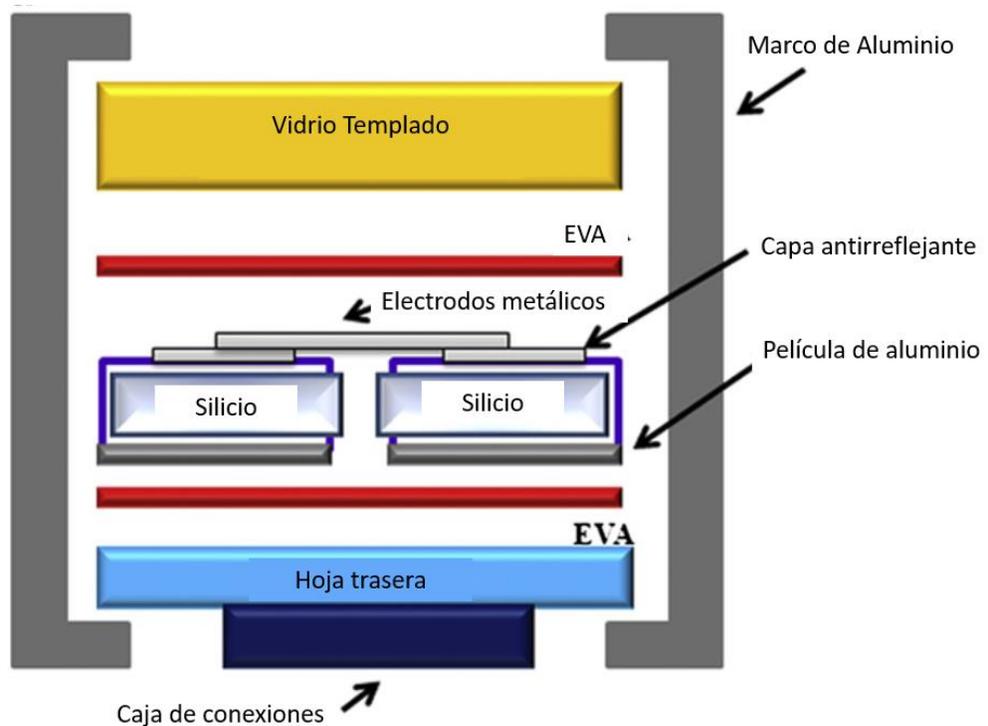


Figura 1. Estructura típica de un panel solar de Si, tomada de [10]

Todos estos materiales se generan en diferente proporción másica dependiendo del tipo de panel solar, y cada uno de estos materiales posee un valor económico diferente; En la Figura 2 se comparan las proporciones másicas de los materiales generados de los residuos de paneles fotovoltaicos de acuerdo con Peplow[3].

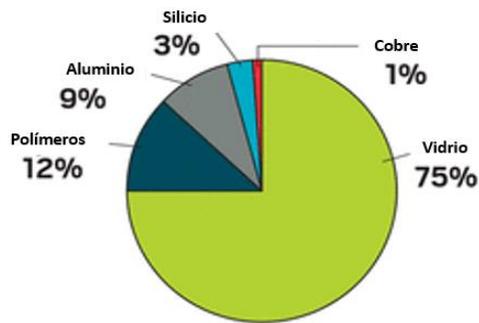


Figura 2. Distribución de los materiales de residuos de paneles fotovoltaicos, tomado de [3].

Se puede observar que el vidrio es el material que se genera con alto volumen; de acuerdo con IRENA[7] se estima que más del 80% del peso de los paneles hechos a través de cualquier tecnología fotovoltaica corresponde este material. Se estima la generación de 960,000 toneladas de vidrio de paneles fotovoltaicos para el 2030; lo que lo convierte en un material que se generará con alto volumen en los próximos años. En la Figura 3 se aprecia la distribución del valor de los materiales generados en residuos de paneles fotovoltaicos.

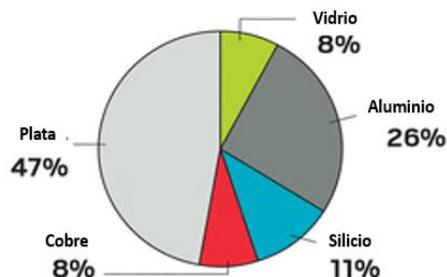


Figura 3. Distribución del valor de los materiales de los residuos de paneles fotovoltaicos, tomada de [3].

Pese a que el vidrio de paneles solares es uno de los residuos más generados al finalizar la vida útil de dichos dispositivos fotovoltaicos, existe poco interés en su revalorización debido a su bajo valor comercial con respecto a otros materiales presentes en el residuo, por lo que los caminos para el reciclaje de este residuo presentan una alta diversificación, y en esta diversificación se incluye el retorno a la producción de paneles solares [7,11]. Otros métodos propuestos de reciclaje consisten en mezclar estos residuos con otros residuos en la producción de diferentes materiales, como ladrillos de arcilla [12,13], fibra de vidrio [7,14], materiales vitrocerámicos [15,16] y zeolitas. [17]

Un residuo puede tener diferentes caminos para ser reciclado, sin embargo, cada ruta de reciclaje ofrecerá diferente reasignación de valor al residuo. Actualmente uno de los retos en el área de reciclaje es el desarrollo de productos de valor agregado al residuo inicial, o “*upcycling*”[18] . En el caso del vidrio de paneles fotovoltaicos, este tiene propiedades de interés como es su alta transparencia debido a su bajo contenido de hierro[19], por lo que estas cualidades pueden ser de utilidad para la elaboración de productos con mayor valor comercial que los propuestos anteriormente. Por otro lado, uno de los retos tecnológicos actuales es el desarrollo de productos cuyas funciones adicionales coadyuven a satisfacer otras necesidades del ser humano, por lo que en este proyecto se propone desarrollar un material que pueda contribuir a satisfacer la demanda de electricidad sin generar gases de efecto invernadero por medio de la tecnología fotovoltaica, aprovechando las propiedades del residuo de vidrio de paneles fotovoltaicos antes mencionadas. Por lo que en este proyecto se pretende estudiar el uso de residuos de vidrio de paneles fotovoltaicos para la producción de ventanas fotovoltaicas, que se describen en la siguiente sección.

## 2. ANTECEDENTES

Debido a que las ventanas fotovoltaicas pertenecen a la familia de los materiales de construcción con propiedades fotovoltaicas (MCFV), será necesario, dar una introducción a estos materiales, así como la mención de estudios relacionados con la elaboración de dichos productos a partir de residuos.

### 2.1 Materiales de construcción con propiedades fotovoltaicas

Los materiales de construcción fotovoltaicos (MCFV) son materiales para la construcción como ventanas, pisos, revestimientos, fachadas, entre otros, los cuales poseen un sistema fotovoltaico integrado, y al igual que los paneles solares convencionales, transforman la energía solar en energía eléctrica para ser aprovechada por el inmueble en el cual se encuentran instalados. Este tipo de materiales ya se encuentran en el mercado a nivel mundial, algunos ejemplos son el vidrio fotovoltaico de la empresa *Onix Solar*® [20] y la teja fotovoltaica de *Tesla*® [21]. Los MCFV tienen alto potencial no solamente por su adaptación arquitectónica, sino también debido a sus características multifuncionales tales como actuar como aislante térmico y aislante acústico [22], así como la reducción de demanda de espacio para su instalación[23] comparado con los paneles solares convencionales.

Dependiendo de su capacidad para transmitir la luz visible, los MCFV se pueden clasificar en opacos, semitransparentes y transparentes. Un MCFV es opaco ya sea debido al sustrato utilizado (cerámico) o al tipo de sistema fotovoltaico instalado, como obleas de silicio cristalino o capas finas no traslúcidas. Por otro lado, los MCFV semitransparentes utilizan sustratos vítreos o poliméricos, en los cuales se les adaptan sistemas fotovoltaicos de capa fina

semitransparente, siendo los más utilizados en la elaboración de ventanas fotovoltaicas [22].

En cuanto al uso de residuos para el desarrollo de estos dispositivos, existen estudios relacionados con el desarrollo de materiales de construcción fotovoltaicos utilizando sustratos producidos a partir de residuos. Se cuenta con los estudios de Becerril-Romero y col. [24] en el cual se desarrollan revestimientos fotovoltaicos por medio de la deposición de kesterita en azulejos ecológicos comerciales sintetizados a partir de arcilla con residuos de vidrio, escorias metalúrgicas, chamota y esmaltados con fritas de diferentes concentraciones de óxido de sodio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ). Fraga y col.[25] en el 2016 desarrollaron un MCFV a partir de deposición de seleniuro de cobre, indio y galio (CIGS) sobre piezas de porcelana, y de materiales cerámicos producidos a partir de residuos industriales como residuos de vidrio sódico doméstico, chamota y cerámica cruda, resultando en que el material fotovoltaico producido a partir de residuos industriales presentó mayor eficiencia fotovoltaica que el producido a partir de porcelana convencional. Este mismo grupo de investigación en el 2018 desarrolló un vitrocerámico fotovoltaico partiendo de residuos de vidrio sódico-cálcico doméstico y ceniza volante proveniente de una planta termoeléctrica [26]; para dar la propiedad fotovoltaica al material, se depositó en el vitrocerámico una capa de CIGS previamente sintetizado por coprecipitación acuosa. Sin embargo, aún no existen estudios relacionados con la elaboración de materiales de construcción fotovoltaicos utilizando sustratos vítreos desarrollados a partir de residuos. Particularmente, el desarrollo de ventanas fotovoltaicas a partir de residuos vítreos de paneles fotovoltaicos, los cuales como se mencionó con anterioridad, tienen potencial para ser utilizados con este propósito. Esto se considera obligatorio debido a que la demanda de vidrio de la industria solar está creciendo [27–29].

Para desarrollar una ventana fotovoltaica, se requiere la elaboración del soporte vítreo que funcione como sustrato, y consecuentemente la deposición de

un sistema fotovoltaico de capa fina. Los componentes se explicarán a detalle en las siguientes secciones.

## 2.2 Sistemas fotovoltaicos de capa fina

Al igual que los paneles solares, los sistemas fotovoltaicos son diseñados para transformar los fotones de la luz solar en corriente eléctrica; para que esto ocurra, es necesario un sistema de materiales semiconductores y conductores acomodados en cierta configuración. En la Figura 4 se muestra una configuración básica general para un dispositivo fotovoltaico de capa fina.

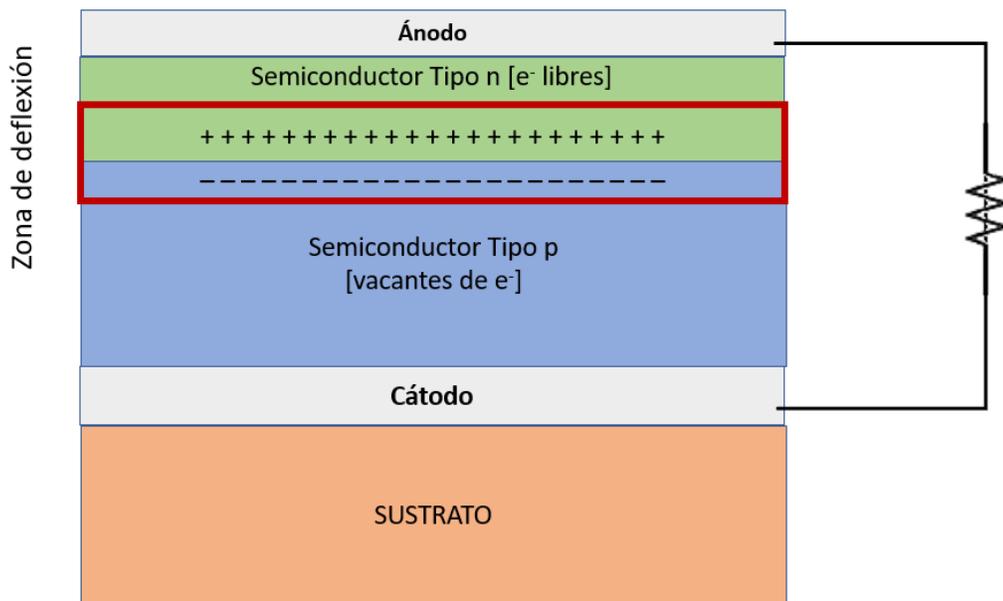


Figura 4. Estructura básica de una configuración fotovoltaica.

**Ánodo y Cátodo:** Para que los electrones puedan viajar fuera del material semiconductor y generar la corriente eléctrica deseada, es necesario que los materiales semiconductores estén en contacto con materiales conductores. En el caso de dispositivos de capa fina, se depositan películas conductoras, estas pueden ser de metales de alta conductividad como molibdeno (Mo), cobre (Cu),

plata (Ag), oro (Au). así como óxidos conductores transparentes (TCO por sus siglas en inglés).

Los TCO's son óxidos cuya transmitancia es lo suficientemente alta para dejar pasar los fotones de la luz solar, y además son materiales conductores, por lo que poseen la capacidad de conducir electrones en un circuito eléctrico. Estos son de utilidad para el desarrollo de dispositivos fotovoltaicos, ya que permiten el paso de los fotones al semiconductor tipo n, y conducen los electrones generados al circuito eléctrico, por lo que el TCO se deposita en la parte superior de la celda fotovoltaica, es decir, en la cara que hará el primer contacto con la radiación solar.

Todos los TCO's son componentes binarios o ternarios, conteniendo uno o dos elementos metálicos. Su notable combinación de propiedades de alta conductividad y transparencia suele ser imposible en condiciones intrínsecas, es decir, como óxidos estequiométricos; sin embargo, se logran dar estas propiedades al producirlos con una composición no estequiométrica, o introduciendo dopantes apropiados[30]. Dentro de los TCO's más utilizados en diversas tecnologías se encuentran: ZnO dopado con aluminio (AZO),  $\text{In}_2\text{O}_3$  dopado con estaño (ITO) y  $\text{SnO}_2$  dopado con antimonio (ATO) así como el FTO[31]; este último consiste en óxido de estaño dopado con fluoruro ( $\text{SnO}_2:\text{F}$ ), que es ampliamente utilizado debido a su capacidad para conducir los electrones producidos en el efecto fotovoltaico [32] .

**Semiconductor tipo n:** también referido como capa ventana, es un material semiconductor extrínseco que se encuentra dopado con átomos con un electrón de valencia de más, en cual hace que existan electrones libres en su estructura atómica. Este material debe tener una energía de banda prohibida alta, absorbancia baja, así como espesor de película bajo, de tal manera que absorba la menor cantidad de fotones posibles. En el caso de las celdas de capa fina, el semiconductor más utilizado es el sulfuro de cadmio, (CdS) [33], sin embargo, recientemente se han investigado nuevos materiales libres de cadmio para ser utilizados como capa ventana, por ejemplo,  $\text{In}_2\text{S}_3$ ,  $\text{Zn}(\text{O},\text{S})$ ,  $(\text{Zn},\text{Sn})\text{O}$  y  $(\text{Zn},\text{Mg})\text{O}$

[34] esto principalmente por la necesidad de evitar el uso de cadmio debido a su alta toxicidad [35].

**Semiconductor tipo p:** También conocido como capa absorbedora o “buffer” es un semiconductor extrínseco dopado con átomos que poseen un electrón de menos en la capa de valencia, lo cual provoca que existan vacantes de electrones en la estructura.

En el caso de las celdas de silicio, existe Si dopado con boro. Por otro lado, en las celdas de capa fina, se tienen materiales como el CdTe, CIGS o perovskitas de la familia  $\text{MAPbBr}(\text{I}_3, \text{Br}_3)$  (A= catión monovalente, M=Catión divalente) por mencionar algunos[36].

**Zona de deflexión:** Esta zona se forma al unirse los semiconductores tipo p y n, generando un campo eléctrico con un diferencial de voltaje, esto es debido a que algunos electrones libres del semiconductor n pasan a ocupar algunos huecos del semiconductor p.

**Efecto fotovoltaico:** Cuando los fotones provenientes de la luz solar con energía mayor que la banda prohibida,  $E_g$  (la energía mínima necesaria para que un electrón salte de la banda de valencia a la de conducción) son absorbidos por un material semiconductor, se da la liberación de electrones y la formación de huecos por excitación óptica en el semiconductor; sin embargo, la característica crucial necesaria para el efecto fotovoltaico es la presencia de un campo eléctrico interno capaz de separar los electrones libres y los huecos para que puedan pasar del material al circuito externo antes de que se recombinen entre sí [37]. En los materiales fotovoltaicos de capa fina, como el ilustrado en esta sección, los fotones traspasan el TCO y la capa ventana hasta llegar a la zona de deflexión, lo cual provoca la generación de pares de electrón-hueco. Los electrones y los huecos son impulsados de la zona de deflexión por el campo eléctrico de la misma, hasta llegar a sus respectivos materiales semiconductores,

generándose un diferencial de voltaje mayor [38]. Este diferencial de voltaje provoca que los electrones viajen por el circuito eléctrico, generándose la energía eléctrica.

**Sustrato:** Es el material soporte en el cual se depositan las capas de los materiales conductores y semiconductores. Este sustrato debe cumplir varias características, por ejemplo, la rugosidad de la superficie debe ser la mínima posible para permitir una deposición uniforme de las capas, el coeficiente de expansión térmica (CET) tiene que ser similar al de las capas para evitar problemas de adherencia, estabilidad térmica, para soportar las temperaturas en las cuales se realizan las deposiciones, y estabilidad mecánica. En el caso de las celdas fotovoltaicas de capa fina, existen diversos materiales que se utilizan como sustratos, como metales, cerámicos, polímeros, sin embargo, el más utilizado es el vidrio, principalmente para el desarrollo de ventanas fotovoltaicas, por lo que en la siguiente sección se detallarán características y fenómenos de este material.

### 2.3 Sustratos vítreos y fenómenos del vidrio

El vidrio es uno de los materiales más utilizados como sustrato para la elaboración de materiales de construcción fotovoltaicos semitransparentes de capa fina, principalmente porque este funge como soporte para los materiales semiconductores y conductores que componen la celda fotovoltaica. Por lo que el estudio de los materiales vítreos, incluyendo los fenómenos físicos y químicos, así como la estructura de este material, también es de importancia para la investigación y el desarrollo de celdas fotovoltaicas de capa fina.

Un vidrio se define como un sólido no cristalino que solo presenta orden de corto alcance en su estructura molecular y que exhibe una región de transformación vítrea en un intervalo de temperaturas determinado [39]. Un orden

de corto alcance es aquel que solo se presenta entre las moléculas vecinas, pero está ausente a lo largo de la estructura atómica [38], en contraste con los sólidos cristalinos, en los cuales existe un orden de largo alcance en su estructura molecular.

Si un material en estado líquido es enfriado lentamente hasta llegar al punto de solidificación, se lleva a cabo la formación de cristales, en cambio, sí el líquido es enfriado rápidamente hasta por debajo de su punto de solidificación, este no se reacomodará en una estructura cristalina, por lo que el líquido ha sido subenfriado, es decir, se encuentra en un estado metaestable en el cual su energía libre es mayor a la comparada con la fase cristalina correspondiente[40]. Un material vítreo es considerado un líquido subenfriado. Durante el proceso de subenfriamiento existe un intervalo de temperatura en el cual se da un cambio en la pendiente de la curva de volumen específico *versus* temperatura (Figura 5), que se conoce como el intervalo de temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ); por arriba del límite superior del intervalo, el material se considera un líquido, y por debajo del límite inferior, el material vítreo posee propiedades que lo vuelven un material tan rígido como un sólido.

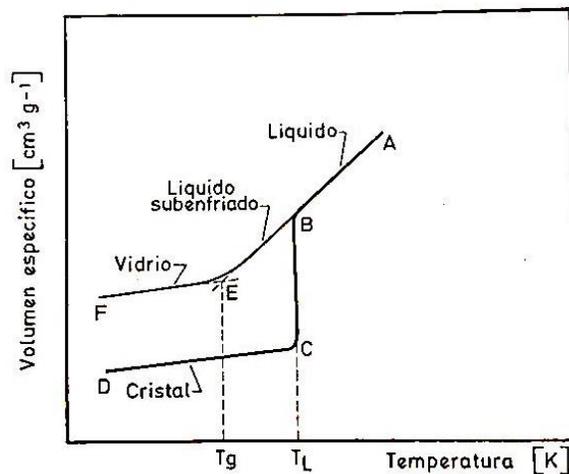


Figura 5. Diagrama de Volumen Específico vs. Temperatura de un Vidrio [39].

Comúnmente los vidrios están formados de óxidos, principalmente de  $\text{SiO}_2$ , el cual es el principal formador de red presente en la mayoría de los vidrios inorgánicos utilizados por el ser humano. Otros óxidos están presentes en los vidrios como son el óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ), óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), óxido de sodio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ), óxido de potasio ( $\text{K}_2\text{O}$ ), óxido de magnesio ( $\text{MgO}$ ), óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) por mencionar algunos. Los óxidos presentes en el vidrio se pueden clasificar de acuerdo con el papel que juegan en la red vítrea, o bien en la función que desempeñan en el material vítreo. En la Tabla I se muestran dichas clasificaciones con algunos ejemplos:

TABLA I. CLASIFICACIÓN DE LOS COMPONENTES DEL VIDRIO.

| Clasificación Estructural[39] | Clasificación Funcional | Ejemplos   |
|-------------------------------|-------------------------|--|
| Formadores de red             | Vitrificantes           | $\text{SiO}_2$ , $\text{B}_2\text{O}_3$ , $\text{GeO}_2$ ,           |
| Modificadores de red          | Fundentes               | $\text{Li}_2\text{O}$ , $\text{Na}_2\text{O}$ , $\text{K}_2\text{O}$ |
|                               | Estabilizantes          | $\text{CaO}$ , $\text{BaO}$  |
| Intermediarios                |                         | $\text{Al}_2\text{O}_3$ , $\text{ZnO}$ , $\text{PbO}$                |

El vidrio sódico cálcico (SLG por sus siglas en inglés), se utiliza en el desarrollo de dispositivos fotovoltaicos semitransparentes debido a su transparencia y su bajo costo de producción [41], este material ha sido utilizado para depositar diversos materiales fotovoltaicos de capa fina, como  $\text{CdTe}$ ,  $\text{CIGS}$ , perovskita [41], por mencionar algunos. El SLG es un vidrio compuesto típicamente por 68–73% óxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ), 12–15%  $\text{Na}_2\text{O}$ , 10–13% óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ) [42].

A pesar de ser utilizado con frecuencia en el campo de la fotovoltaica como sustrato, su interacción e influencia en la eficiencia fotovoltaica del material ha

sido objeto de estudio; particularmente, el fenómeno de la difusión del ion sodio ( $\text{Na}^+$ ) proveniente del vidrio hacia las capas fotovoltaicas y su influencia en los procesos de deposición y cristalización de los materiales depositados. Un ejemplo es el estudio de Prabhakar y col.[43] en el cual encuentran diferencias en la deposición de kesterita en un sustrato de vidrio sódico cálcico y uno de vidrio de borosilicato, principalmente en el tamaño de grano y conductividad del material semiconductor. En el caso del proceso de dispositivos de CIGS, se ha reportado que la difusión de este ion resulta positiva, ya que mejora las propiedades de dichas celdas solares [41,44] sin embargo, estudios como los de Salomé y col.[45] sugieren el uso de otras fuentes de  $\text{Na}^+$  como la deposición de una capa precursora de fluoruro de sodio ( $\text{NaF}$ ) para reducir la dependencia de la difusión de  $\text{Na}^+$  del SLG. Por otro lado para el caso de CdTe, se ha reportado que la difusión de  $\text{Na}^+$  proveniente del SLG resulta perjudicial para este sistema, tal como lo reportó Kranz y col. [46] en su trabajo en el cual se encontró que el sodio presente conduce a un aumento del tamaño de grano del absorbente, así como al ensanchamiento de los límites de los granos, lo que daba como resultado una derivación eléctrica en las celdas solares, además se observó la mezcla de CdS-CdTe y la formación de islas de CdS las cuales aumentaron significativamente debido a la presencia de sodio.

## 2.4 Efecto álcali mixto

Naturalmente, las propiedades mecánicas, térmicas y químicas de los vidrios dependen del tipo y porcentaje de los óxidos que los componen, sin embargo, con la combinación de los primeros tres iones alcalinos del grupo IA de la tabla periódica,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{Li}^+$ , en el vidrio se produce el denominado efecto de **álcali mixto**, provocando que las propiedades dependientes de la movilidad de los iones modificadores muestren variaciones anómalas con aparición de máximos y mínimos [42] , indicando que estas mismas se dan de manera no lineal.

Las propiedades más afectadas por el efecto del álcali mixto son: conductividad eléctrica, número de transporte, difusión iónica, durabilidad química y viscosidad [47]. En la Figura 6 se presenta una gráfica del estudio de Lengyel y Boksay en 1955 [47], en la cual se observa que a determinadas proporciones de los iones Na-K, Na-Li y K-Li, se encuentra un punto máximo en la resistividad iónica. Dicho punto es de interés para la formulación de vidrios destinados a sustratos para ventanas fotovoltaicas de capa fina.

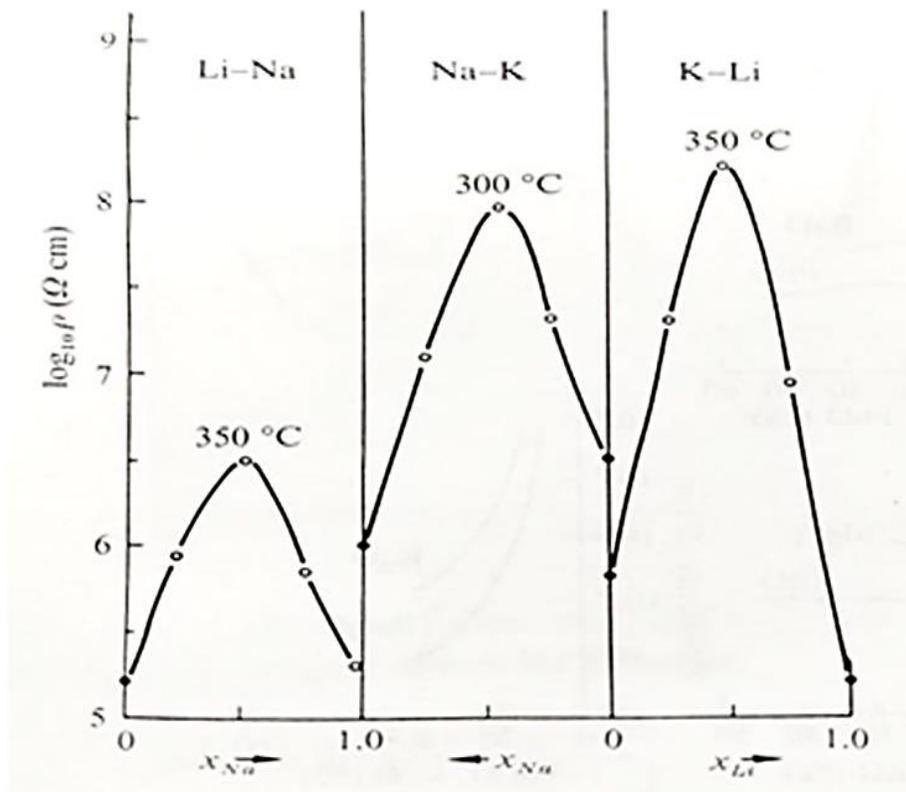


Figura 6. Resistividad iónica con respecto a proporciones de iones alcalinos, tomada de [42]

Por otro lado, Poole [48] en 1949 estudió el efecto del álcali mixto de los iones  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  en la viscosidad de los materiales vítreos. Se puede apreciar en la Figura 7 que se llega a un punto mínimo a cierta proporción en el cual la

viscosidad alcanza un punto mínimo, este comportamiento puede ser de utilidad para reducir la temperatura de trabajo y facilitar el proceso de afinado del vidrio.

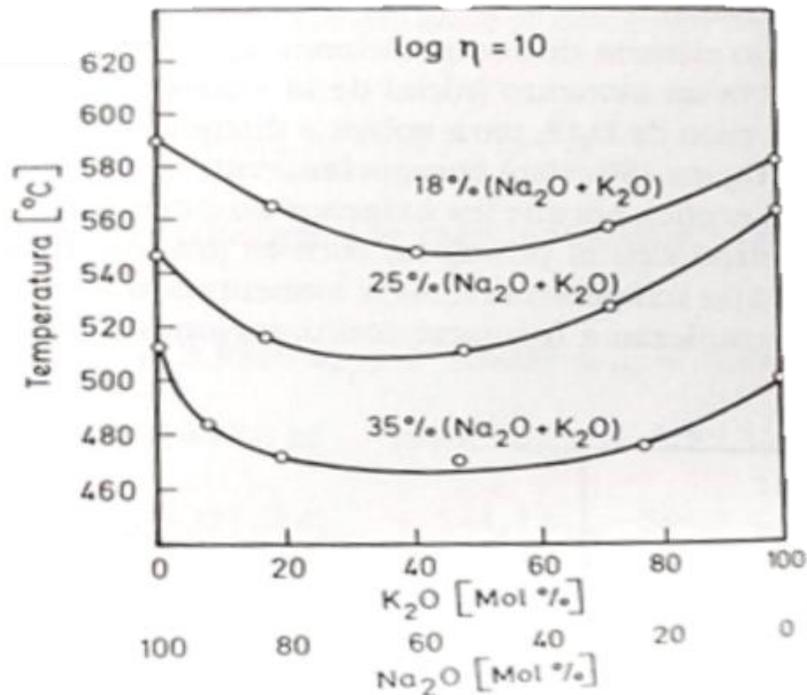


Figura 7. Temperatura en función del porcentaje molar de  $\text{K}_2\text{O}$  y  $\text{Na}_2\text{O}$  para una viscosidad constante de  $\log \eta = 10$  en vidrios binarios de silicato alcalino según Poole, tomada de [39,48].

Si bien la difusión del  $\text{Na}^+$  proveniente del SLG tiene una influencia en el desarrollo de materiales fotovoltaicos de capa fina sobre sustratos de SLG, este elemento cumple una función importante en el proceso de elaboración del material vítreo; ya que la presencia de  $\text{Na}_2\text{O}$  en las materias primas del vidrio ayuda a reducir la viscosidad de este. Uno de los mecanismos propuestos para el control de la difusión del  $\text{Na}^+$  a través de la matriz vítrea es el efecto del álcali mixto, el cual se produce con la combinación de los iones alcalinos sodio ( $\text{Na}^+$ ), potasio ( $\text{K}^+$ ), y litio ( $\text{Li}^+$ ) teniendo efecto en las propiedades relacionadas con la movilidad de dichos iones. El efecto del álcali mixto consiste principalmente en un comportamiento que no sigue una tendencia lineal como es en el caso de la

presencia de los iones no combinados, además estos comportamientos muestran máximos y mínimos a medida que varía la proporción de los iones alcalinos[49].

Con respecto a este fenómeno en sustratos vítreos destinados al desarrollo de celdas fotovoltaicas, recientemente Bansal y col [50], estudiaron la movilidad de los iones alcalinos  $K^+$ ,  $Na^+$  y  $Li^+$  provenientes de matrices vítreas de sustratos sintetizados a partir de reactivos, a través de películas de molibdeno depositado en los mismos. Encontraron que el  $Na^+$  tiene mayor difusión con respecto a los otros dos iones cuando estos no se encuentran combinados en la matriz vítrea, por otro lado, observaron que la difusión del  $Na^+$  en la película de Mo era mayor en combinación con  $Li^+$  que en aquella combinada con  $K^+$ .

En el presente proyecto, se estudió el efecto del álcali mixto en sustratos vítreos desarrollados a partir de residuos de vidrio de paneles fotovoltaicos y cómo este efecto influye en la eficiencia fotovoltaica de dispositivos de capa fina, concentrándose en el estudio de la combinación de los iones  $Na^+$ -  $K^+$  y  $Na^+$ -  $Li^+$  en dichos sustratos.

## **2.5 Evaluación de Impactos ambientales por medio de Análisis de Ciclo de Vida**

La metodología de análisis de ciclo de vida (ACV), ha sido desarrollada para identificar y medir los impactos ambientales de un producto, comprendiendo las actividades de extracción de la materia prima, manufactura, uso del producto, reciclaje y disposición final al terminar su vida útil. Esta metodología se encuentra estandarizada por las normas ISO14040:2006[51] y ISO14044:2006[52].

Para el desarrollo de ACV, las normativas ISO indican el desarrollo de cuatro etapas, las cuales se ilustran en la Figura 8 y se describen a continuación:

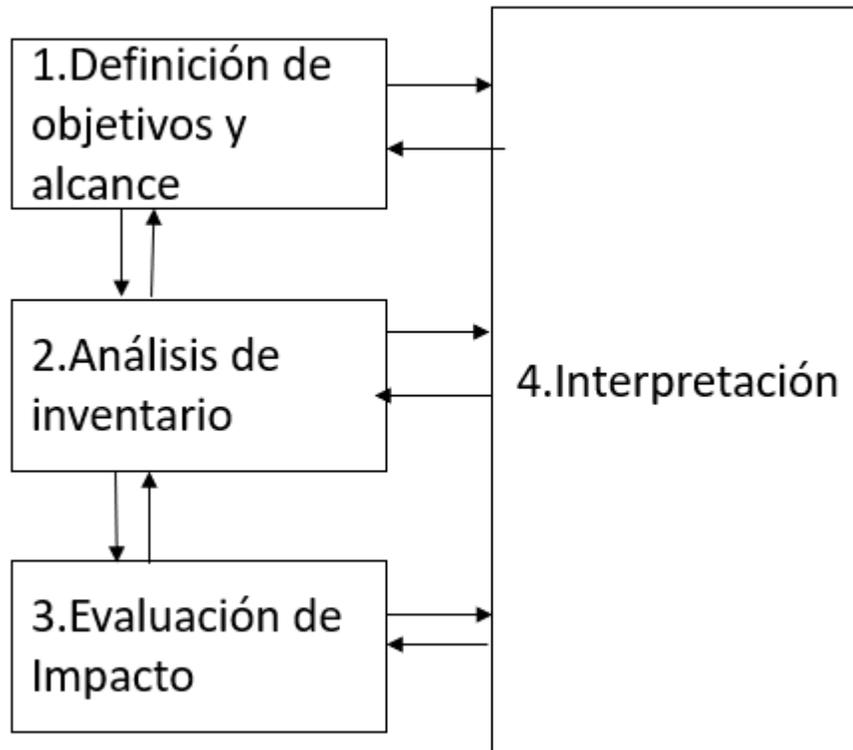


Figura 8. Etapas del análisis de ciclo de vida, tomada de [51].

En la primera etapa, se define el objetivo y alcance del estudio. En el objetivo se define el propósito del estudio, que debe cumplir con aspectos como aplicaciones previstas de los resultados, limitaciones del estudio, motivos para realizar el estudio, audiencia objetivo (científica, industrial, política, etc.) [53]. Por su parte, en el alcance del estudio se incluye la delimitación del sistema, es decir el conjunto de los procesos unitarios a estudiar en el ACV, así como la unidad funcional, la cual permitirá la definición de los aspectos cualitativos y la cuantificación de los impactos ambientales estudiados.

La unidad funcional se compone no solamente de una cantidad física, sino también de una función determinada por un determinado tiempo y lugar para el producto a analizar.

En la etapa de análisis de inventario se contempla la obtención de datos y procedimientos para identificar y calcular los impactos ambientales asociados a la unidad funcional [54], esto en base a las entradas y salidas de materia y energía involucradas en el límite del sistema, incluyendo las emisiones, efluentes de agua, residuos, consumo de recursos naturales, radiaciones, etc. Para este estudio, se recopilaron dichos datos en base a los balances de materia y energía correspondientes en cada uno de los tres procesos indicados en el límite del sistema.

La etapa de evaluación de impacto se realiza en base a lo recopilado en la etapa de análisis de inventario. Se analiza el impacto ambiental comprendido en las salidas y entradas del sistema evaluado, para ello, es necesario seguir la metodología indicada [52], la cual consiste primeramente en la selección de las categorías de impacto, indicadores de categoría y modelos de evaluación, después se conlleva la clasificación de los datos recopilados a cada categoría de impacto, y finalmente se lleva a cabo la caracterización de los datos del inventario para cada una de las categorías de impacto seleccionadas.

En la última etapa, se lleva a cabo la interpretación, en la cual se analizan los resultados obtenidos en la etapa de evaluación de impacto, permitiendo determinar conclusiones relacionadas tanto a las categorías de impacto evaluadas como a los procesos y etapas involucrados.

La metodología de ACV se ha utilizado para evaluar los impactos ambientales de diversos productos en vías de desarrollo, y el ramo de la fotovoltaica no es la excepción, ya que existen diversas investigaciones en las cuales se recurre a esta metodología para evaluar los impactos ambientales de diversos materiales de construcción con propiedades fotovoltaicas, en los cuales se realizan principalmente comparaciones entre dichos materiales y paneles solares convencionales:

En 1997, Baumann y col.[55] estudiaron los impactos ambientales de tres sistemas fotovoltaicos: el primero de paneles fotovoltaicos de silicio cristalino (c-

Si), el segundo de fachadas fotovoltaicas de c-Si y el tercero de fachadas fotovoltaicas de CdTe. Calcularon menor emisión de gases de efecto invernadero y menor tasa de retorno energético (TRE) en las fachadas de CdTe, siendo las de mayor emisión de gases y de TRE los módulos fotovoltaicos convencionales. Este resultado fue atribuido al alto consumo de energía en el proceso de producción de los módulos de silicio, particularmente, la etapa de producción de las obleas de silicio que componen dicho módulo fotovoltaico[56].

En el 2015, Belussi y col.[57] estudiaron los impactos ambientales de la producción de un piso cerámico fotovoltaico (silicio amorfo depositado en el esmalte), los cuales resultaron ser comparables con los sistemas fotovoltaicos convencionales en términos de consumo de recursos (agua, energía y residuos). Sin embargo, se localizaron las etapas de proceso con mayores impactos ambientales para la producción del piso cerámico fotovoltaico, los cuales incluyeron la extracción y procesamiento de materias primas, y la deposición de la capa fotovoltaica de silicio amorfo sobre el esmalte de la cerámica. Por lo que en este estudio se establecieron puntos de partida para implementar modificaciones en los procesos para reducir los impactos ambientales señalados en este estudio para la producción de este material fotovoltaico.

Para el caso del reciclaje de los residuos fotovoltaicos, se tiene como ejemplo el trabajo de Klugmann-Radziemska [58] en el 2020, en el cual realizaron un estudio del impacto ambiental de la recuperación y reciclaje del c-Si de celdas fotovoltaicas, realizando una comparación entre el uso de silicio reciclado y silicio convencional en la producción de nuevos paneles solares. De acuerdo con la interpretación del estudio, el uso de material de silicio reciclado contribuyó en todas las etapas del ciclo de vida de las celdas de silicio en la reducción del potencial de calentamiento global en un 42%; además, el impacto ambiental total de la producción fotovoltaica se podría reducir hasta en un 58%, principalmente a través de la reducción de consumo de energía en el proceso de producción de silicio cristalino de alta pureza.

En estos estudios se destaca tanto la reducción de gases de efecto invernadero (GEI) y de TRE de los materiales de construcción fotovoltaicos con respecto a los convencionales [55], así también como el aporte a la mitigación de impactos ambientales del reciclaje de residuos fotovoltaicos [58].

En el caso particular de las ventanas fotovoltaicas, Maalouf y col. [59] estudiaron la tendencia en diversos estudios de ACV para este tipo de dispositivos. Las categorías de impacto relevantes en estos estudios fueron las siguientes: Calentamiento global, acidificación, eutrofización, ecotoxicidad, toxicidad humana, demanda de energía acumulada y tasa de retorno energético. Encontraron que en general, las tecnologías de capa fina presentaron menores emisiones de gases de efecto invernadero en comparación que los paneles solares convencionales, esto debido principalmente a que se requiere menores consumo de energía y procesos de producción más simplificados para la producción de las capas finas con respecto a la producción de las obleas fotovoltaicas de silicio. Por otro lado, el tipo de capa fina depositada, así como el método de deposición utilizado juegan un papel importante en diversas categorías de impacto. De acuerdo con lo reportado en este estudio, las celdas solares de multiunión de arseniuro de galio (GaAs) y de perovskita, resultaron con mayores emisiones de gases de efecto invernadero con respecto al resto; esto debido a la mayor demanda energética de sus procesos intensivos, como la deposición epitaxial del GaAs, o la síntesis de materiales complejos en el caso de las perovskitas fotovoltaicas.

En cuanto a estudios de impactos ambientales del uso de residuos vitreos a partir de paneles solares para la fabricación de ventanas fotovoltaicas, no se han reportado estudios de impacto ambiental que impliquen el uso de dichos residuos para la producción de los sustratos vitreos de capa fina. Por ello, en el presente proyecto se utilizó la herramienta del ACV con la finalidad de evaluar los impactos ambientales en la producción de materiales de construcción fotovoltaicos producidos a partir de residuos de vidrio de paneles solares, arena de cuarzo de rechazo y dolomita de rechazo.

### **3. HIPÓTESIS, OBJETIVOS, METAS Y APORTACIÓN CIENTÍFICA**

#### **3.1. Hipótesis**

Las combinaciones de iones alcalinos en un sustrato vítreo desarrollado principalmente de residuos de vidrio de paneles solares reducen la movilidad iónica del Na<sup>+</sup>, impactando en los materiales depositados, y a su vez en la eficiencia de una celda fotovoltaica.

#### **3.2. Objetivos y metas**

##### **3.2.1. Objetivo general**

Revalorizar y utilizar residuos de vidrio de paneles solares, con la finalidad de sintetizar sustratos vítreos destinados al desarrollo de ventanas fotovoltaicas, formular sustratos en base al fenómeno del álcali mixto y estudiar su influencia en el desempeño de las celdas fotovoltaicas elaboradas.

##### **3.2.2. Objetivos particulares**

- Caracterizar química, térmica y estructuralmente al residuo vítreo de paneles solares de desecho.
- Formular y sintetizar el sustrato vítreo a partir de residuos de vidrio de paneles solares y otros residuos industriales.
- Depositar capas de materiales conductores y semiconductores al sustrato vítreo sintetizado.
- Elaboración de una celda fotovoltaica de capa fina.

- Evaluar propiedades y fotovoltaicas del material desarrollado.
- Evaluar impactos ambientales del proceso de elaboración de la celda fotovoltaica en este proyecto utilizando la herramienta de Análisis de Ciclo de Vida.

### **3.2.3. Metas**

- Proponer una alternativa para el reciclaje de residuos vítreos de paneles fotovoltaicos, obteniendo un producto de alto valor comercial que coadyuve a la generación de energías renovables.
- Estudiar el efecto del álcali mixto en sustratos desarrollados a partir de residuos de vidrio de paneles fotovoltaicos y otros residuos industriales, y cómo este influye en la eficiencia fotovoltaica de las celdas fotovoltaicas elaboradas.
- Evaluar los impactos ambientales relacionados con el desarrollo del vidrio fotovoltaico a partir de residuos de vidrio de paneles solares.
- Obtener grado de Doctorado en Ciencias con orientación en Procesos Sustentables.
- Divulgar los resultados de la investigación por medio de la publicación de al menos un artículo científico, así como presentar los resultados en un congreso internacional.

### **3.3 Aportación científica**

Desarrollo de un material sustrato vítreo, partiendo principalmente de residuos de vidrio de paneles solares, cuyas características químicas, eléctricas y térmicas coadyuvan a la eficiencia del proceso fotovoltaico.

## 4. METODOLOGÍA

### 4.1 Procedimientos experimentales

#### 4.1.1 Recolección de residuos y extracción del vidrio de los paneles solares

Para este proyecto se trabajó con residuos de paneles solares de celdas de silicio policristalino provenientes de la Ciudad de México. En la Figura 9 se aprecian dichos residuos, que se encontraban totalmente estrellados.



Figura 9. Residuos de paneles solares estrellados.

Con la finalidad de separar los monolitos del vidrio del panel fotovoltaico (VPFV) del resto de los residuos de los paneles solares, estos fueron cortados en cuadrados de 5 x 5 cm, que fueron colocados en cápsulas de porcelana y calentados por 30 minutos a 200°C, temperatura cercana a la transición vítrea del etilvinilacetato (EVA) de acuerdo con el estudio de McGarry y col. [60]; las

hojas fueron retiradas de la mufla y los monolitos de vidrio fueron separados manualmente de las hojas de Tedlar®. Para evaporar el EVA del vidrio y separarlo de los residuos de celdas de silicio, se siguió el proceso descrito por Savvilotidou y col.[16]; el material fue tratado térmicamente a 550°C por una hora, y el vidrio se separó manualmente de las celdas. Cada uno de los productos obtenidos fue pesado con el propósito de calcular la proporción másica de los materiales obtenidos.

#### **4.1.2 Preparación de sustratos vítreos**

##### **4.1.2.1 Formulación de composiciones a partir de VPFV y otros residuos**

El residuo de vidrio de paneles solares se combinó con los otros residuos previamente caracterizados[61] (arena de cuarzo y dolomita) en las proporciones necesarias para llegar a la formulación meta de  $\text{SiO}_2 \sim 70\%$  y  $\text{Na}_2\text{O} \sim 7.5\%$ .

##### **4.1.2.2 Formulaciones de composiciones para el estudio del efecto de álcali mixto**

Para el estudio de álcali mixto, se utilizaron reactivos de carbonato de potasio ( $\text{K}_2\text{CO}_3$ , 99.99% Sigma Aldrich) como fuente de potasio, y carbonato de litio ( $\text{Li}_2\text{CO}_3$ , 99.99% Sigma Aldrich) como fuente de litio. Estos reactivos fueron mezclados con el VPFV previamente pulverizado en las proporciones indicadas en la Tabla II. Con la finalidad de asegurar homogeneidad en la composición, el vidrio y el carbonato correspondiente se molieron en un mortero de ágata.

TABLA II. PROPORCIONES DE SODIO Y ION ALCALINO (K<sup>+</sup>/Li<sup>+</sup>).

| Nombre | K <sup>+</sup> /Na <sup>+</sup> | Nombre | Li <sup>+</sup> /Na <sup>+</sup> |
|--------|---------------------------------|--------|----------------------------------|
| K1     | 1/3                             | L1     | 1/3                              |
| K2     | 3/4                             | L2     | 3/4                              |

#### 4.1.2.3 Fusión, vaciado y preparación de sustratos

Los vidrios se sintetizaron calentando cada composición hasta temperaturas alrededor de 1450°C, después de un tiempo de residencia de 1 hora, se realizó el enfriamiento al aire, en el cual, el vidrio se enfría bruscamente vaciándolo sobre una placa y molde cuadrado de acero de 4 cm de lado; esto para llevar la composición al estado vítreo. Con la finalidad de eliminar las tensiones residuales existentes en los vidrios, estos se sometieron a un proceso de recocido, en el cual el material fue tratado térmicamente a una temperatura cercana a la T<sub>g</sub> por un tiempo de 60 minutos. El material vítreo fue cortado en una cortadora de baja velocidad para obtener sustratos de 3 mm de espesor, y después fueron pulidos con lijas de carburo de silicio (SiC) para eliminar la rugosidad de las superficies de los sustratos.

#### 4.1.3 Deposición

Se realizó la deposición de la primera capa componente de una celda fotovoltaica, con la finalidad de estudiar la interacción física y química del sustrato vítreo con dicha capa. Para este estudio, se realizó la deposición de un óxido conductor transparente el cual se describirá a continuación.

#### **4.1.3.1 FTO**

Se seleccionó óxido de estaño dopado con fluoruro (FTO) como capa de contacto frontal y se depositó sobre los sustratos de vidrio mediante la técnica de aspersión pirolítica. Para el depósito de este material, se utilizó el método de Muniramaiah y col.[62]. Se disolvieron 3.16 g de tetracloruro de estaño pentahidratado ( $\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) en 15 ml de etanol, después 0.54 g de  $\text{NH}_4\text{F}$  fueron añadidos como fuente de F, 5 ml de agua destilada fueron agregados con la finalidad de disolver el  $\text{NH}_4\text{F}$ . La solución precursora fue llevada a ultrasonido durante 30 minutos hasta completar la disolución de los reactivos y después colocada en el atomizador. La solución fue depositada por medio de la técnica de aspersión pirolítica, la cual se describirá en la siguiente sección.

#### **4.1.3.2 Deposición por aspersión pirolítica**

Uno de los parámetros de interés en la formación de las películas delgadas es la cristalización uniforme del compuesto deseado, principalmente, que esta se lleve a cabo con la orientación en un plano de interés.

La aspersión pirolítica, también conocida como "*spray-pyrolysis*", es una técnica de deposición en la cual se da la formación y cristalización de manera ordenada de un material de interés, por medio del contacto de gotas de la solución precursora con el sustrato a una temperatura en la cual se lleve a cabo tanto la evaporación de los solventes utilizados como la reacción de formación y cristalización del compuesto deseado. La Figura 10 muestra un esquema del proceso general de aspersión pirolítica.

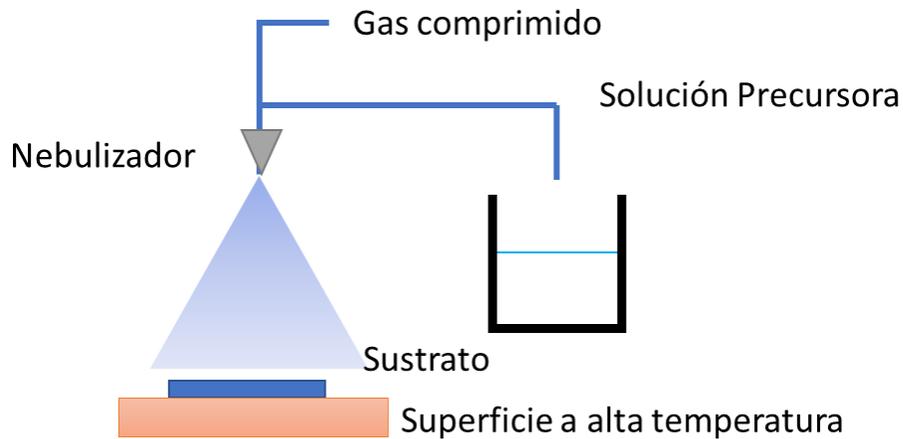


Figura 10. Aspersión pirolítica.

El equipo necesario consiste esencialmente en un atomizador o nebulizador para la atomización de la solución precursora, así también un medio de calentamiento para llevar el sustrato a la temperatura deseada, una fuente de gas comprimido generalmente es utilizada para facilitar la nebulización de la solución precursora, sin embargo, existen equipamientos en los cuales la solución es presurizada para ser nebulizada [63].

En la técnica de aspersión pirolítica, la solución precursora es nebulizada de tal manera que las gotas de la solución al entrar en contacto con el sustrato a alta temperatura, se dé la evaporación del solvente y la cristalización del material de manera espontánea, lo cual facilitará el crecimiento cristalino del material de manera ordenada y con orientación en un plano determinado.

Para este trabajo, los sustratos fueron calentados en una plancha de calentamiento hasta 500°C, una vez alcanzada la temperatura, la solución precursora previamente preparada fue nebulizada y disparada sobre los sustratos en intervalos de 10 segundos de aplicación y 5 de reposo, a una distancia de 40 centímetros.

### 4.1.3.3 Elaboración de celda solar de capa fina

#### 4.1.3.3.1 CdS: Deposición por baño químico y superficie química

Con la finalidad de depositar el CdS, generalmente se utiliza la técnica de deposición por baño químico (CBD por sus siglas en inglés), esta técnica es seleccionada debido a sus ventajas técnicas, como las bajas temperaturas de trabajo, y que no requiere una atmósfera en particular a una presión determinada, por lo que esto facilita que el proceso de deposición sea reproducible a gran escala. En la Figura 11 se ilustra un arreglo típico para la deposición por baño químico.

El CBD consiste en la nucleación y el crecimiento cristalino controlado de un compuesto sobre un sustrato, como resultado de una reacción en solución sin la aplicación de una fuerza impulsora eléctrica externa [64]; la cinética de la reacción involucrada está controlada por parámetros de la solución como la temperatura, el pH y la concentración del reactivo.

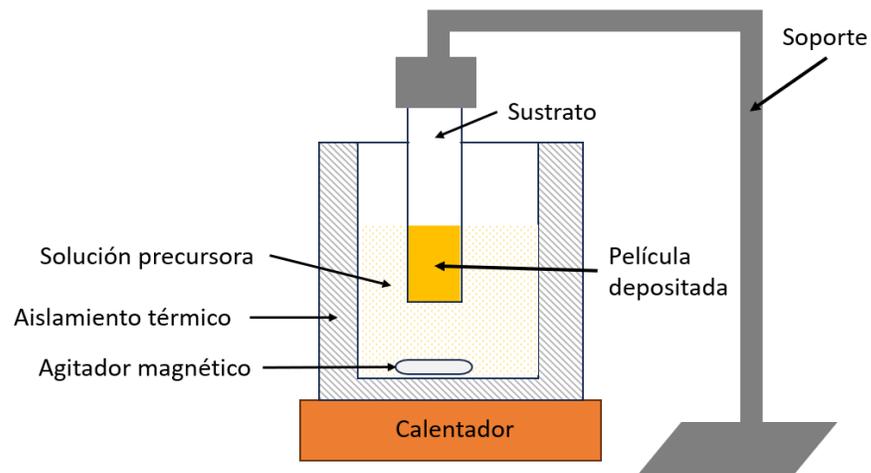


Figura 11. Deposición por Baño Químico.

El incremento del pH en el baño químico promueve la estabilidad de los complejos catiónicos y reduce la concentración de los cationes libres, lo cual resulta en el decremento de la razón de depósito. Los iones  $\text{OH}^-$  son los responsables de la formación de centros de nucleación, sin embargo, el exceso de este ion no participará en la formación de complejos y provocará la precipitación del hidróxido del catión metálico, esto resultando en la disminución del espesor de la película a depositar.

Por otro lado, la temperatura del baño químico juega un papel determinante en el proceso de deposición; el incremento de la temperatura provoca la disociación de los complejos formados por el catión y los compuestos que proporcionan los iones calcógeno en la solución precursora, provocando el aumento de la velocidad de deposición de la película delgada. Pero si la temperatura y el grado de calcogenuros llegan a un punto crítico, esto provocará la disminución del espesor de la película y la precipitación del compuesto[64].

La solución precursora fue preparada en base a lo reportado por Mutalikdesai y Ramasesha [65], utilizando acetato de cadmio como fuente de Cd y tiourea ( $\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}$ ) como fuente de S; con la finalidad de ajustar el pH de la solución, fueron utilizados acetato de amonio ( $\text{C}_2\text{H}_7\text{NO}_2$ ) y amoníaco ( $\text{NH}_3$ ).

La deposición por capa química (CSD por sus siglas en inglés), es una variante a la deposición por baño químico, en la cual la solución precursora es preparada y colocada directamente sobre el sustrato precalentado a determinada temperatura (Figura 12); la tensión superficial de la solución proporciona un volumen mínimo de la reacción de la solución precursora y su deposición en el sustrato. La deposición de la película se produce a través del crecimiento heterogéneo de compuestos en la superficie del sustrato por transferencia de calor a la solución precursora[66]. Para este proyecto, se siguió la metodología de Il'chuck y col [66] para la deposición por superficie química, las condiciones de trabajo fueron  $70^\circ\text{C}$  por un tiempo de 60 min.

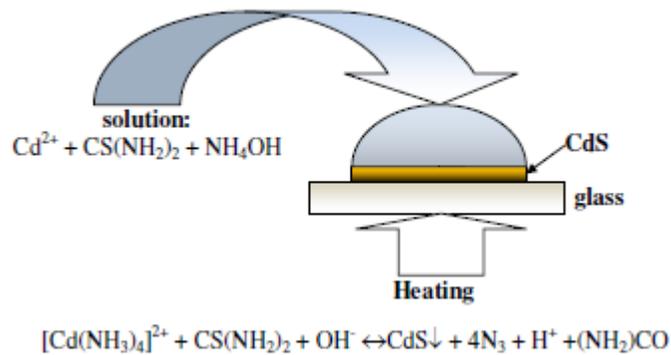


Figura 12. Deposición por capa Química[66]

#### 4.1.3.3.2 $\text{CuAlS}_2$ : Deposición por aspersión pirolítica

Se seleccionó  $\text{CuAlS}_2$  como semiconductor tipo p.  $\text{CuAlS}_2$  es un semiconductor perteneciente a la familia de las calcopiritas, este material es de baja toxicidad en comparación con el CdTe, y es posible aplicarlo por medio de técnicas de bajo costo y alta producción como es la aspersión pirolítica[67,68]. Para este proyecto, se utilizó la técnica de aspersión pirolítica descrita en la sección 4.1.3.2.

Para esta técnica se prepararon 50 ml de la solución precursora a partir de sulfato de cobre pentahidratado ( $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) 0.01 M, tiourea 0.02 M y de cloruro de aluminio hexahidratado 0.01 M.

Los sustratos con las capas de FTO y CdS previamente depositadas fueron calentados a una temperatura de 300°C. La solución precursora fue aplicada sobre los sustratos por un tiempo de 30 minutos, utilizando aire comprimido.

#### 4.1.3.3 Molibdeno: Deposición por pulverización catódica

Una celda fotovoltaica requiere de un contacto posterior para el transporte de los electrones producidos por el efecto fotovoltaico al circuito eléctrico. Si bien hay muchas opciones disponibles de materiales para ser utilizados por contactos posteriores, el molibdeno (Mo) ha sido identificado como una opción ideal para el contacto posterior en células solares CIS y CIGS, no solo por sus excelentes propiedades eléctricas, sino también por su inercia y durabilidad mecánica durante el crecimiento de la película absorbente[69].

Con la finalidad de depositar las capas conductoras de molibdeno como contacto posterior, se optó por la técnica de pulverización catódica de radiofrecuencia, conocida también como “RF-*sputtering*”.

El fenómeno de la pulverización catódica se da cuando una superficie sólida (blanco) es bombardeada con partículas energizadas como iones acelerados. Los átomos de la superficie del blanco se dispersan debido a las colisiones entre los átomos del blanco y las partículas energizadas como se muestra en la Figura 13 [70]:

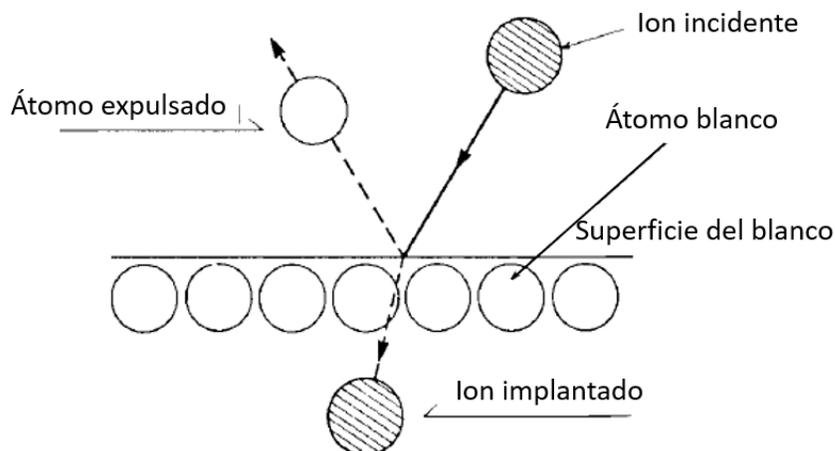


Figura 13. Proceso físico de la pulverización catódica, tomada de [70].

Existen diferentes sistemas desarrollados para llevar a cabo el fenómeno de pulverización catódica, el más simple y utilizado es la pulverización catódica de corriente directa (*DC-sputtering*) el cual está compuesto por un par de electrodos planos, un cátodo y un ánodo; en el cátodo se instala el blanco a depositar, mientras que el sustrato se coloca sobre el ánodo, la cámara se llena de gas, generalmente argón a 0,1 Torr [70]. Al aplicarse una corriente directa a los electrodos, el argón se ioniza ( $\text{Ar}^+$ ) funcionando como las partículas energizadas que bombardean al blanco, cuyos átomos se dispersan y son depositados en el sustrato que se encuentra en el ánodo. Sin embargo, este fenómeno solo puede ser llevado a cabo si el blanco a depositar es un metal conductor, si el blanco metálico es sustituido por un blanco aislante, la deposición no podría llevarse a cabo debido a la acumulación inmediata de una carga superficial positiva en la superficie del aislante. Para que se lleve a cabo la descarga del blanco aislante, se suministra un voltaje de radiofrecuencia (RF) al objetivo, en el sistema de pulverización catódica por radiofrecuencia (*RF-Sputtering*), la deposición del aislante se realiza directamente desde el blanco.

La técnica de pulverización catódica por radiofrecuencia es utilizada principalmente en la deposición de blancos no metálicos, sin embargo, esta técnica también es de utilidad para la deposición de metales, como el aluminio (Al) [71] y Mo [72].

Para la deposición de Mo por medio de pulverización catódica por radiofrecuencia, se siguió metodología descrita por Chelvanathan y col. [72], en la cual se utilizó un blanco comercial de Mo de 25.4 mm de diámetro de 99.99% de pureza (Kurt J. Lesker) con la finalidad de obtener películas de 800 nm de espesor.

## 4.2 Caracterización

### 4.2.1 Caracterización química, térmica y estructural

#### 4.2.1.1 Fluorescencia de rayos X (FRX)

Por medio del análisis de fluorescencia de rayos X (FRX), se analizó el vidrio recuperado de los paneles fotovoltaicos con la finalidad de identificar los elementos presentes en su base óxido y en qué proporción se encuentran.

La técnica se basa en que cuando una muestra es irradiada por fotones de rayos X, los electrones de los átomos son expulsados en forma de fotoelectrones, convirtiendo los átomos en iones inestables. Para estabilizar los átomos, las vacantes de los orbitales inferiores de los átomos son ocupados por electrones de orbitales superiores, dicha transición genera una emisión de energía en forma de fotones de rayos X, dándose el fenómeno de fluorescencia de rayos X. La longitud de onda característica de los fotones emitidos dependerá tanto del elemento irradiado como de la diferencia de energía que existe entre los orbitales en los cuales se dio la transición [73].

Para realizar los análisis de FRX en los residuos de VPFV, se tomaron 10 g de muestra, se mezclaron con 1 g de cera aglutinante, se prensaron bajo una fuerza de 25N con la finalidad de obtener pastillas, las cuales fueron montadas y analizadas en un espectrómetro marca S4 PIONEER, ubicado en la *Universitat Jaume I*, el equipo trabajó bajo una atmósfera de helio a 0.47 L/min, con un voltaje de 5 kV y una intensidad de corriente de 900 mA.

#### **4.2.1.2 Análisis térmicos.**

En general, se puede definir a los análisis térmicos a aquellos en los cuales se mide una o varias propiedades físicas o estabilidad química, con respecto a la temperatura.

Estos son clasificados dependiendo de la propiedad que será medida en: análisis asociados con el cambio de masa, análisis asociados con el cambio de energía y análisis asociados con cambios dimensionales [74]. Por otro lado, los análisis térmicos también se pueden clasificar dependiendo del cambio de la temperatura programada, en análisis estáticos y dinámicos, en los primeros la muestra se somete a una temperatura constante, y las propiedades se miden con respecto al tiempo de residencia, mientras que en los dinámicos la temperatura es variable a una determinada velocidad de calentamiento. Cabe mencionar que se pueden combinar experimentos dinámicos y estáticos en un análisis térmico, tal es el caso de los análisis térmicos diferenciales de nucleación de materiales vítreos. Para este proyecto, el estudio se centró en los análisis térmicos dinámicos, particularmente, los de análisis termogravimétrico (TGA por sus siglas en inglés), análisis térmico diferencial (DTA por sus siglas en inglés).

En el TGA la muestra es sometida a un programa de calentamiento en el cual la muestra se calienta a una determinada velocidad de calentamiento (generalmente medida en °C/min), y se registra la masa de la muestra con respecto a la temperatura. La muestra es depositada en una celda de un material inerte como alúmina o platino, esta celda es colocada a un termopar conectado a una micro balanza, los cuales registran tanto la temperatura como la masa de la muestra. Generalmente en el termograma se reporta el porcentaje de masa con respecto a la masa inicial, o la cantidad de masa en unidades de miligramos (mg) con respecto a la temperatura, de tal manera que se puedan identificar a qué temperaturas ocurren determinadas reacciones químicas en base a las pérdidas o ganancias de masa registradas.

Por otro lado, en el DTA, al igual que en el TGA, la muestra es sometida a un programa en el cual la temperatura aumenta a determinada velocidad de

calentamiento. En el DTA se compara la temperatura de la muestra con la de un material de referencia térmicamente estable, generalmente  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , y se reporta la diferencia de temperatura entre el material estudiado y el de referencia ( $\Delta T$ ). En síntesis, DTA es un experimento termodinámico que permite observar cambios de energía relativa en comparación con un material térmicamente inerte [75]. Mientras que en la técnica de calorimetría diferencial de barrido (DSC por sus siglas en inglés), se mide la diferencia de calor entre una muestra y su referencia, tanto en el DTA como en DSC, se pueden identificar eventos termodinámicos ocurridos en la muestra a estudiar durante en el proceso de calentamiento en los termogramas.

Cabe mencionar que en los equipos de análisis térmicos actuales se tienen acoplados el análisis termogravimétrico y el térmico diferencial, a estos equipos se les conoce como analizadores térmicos simultáneos, (STA por sus siglas en inglés); y en sus termogramas de salida se registran tanto los cambios de masa, como la  $\Delta T$  con respecto a la temperatura. Al combinarse ambos análisis, se facilita la detección de cambios de estado de la materia (fusión, solidificación o cristalización, evaporación y sublimación) así como de reacciones químicas, y en el caso de materiales vítreos, los eventos de cristalización son identificados por medio de la presencia de exotermas o picos exotérmicos mientras que la  $T_g$  se determina por cambios en la línea base del DTA.

Con la finalidad de conocer la estabilidad térmica, así como los eventos de transición vítrea y temperaturas de cristalización de los materiales vítreos involucrados en el proyecto, se utilizó un analizador térmico simultáneo PERKIN ELMER modelo STA 600, las condiciones de calentamiento fueron bajo atmósfera de aire seco a un flujo de 20 mL/min. Las muestras fueron sometidas a un intervalo de calentamiento de 25 a 995 °C, a una velocidad de calentamiento de 10 °C/min, utilizando  $\text{Al}_2\text{O}_3$  como material de referencia. Por otro lado, para conocer las temperaturas de transición vítrea de los materiales vítreos producidos, y la influencia de los iones alcalinos añadidos, se utilizó un analizador

simultáneo METTLER TOLEDO TGA/DSC3 y las pruebas fueron realizadas a una velocidad de calentamiento de 10°C/min.

#### 4.2.1.3 Difracción de rayos X (DRX)

Según el acomodo de los átomos, las estructuras de los materiales se pueden clasificar en amorfas o de corto alcance, y estructuras cristalinas o de largo alcance [38]. Una estructura cristalina está compuesta por un arreglo periódico tridimensional, el cual está configurado en un patrón regular y repetitivo.

Cuando un haz de rayos X choca con un sólido, bajo ciertas condiciones se puede producir el fenómeno conocido como difracción de los rayos X, en el que se da la formación de un ángulo entre el haz y el sólido, conocido como el ángulo de difracción  $\theta$ , el cual depende del arreglo atómico, la densidad planar y de la longitud de onda ( $\lambda$ ) del haz de rayos X; dicho comportamiento se puede explicar por medio de la ecuación de Bragg (1):

$$n\lambda = 2 * d * \text{sen}\theta \quad (1)$$

En donde  $d$  es la distancia entre los planos de la celda unitaria de la estructura cristalina, conocida como distancia interplanar y  $n$  corresponde a un número entero de veces que se repite la longitud de onda en la distancia equivalente a  $2d\text{sen}\theta$ .

Cuando existe un arreglo periódico de los átomos, los rayos X serán difractados solamente en ciertas direcciones cuando chocan con los diferentes planos de la estructura, como se representa en la Figura 14. Por otro lado, los materiales amorfos no poseen un arreglo, y solo se encuentran distribuidos de manera desordenada en el espacio tridimensional, por lo que los rayos X serán dispersados en todas direcciones.

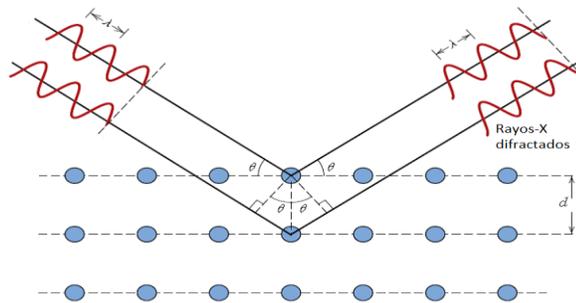


Figura 14. Difracción de rayos X en un sólido cristalino.

Con la finalidad de observar la estructura amorfa presente, así como determinar cualitativamente la presencia de material remanente del proceso de separación como silicio cristalino y EVA, el vidrio recuperado de los paneles solares fue analizado por medio de difracción de rayos X (DRX), en un difractómetro marca Phillips XPERT-PRO. Para este análisis el equipo trabajó a voltaje de 40 kV y corriente de 35 mA, utilizando una radiación de Cu  $k_{\alpha}$  con una longitud de onda de 1.5418 Å. Las muestras se sometieron a un recorrido  $2\theta$  de  $5^{\circ}$  a  $90^{\circ}$  con un tamaño de paso de  $0.01^{\circ}$ .

Por otro lado, para observar las deposiciones de FTO, tanto el grado de cristalización, como los planos en los cuales se encuentran orientados los cristales depositados, se utilizó un difractómetro D8 Advance Series 2. Las condiciones del análisis fueron un voltaje de 40 kV, una corriente de 40 mA y una radiación de Cu  $k_{\alpha}$  con una longitud de onda de 1.5418 Å. Las muestras se sometieron a un recorrido  $2\theta$  de  $10^{\circ}$  a  $90^{\circ}$  con un tamaño de paso de  $0.03^{\circ}$ ,

#### 4.2.1.4 Microscopia electrónica de barrido con espectroscopia de energía dispersiva (SEM-EDS)

Para producir las imágenes por medio de microscopia electrónica de barrido, la superficie de la muestra es bombardeada por un haz de electrones (electrones incidentes o primarios) que lleva una energía de 0.1 a 30 eV. La

obtención de las imágenes de la muestra depende de la interacción de esta y los electrones incidentes como se muestra en la Figura 15, estas interacciones se dividen en elásticas e inelásticas [76].

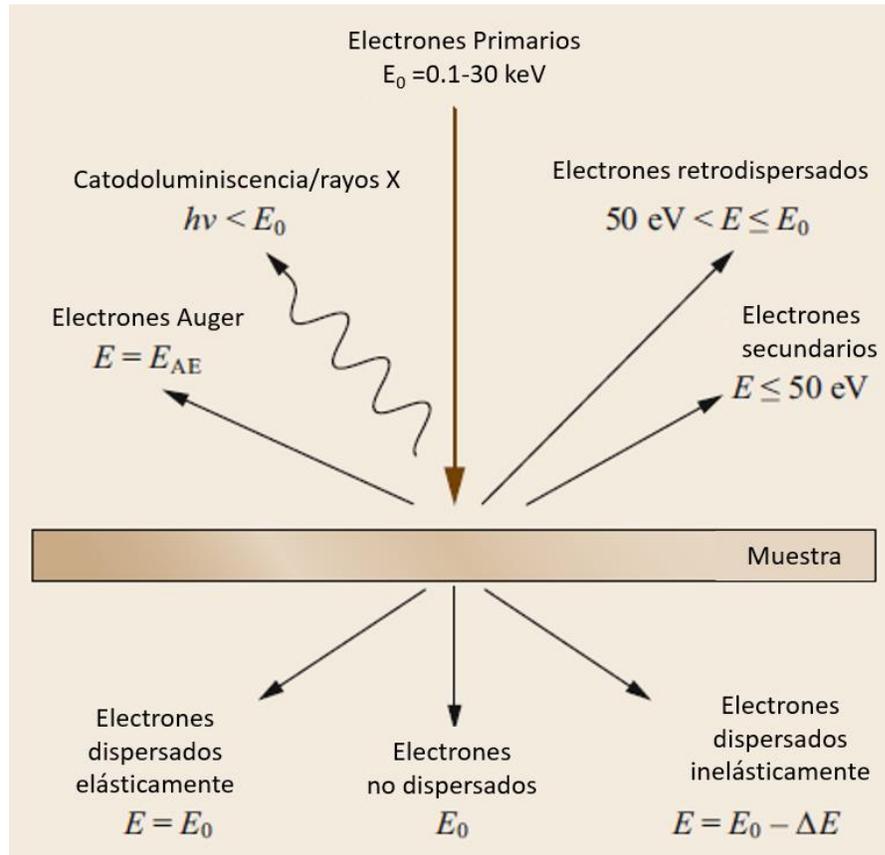


Figura 15. Esquema de los tipos de electrones producidos por la colisión de los electrones primarios con la muestra a analizar por SEM, tomada de [77].

Las interacciones elásticas resultan de la desviación de los electrones incidentes después de colisionar con el núcleo atómico de la muestra, estas dispersiones se caracterizan por una pérdida insignificante de energía durante la colisión y por un cambio direccional de gran angular del electrón dispersado. Los electrones incidentes que se dispersan elásticamente en un ángulo mayor a  $90^\circ$  se denominan electrones retrodispersados o *backscattered electrons (BSE)* y producen una señal de utilidad para la obtención de imágenes de la muestra, ya que proporcionan información tanto de la composición como de la topografía de

la muestra. Generalmente los BSE escapan con una energía superior a 50 eV [76] y el porcentaje de electrones retrodispersados es proporcional al número atómico de los átomos presentes en la muestra.

Por otro lado, la dispersión inelástica ocurre a través de una variedad de interacciones entre los electrones incidentes y los electrones y átomos de la muestra, y da como resultado que el electrón del haz primario transfiera energía sustancial a ese átomo. La cantidad de energía perdida depende si la excitación de los electrones de la muestra es individual o colectiva, así también de la energía de enlace del electrón al átomo de la muestra. La excitación de los electrones de la muestra durante la ionización de sus átomos da como resultado la generación de electrones secundarios (SE por sus siglas en inglés), que se definen convencionalmente como poseedores de energías menores a 50 eV. Los SE son utilizados principalmente para el contraste topográfico, el cual depende de la cantidad de electrones secundarios que lleguen al detector. Una señal de electrones secundarios puede resolver estructuras superficiales del orden de 10 nm [76].

Otra señal de interés corresponde a los rayos X característicos, estos se generan cuando un electrón de la capa externa atómica se traslada a la capa interna para restablecer el electrón desplazado por la colisión con un electrón primario del haz de electrones. Este desplazamiento de electrones entre las capas del átomo genera la emisión de un fotón de rayos X con una cantidad de energía característica para cada átomo y nivel energético, siendo esta de utilidad para proporcionar información química de la muestra [76].

Para este trabajo, la microscopia electrónica de barrido fue utilizada para observar las capas de los materiales depositados en los sustratos vítreos, el espesor alcanzado, así como el tamaño y morfología de los cristales depositados, todo esto con la finalidad de evaluar los procesos de deposición sobre los sustratos desarrollados.

Por otro lado, con la finalidad de rastrear el sodio a través de la capa de FTO depositada en los diferentes sustratos, se realizó el análisis de EDS a las diferentes superficies de FTO depositadas en los sustratos sintetizados. Se realizó un análisis EDS por técnica de mapeo en la sección transversal de los depósitos de FTO, así como el análisis en el punto intermedio de la capa de FTO depositada. En este caso es la proporción del  $\text{Na}^+$  con respecto al estaño presente en la capa de FTO fue reportado con la finalidad de realizar la comparativa de la presencia de este ion en todos los sustratos analizados.

#### 4.2.2 Caracterización optoelectrónica.

##### 4.2.2.1 Espectrometría UV-VIS

Cuando un haz de luz visible atraviesa un cuerpo transparente o semi-transparente de un espesor determinado ( $d$ ), ocurren diversos fenómenos debido a la interacción de la luz con el material. Un porcentaje de la luz será absorbido por el cuerpo ( $I_a$ ), otro será reflejado ( $I_r$ ) y un porcentaje será transmitido ( $I_T$ ). La Figura 16 esquematiza este fenómeno:

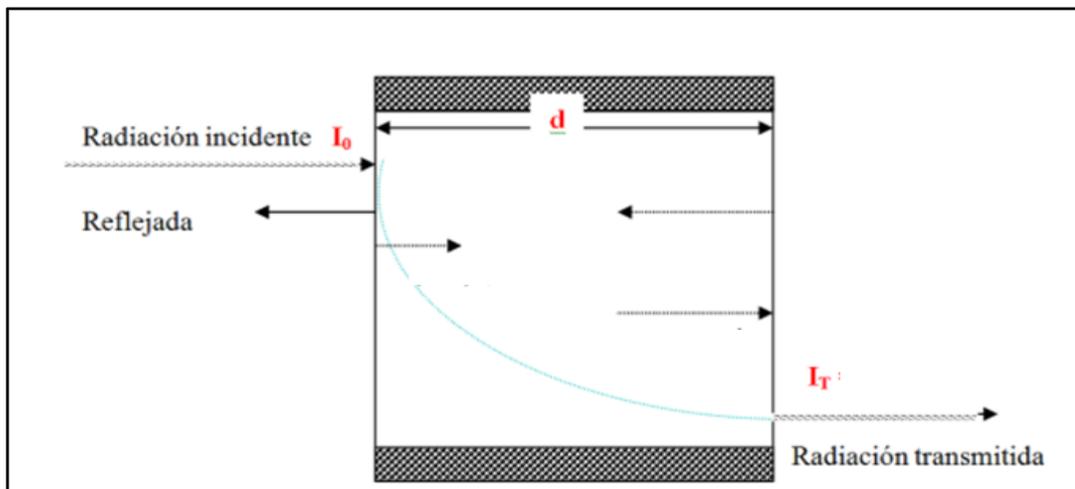


Figura 16. Paso de un haz de luz a través de un cuerpo.

El porcentaje de transmitancia determina la fracción de energía solar incidente que atraviesa el cuerpo y llega al otro lado del cuerpo. Esta propiedad es de interés en el área de la fotovoltaica, ya que representa la cantidad de fotones que atravesarán un material en particular, y llegarán a la zona de la celda en la cual se dé el efecto fotovoltaico. Los componentes de las celdas fotovoltaicas en los cuales se requiere una alta transmitancia son los TCO y los sustratos de las celdas fotovoltaica puestas en modo superestrato como se muestra en la Figura 17.

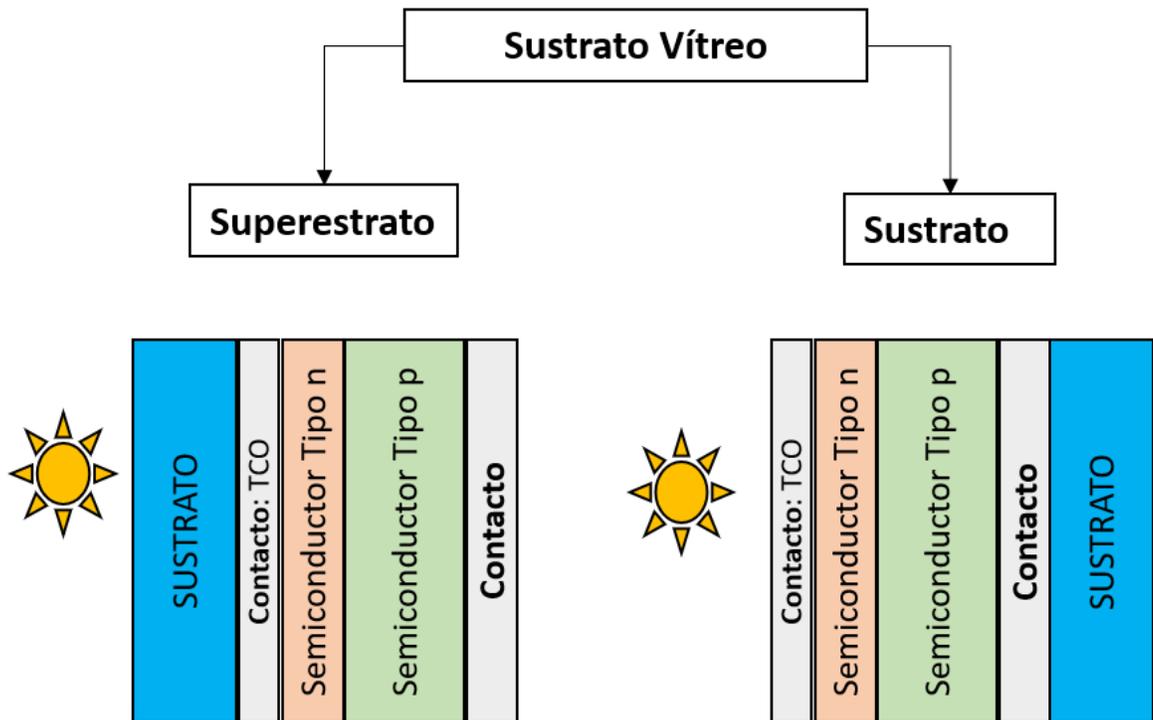


Figura 17. Esquemas de configuraciones de celdas fotovoltaicas.

Como se mencionó anteriormente, el vidrio es un material ampliamente utilizado como sustrato fotovoltaico, principalmente por su alta transparencia y amplia producción. Por lo que en este proyecto fue de importancia determinar el porcentaje de transmitancia de los materiales a través del rango visible.

Para medir el %T de los sustratos vítreos sintetizados de este trabajo, se utilizó un espectrofotómetro Nicolet Evolution 300, con una celda vacía (aire) como referencia (Transmitancia 100%).

#### **4.2.2.2 Resistencia eléctrica laminar**

La resistencia laminar es una medida de resistencia lateral por área cuadrada de una película con espesor uniforme, y cuantifica la capacidad de la carga eléctrica para viajar en el plano de la película. Es una propiedad eléctrica crítica y se utiliza para caracterizar películas de materiales tanto semiconductores como conductores.[78]

Independientemente del tamaño de los electrodos, la unidad de la resistencia eléctrica laminar es ohmios por cuadrado ( $\Omega/\text{sq}$ ) o solo  $\Omega$ . Para evitar confusión con resistencia de volumen (que se expresa en la unidad de ohm), la resistencia laminar se expresa en ohmios por cuadrado ( $\Omega/\text{sq}$ ). [79]

La técnica de la probeta de 4 puntas es la más utilizada para realizar la medición de la resistencia laminar. Un medidor típico de 4 puntas consta de cuatro electrodos colineales igualmente espaciados que hacen contacto eléctrico con la superficie a caracterizar. Para calcular la resistencia laminar, se aplica una corriente continua a través de las sondas externas que induce un voltaje a través de las dos sondas internas como se muestra en la Figura 18.

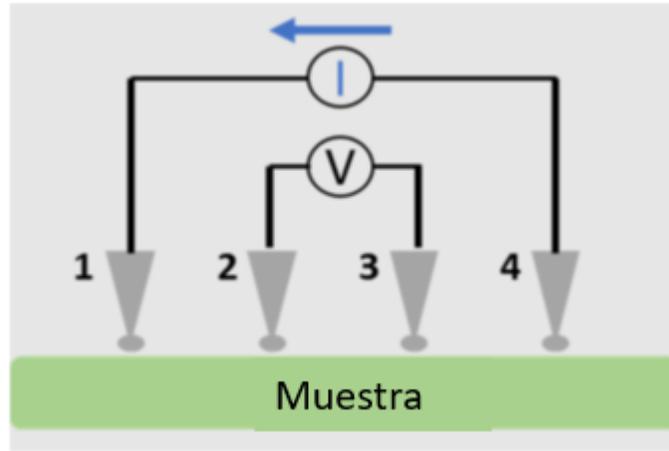


Figura 18. Dibujo esquemático de un medidor de cuatro puntas. [78]

Para calcular la resistencia laminar ( $R_s$ ), se utiliza la ecuación (2), donde  $R_s$  se expresa en  $\Omega / \text{sq}$ ,  $\Delta V$  es el voltaje medido en las probetas interiores, e  $I$  es la corriente medida en las probetas exteriores.

$$R_S = \frac{\pi}{\ln(2)} \frac{\Delta V}{I} = 4.53236 \frac{\Delta V}{I} \quad (2)$$

Para este proyecto, se midieron las resistencias laminares del FTO depositado por un medidor de cuatro puntos OSSILA con una corriente de 10 mA y un voltaje máximo de 10 V, con incrementos de 0.01 V.

#### 4.2.2.3 Cronoamperometría

En general, la cronoamperometría es un método de análisis en el cual se mide la corriente producida a través del tiempo, cuando el sistema es estimulado por una energía externa en particular, la cual active el fenómeno que lo hará producir dicha corriente eléctrica. Aunque esta técnica es ampliamente utilizada

en el estudio de fenómenos electroquímicos, su aplicación en el campo de la fotovoltaica se ha dado debido a que permite el estudio del efecto fotovoltaico en celdas solares, principalmente, la producción de corriente eléctrica al ser estimulado con un haz de luz solar de una potencia determinada [80].

Con la finalidad de realizar la caracterización por medio de cronoamperometría, se utilizó un simulador solar Sun 3000 Class AAA de Abet Technologies y se trabajó con una potencia de  $1000 \text{ W/m}^2$  y una masa de aire (AM por sus siglas en inglés) de 1.5. Para este proyecto, se utilizó la metodología de encendido/apagado, como al reportada por Mistry y col. [80], bajo periodos de 10 segundos hasta completar 2 minutos.

### **4.3. Evaluación de Impactos ambientales**

Para realizar una evaluación de impactos ambientales de los procesos involucrados en el desarrollo de una celda fotovoltaica, cuyo sustrato fue sintetizado partiendo de residuos de vidrio de paneles fotovoltaicos de este proyecto, se optó por utilizar la metodología de análisis de ciclo de vida (ACV). Esta herramienta ha sido desarrollada para identificar y medir los impactos ambientales de un producto, comprendiendo las actividades de extracción de la materia prima, manufactura, uso del producto, reciclaje y disposición final al terminar su vida útil. Sin embargo, para los fines de este proyecto, la evaluación de los impactos ambientales fue delimitada a los procesos que se llevaron a cabo en la parte experimental de este trabajo para sintetizar dicha celda fotovoltaica.

#### **4.3.1. Delimitaciones del estudio**

##### **4.3.1.1 Delimitación del sistema**

Para este estudio se delimitó el análisis de impactos ambientales con base a las dimensiones trabajadas en este proyecto. Se definió la unidad funcional, como una celda solar con un área de  $2.54 \text{ cm}^2$  y un espesor de 3 mm, con configuración Vidrio/FTO/CdS/CuAlS<sub>2</sub>/Mo siendo el vidrio (3.05 g) producido a partir de residuos vítreos de paneles solares y otros residuos: Estas dimensiones de masa y área corresponden al tamaño de los sustratos vitreos que se obtuvieron durante los procesos de síntesis en la parte experimental de este proyecto, como se especifica en el apartado 5.3.1.1. Así también, el flujo de referencia es 3.05 gr de vidrio producido a partir de residuos de vidrio de paneles solares y otros materiales de rechazo, anteriormente denominado como VAD.

La Figura 19 representa el proceso general de la síntesis de la celda fotovoltaica a partir de residuos que se llevó a cabo en la parte experimental de

este trabajo, los cuales fueron analizados en este estudio de impactos ambientales.

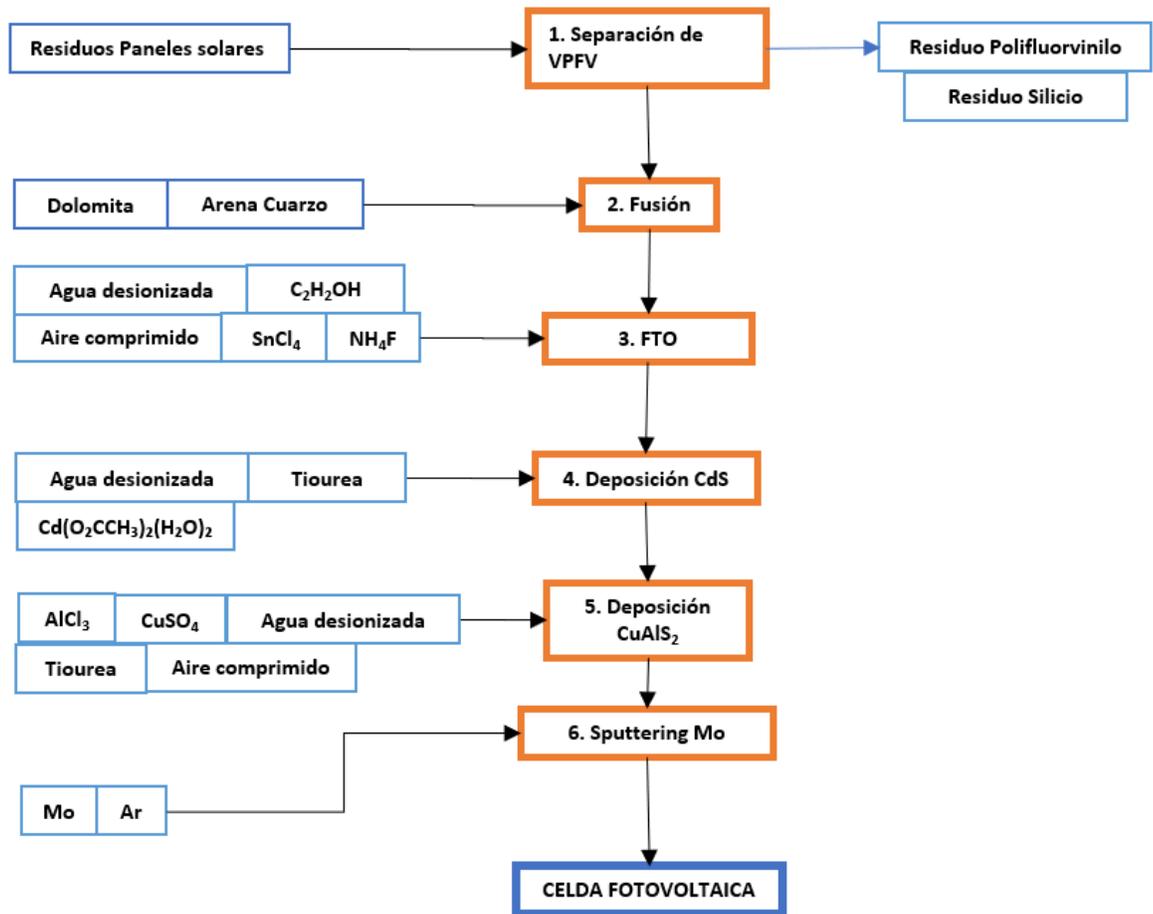


Figura 19. Esquema de la elaboración de la celda fotovoltaica.

A continuación, se describen cada una de las etapas involucradas en el proceso del desarrollo de la celda fotovoltaica:

1) Separación de VPFV. Esta etapa se describe en el punto 4.1.1, consiste en la separación del vidrio del resto de los componentes presentes en los residuos de paneles solares. Para lograr dicha separación, se realizaron diversos

tratamientos térmicos, así como separaciones manuales de cada uno de los componentes.

2) Fusión. Esta etapa consiste en la síntesis del sustrato a partir de los residuos vitreos obtenidos en la etapa de Fusión junto con otros componentes como la dolomita y la arena de cuarzo. Este proceso se describe en el punto 4.1.2.1. y en él se involucra la preparación y la fusión del lote y la producción del sustrato vítreo.

3) Deposición de FTO. Esta etapa se describe en el apartado 4.1.3.1 de este trabajo. Consiste en la deposición de óxido de estaño dopado con flúor sobre el sustrato obtenido en la etapa de Fusión. Para lograrlo, se realiza la preparación de la solución precursora, y la deposición de esta en el sustrato por medio de aspersión pirolítica.

4) Deposición de CdS. En esta etapa (descrita en la sección 4.1.3.3.1) se engloba la deposición por baño químico de CdS realizada sobre el sustrato con FTO obtenido en la etapa de deposición de FTO. Tanto la preparación de la solución precursora como el proceso de deposición realizado se involucran en esta etapa.

5) Deposición de  $\text{CuAlS}_2$ . (sección 4.1.3.3.2) Se llevó a cabo la deposición de  $\text{CuAlS}_2$  sobre el sustrato con FTO y CdS obtenido en la etapa de deposición de CdS por medio de aspersión pirolítica. Esto se logra por medio de la preparación de la solución precursora, así como su deposición por medio de aspersión pirolítica.

6) Deposición de molibdeno. (sección 4.1.3.3.3) Esta etapa consiste en la deposición de Molibdeno sobre el sustrato obtenido en la etapa de deposición de  $\text{CuAlS}_2$  por medio del proceso de pulverización catódica. Esta se consiste primeramente en la ionización de los átomos de argón (Ar), al chocar éstos con el blanco de molibdeno, subsecuentemente, los iones son depositados en el sustrato por atracción electrostática.

#### **4.3.1.2 Límites geográficos y temporales**

El proceso de síntesis de la celda fotovoltaica a nivel laboratorio se llevó a cabo en el estado de Nuevo León, localizado en el Norte de México y el suministro de electricidad es proveniente de la red pública de la Comisión Federal de Electricidad de México, además los materiales y reactivos utilizados se encontraron disponibles dentro de las instalaciones del laboratorio. Por lo que este estudio de impactos ambientales se considera válido para esta zona del país.

Por su parte, El proceso de la elaboración de la celda fotovoltaica ocurrió durante los años 2020 y 2022, tiempo que corresponde a la duración del presente proyecto. Sin embargo, los datos relacionados a los impactos ambientales de la electricidad generada y comercializada por la CFE fueron recopilados durante el 2016, de acuerdo con la base de datos utilizada. Por lo que se deben considerar la incertidumbre relacionada a los impactos ambientales relacionados a este flujo, principalmente a los cambios en las tecnologías de producción de energía eléctrica que se presentaron durante este periodo de tiempo.

#### **4.3.2 Categorías de Impacto analizadas**

Las categorías de impacto analizadas fueron seleccionadas en base al análisis de los antecedentes bibliográficos de análisis de impactos ambientales en ventanas de capa fina, [81]. Las categorías de impacto relevantes en la producción de celdas solares de capa fina son las siguientes:

##### **4.3.2.1 Calentamiento global**

El calentamiento global se refiere al aumento gradual de la temperatura promedio de la Tierra, tanto en la superficie terrestre como en la atmósfera, esto debido al aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI)

en la atmósfera[82]. Estos gases, tienen la capacidad de absorber y emitir radiación infrarroja. Algunos de los gases de efecto invernadero más comunes son: dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ), óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC), hexafluoruro de azufre ( $\text{SF}_6$ ) y el vapor de agua. Generalmente, la métrica del calentamiento global para un proceso estudiado se basa en la emanación de los GEI y su contribución en el calentamiento global, generalmente medida en Kg de  $\text{CO}_2$  equivalente (Kg  $\text{CO}_2$  eq), ya que el  $\text{CO}_2$  es el gas de referencia.

En el caso particular de la producción de celdas de capa fina. la emanación de gases de efecto invernadero como  $\text{CO}_2$  y  $\text{NO}_x$  se da tanto en los procesos de deposición de las capas finas, así como en la fabricación del sustrato vitreo, ya que, durante su síntesis, se da la descarbonatación de materias primas utilizadas para la producción del vidrio sódico cálcico[39]. Un factor de interés para el análisis del calentamiento global en el desarrollo de estas tecnologías es el consumo de energía, particularmente, la energía eléctrica utilizada y la fuente de generación de esta. Para este análisis, se utilizó el método ReCiPe para estimar el calentamiento global y se reportó en kg  $\text{CO}_2$  eq.

#### **4.3.2.2 Acidificación**

La acidificación consiste en el proceso en el cual se produce una disminución en el pH del suelo o el agua de un ecosistema. Este fenómeno es causado por la emisión de gases ácidos a la atmósfera o la deposición de contaminantes ácidos en el suelo y el agua. La acidificación del suelo puede afectar la disponibilidad de nutrientes para las plantas y alterar la composición de la flora y fauna del ecosistema. Por su parte, la acidificación de los ecosistemas acuáticos puede afectar la vida acuática, disminuyendo la población de organismos como peces e invertebrados[83]. Los principales agentes acidificantes son las emisiones de dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) y óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) provenientes de la quema de combustibles fósiles. Estos compuestos se convierten en ácidos cuando reaccionan con el agua en la atmósfera, formando

lluvia ácida que puede depositarse en el suelo y los cuerpos de agua, contribuyendo así a la acidificación[84].

En el caso particular del desarrollo de ventanas y celdas solares de capa fina, la acidificación puede estar relacionada con emisiones de gases ácidos como  $\text{SO}_2$  y  $\text{NO}_x$  durante los procesos de fabricación, así como la generación de residuos ácidos[22]. En este análisis por medio del método ReCiPe, la acidificación se cuantificó en kilogramos de dióxido de azufre equivalentes (kg  $\text{SO}_2$  eq.)

#### **4.3.2.3 Eutrofización**

La eutrofización es el proceso en el cual un cuerpo de agua, (por ejemplo, un lago), se enriquece excesivamente con nutrientes como el nitrógeno y el fósforo, lo cual estimula el crecimiento desmedido de algas, lo cual puede tener efectos en el ecosistema acuático, como la disminución de oxígeno disuelto en el agua, el aumento de la turbidez del agua y consecuente obstrucción de la luz solar y la alteración de la cadena alimentaria. Esto teniendo como consecuencia la muerte de especies acuáticas, así como la modificación de las características físicas y químicas del agua.[84]

En el caso particular de la fabricación de las ventanas fotovoltaicas de capa fina, se asocia la liberación de agentes eutrofizantes al aire y al agua durante los procesos de síntesis y deposición de los materiales semiconductores [59], particularmente por el uso de nitratos y sulfatos [66,68,85] como reactivos. Para este análisis, se reportó la eutrofización en Kilogramos de fosforo equivalente (kg P eq.) para la eutrofización terrestre y en kilogramos de nitrógeno equivalente (kg N eq) para la marina.

#### **4.3.2.4 Ecotoxicidad**

La ecotoxicidad se refiere a la capacidad de una sustancia para causar efectos adversos en los organismos y en los ecosistemas en general. Estos

efectos pueden incluir daños en la salud de los organismos, reducción en la reproducción, mutaciones genéticas. Esta se puede definir por medio de cuatro factores clave: La concentración de la sustancia en un medio ambiente, la exposición del ecosistema a la sustancia, el efecto adverso que la sustancia puede tener en los organismos, y el daño al ecosistema en un cambio de población del ecosistema integrado en el tiempo y el espacio[86].

En el caso particular de las ventanas de capa fina, su ecotoxicidad está directamente relacionada principalmente por el uso de materiales como cadmio, indio, galio y telurio, y su posible daño a los ecosistemas por medio de generación de residuos o emisiones que contengan dichos elementos[22].

Para el análisis de impactos ambientales de este proyecto, se utilizará el método ReCiPe el cual evalúa los diferentes tipos de ecotoxicidad de manera individual: Terrestre, marina y de agua dulce, y se reportaron en kilogramos de 1,4-diclorobenceno equivalente (kg 1,4-DCB eq.)

#### **4.3.2.5 Toxicidad humana**

La toxicidad humana se refiere a la capacidad de una sustancia para causar efectos adversos en la salud humana una vez esta entre en contacto con este por cualquiera de las vías de exposición (inhalación, ingesta, contacto dérmico o por medio de mucosas)[53].

Para el caso del desarrollo de ventanas fotovoltaicas de capa fina, la toxicidad humana está relacionada con la exposición a las sustancias con potencial tóxico durante el proceso de fabricación, principalmente en los procesos de deposición de las capas finas, así también durante el manejo y disposición de residuos y emisiones atmosféricas[22].

Para el análisis de impactos ambientales de este proyecto, se utilizará el método ReCiPe el cual evalúa dos tipos de toxicidad humana: cancerígena y no cancerígena. ambas medidas en kg 1,4-DCB eq.

### **4.3.3. Datos Utilizados**

#### **4.3.3.1 Criterios de corte**

El presente análisis de impacto ambientales es un análisis “Puerta a Puerta”, es decir se analizan los procesos que se llevaron a cabo a nivel laboratorio para desarrollar la celda fotovoltaica, para este caso en particular se tomaron en cuenta los siguientes criterios:

- No se contabilizaron los flujos relacionados al material y equipo de laboratorio utilizado durante el desarrollo de la celda fotovoltaica que no es exclusivo para el desarrollo del presente proyecto y que será de utilidad para futuros proyectos que se lleven a cabo en el laboratorio de Materiales III de la Facultad de Ciencias Químicas.
- No se contabilizó el consumo de energía asociado a pérdidas por ineficiencia de los equipos: Este consumo está asociado a estados de los equipos utilizados que lo alejan de la eficiencia, tal es el caso de pérdidas de calor por falta de aislamiento o desgaste de las resistencias de las muflas o planchas de calentamiento. Por lo que, para calcular la energía involucrada en cada una de las etapas que involucren tratamientos térmicos, se utilizó directamente los balances de energía.
- Se asumió que toda la energía utilizada en el proceso del desarrollo de la celda fotovoltaica es proveniente de la red eléctrica de la CFE. El consumo de energía de las planchas de calentamiento, muflas y equipos como la pulverización catódica, están conectados a la red eléctrica nacional.
- No se contabilizó los impactos ambientales asociados al transporte, esto debido a que todos los materiales, equipos y reactivos, se encontraron disponibles dentro del laboratorio en el cual se realizó la síntesis de la celda fotovoltaica.

- Debido a que en este proyecto no se realizaron estudios detallados sobre la producción de electricidad fotovoltaica por medio de la celda fotovoltaica, este estudio de impactos ambientales se concentra en la síntesis de la celda fotovoltaica y no se contabilizan impactos ambientales mitigados asociados a la producción de electricidad a partir de esta.
- Debido a los alcances de este proyecto, los escenarios de reciclaje de residuos generados, uso del producto, disposición final o reciclaje al término de su vida útil no se contemplaron dentro de este estudio.

#### **4.3.3.2 Calidad de datos**

Para este estudio se obtuvieron datos medidos y calculados en base a los resultados experimentales de este proyecto. Los impactos de las entradas relacionadas a la energía eléctrica y los reactivos utilizados para la elaboración de la celda fotovoltaica fueron obtenidos por medio de la base de datos Ecoivent 3.0.

Las entradas de masa referentes a materiales y reactivos en cada etapa fueron obtenidas por medio de mediciones gravimétricas. Por otro lado, se contaron con datos calculados en base a las mediciones gravimétricas: Se realizaron balances de materia, involucrando las reacciones químicas ocurridas, para calcular las emanaciones generadas en cada etapa del proceso. Así como balances de energía para calcular la cantidad de energía requerida en cada una de las etapas del proceso. Por su parte el consumo de energía en el caso de la pulverización catódica fue calculada en base a la potencia del equipo. Por su parte, para estimar los impactos ambientales relacionados con materiales y reactivos utilizados en este estudio, así como la energía eléctrica utilizada, proveniente de la red eléctrica nacional mexicana (Comisión Federal de Electricidad), se utilizó la base de datos Ecoivent 3.0. Para este proyecto se utilizó el programa SimaPro 9.1.1.7 y la base de datos Ecoivent 3.0, Para realizar el análisis de impactos ambientales se utilizó el método ReCiPe 2015 “midpoint”, en

el cual se realiza el análisis de efectos ambientales intermedios, es decir las categorías más cercanas a la intervención proceso-ambiental.

#### **4.3.3.3 Procedimiento para las recopilaciones de datos y/o estimaciones:**

A continuación, se describen las consideraciones tomadas para cada una de las etapas analizadas. En general, para las etapas 1,2,3,4 y 5, se utilizó el modelo de Moore y Sharp [39,87] para calcular la energía requerida para elevar la temperatura de las formulaciones vítreas involucradas en el proceso. Por su parte, para el resto de los materiales, la energía para llevarlos a una determinada temperatura se determinó por medio del calor específico para cada uno de los materiales involucrados, el cual fue obtenido de literatura [88].

1) Separación del vidrio fotovoltaico: En esta etapa se cuantificó la cantidad de calor necesaria para realizar la separación del vidrio del resto de los componentes, es decir, el calor latente necesario para llevar los diversos materiales del panel solar hasta los 220°C, la cual es la temperatura de transición vítrea del EVA [60]. Para este primer calentamiento, se consideraron los siguientes materiales: VPFV, sílice cristalina, cobre, EVA y Tedlar®, en las proporciones medidas en la etapa experimental de separación del VPFV (4.1.1).

Después se cuantificó la cantidad de calor necesaria para llegar a los 550°C, temperatura en la cual ocurre la evaporación del EVA; en esta etapa se consideraron los materiales de EVA, sílice y VPFV en las proporciones medidas en la etapa experimental de separación del VPFV (4.1.1). los calores de combustión ocurridos en la reacción de degradación del EVA fueron considerados. Las emanaciones de gases producidos por la reacción de degradación del EVA, como ácido acético ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ),  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ , fueron calculadas por medio de balances de masa.

2) Fusión. Para esta etapa se realizaron mediciones gravimétricas de las entradas del vidrio de residuos de paneles fotovoltaicos, la dolomita y la arena de

cuarzo utilizados para producir el lote a fundir. La energía utilizada para la fusión del lote y la producción del sustrato fue calculada por medio de balances de energía, en los cuales se involucraron los calores sensibles de cada uno de los componentes del batch, así como los calores de reacción de cada una de las reacciones de descarbonatación. Las emanaciones de  $\text{CO}_2$  procedentes de las reacciones de descarbonatación de  $\text{MgCO}_3$  y  $\text{CaCO}_3$  contenidos en la dolomita utilizada, fueron calculadas por medio de balances de materia.

3) Deposición de FTO. Para esta etapa, se consideró el calor necesario para llevar al sustrato vítreo a la temperatura requerida ( $500^\circ\text{C}$ ), así también como las entradas de los reactivos necesarios (especificados en la sección 4.1.3.1), las cantidades calculadas para producir el recubrimiento en las dimensiones requeridas (600 nm de espesor) y las emanaciones producidas en la reacción de síntesis del FTO a partir de los reactivos fueron calculadas por medio de balances de materia. Debido a que la base de datos no cuenta con el inventario del cloruro de estaño, se incluyeron los balances de materia y energía para producir dicho compuesto a partir de ácido clorhídrico y estaño. La cantidad de aire utilizada durante el proceso de aspersion pirolítica fue calculada en base al flujo de aire utilizado.

4) Deposición de CdS. Al igual que en la etapa anterior, se calculó el calor necesario para llevar tanto al sustrato vítreo, con la película de FTO depositada, a la temperatura necesaria para la deposición por baño químico por medio de balance de energía; las entradas a considerar fueron los reactivos necesarios para la producción del CdS, (sección 4.1.3.3). Las emanaciones producidas en la reacción de síntesis del CdS a partir de los reactivos fueron calculadas por balance de materia.

5) Deposición de  $\text{CuAlS}_2$ . Se consideró el calor necesario para llevar tanto al sustrato vítreo, como la película de FTO y CdS depositadas, a la temperatura necesaria para la deposición por aspersion pirolítica; las entradas a considerar fueron los reactivos necesarios para la producción del  $\text{CuAlS}_2$  (sección 4.1.3.3).

Las emanaciones producidas en la reacción de síntesis del  $\text{CuAlS}_2$  a partir de los reactivos fueron calculadas por medio de balance de materia.

6) Deposición de molibdeno. El argón consumido para llevar a cabo el fenómeno explicado en el apartado 4.1.3.3.3, fue calculado en base al flujo de argón utilizado en el proceso. El molibdeno depositado sobre el sustrato obtenido en la etapa 5, fue estimado en base a las dimensiones de la capa de molibdeno depositada. La energía requerida para la pulverización catódica fue estimada en base a la potencia del equipo. La emanación de argón utilizado después del proceso de pulverización es igual al argón consumido durante el proceso.

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1 Extracción del vidrio de los paneles solares

En la Figura 20 se ilustran el proceso de recuperación del VPFV, así como el porcentaje de recuperación del vidrio y subproductos. Se recuperó un 80% de VPFV, lo cual es acorde a lo indicado por la IRENA [2], otros subproductos como los residuos de celdas de silicio, así como los residuos de Tedlar®, los cuales pueden ser destinados a procesos pirolíticos [89]. También es importante resaltar la materia volátil perdida en dicho proceso (3.54% en total), la cual corresponde a la descomposición y evaporación del EVA durante los tratamientos térmicos realizados, de acuerdo con lo reportado por McGarry y col. [60]

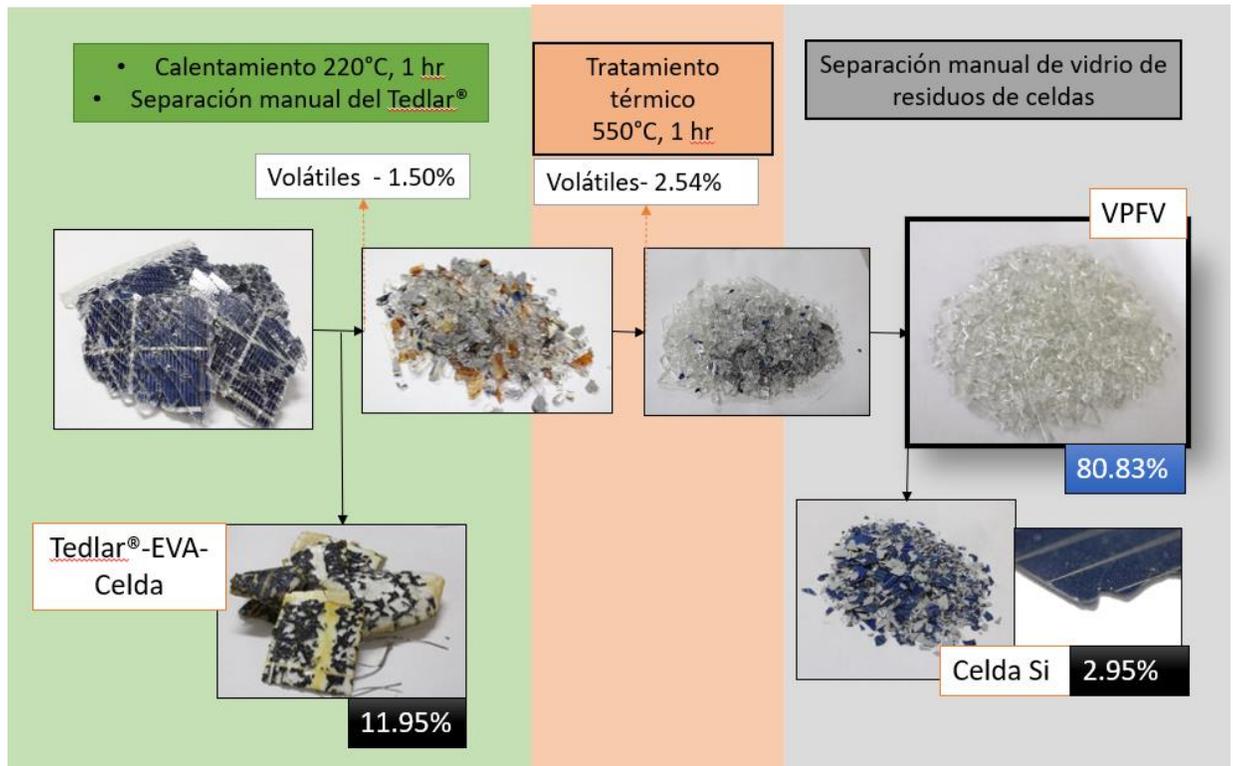


Figura 20. Proceso de recuperación de VPFV.

## 5.2 Caracterización del vidrio de paneles solares

### 5.2.1 Difracción de rayos X

En la Figura 21 se presenta el patrón de difracción correspondiente al VPFV. Se puede observar el patrón amorfo característico de los materiales vítreos, por lo que por medio de esta técnica no se confirma la presencia de contaminantes en fase cristalina en el vidrio recuperado a un porcentaje mayor al 1%, el cual es el límite de detección de fases cristalinas presentes en una matriz vítrea[90].

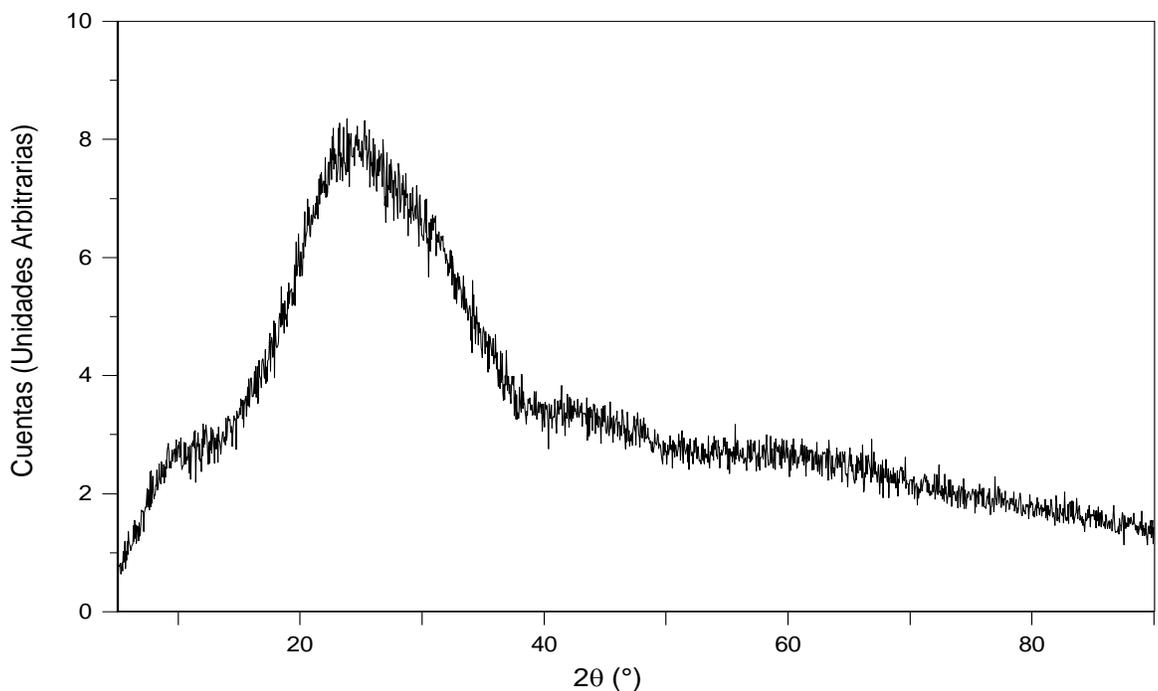


Figura 21. Patrón de difracción de VPFV.

### 5.2.2 Fluorescencia de rayos X

En la Tabla III se indica la composición del VPFV. Como se puede observar, los principales componentes son el SiO<sub>2</sub>, presente en un 71.63%, el Na<sub>2</sub>O, en un 14.20% y el CaO en un 8.98% siendo similares a una composición de vidrio sódico cálcico [91,92] cuyo rango de composición (70–75% en peso de SiO<sub>2</sub>, 12–16% en peso de Na<sub>2</sub>O y 10–15% en peso de CaO); sin embargo, el contenido de Na<sub>2</sub>O en VPFV fue 0.6% mayor, el de SiO<sub>2</sub> fue 1.13% más alto, mientras que el del CaO fue 0.84% más bajo que en el SLG.

TABLA III. ANÁLISIS FRX DE VPFV.

| <b>Compuesto</b>               | <b>% Masa</b> |
|--------------------------------|---------------|
| SiO <sub>2</sub>               | 71.63         |
| Na <sub>2</sub> O              | 14.20         |
| CaO                            | 8.98          |
| MgO                            | 3.58          |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1.13          |
| SO <sub>3</sub>                | 0.17          |
| PPC*                           | 0.29          |
| Total                          | 99.98         |

\*Pérdidas por calcinación

### 5.2.3 Estabilidad térmica

En la Figura 22 se presenta el análisis térmico diferencial del VPFV. Se observa la temperatura de transición vítrea a 603°C, así como un evento

endotérmico a 800°C, el cual se asocia a la fusión del vidrio; estos eventos térmicos son típicos del vidrio sódico cálcico a temperaturas similares.

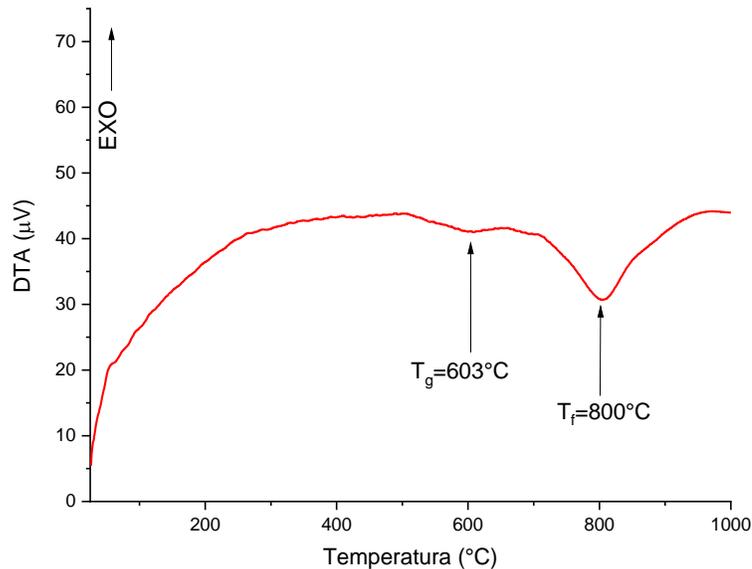


Figura 22. DTA de VPFV.

### 5.3. Vidrio transparente a partir de residuos (VAD)

#### 5.3.1 Preparación de sustratos vítreos

##### 5.3.1.1 Formulación

En la Tabla IV se especifican los residuos y porcentajes utilizados para la formulación del vidrio transparente a partir de residuos, denominado “VAD”. Esta formulación fue realizada con la intención de disminuir el porcentaje de Na<sub>2</sub>O a un 7% aproximadamente y observar un posible efecto en las propiedades estructurales y eléctricas de los materiales depositados en el sustrato, en comparación con el vidrio sódico cálcico comercial (15% Na<sub>2</sub>O). Otro objetivo de

dicha formulación fue la incorporación de materias primas provenientes de la industria de la construcción, las cuales no cumplen con las especificaciones requeridas por sus respectivos procesos productivos, sin embargo, por su composición química, particularmente su alto contenido de  $\text{SiO}_2$  (arena de cuarzo), y  $\text{CaCO}_3$  (dolomita), son de utilidad para la elaboración de sustratos vítreos a partir de residuos.

TABLA IV. FORMULACIÓN DE VAD.

| <b>Residuos</b> | <b>% Peso usado</b> |
|-----------------|---------------------|
| VPFV            | 48.08               |
| Arena de Cuarzo | 36.06               |
| Dolomita        | 15.86               |

En la Figura 23 se presentan imágenes de los sustratos vítreos sintetizados VPFV y VAD, siendo estos de 3 mm de espesor y de un área de 2.54  $\text{cm}^2$ .

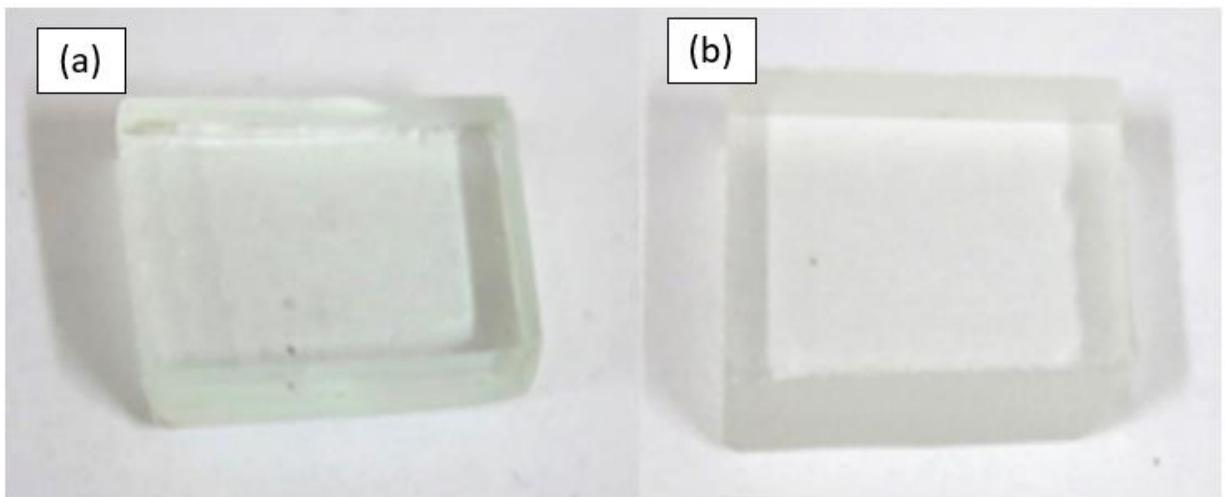


Figura 23. Imágenes de los sustratos vítreos sintetizados (a) VPFV y (b) VAD.

### 5.3.1.2 FRX

En la Tabla V, se presenta el análisis por FRX de dicho material. Se puede observar que el SiO<sub>2</sub> en esta composición es alrededor de un 71% similar al del VPFV, el contenido de CaO aumentó a 10.68% y Na<sub>2</sub>O disminuyó a 7.18%, por lo que esta formulación de vidrio preparada con otros materiales de desecho presentó menos proporción del ion alcalino Na<sup>+</sup> que la encontrada en el vidrio sódico cálcico [93] .

TABLA V. ANÁLISIS FRX DEL SUSTRATO VAD.

| <b>Compuesto</b>               | <b>% Masa</b> |
|--------------------------------|---------------|
| SiO <sub>2</sub>               | 70.9          |
| CaO                            | 10.68         |
| Na <sub>2</sub> O              | 7.18          |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 5.65          |
| MgO                            | 4.91          |
| K <sub>2</sub> O               | 0.41          |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.27          |
| PPC*                           | 0.44          |
| Total                          | 100.46        |
| *Pérdidas                      | por           |
| calcinación                    |               |

### 5.3.1.3 DTA

En la Figura 24 se presenta el análisis por DTA para el vidrio sintetizado, se puede observar una T<sub>g</sub> a los 618°C y una temperatura de fusión (T<sub>m</sub>) a los 874°C. Los aumentos de los puntos transición vítrea y fusión de VAD con

respecto al VPFV son debido a la incorporación de  $\text{SiO}_2$  de arena de cuarzo y de  $\text{CaO}$  proveniente de la dolomita[39,94], y la consecuente disminución en la proporción del  $\text{Na}^+$  en la composición del material, ya que este ion juega un papel importante en el comportamiento reológico y su dependencia con la temperatura del vidrio [39,42].

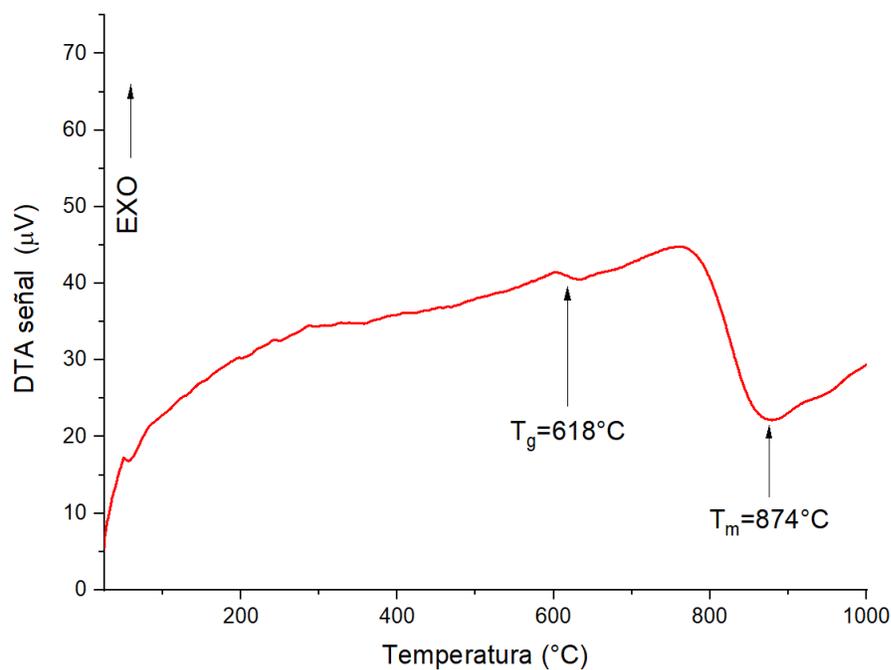


Figura 24. Análisis DTA de VAD.

#### 5.3.1.4 Transmitancia

En la Figura 25 se observa el análisis de transmitancia desde 350 hasta 1000 nm de los sustratos VAD, VPFV y SLG, la transmitancia promedio en la región analizada para los tres vidrios es de  $90.15 \pm 0.98 \%$  para el VPFV y  $83.60 \pm 1.52 \%$  para el vidrio VAD, por otro lado, en el SLG, la transmitancia es de alrededor de 90% para la región de 425 a 525 nm, y decrece hasta 78% a los

1000 nm, la transmitancia promedio para este vidrio es de  $84.76 \pm 3.60\%$  para toda la región analizada. Se puede observar que la transmitancia de los sustratos VAD y SLG se encuentra alrededor de un 85%, y en el caso particular del VAD, este se encuentra estable en toda la región del UV-VIS.

La transmitancia en VAD fue comparable con la del SLG, por otro lado, la transmitancia de VPFV fue mayor que la de VAD y la del vidrio sódico cálcico comercial. Este fenómeno ocurre debido al contenido de hierro en los vidrios SLG y VAD, que impacta en la absorbancia del vidrio [77,78], y por lo tanto en la fracción de luz transmitida a través del sustrato. Según Vogt y col. [78] en SLG el contenido de hierro es de 0.093 %, mientras que el del vidrio destinado a la aplicación fotovoltaica es de alrededor de 0.02%. Los sustratos de vidrio producidos a partir de diferentes residuos exhibieron una transmitancia estable del 80% similar a la del SLG comercial [77,78], y por lo tanto en la fracción de luz transmitida a través del sustrato.

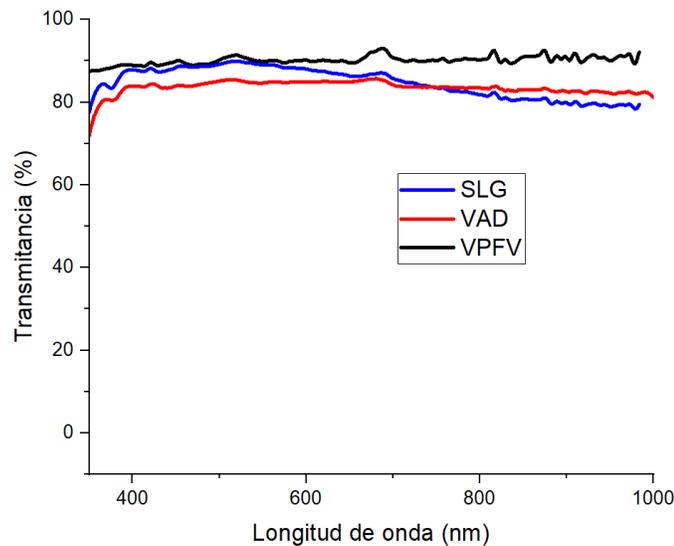
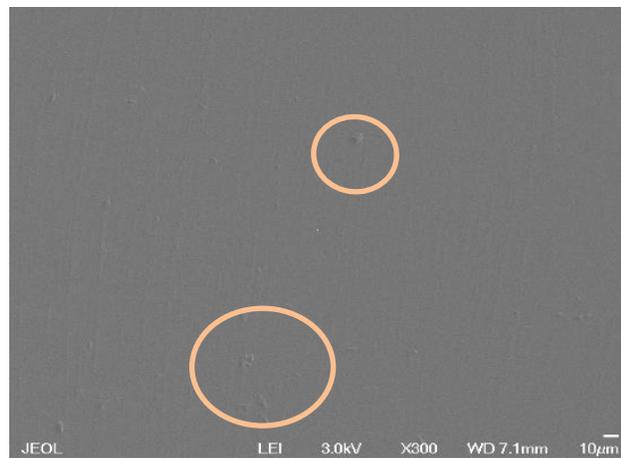


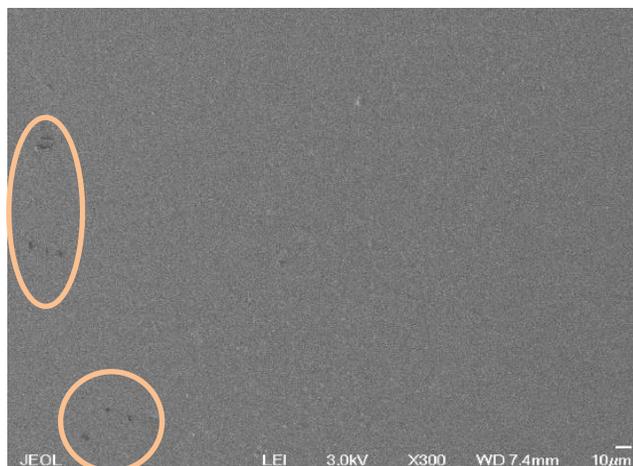
Figura 25. Transmitancia UV-VIS de VPFV, VAD y SLG.

### 5.3.1.5 SEM

En la Figura 26 se aprecian las micrografías de la superficie de los sustratos sintetizados. Se pueden observar defectos ocasionados por el tratamiento de pulido (señalados dentro de los círculos color naranja), sin embargo, no se observa la formación de cristales o impurezas mayores en los sustratos vítreos. Por otro lado, no se observan poros ocasionados por la presencia de aire incrustado (burbujas) en la superficie de los sustratos, lo cual indica que, con el proceso de afinado realizado a la composición durante la elaboración del sustrato vítreo, se logró la remoción de gases del cuerpo vítreo.



(a)



(b)

Figura 26. Imágenes SEM de (a) VAD (b) VPFV.

### 5.3.2 Deposiciones de FTO

La Figura 27 ilustra los patrones de DRX del FTO depositado en sustratos de vidrio SLG, VPFV y VAD. La única fase cristalina detectada fue la estructura tetragonal  $\text{SnO}_2$  ( $a=4,7358 \text{ \AA}$ ,  $c=3,1873 \text{ \AA}$ ) [JCPDS: 00-210-4754] con la orientación principal en el plano (200). Los planos (110) y (310) se observan con menor intensidad, mientras que otros planos como (101), (211) y (301) apenas se muestran en el patrón de difracción. La cristalización de FTO fue mayor en el sustrato VAD, mientras que el sustrato VPFV presentó el grado de cristalización menor para el FTO. Además, se observa que en el caso del VAD, la orientación en el plano (200) se presenta con mayor intensidad con respecto al resto de los planos; por el contrario en el caso de la muestra VPFV, la orientación en otros planos diferentes al plano (200) es mayor con respecto al resto de las muestras, por lo que la observación de dicha orientación de los planos, nos indica el grado de ordenamiento de los cristales de FTO en la superficie depositada en cada uno de los sustratos.

Las resistencias laminares del FTO depositado se muestran en la Tabla VI. En estos resultados, se muestra que la resistencia de la hoja en VAD fue la menor en comparación con la de los sustratos SLG y VPFV; este material, al presentar la menor resistencia laminar, indica que este material puede ser más adecuado para conducir los electrones producidos por el efecto fotovoltaico al sistema eléctrico.

Las micrografías SEM del FTO depositado en los sustratos VPFV, VAD y SLG se muestran en la Figura 28. Los espesores de las películas fueron de 1126, 1145 y 1111 nm respectivamente, siendo más definidos los granos de FTO en el vidrio VAD en comparación con los del VPFV y más ordenados en comparación con los del vidrio SLG; lo cual concuerda con los resultados de DRX tanto en el grado de cristalización, como en el grado de la orientación en el plano principal (200).

En general, se observa para estas tres muestras, que existe una relación inversamente proporcional entre su grado de cristalización y ordenamiento de los planos, con su resistencia laminar, lo cual indica que, para este óxido transparente conductor, a mayor orden de los cristales que conforman la película conductora, se facilitará la conducción de los electrones.

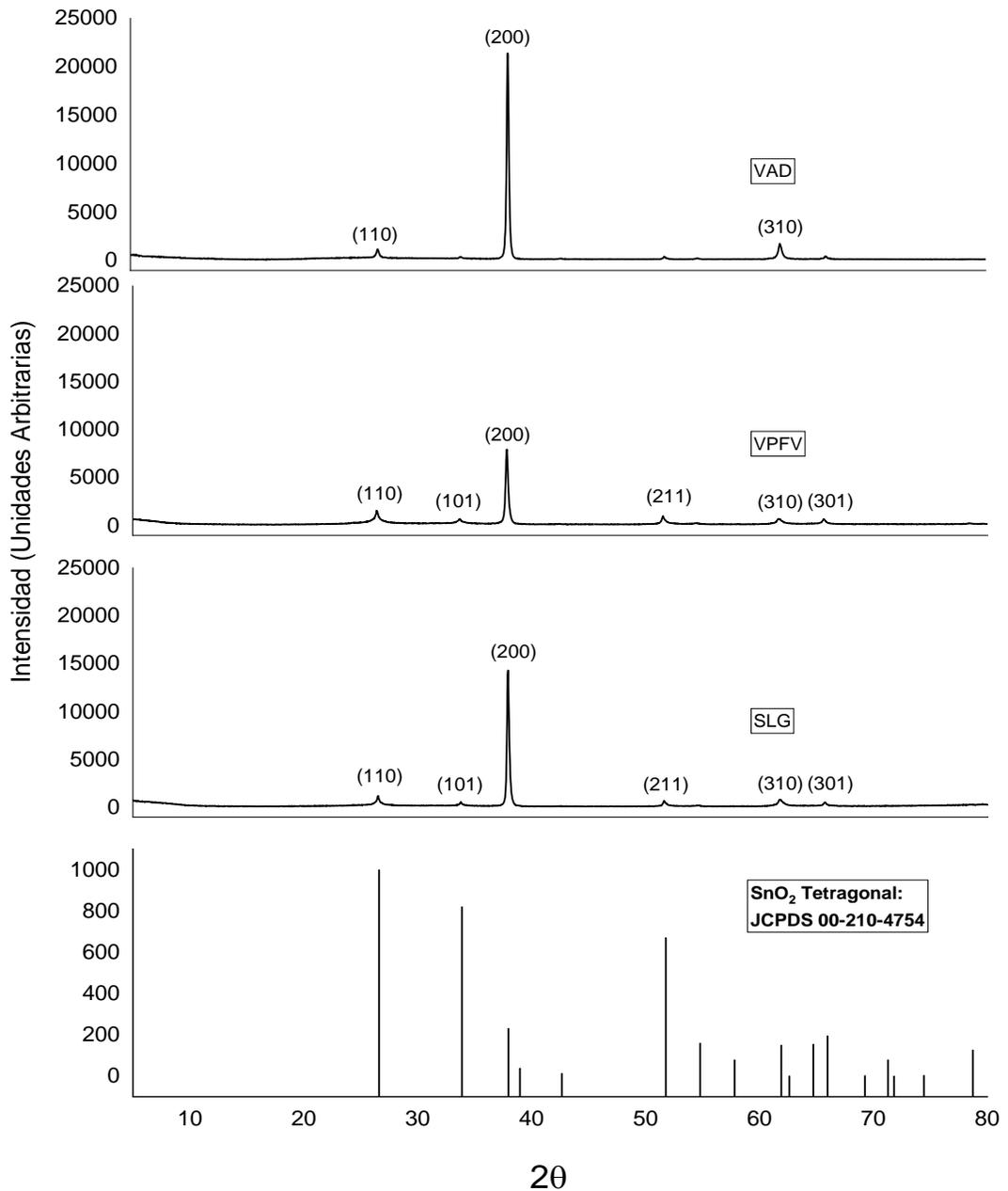
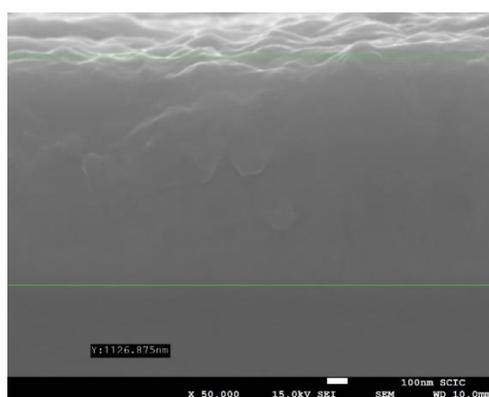


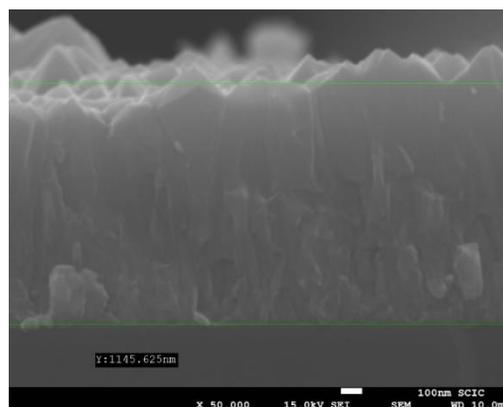
Figura 27. DRX de FTO depositado en vidrio comercial, VPFV y VAD.

TABLA VI. RESISTENCIAS LAMINARES DE LAS MUESTRAS A PARTIR DE RESIDUOS.

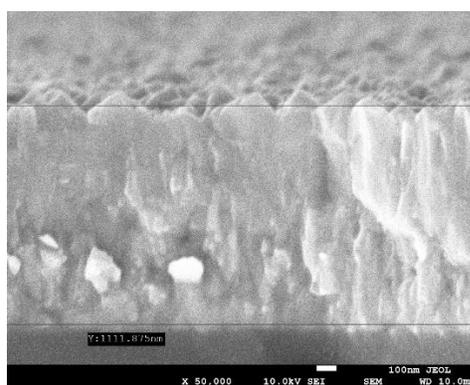
| Muestra | Resistencia Laminar                       |
|---------|---|
| SLG     | $8.14 \pm 3.61 \text{ } \Omega/\text{sq}$ |
| VPFV    | $9.07 \pm 4.03 \text{ } \Omega/\text{sq}$ |
| VAD     | $7.84 \pm 3.11 \text{ } \Omega/\text{sq}$ |



(a)



(b)



(c)

Figura 28. Imágenes SEM del FTO depositado sobre los sustratos vítreos:

(a) VPFV; (b) VAD (c) SLG.

### 5.3.3 Celda fotovoltaica

Celdas fotovoltaicas con configuración FTO/CdS/CuAIS<sub>2</sub>/Mo fueron montadas utilizando tanto el sustrato VAD como un sustrato comercial SLG para ser utilizado como referencia. En la Figura 29 se muestra la imagen de la celda fabricada a partir del sustrato VAD, la cual fue subdividida en dos módulos.

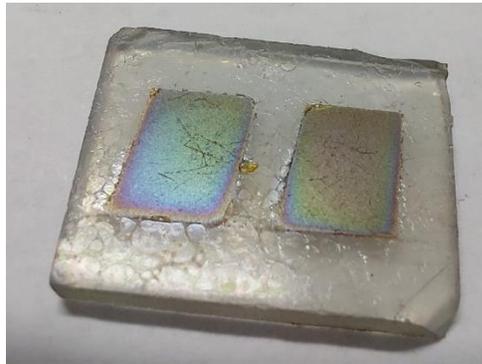


Figura 29. Celdas solares de CuAIS<sub>2</sub> sintetizadas sobre el sustrato VAD.

Las cronoamperometrías realizadas se presentan en la Figura 30, esta prueba fue realizada en cada uno de los dos módulos de las celdas montadas en cada sustrato como se observa en la Figura 29. Se observa que no existe una diferencia significativa en cuanto a la respuesta a la luz entre las celdas producidas en cada sustrato, ni entre los intervalos luz/oscuridad los cuales fueron realizados en periodos de 10 segundos.

Si bien, en las pruebas de FTO, el sustrato VAD presentó mejores resultados en cuanto a resistencia laminar eléctrica y cristalización del material, en este caso la respuesta de la celda en total no fue significativa entre ambos sustratos.

Si se toman en cuenta las composiciones de ambos sustratos, principalmente la presencia de Na<sub>2</sub>O, la cual en el vidrio VAD se presenta en un 7%, mientras que el vidrio SLG, se presenta en un 14%, una explicación a este

resultado se puede deber a la presencia del sodio proveniente del vidrio comercial incrementa la cristalinidad del  $\text{CuAlS}_2$ , esto en base a lo reportado por Barkat y col. [85]. Otro componente de la celda que se ve afectado por la presencia del sodio es el CdS, estudios como en de Mageswari y col. [95] han encontrado que la presencia de este elemento incrementa la energía de banda prohibida del semiconductor, así también se observó un impacto en la reducción del grado de cristalización del CdS.

Si bien, para este caso, la modificación de la composición del sustrato, en especial, la reducción de la presencia del  $\text{Na}_2\text{O}$  resultó positiva en el desempeño de la capa FTO, los efectos en las capas subsecuentes de la celda fotovoltaica son diversos para cada una de las capas que conforman la celda. Estudios a futuro podrían sugerir una configuración de una celda fotovoltaica cuyo desempeño se vea beneficiado por dicha modificación a la fórmula del sustrato vítreo.

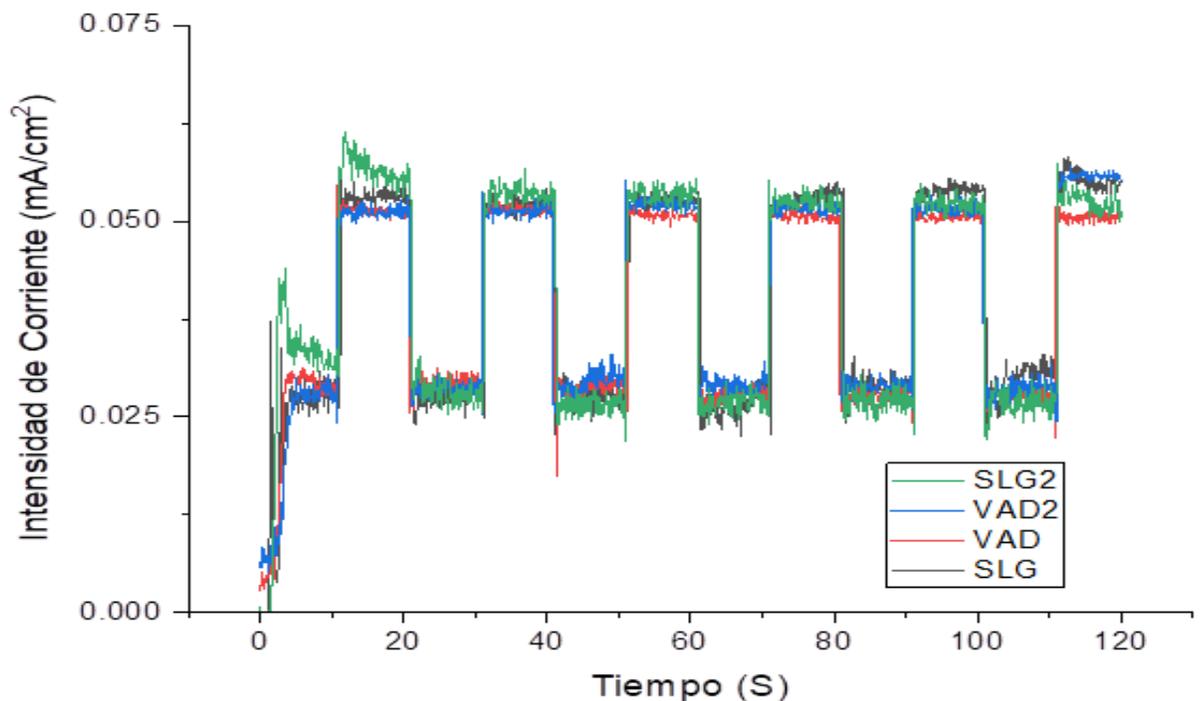


Figura 30. Cronoamperometría con diferentes ciclos de oscuridad-luz de las celdas solares sintetizadas.

### **5.3.4 Evaluación de impactos ambientales por medio de Análisis de Ciclo de Vida**

#### **5.3.4.1 Objetivo y alcance**

El Objetivo de este análisis es estimar e identificar puntos críticos relacionados a los posibles impactos ambientales del desarrollo a nivel laboratorio de una celda fotovoltaica de capa fina con configuración FTO/CdS/CuAlS<sub>2</sub>/Mo, cuyo sustrato sea elaborado a partir de residuos vítreos de paneles solares. Esto surgiendo a partir del presente proyecto de investigación, en el cual se estudió la incorporación de residuos de vidrio de paneles solares para la síntesis de sustratos vítreos destinados al desarrollo de celdas fotovoltaicas de capa fina. Además, proporcionar un punto de partida para futuros estudios de impactos ambientales en el campo del desarrollo de tecnologías fotovoltaicas de capa fina que involucren la incorporación de residuos.

La unidad funcional considerada en este análisis es una celda cuya área es de 2.54 cm<sup>2</sup> y un espesor de 3 mm, (dimensiones descritas en el apartado 5.3.1.1 de este proyecto), con configuración Vidrio/FTO/CdS/CuAlS<sub>2</sub>/Mo siendo el vidrio producido a partir de residuos vítreos de paneles solares y otros residuos. Como flujo de referencia, se tomó la masa del sustrato vítreo obtenido, el cual es de 3.05 g.

En la Figura 31 se muestra el sistema de producción de la celda fotovoltaica, y la delimitación de este para la evaluación de impactos ambientales (línea punteada morada), los cuales corresponden a los procesos llevados a cabo durante el procedimiento experimental de este proyecto. La tecnosfera se encuentra delimitada por el recuadro azul, esta se define como la esfera o ámbito de la actividad tecnológica humana, es decir, el entorno tecnológicamente modificado por el ser humano [84]. Por otro lado, la ecósfera se delimita por el recuadro verde, y de acuerdo con Savenko y col. [96] la ecósfera incluye toda la materia viva del planeta, la atmósfera hasta la termosfera, toda la hidrosfera y la parte superior de la litosfera con la capa metamórfica. Dentro del espacio de la

ecósfera, se logra un gran ciclo geológico, vinculando la biosfera y su entorno abiótico en un todo unificado y creando una forma específica de su organización estructural y funcional. Los productos evitados se encuentran señalados en color gris, corresponden a aquellos que fueron sustituidos por la implementación de la alternativa de reciclaje del vidrio de residuos de paneles fotovoltaicas propuestos en este proyecto.

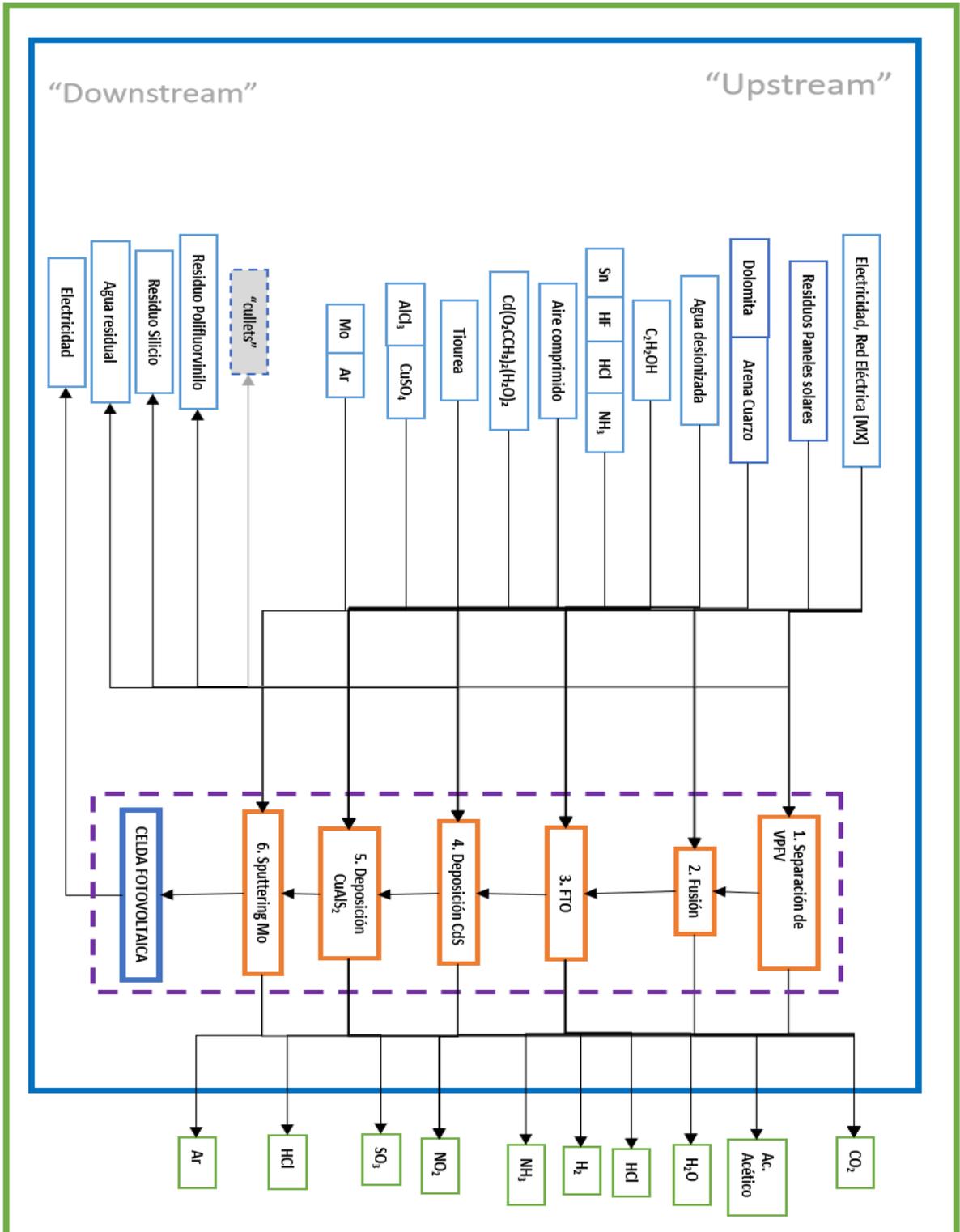


Figura 31. Sistema de producción de la celda fotovoltaica.

### 5.3.4.2. Inventario

A continuación, se presenta el inventario calculado para cada una de las etapas analizadas, este inventario fue calculado en base a los datos experimentales registrados durante el proceso de fabricación de la celda.

En la Tabla VII se presenta el inventario para la primera etapa del proceso, separación del VPFV. En esta etapa se consideró el producto evitado de “*cullets*” de vidrio. Las emanaciones y residuos fueron calculados en base al balance de materia y las reacciones químicas de descomposición implicadas en este proceso de separación del vidrio. La energía calculada corresponde al calor necesario para el tratamiento de separación para el flujo de salida indicado.

TABLA VII. INVENTARIO ETAPA 1. SEPARACIÓN DE VPFV

| <b>Flujo</b>   | <b>Nombre</b>               | <b>Cantidad</b> | <b>Unidad</b> |
|--|-----------------------------|-----------------|---------------|
| Salidas conocidas a la tecnósfera                                | VPFV                        | 1.59            | g             |
| Salidas conocidas a la tecnósfera (Productos evitados)           | “ <i>Cullets</i> ”          | 1.59            | g             |
| Entradas conocidas desde la Ecósfera (naturaleza)                | N.A.                        | N.A.            | N.A.          |
| Entradas conocidas desde la tecnósfera (materiales/combustibles) | Residuos de paneles solares | 1.97            | g             |
| Entradas conocidas desde la tecnósfera (electricidad/calor)      | Electricidad {MX} (CFE)     | 545.51          | J             |
| Emisiones al aire  | CO <sub>2</sub>             | 0.30            | g             |
|  | H <sub>2</sub> O            | 0.10            | g             |
|  | Ácido acético               | 0.08            | g             |

| <b>Flujo</b>  | <b>Nombre</b>  | <b>Cantidad</b> | <b>Unidad</b> |
|---|--|-----------------|---------------|
| Salidas conocidas a la tecnósfera (Residuos para tratamiento) | Residuo Polifluorvinilo<br>“Waste polyvinylfluoride” | 0.24            | g             |
| Flujos finales de residuos                                    | Silicio (Residuos de celda fotovoltaica)             | 0.06            | g             |

En la Tabla VIII se presenta el inventario para la etapa de fusión del vidrio, se toman en cuenta los siguientes aspectos. El producto evitado, esto debido a que el producto desarrollado en esta tapa sustituye al vidrio plano comercial, por lo que esto implicará una amortiguación en los impactos ambientales de este proceso. La electricidad fue calculada en base a la energía necesaria para someter la cantidad de materia indicada por el flujo de entrada al proceso de fusión, esto es tanto para vidrio del proceso de separación, así como las cantidades de arena y dolomita necesarios para producir el vidrio de residuos. Por su parte, las emanaciones de CO<sub>2</sub> calculadas corresponden a las reacciones de descarbonatación de la dolomita.

TABLA VIII. INVENTARIO ETAPA 2. FUSIÓN DEL VIDRIO

| <b>Flujo</b>   | <b>Nombre</b>                       | <b>Cantidad</b>      | <b>Unidad</b> |
|--|-------------------------------------|----------------------|---------------|
| Salidas conocidas a la tecnósfera (Productos)                    | Sustrato                            | 3.05                 | g             |
| Entradas conocidas desde la Ecósfera (naturaleza)                | N.A.                                | N.A.                 | N.A.          |
| Entradas conocidas desde la tecnósfera (materiales/combustibles) | VPFV<br>Dolomita<br>Arena de cuarzo | 1.56<br>0.52<br>1.19 | g<br>g<br>g   |

| <b>Flujo</b>  | <b>Nombre</b>           | <b>Cantidad</b> | <b>Unidad</b> |
|---|-------------------------|-----------------|---------------|
| Entradas conocidas desde la tecnósfera (electricidad/calor)   | Electricidad {MX} (CFE) | 5521.01         | J             |
| Emisiones al aire   | CO <sub>2</sub>         | 0.24            | g             |
| Salidas conocidas a la tecnósfera (Residuos para tratamiento) | N.A.                    | N.A.            | N.A.          |

En la Tabla IX se presenta el inventario para la etapa de deposición de FTO. En este caso, el inventario fue calculado en base a los datos experimentales, principalmente, a la capacidad del proceso para llevar a cabo el recubrimiento de varias unidades de entrada. Las emanaciones corresponden al proceso de reacción de síntesis de FTO a partir de los reactivos correspondientes. Por su parte, en esta etapa se consideró la síntesis de cloruro de estaño y fluoruro de amonio a partir de los reactivos reportados en el ecoinventario.

TABLA IX. INVENTARIO ETAPA 3. DEPOSICIÓN DE FTO

| <b>Flujo</b>   | <b>Nombre</b>  | <b>Cantidad</b> | <b>Unidad</b> |
|--|----------------|-----------------|---------------|
| Salidas conocidas a la tecnósfera (Productos)          | SUSTRATO-FTO   | 109.80          | g             |
| Salidas conocidas a la tecnósfera (Productos evitados) | N.A.           | N.A.            | N.A.          |
| Entradas conocidas desde la Ecósfera (naturaleza)      | N.A.           | N.A.            | N.A.          |
|  | Etanol         | 60.00           | g             |
|  | Agua Destilada | 20.00           | g             |

| <b>Flujo</b>   | <b>Nombre</b>             | <b>Cantidad</b> | <b>Unidad</b>   |
|--|---------------------------|-----------------|-----------------|
| Entradas conocidas desde la tecnósfera (materiales/combustibles) | Estaño                    | 5.71            | g               |
|  | Ácido Clorhídrico (30%)   | 11.00           | g               |
|  | Amoniaco                  | 2.16            | g               |
|  | Ácido fluorhídrico        | 1.17            | g               |
|  | Aire comprimido (600 KPa) | 150             | mm <sup>3</sup> |
| Entradas conocidas desde la tecnósfera (electricidad/calor)      | Electricidad {MX} (CFE)   | 70,184.16       | J               |
| Emisiones al aire  | HCl                       | 1.65            | g               |
|  | H <sub>2</sub>            | 0.09            | g               |
|  | NH <sub>3</sub>           | 0.06            | g               |
|  | CO <sub>2</sub>           | 1.30            | g               |
|  | H <sub>2</sub> O          | 1.30            | g               |
| Salidas conocidas a la tecnósfera (Residuos para tratamiento)    | N.A.                      | N.A.            | N.A.            |

En la Tabla X se presenta el inventario para la etapa de deposición de CdS. La deposición por capa química del CdS consistió básicamente en la preparación del precursor y su correspondiente aplicación a la superficie; en este caso, las unidades de entrada se procesan individualmente, por lo que el cálculo para una sola unidad de referencia fue realizado para esta etapa, considerando las diversas emanaciones ocurridas, así como el gasto energético para llevar el sustrato a la temperatura de reacción indicada. El tratamiento térmico de recocido también es considerado en esta etapa.

TABLA X. INVENTARIO ETAPA 4. DEPOSICIÓN DE CdS

| <b>Flujo</b>   | <b>Nombre</b>                 | <b>Cantidad</b> | <b>Unidad</b> |
|--|-------------------------------|-----------------|---------------|
| Salidas conocidas a la tecnósfera (Productos)                    | SUSTRATO-AZO-CdS              | 3.05            | g             |
| Salidas conocidas a la tecnósfera (Productos evitados)           | N.A.                          | N.A.            | N.A.          |
| Entradas conocidas desde la ecósfera (naturaleza)                | N.A.                          | N.A.            | N.A.          |
| Entradas conocidas desde la tecnósfera (materiales/combustibles) | Agua desionizada              | 1.00E+00        | g             |
|  | Acetato de cadmio dihidratado | 2.67E-03        | g             |
|  | Tiourea                       | 1.52E-03        | g             |
| Entradas conocidas desde la tecnósfera (electricidad/calor)      | Electricidad {MX} (CFE)       | 1494.61         | J             |
| Emisiones al aire  | CO <sub>2</sub>               | 2.20E-03        | g             |
|  | NO <sub>2</sub>               | 4.60E-04        | g             |
|  | H <sub>2</sub> O              | 1.26E+00        | g             |
| Salidas conocidas a la tecnósfera (Residuos para tratamiento)    | N.A.                          | N.A.            | N.A.          |

En la Tabla XI se presenta el inventario para la etapa de deposición de CuAlS<sub>2</sub>. Al igual que en proceso de aspersion pirolítica del FTO, se tomó en cuenta el calor necesario para llevar las unidades a la temperatura requerida

(500°C) para la deposición. Las emanaciones calculadas provienen de la reacción de síntesis del CuAIS<sub>2</sub> a partir de la solución precursora depositada.

TABLA XI. INVENTARIO ETAPA 5. DEPOSICIÓN DE CuAIS<sub>2</sub>.

| <b>Flujo</b>   | <b>Nombre</b>               | <b>Cantidad</b> | <b>Unidad</b>   |
|--|-----------------------------|-----------------|-----------------|
| Salidas conocidas a la tecnósfera (Productos)                    | SUSTRATO-FTO-CDS-CAS        | 305.00          | g               |
| Salidas conocidas a la tecnósfera (Productos evitados)           | N.A.                        | N.A.            | N.A.            |
| Entradas conocidas desde la ecósfera (naturaleza)                | N.A.                        | N.A.            | N.A.            |
| Entradas conocidas desde la tecnósfera (materiales/combustibles) | Agua desionizada            | 5.00E+01        | g               |
|  | Sulfato de cobre            | 1.25E-01        | g               |
|  | Cloruro de Aluminio         | 1.21E-01        | g               |
|  | Tiourea                     | 7.61E-02        | g               |
|  | Aire comprimido a (600 KPa) | 150             | mm <sup>3</sup> |
| Entradas conocidas desde la tecnósfera (electricidad/calor)      | Electricidad {MX} (CFE)     | 70942.02        | J               |
| Emisiones al aire  | CO <sub>2</sub>             | 1.10E-01        | g               |
|  | NO <sub>2</sub>             | 1.15E-01        | g               |
|  | SO <sub>4</sub>             | 8.06E-02        | g               |
|  | H <sub>2</sub> O            | 1.58E+02        | g               |
|  | HCl                         | 1.09E+02        | g               |

| <b>Flujo</b>  | <b>Nombre</b> | <b>Cantidad</b> | <b>Unidad</b> |
|---|---------------|-----------------|---------------|
| Salidas conocidas a la tecnósfera (Residuos para tratamiento) | N.A.          | N.A.            | N.A.          |

En la Tabla XII se presenta el inventario para la etapa de deposición de molibdeno. El punto crítico para este proceso es la energía consumida para llevar a cabo el proceso de ionización del argón y del molibdeno a depositar, así como otros procesos adjuntos como lo son la despresurización de la cámara y la refrigeración del sistema. Se toma en cuenta que este proceso también se lleva a cabo la deposición de más de una unidad de referencia, esto principalmente debido al área alcanzada por el plasma emitido.

TABLA XII. INVENTARIO ETAPA 6. DEPOSICIÓN DE MOLIBDENO

| <b>Flujo</b>   | <b>Nombre</b>           | <b>Cantidad</b> | <b>Unidad</b> |
|--|-------------------------|-----------------|---------------|
| Salidas conocidas a la tecnósfera (Productos)                    | SUSTRATO-FTO            | 27.45           | g             |
| Salidas conocidas a la tecnósfera (Productos evitados)           | N.A.                    | N.A.            | N.A.          |
| Entradas conocidas desde la ecósfera (naturaleza)                | N.A.                    | N.A.            | N.A.          |
| Entradas conocidas desde la tecnósfera (materiales/combustibles) | Mo                      | 1.25E-02        | g             |
|  | Ar                      | 1.40E-08        | g             |
| Entradas conocidas desde la tecnósfera (electricidad/calor)      | Electricidad {MX} (CFE) | 72,000.00       | J             |
| Emisiones al aire  | Ar                      | 1.40E-08        | g             |

| <b>Flujo</b>  | <b>Nombre</b> | <b>Cantidad</b> | <b>Unidad</b> |
|---|---------------|-----------------|---------------|
| Salidas conocidas a la tecnósfera (Residuos para tratamiento) | N.A.          | N.A.            | N.A.          |

### **5.3.4.3 Análisis de impactos ambientales**

En la Figura 32 se presenta el análisis de impactos ambientales para cada una de las categorías de impacto estudiadas, siendo estas representadas en el porcentaje de aporte de cada una de las etapas analizadas para todo el proceso de elaboración de la celda fotovoltaica.

Como se puede observar, una etapa crítica, y que tiene una alta presencia en la mayoría de las categorías de impacto, es la deposición de FTO por aspersión pirolítica. Un resultado similar fue presentado por Krebs-Moberg y col.[97] reportaron en su estudio de impactos ambientales para paneles fotovoltaicos de tercera generación, que la deposición de FTO en un dispositivo fotovoltaico de capa fina orgánica, presentó el mayor porcentaje de aporte de impacto ambientales en las categorías de calentamiento global, acidificación y ecotoxicidad terrestre.

En cuanto a la categoría de impacto del calentamiento global se estimaron  $1.25 \times 10^{-2}$  Kg CO<sup>2</sup> eq. para la producción de una unidad de 2.54 cm<sup>2</sup>, correspondiendo estos en mayoría a la etapa de deposición del FTO: De acuerdo con los resultados del presente análisis, la mayor parte calentamiento global es atribuido al uso de alcohol etílico para la deposición del óxido conductor transparente. Si bien, este solvente es requerido para las propiedades estructurales de la capa fina del FTO, se debe tomar en cuenta que los datos del ecoinventario utilizado en este análisis son referidos para etanol producido a partir de etileno proveniente de nafta. En el caso específico de solventes orgánicos, su fuente de producción juega un papel importante en la atribución del calentamiento global [98]. Otro componente que representa un aporte importante

en esta categoría es el uso de estaño, esto es debido a los impactos los procesos de minería y producción de dicho material. [99]

En el caso específico de la etapa de separación de VPFV de los residuos de paneles solares, el mayor aporte a esta categoría proviene de la generación de residuos de polifluoruro de vinilo, y de la emanación de GEI como CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O y ácido acético calculados para este proceso.

Por su parte, para la etapa de producción del sustrato vitreo, los impactos ambientales en esta categoría estos asociados principalmente a la energía consumida para llevar a cabo este proceso, es decir, llevar los materiales a temperaturas de 1450°C.

Para la acidificación se estimaron  $9.83 \times 10^{-5}$  Kg SO eq, siendo esta aportada en su mayoría por la deposición de FTO. El punto crítico en este proceso para esta categoría de impacto corresponde a las emanaciones de los gases acidificantes HCl y amoniaco. [83,84]

La eutrofización tanto marina, como de agua dulce son impactadas por los procesos de deposición de FTO y Molibdeno. Los principales aportes provienen del uso del estaño en el FTO y del molibdeno[100] para la pulverización catódica. De acuerdo con lo reportado por Blanco y col [101], la deposición de FTO es uno de los puntos críticos a considerar en las tecnologías fotovoltaicas emergentes, esto debido a sus impactos ambientales en la eutrofización marina presentado en diferentes estudios de impactos ambientales.

Para el caso de la ecotoxicidad, tanto en agua dulce como en ecotoxicidad marina, el proceso de principal aporte es la deposición de molibdeno, y el FTO. Se puede observar que, en el caso de la ecotoxicidad terrestre, el aporte proviene de las diferentes etapas con respecto a las otras categorías de impacto. En el caso de la etapa de separación del vidrio de panel fotovoltaico, este aporte es debido a los residuos de polifluoruro de vinilo generados durante el proceso de separación. De acuerdo con lo explicado por Aryan y col. [102] el proceso de reciclaje del polifluoruro de vinilo presenta un desafío técnico y económico debido

a la característica resistencia del enlace C-F presente en este material, además descomposición térmica de este material puede desencadenar la emanación de fluorocarburos, fluoroácidos, dioxinas y furanos.

La toxicidad humana es principalmente aportada por la deposición del FTO, de acuerdo con los resultados, el punto crítico es el uso de estaño durante dicho proceso, de acuerdo con Ostrakhovitch [103] el estaño, que es un componente del FTO, en sí mismo no se considera altamente tóxico, sin embargo, la exposición crónica a determinados compuestos de estaño puede provocar daños a la salud humana.

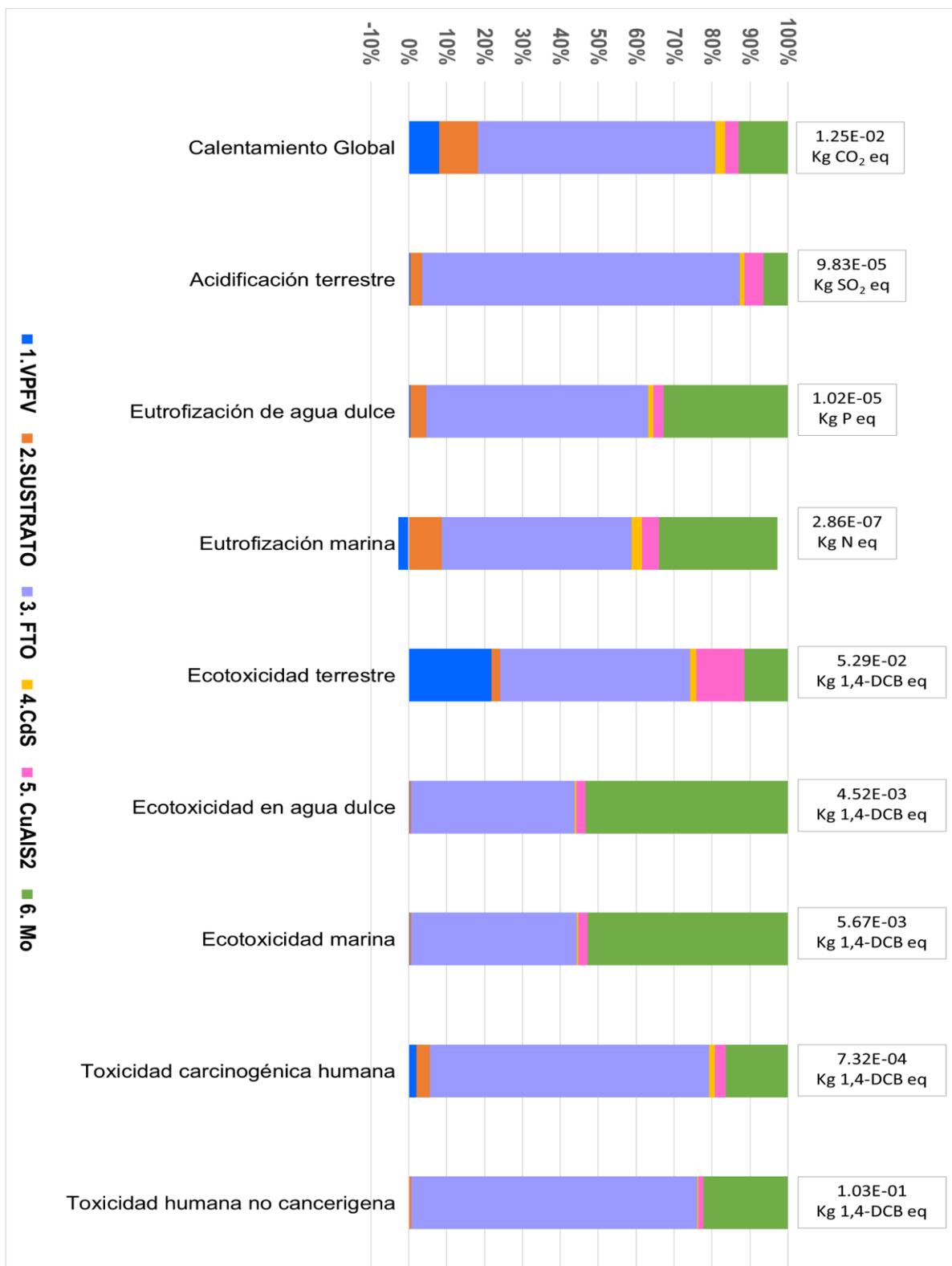


Figura 32. Categorías de Impacto para una celda de 2.54 cm<sup>2</sup> de área con configuración VAD/FTO/CdS/CuAlS<sub>2</sub>/Mo.

En la Figura 33 se presentan las categorías de impacto normalizadas para el proceso estudiado. La normalización es definida por la ISO 14042 como "Cálculo de la magnitud de los resultados relativos del indicador a información de referencia"[51,104]; y ayuda a detectar aquellas categorías de impacto en las cuales se deben focalizar los impactos ambientales que produce cada una de las etapas analizadas.

La etapa que representa impactos ambientales considerables, principalmente en las categorías de ecotoxicidad marina y de agua dulce, es el proceso de deposición de molibdeno. Esto es debido a los procesos de extracción minera de la molibdenita y de la producción del molibdeno a partir de este mineral [99]. De acuerdo con Scott y Cullen [100] en su estudio impactos ambientales de películas delgadas conductoras destinadas para la producción de celdas fotovoltaicas de kesterita, los impactos ambientales del molibdeno en las categorías de ecotoxicidad son generados principalmente por la extracción minera del trióxido de molibdeno ( $\text{MoO}_3$ ).

Basado en los resultados de este análisis de impactos ambientales, los puntos críticos se encontraron dentro los procesos de deposición, particularmente del FTO y del Mo, esto debido principalmente a los materiales utilizados para realizar dichos procesos de deposición. Las categorías de impacto más críticas en este estudio resultaron ser la ecotoxicidad tanto de agua dulce como marina, esto debido a los procesos de extracción y producción minera, como se señala en la literatura [97,100].

Si bien, en este análisis se detectaron puntos clave en cuanto a impactos ambientales, un estudio de impactos ambientales por medio del análisis de ciclo de vida, en el cual se expandan los límites del sistema y se estudien diferentes escenarios como reciclaje de residuos, uso de la celda fotovoltaica y así como la disposición final y el reciclaje de esta al finalizar su vida útil, podrá emitir una evaluación de la posible mitigación de impactos ambientales de la propuesta del siguiente trabajo.

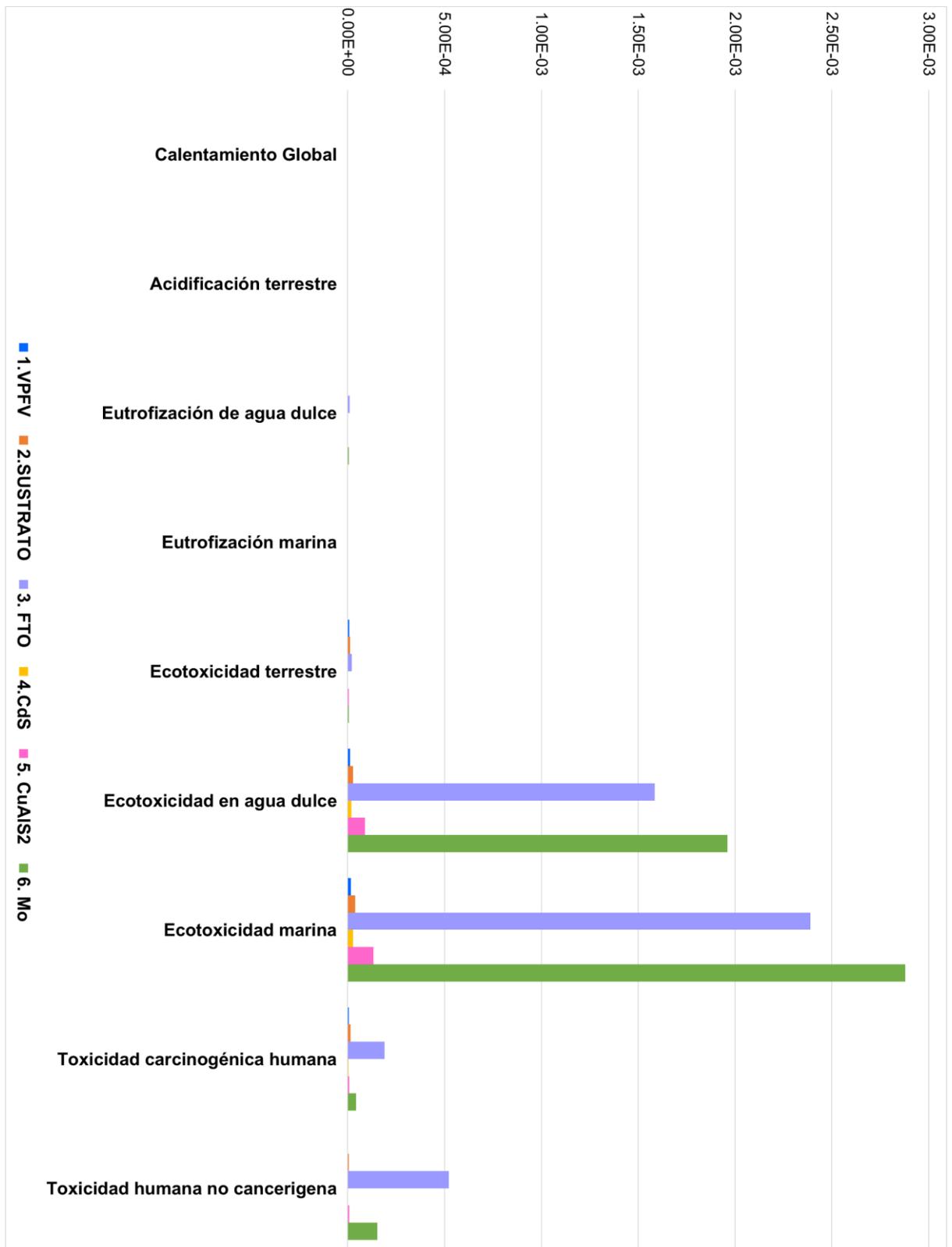


Figura 33. Categorías de impacto normalizadas

## 5.4 Vidrios para el estudio del efecto del álcali mixto

### 5.4.1 Preparación de sustratos vítreos

Para el estudio de álcali mixto, se sintetizaron diferentes sustratos vítreos combinando el VPFV con  $K_2CO_3$ , y  $Li_2CO_3$  en diferentes proporciones. Esto con la finalidad de comparar las propiedades químicas, térmicas y ópticas de cada uno de los sustratos producidos, así como observar un posible efecto en las propiedades estructurales y eléctricas de los materiales depositados en el sustrato, esto en comparación con el sustrato producido a partir solamente de VPFV.

#### 5.4.1.1 FRX

En la Tabla XIII, se presentan los análisis por FRX de los vidrios K1 y K2, los cuales fueron sintetizados añadiendo  $K^+$  al VPFV en diferentes proporciones.

TABLA XIII. ANÁLISIS FRX DE LOS SUSTRATOS VÍTREOS CON  $K^+$  (% MASA).

| Compuesto                      | VPFV        | K1          | K2          |
|--------------------------------|-------------|-------------|-------------|
| Na <sub>2</sub> O              | 14.0        | 12.60       | 12.4        |
| MgO                            | 3.56        | 3.27        | 2.98        |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1.15        | 1.62        | 1.35        |
| SiO <sub>2</sub>               | 71.0        | 66.6        | 61.36       |
| SO <sub>3</sub>                | N.D.        | 0.14        | 0.00        |
| <b>K<sub>2</sub>O</b>          | <b>0.20</b> | <b>5.96</b> | <b>12.5</b> |
| CaO                            | 9.25        | 8.92        | 8.026       |
| PPC                            | 0.68        | 0.88        | 1.28        |
| TOTAL                          | 99.8        | 99.98       | 99.9        |

PPC: Pérdidas por calcinación

En la Tabla XIV se presentan los análisis por FRX de los vidrios L1 y L2, los cuales fueron producidos a partir de la adición del Li<sup>+</sup> al vidrio VPFV en diferentes proporciones. Debido a que la energía de banda prohibida del ion Li<sup>+</sup> se encuentra por debajo del límite de detección del FRX, la composición de estos vidrios fue recalculada en base a los resultados de FRX obtenidos para cada vidrio, así como a la formulación realizada para cada uno de los sustratos, esto con la finalidad de incluir el porcentaje de LiO<sub>2</sub> contenido en cada una de las muestras.

TABLA XIV. ANÁLISIS FRX DE LOS SUSTRATOS VÍTREOS CON Li<sup>+</sup> (% MASA).

| COMPUESTO                      | VPFV        | L1(I)       | L1 (R)      | L2(I)       | L2 (R)      |
|--------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Na <sub>2</sub> O              | 14.0        | 13.5        | 13.2        | 12.4        | 11.8        |
| MgO                            | 3.56        | 3.58        | 3.5         | 3.23        | 3.08        |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1.15        | 1.93        | 1.88        | 4.62        | 4.39        |
| SiO <sub>2</sub>               | 71.0        | 70.6        | 68.9        | 69.4        | 65.8        |
| <b>Li<sub>2</sub>O</b>         | <b>N.D.</b> | <b>N.D.</b> | <b>2.18</b> | <b>N.D.</b> | <b>4.94</b> |
| SO <sub>3</sub>                | N.D.        | 0.15        | 0.15        | 0.10        | N.D.        |
| K <sub>2</sub> O               | 0.20        | N.D.        | N.D.        | N.D.        | 0.09        |
| CaO                            | 9.25        | 9.46        | 9.2         | 9.54        | 8.97        |
| Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | N.D.        | N.D.        | 0.28        | N.D.        | N.D.        |
| PPC                            | 0.68        | 0.6         | 0.6         | 0.56        | 0.56        |
| TOTAL                          | 99.8        | 99.8        | 99.84       | 99.9        | 99.63       |

PPC: Pérdidas por calcinación, (I): Resultado inicial, (R): Resultado recalculado

### 5.4.1.2 DRX

En las Figura 34 se muestran los patrones de DRX para los vidrios de potasio, y para los de litio en la Figura 35. En todos ellos se observa el patrón amorfo característico de los vidrios, descartándose cristalización durante los procesos de fusión, vaciado y recocido a un porcentaje mayor al 1%[90].

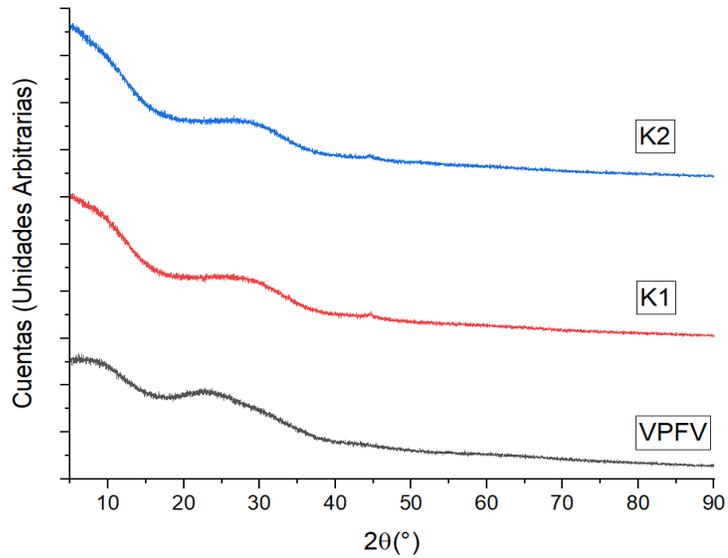


Figura 34. DRX de vidrios con adición de potasio.

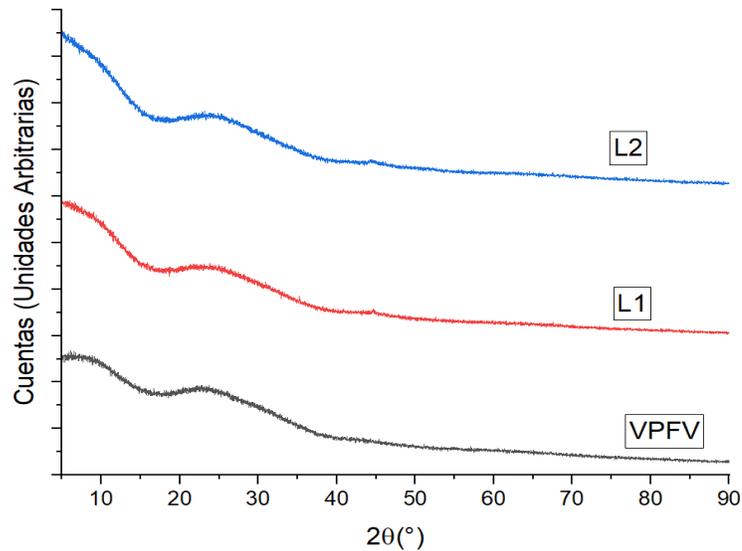


Figura 35. DRX de vidrios con adición de Litio.

### 5.4.1.3 DSC

La Figura 36 resume las temperaturas de transición vítrea de los vidrios objeto de estudio del efecto del álcali mixto, las cuales fueron detectadas por la técnica de DSC. Se observa que, en el caso de la adición del potasio, se logra bajar la temperatura de transición vítrea en comparación con el vidrio de residuos fotovoltaicos. Mientras que en el caso de litio se logró reducir las temperaturas de transición vítrea a un grado incluso menor que los vidrios en los cuales se les añadió potasio. Estos resultados son esperados debido a que a la adición de los iones alcalinos a la composición vítrea impacta en el comportamiento de la viscosidad del vidrio con respecto a la temperatura, y por lo tanto en la reducción en las temperaturas de transición vítrea. [39,42,47]

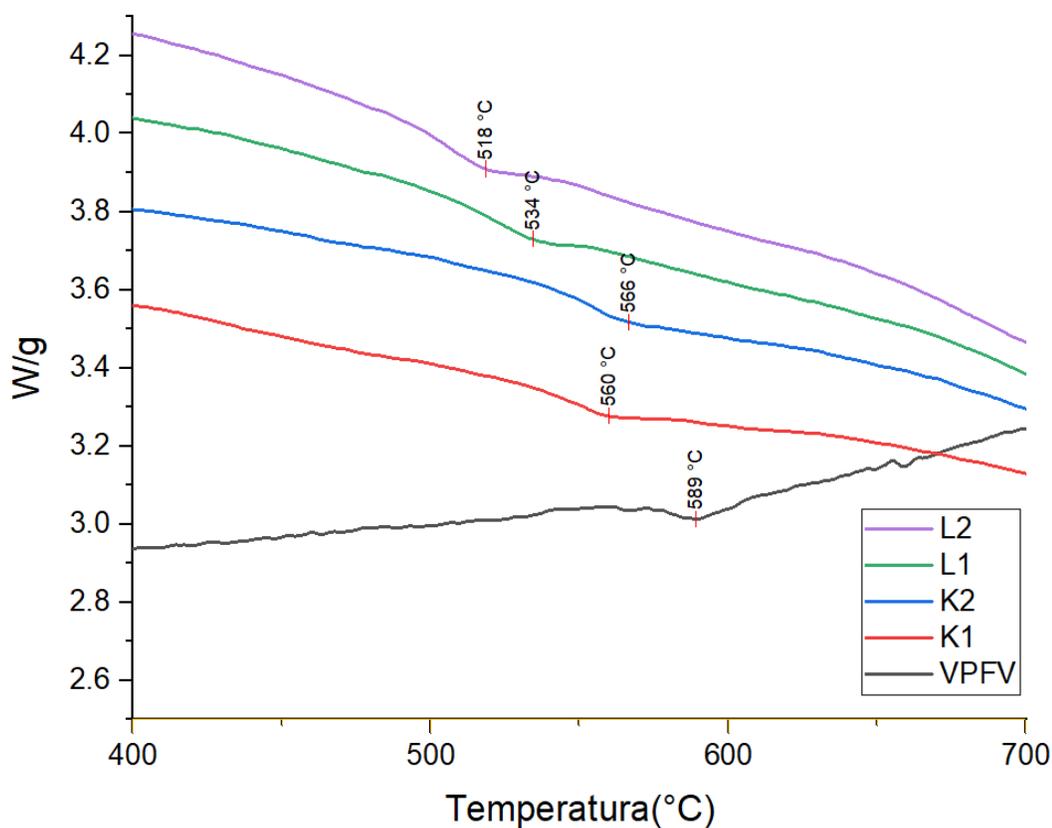


Figura 36. DSC de vidrios VPFV, L1, L2, K2, K1.

#### 5.4.1.4 Transmítancia

En la Figura 37, se aprecia la transmítancia del vidrio con adici3n de potasio. Para este caso se observa que en el caso de K1, en la regi3n comprendida de 400 a 650 nm, el %T es de  $87.56 \pm 0.94$  % siendo este menor en comparaci3n con VPFV, el cual es de  $89.82 \pm 0.61$  % en la misma regi3n. Por su parte, el vidrio K2 presenta un decremento de la transmítancia m1s bajo que los otros vidrios, siendo esta de 73.16% en 350 nm, y se incrementa hasta llegar al valor de 89.11% a 800 nm, manteniéndose similar al del resto de los vidrios hasta los 1000 nm. Las transmítancias promedio a lo largo de la regi3n visible para K1 y K2 son de  $88.80 \pm 1.38$ % y  $85.71 \pm 3.70$ % respectivamente, siendo la de K1 mayor, y la de K2 similar a la del SLG ( $84.76 \pm 3.60$ %). Sin embargo, ambas resultaron menores que las del VPFV ( $90.14 \pm 0.98$ %), por lo que en este caso se observ3 que la adici3n de potasio a la f3rmula vítrea disminuye el porcentaje de transmítancia de este.

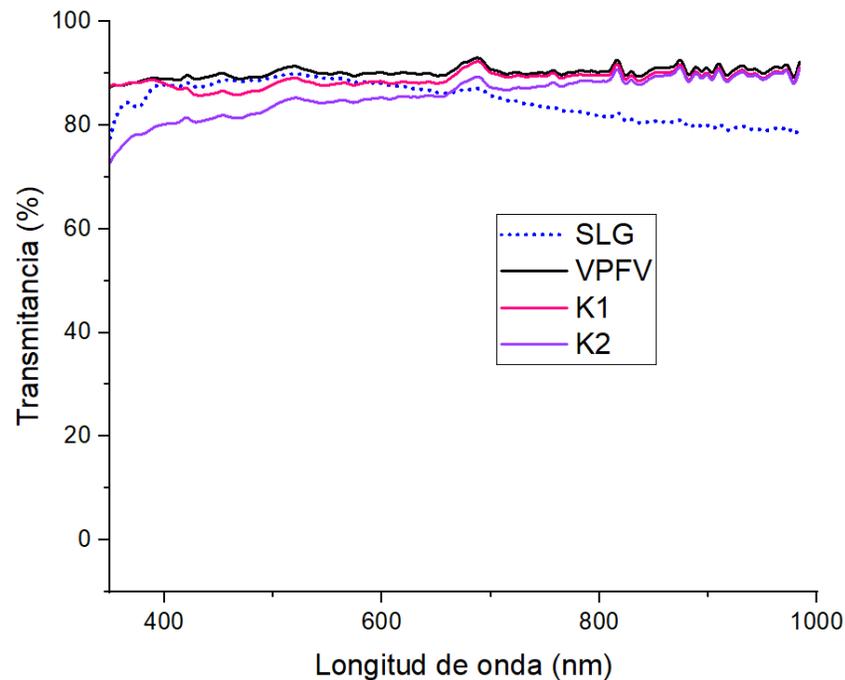


Figura 37. Transmítancia UV-VIS de los vidrios con potasio a3adido.

En el caso de los sustratos vítreos a los que se les añadió el ion litio (Figura 38), la transmitancia promedio de L1 fue de  $90.95 \pm 1.29 \%$ , mientras que la de L2 fue de  $89.07 \pm 0.98 \%$  a lo largo del espectro visible; ambos sustratos vítreos presentaron una transmitancia similar a la del VPFV ( $89.82 \pm 0.61 \%$ ). Se puede observar para este caso, que la adición de  $\text{Li}^+$  al VPFV no generó modificaciones en la transmitancia del vidrio, como fue el caso de los sustratos en los cuales se le añadió el  $\text{K}^+$ . Por su parte, al igual que el VPFV y las de los vidrios con adición de  $\text{K}^+$  las transmitancias promedio de estos sustratos resultaron ser mayores que las del SLG ( $84.76 \pm 3.60\%$ ).

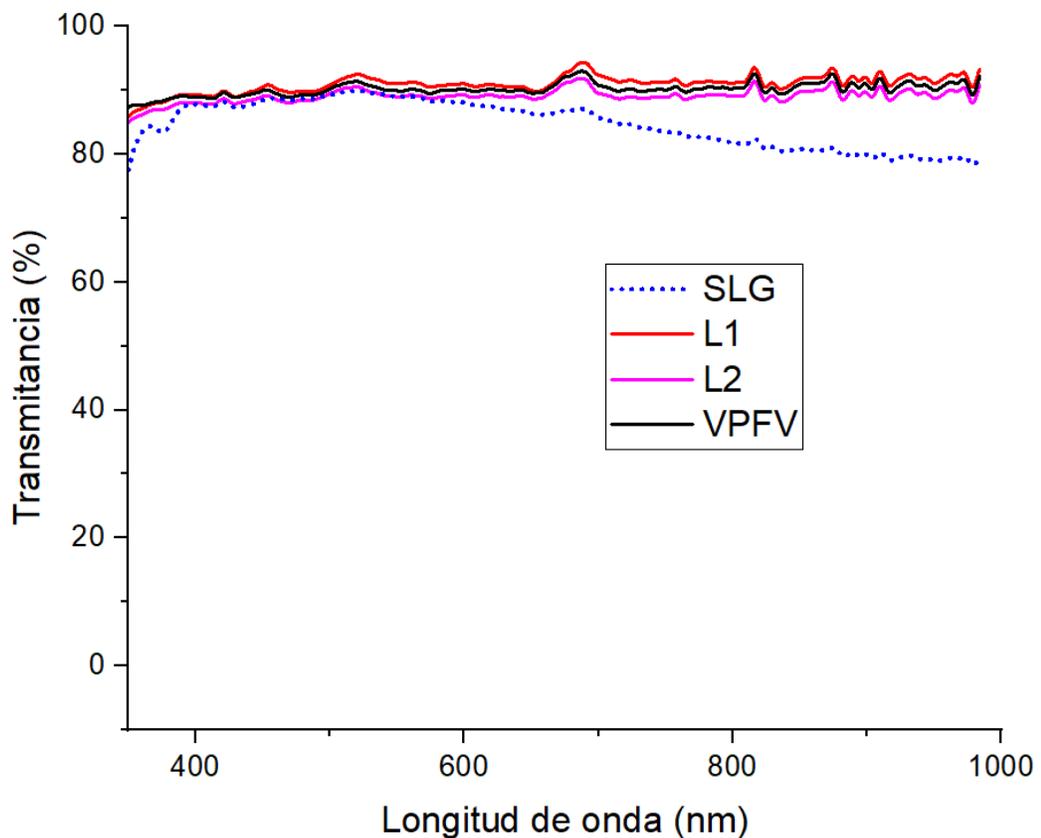


Figura 38. Transmitancia UV-VIS de los vidrios con litio añadido.

#### 5.4.1.5 SEM

En la Figura 39 se aprecian las micrografías SEM de las superficies de los sustratos sintetizados K1, K2, L1 y L2. Al igual que en las muestras VAD y VPFV, se aprecian defectos y poros superficiales ocasionados por el pulido, sin embargo, no se observó la formación de cristales en la matriz vítrea de estas muestras.

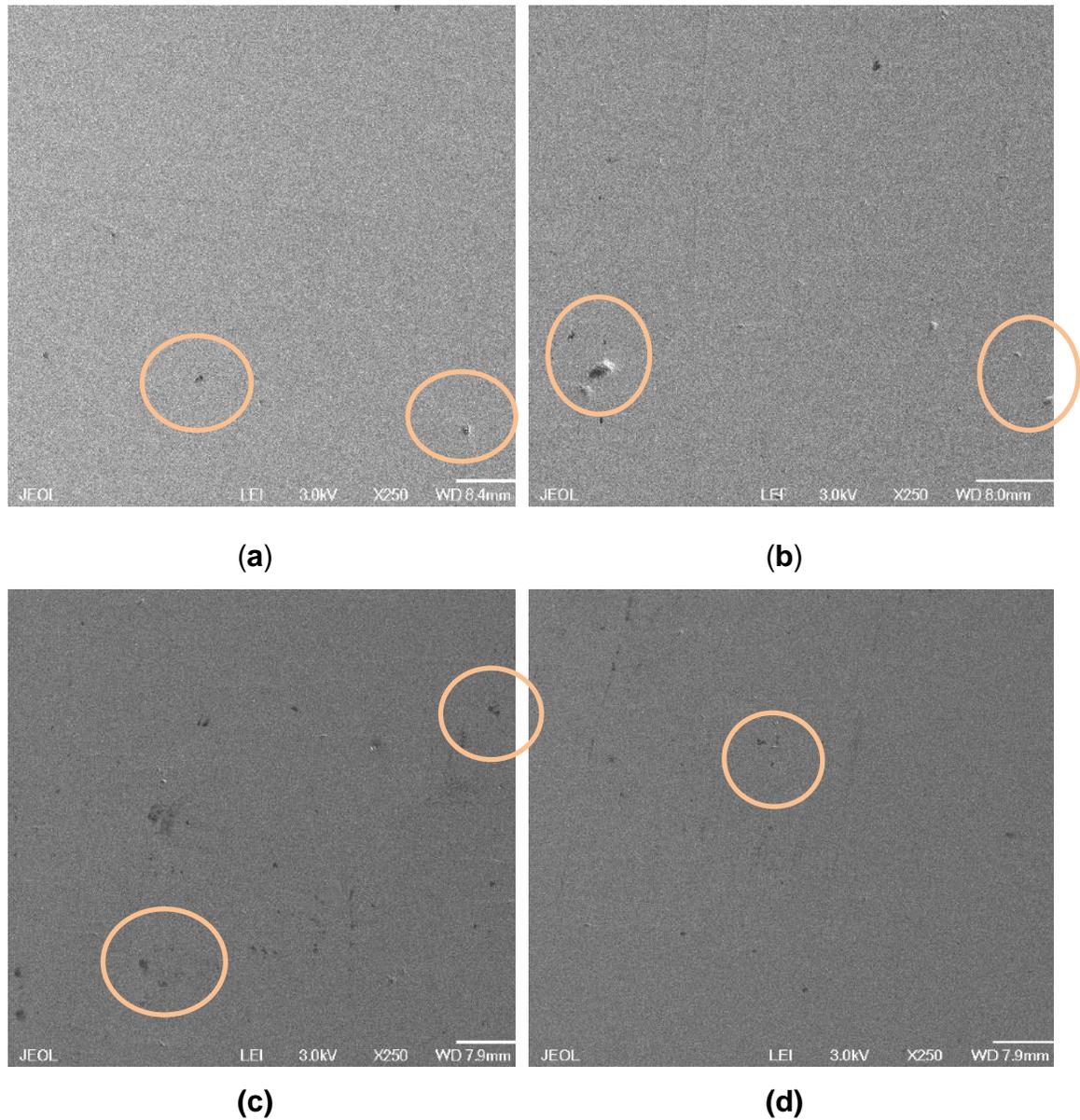


Figura 39. Imágenes SEM de (a)K1 (b)K2 (c)L1 (d)L2.

### 5.4.2 Depositiones de FTO

La Figura 40 ilustra los patrones DRX del FTO depositado en sustratos de vidrio VPFV, K1 y K2. Al igual que en los resultados anteriores, la única fase cristalina detectada fue la estructura tetragonal  $\text{SnO}_2$  ( $a=4,7358 \text{ \AA}$ ,  $c=3,1873 \text{ \AA}$ ) [JCPDS: 00-210-4754] con la orientación principal en el plano (200). La cristalización de FTO fue mayor en el sustrato K2, mientras que los sustratos K1 presentó una baja cristalización similar a la del VPFV. La orientación en otros planos como el (110) y el (101) también es apreciada en los patrones de difracción.

Las resistencias laminares del FTO depositado sobre los vidrios en los cuales se les añadió potasio se muestran en la Tabla XV. En estos resultados, se muestra que la resistencia del vidrio K1 resultó ser menor que la del vidrio K2, sin embargo, ambas resistencias resultaron ser mayores que las del FTO depositado sobre el VPFV, por lo para este estudio no se observó un efecto positivo en la adición de  $\text{K}^+$  al sustrato vítreo en las propiedades eléctricas del óxido conductor transparente depositado.

En la Figura 41 se presentan imágenes SEM de los depósitos de FTO realizados sobre los vidrios K2 y K1. Se observa que la definición de los granos de FTO es mayor en K1, con respecto a K2, sin embargo, en ambos casos, no se logra obtener cristales definidos y orientados como es el caso de los vidrios VAD y SLG.

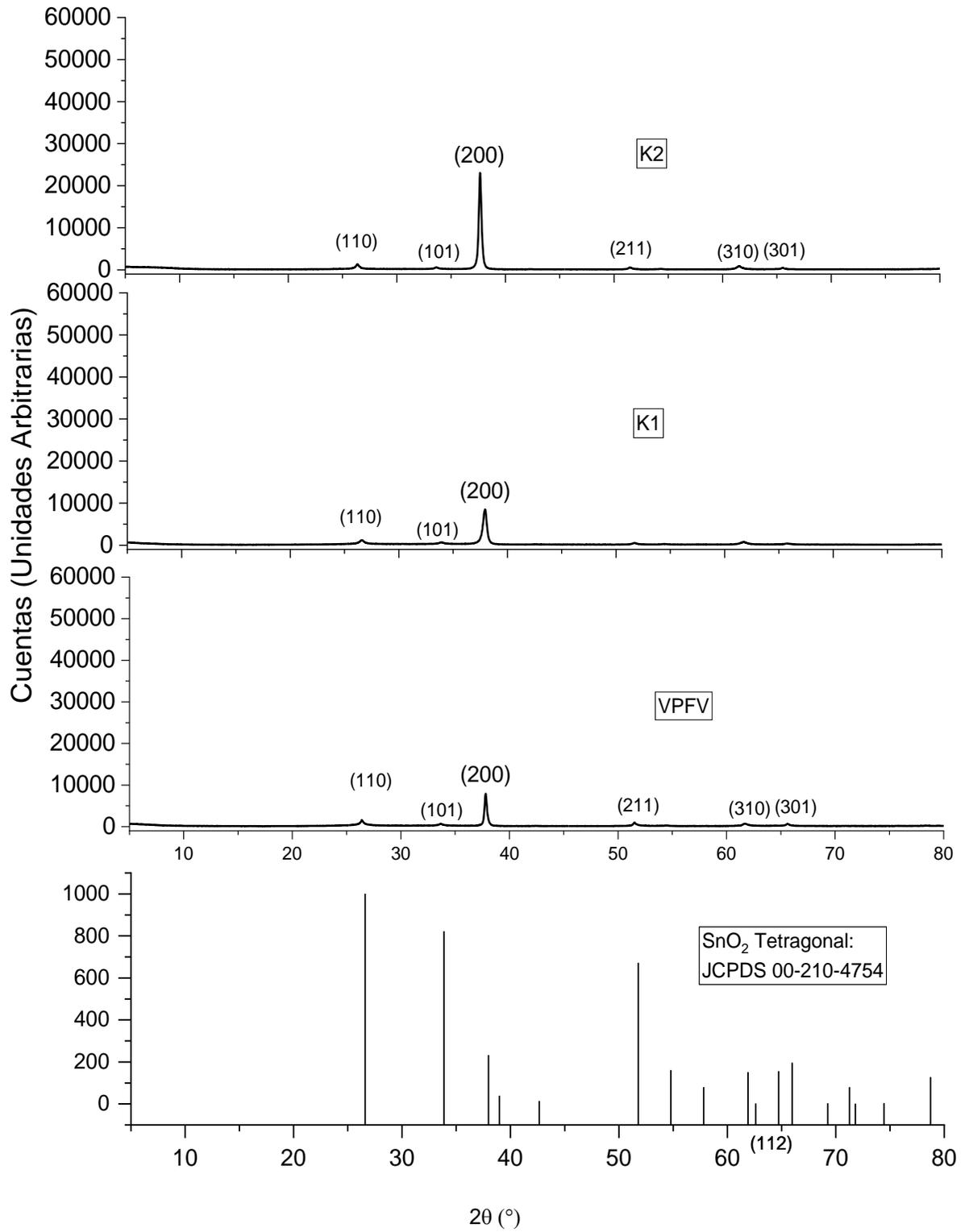
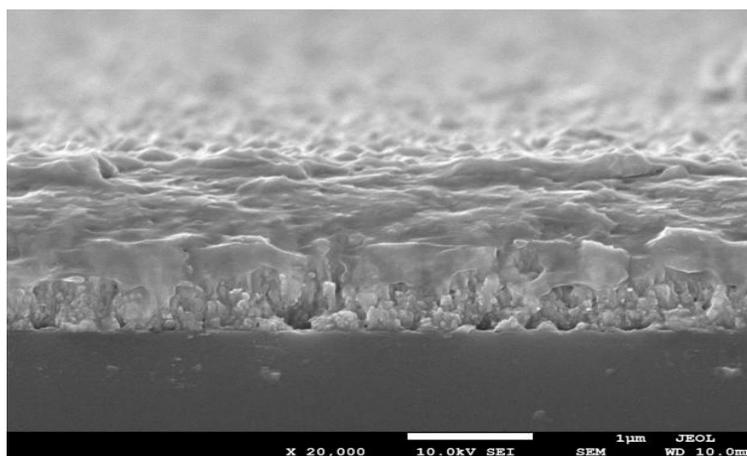


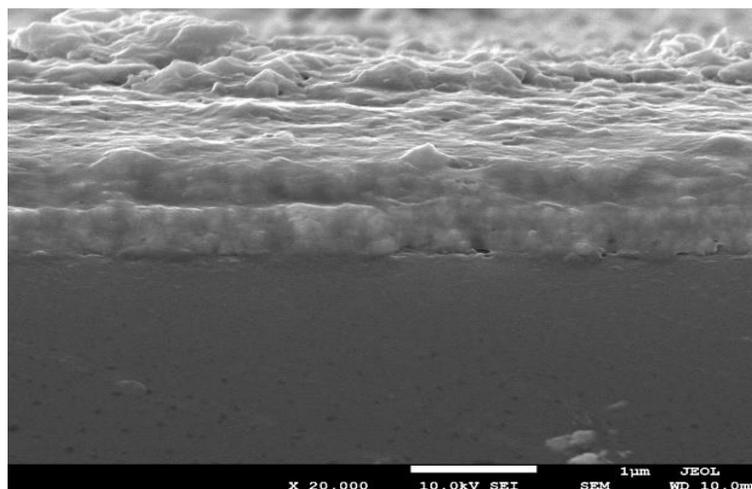
Figura 40. DRX de FTO depositado en vidrios con potasio añadido.

TABLA XV. RESISTENCIAS LAMINARES DEL FTO DE LOS SUSTRATOS  
CON POTASIO AÑADIDO

| Muestra | Resistencia Laminar                       |
|---------|---|
| VPFV    | $9.07 \pm 4.03 \text{ } \Omega/\text{sq}$ |
| K1      | $15.4 \pm 3.5 \text{ } \Omega/\text{sq}$  |
| K2      | $11.79 \pm 2.6 \text{ } \Omega/\text{sq}$ |



(a)



(b)

Figura 41. Imágenes SEM del FTO depositado sobre los sustratos vítreos.

(a) K1, (b) K2.

En el caso del estudio de la adición del litio a los sustratos, la Figura 42 ilustra los patrones DRX del FTO depositado en los sustratos VPFV, L1 y L2. La cristalización de FTO fue mayor en el sustrato L1, siendo esta incluso mayor en el SLG y el vidrio VAD previamente propuesto en este trabajo.

Las resistencias laminares del FTO depositado se muestran en la Tabla XVI. En estos resultados, se muestra que la resistencia en L1 fue la menor en todos los casos estudiados en este trabajo, incluso que la del vidrio VAD. En la Figura 43 se observa una imagen SEM del FTO depositado sobre el sustrato vítreo L1, en el cual se aprecia los cristales de FTO ordenados sobre el sustrato vítreo L1. En general, la adición de litio resultó en un efecto positivo en la conductividad del FTO depositado sobre los sustratos, por lo que este material puede ser el más adecuado para conducir los electrones producidos por el efecto fotovoltaico a través del FTO.

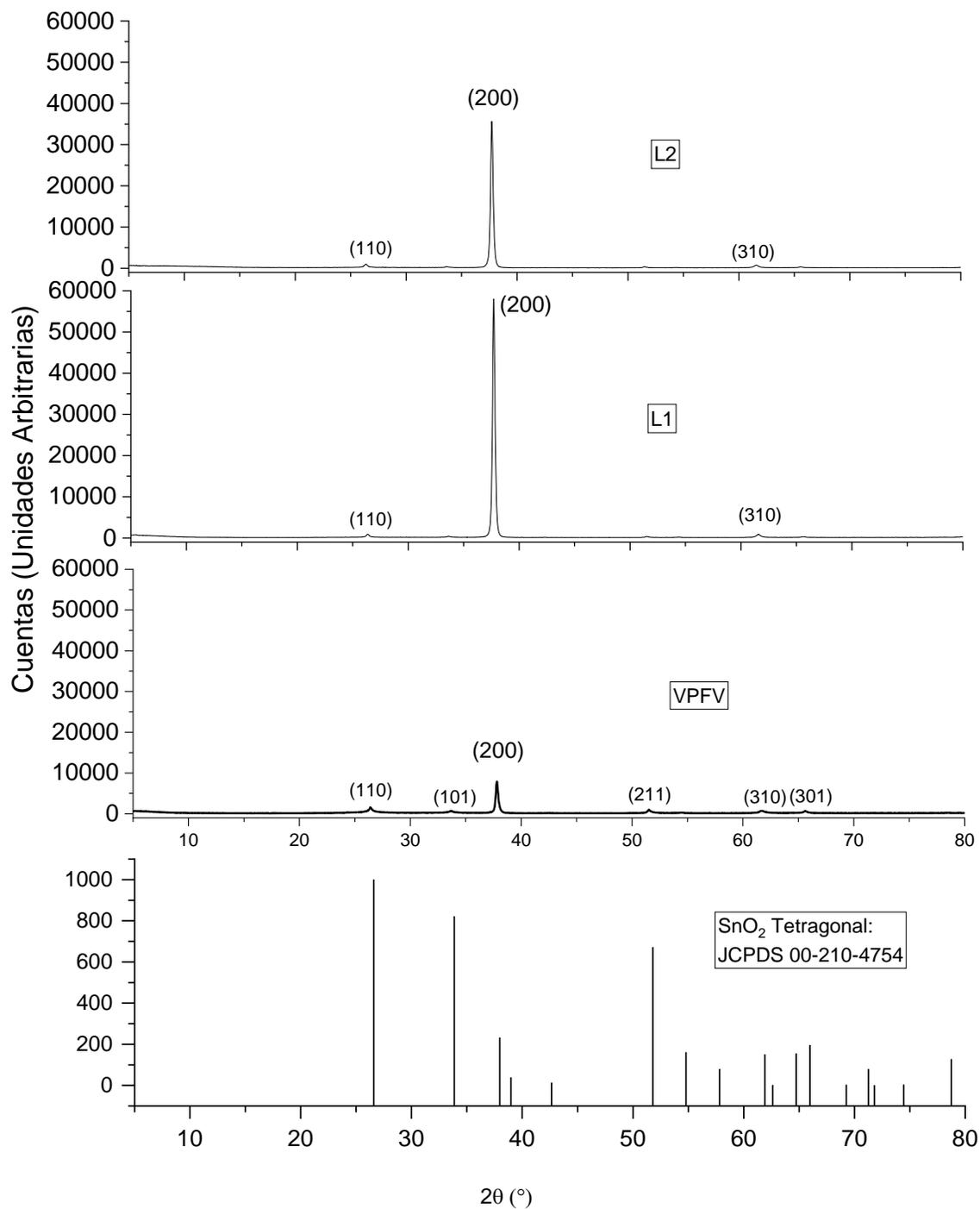


Figura 42. DRX de FTO depositado en vidrios con litio añadido.

TABLA XVI. RESISTENCIAS LAMINARES DEL FTO DE LOS SUSTRATOS  
CON LITIO AÑADIDO

| Muestra | Resistencia Laminar              |
|---------|----------------------------------|
| VPFV    | $9.07 \pm 4.03 \Omega/\text{sq}$ |
| L1      | $6.37 \pm 1.03 \Omega/\text{sq}$ |
| L2      | $6.77 \pm 2.1 \Omega/\text{sq}$  |

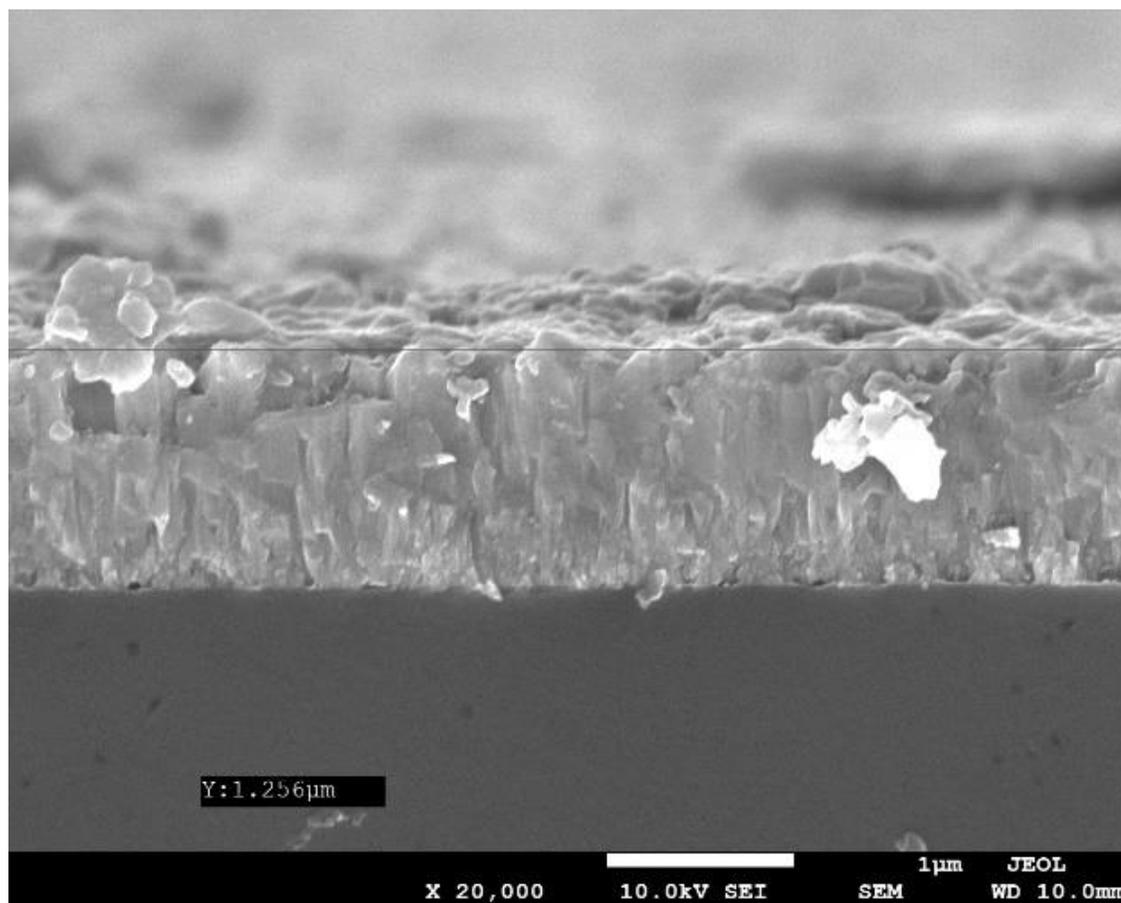


Figura 43. Imágenes SEM del FTO depositado sobre el sustrato vítreo L1.

### 5.4.3 Análisis EDS

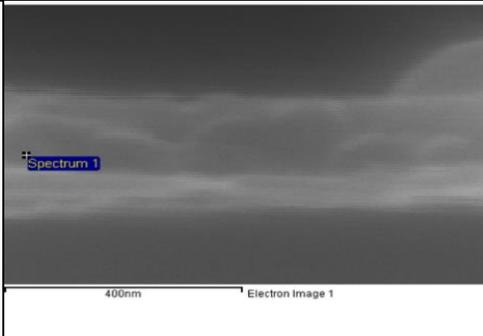
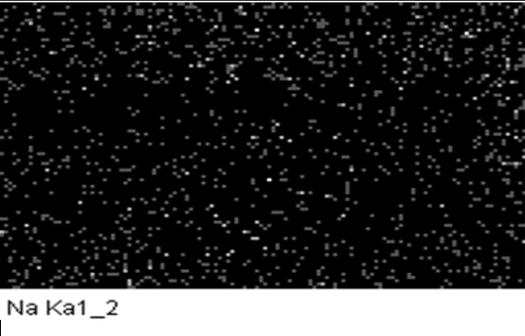
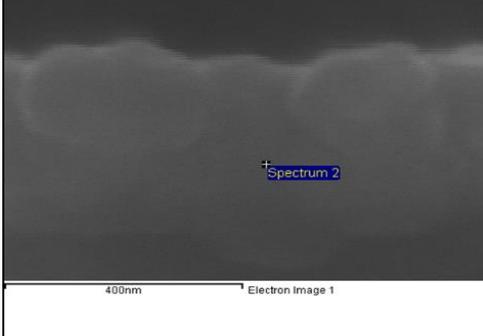
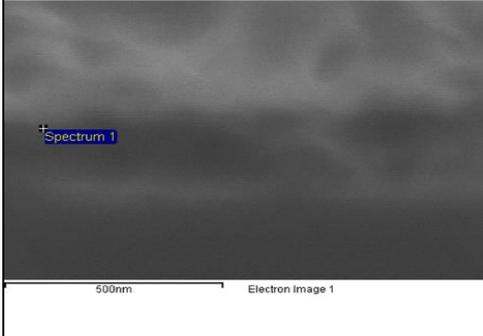
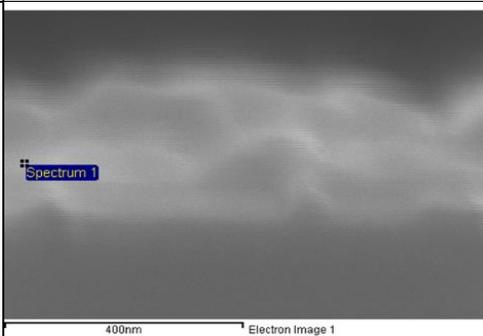
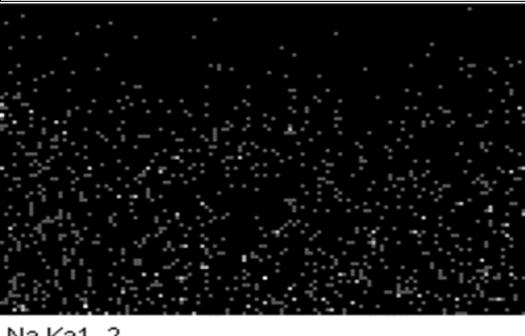
En la Tabla XVIII se presentan los análisis EDS por la técnica de mapeo para películas de 300 nm aproximadamente, esto con la finalidad de rastrear la presencia de  $\text{Na}^+$  a través de la capa de FTO depositada. Además, se presenta la proporción iónica de  $\text{Na}^+/\text{Sn}$  analizado a la altura media de la película depositada.

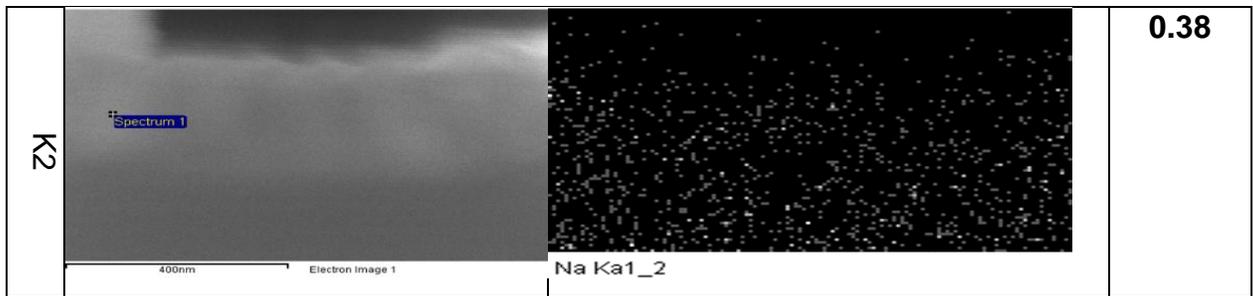
En el caso de las películas sobre los sustratos K1 y L1, la presencia de  $\text{Na}^+$  está en menor densidad en la muestra K1 con respecto a la muestra L1. Por otro lado, las muestras L2 y K2 presentaron una mayor presencia de  $\text{Na}^+$  con respecto a las muestras L1 y K1. Esto también se puede analizar contrastando los resultados de la proporción atómica  $\text{Na}/\text{Sn}$  a la altura media de la superficie, en el cual, el de K1 resultó ser menor que L1, sin embargo, ambos menores que los de L2 y K2, los cuales resultaron ser mayores que las del sustrato VPFV.

Comparándose con el estudio realizado por Bansal y col.[50] en el cual los vidrios fueron formulados y sintetizados a partir de reactivos, consecuentemente se les depositó una capa de molibdeno por medio de la técnica de pulverización catódica, y la movilidad de los iones  $\text{K}^+$ ,  $\text{Li}^+$  y  $\text{Na}^+$  fue analizada por medio de la técnica de iones secundarios (SIMS por sus siglas en inglés). Se encontró que la difusión de  $\text{Na}^+$  se facilitaba por la presencia de  $\text{Li}^+$  en el material vítreo, mientras que en presencia de  $\text{K}^+$  en el vidrio, la migración de  $\text{Na}^+$  se veía disminuida, lo cual también fue observado en este estudio para las muestras L1 y K1.

Por su parte, si se comparan los resultados de la migración de  $\text{Na}^+$  con los resultados obtenidos de las propiedades eléctricas del FTO depositado, se observa que en general, no existe una correlación directa entre la presencia de  $\text{Na}^+$  en el FTO y la resistividad del FTO depositado. Por lo que, en este caso, se presume que existe un efecto de los iones  $\text{K}^+$  y  $\text{Li}^+$  sobre el FTO depositado, y se discuten los resultados del potasio y el litio por separado.

TABLA XVII. ANALISIS EDS DEL FTO DEPOSITADO

|    | IMAGEN EDS  | MAPEO Na <sup>+</sup>  | [Na <sup>+</sup> /Sn <sup>+</sup> ] |
|----|---|--|-------------------------------------|
| V  |    |    | 0.16                                |
| L1 |   |   | 0.13                                |
| K1 |  |  | 0                                   |
| L2 |  |  | 0.5                                 |



En el caso de los sustratos a los que se le añadió potasio a la fórmula vítrea, se observa que a menor lixiviación del Na<sup>+</sup>, mayor es la resistividad del FTO. Aunque en literatura no existe un estudio que relacione en específico el efecto del Na<sup>+</sup> con la conductividad de un TCO, se puede suponer que este tiene un efecto en el FTO, y llegar a un punto de inflexión en el cual se tenga la resistividad óptima para el FTO, que puede ser objeto de estudio a futuro. Por su parte, no se detectó la presencia de K<sup>+</sup> en el FTO analizado para estas muestras.

Por su parte, el efecto del litio resultó determinante en la resistividad del FTO. Estudios como el de Joseph y col. [105] en el que analizaron el efecto del dopaje del lito y el efecto de este en las propiedades del FTO, concluyeron que a cierta concentración de dopaje de Li<sup>+</sup>, se obtenía una menor resistencia laminar, por lo que, en el caso de este trabajo, se consideró que una posible migración del ion litio sería el causante de la mejora de las propiedades del FTO. Sin embargo, un estudio a futuro podría determinar la presencia y cantidad de litio en el FTO; para ello, técnicas de mayor precisión como la SIMS [106], o la EDX [107] podrían ayudar a determinar el fenómeno de migración del litio proveniente del sustrato vítreo.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Se logró recuperar el vidrio de paneles solares estrellados de desecho, representando el 80% de la masa de éstos. Dicho vidrio fotovoltaico presentó una composición similar a un vidrio sódico cálcico comercial, además que sus propiedades térmicas resultaron ser similares a las del vidrio comercial. Sin embargo, este material vítreo posee una propiedad de interés para el desarrollo de ventanas fotovoltaicas, la cual es la alta transmitancia que permite el paso de los fotones de la luz.
- Se sintetizaron sustratos de vidrio a partir del vidrio extraído de los residuos fotovoltaicos y se evaluó su posible uso en aplicaciones fotovoltaicas. El sustrato de vidrio preparado solo a partir de residuos de vidrio fotovoltaico presentó la mayor transmitancia ( $90.15 \pm 0.98 \%$ ), sin embargo, presentó la mayor resistencia de lámina ( $10.13 \pm 3.47 \Omega/\text{sq}$ ) y la menor cristalización de FTO en comparación con las de los otros sustratos sintetizados y analizados, por lo que su uso en dispositivos fotovoltaicos de película delgada no es recomendado en este estudio.
- Se sintetizaron sustratos de vidrio con residuos fotovoltaicos de vidrio y otros residuos industriales y se evaluó su posible uso en aplicaciones fotovoltaicas. Estos presentaron una transmitancia de  $83.60 \pm 1.52 \%$ , que es similar a la del vidrio comercial sódico cálcico ( $84.76 \pm 3.60\%$ ), la resistencia de lámina más baja ( $7.84 \pm 3.11 \Omega/\text{sq}$ ) y la mayor cristalización de FTO en comparación con las de los otros sustratos de vidrio, incluido el vidrio comercial ( $8.48 \pm 3.67 \Omega/\text{sq}$ ). Por lo tanto, se podría considerar su uso en el desarrollo de dispositivos fotovoltaicos de película delgada.

- En cuanto a la celda realizada a partir de este sustrato, se comparó su respuesta a la luz solar por cronoamperometría. Sin embargo, se requieren futuras investigaciones para determinar un sistema fotovoltaico adaptable a ese sustrato vítreo. Esto principalmente debido a los efectos de la composición química del sustrato y su interacción con los materiales conductores y semiconductores que componen dicha celda fotovoltaica.
- La incorporación de  $K^+$  al vidrio de residuos de paneles solares no mejoró las propiedades eléctricas y estructurales del FTO depositado con respecto a las del vidrio sódico cálcico comercial. Por su parte, la incorporación de  $Li^+$  en sustratos vítreos sintetizados a partir de residuos de paneles fotovoltaicos mejoró las propiedades eléctricas y estructurales del FTO depositado en ellos, con respecto al FTO cristalizado sobre vidrio sódico cálcico comercial.
- El comportamiento del efecto de ion álcali mixto fue analizado por medio de EDS. Se observa que en general, no existe una correlación directa entre la presencia de  $Na^+$  en el FTO y la resistividad del FTO depositado. Por lo que, en este caso, se presume que existe un efecto de los iones  $K^+$  y  $Li^+$  sobre el FTO depositado; se sugieren estudios futuros a profundidad que analicen el comportamiento de dichos iones, en particular, el estudio de la migración de  $Li^+$  por otras técnicas como EDX o SIMS.
- En cuanto al estudio de impactos ambientales por medio de la herramienta de análisis de Ciclo de Vida, se determinó que la mayor causa de impactos ambientales se encuentra en el proceso de deposición de FTO para la producción de la celda fotovoltaica, principalmente en las categorías de ecotoxicidad terrestre y acuática, por otro lado, el uso de molibdeno también representa un impacto en dichas categorías. En general, los procesos de extracción minera de los metales requeridos para la construcción de la celda fotovoltaica están representando los impactos

ambientales más importantes en este proceso. Por otro lado, en cuanto a la producción del vidrio a partir de residuos, se debe focalizar la atención en la generación de residuos, así como en las emisiones al aire que produce el proceso de separación. Futuras investigaciones podrían sugerir la mitigación de dichos impactos ambientales, por medio de procesos alternos.

- En general, en este trabajo se desarrollaron sustratos vítreos destinados al desarrollo de ventanas fotovoltaicas de película delgada a partir de residuos fotovoltaicos de vidrio y otros residuos industriales. La incorporación de arena de cuarzo y dolomita aumentaron la conductividad eléctrica y el grado de cristalización del FTO depositado en el sustrato vítreo desarrollado. Por otro lado, las combinaciones de iones alcalinos en un sustrato vítreo desarrollado a partir de residuos de vidrio de paneles solares produjeron cambios en las propiedades eléctricas del FTO depositado con respecto al sustrato vítreo formulado a partir solamente de vidrio de panel fotovoltaico. Sin embargo, no pudo ser probada la reducción de los iones de  $\text{Na}^+$  provenientes del sustrato hacia el FTO por medio de la adición de iones de  $\text{K}^+$  y  $\text{Li}^+$ . Estudios a profundidad podrían rastrear los iones que se movilizan modifican las propiedades eléctricas del óxido conductor transparente.

## PROSPECTIVA

En este proyecto se planteó el reciclaje de vidrio de paneles fotovoltaicos junto con materiales de rechazo en la industria cerámica para el desarrollo de sustratos para dispositivos fotovoltaicos.

Se realizaron estudios con la deposición de FTO como óxido conductor transparente, el cual presentó una resistencia laminar aceptable para ser usada en dispositivos fotovoltaicos. Sin embargo, una celda fotovoltaica es un sistema complejo en el cual las capas de conductores y semiconductores interactúan entre sí para llevar a cabo el efecto fotovoltaico. Por lo que se propone un estudio a futuro, en el cual se involucren diversos óxidos conductores transparentes, y determinar cuál de ellos tiene una mejor compatibilidad con los sustratos propuestos en este proyecto. Este estudio se puede extender hasta la configuración de una celda fotovoltaica de capa fina ideal para ser utilizada con los sustratos vítreos desarrollados en este proyecto.

En este proyecto se estudió el fenómeno del álcali mixto y su comportamiento en los sustratos vítreos y su efecto en la capa de FTO depositado. En este punto específico del proyecto, se propone dar continuación al estudio de dicho fenómeno, particularmente, comprobar o descartar la movilidad de iones litio y potasio con equipos especializados como SIMS o XPS. Por otro lado, se recomienda el estudio de otros fenómenos del estado vítreo alternos al efecto del álcali mixto, y su aprovechamiento para la mejora de las propiedades de un material vítreo destinado a fungir como sustrato de una celda fotovoltaica de capa fina.

En este estudio del álcali mixto, la adición de litio a la fórmula vítrea de los sustratos desarrollados a partir de residuos, mostro resultados favorables con respecto al resto de los sustratos, incluyendo el de vidrio sódico cálcico comercial. Sin embargo, este material está presentando una alta demanda debido a su uso en otras tecnologías relacionadas, así como en baterías para diversos productos,

particularmente, automóviles eléctricos[108]. De acuerdo con García y col.[109] se proyecta que la demanda de litio superará la oferta en un futuro cercano, lo que podría resultar en un déficit potencial de disponibilidad de litio, además del alza de los precios de dicho material. Por lo que se sugiere el estudio de otros fenómenos, y otros compuestos de mayor disponibilidad, particularmente aquellos que provengan de otros residuos.

El estudio de impactos ambientales presentado en este proyecto representó una guía para identificar puntos de atención en cuando a impactos ambientales, tanto las etapas del proyecto como las categorías de impacto críticas en este proceso. Sin embargo, para futuras investigaciones, se sugiere el desarrollo de un estudio de impacto ambiental por medio de análisis de ciclo de vida, en el cual se expandan los límites del sistema, incluyendo el uso y generación de energía eléctrica de la celda, así como escenarios como la disposición final y reutilización del producto a término de su ciclo de vida. Así también se contabilicen flujos adicionales a los recopilados en la parte experimental de este proyecto. Esto con la finalidad de reducir la incertidumbre del estudio, así también, aportar conocimiento de interés al campo del desarrollo de economía circular en la industria fotovoltaica.

En general, se sugiere que las futuras investigaciones que extiendan dicho proyecto sean puntos de partida para establecer modelos de economía circular aplicados en el campo de la fotovoltaica: Tanto en los componentes que conforman las celdas fotovoltaicas actuales, así como el de aquellas celdas fotovoltaicas, cuyos componentes puedan ser desarrollados a partir de residuos de los mismos procesos industriales enfocados en el ramo de la fotovoltaica.

## REFERENCIAS

- [1] A. Domínguez, R. Geyer, Photovoltaic waste assessment in Mexico, *Resour Conserv Recycl* 127 (2017) 29–41. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.08.013>.
- [2] IRENA, Future of Solar Photovoltaic: Deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects (A Global Energy Transformation: paper), 2019. <https://www.irena.org/publications/2019/Nov/Future-of-Solar-Photovoltaic>.
- [3] M. Peplow, Solar Panels Face Recycling Challenge, (2022).
- [4] Cámara de Diputados del Honorable Congreso de la Unión., Ley de Transición Energética, *Diario Oficial de La Federación* (2015) 1–77. <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LTE.pdf>.
- [5] SENER, *Prospectivas de Energías Renovables (2018-2032)*, (2018) 73. <https://www.gob.mx/sener>.
- [6] N.M. Holden, The Inverted Waste Pyramid as a Policy Tool to Unite SDG 11 and SDG 12 Waste Management Targets, in: *SDG 11, Sustainable Cities and Communities*, Routledge India, 2022: pp. 156–170.
- [7] S. Weckend, A. Wade, G. Heath, *End-Of-Life Management Solar Photovoltaic Panels*, Golden, CO (United States), 2016. <https://doi.org/10.2172/1561525>.
- [8] S. Kusch, M.A.T. Alsheyab, Waste electrical and electronic equipment (WEEE): A closer look at photovoltaic panels, *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM* 17 (2017) 317–324. <https://doi.org/10.5593/sgem2017/41/S18.041>.

- [9] DuPont, DuPont Photovoltaics Solutions, (2022). <https://www.dupont.com/solar-photovoltaic-materials.html> (accessed August 22, 2022).
- [10] S. Kang, S. Yoo, J. Lee, B. Boo, H. Ryu, Experimental investigations for recycling of silicon and glass from waste photovoltaic modules, *Renew Energy* 47 (2012) 152–159. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.04.030>.
- [11] M. Li, S.D. Widijatmoko, Z. Wang, P. Hall, A methodology to liberate critical metals in waste solar panel, *Appl Energy* 337 (2023) 120900.
- [12] K.L. Lin, L.S. Huang, J.L. Shie, C.J. Cheng, C.H. Lee, T.C. Chang, Elucidating the effects of solar panel waste glass substitution on the physical and mechanical characteristics of clay bricks, *Environmental Technology (United Kingdom)* 34 (2013) 15–24. <https://doi.org/10.1080/09593330.2012.679693>.
- [13] J. Jimenez-Millan, I. Abad, R. Jimenez-Espinosa, A. Yebra-Rodriguez, Assessment of solar panel waste glass in the manufacture of sepiolite based clay bricks, *Mater Lett* 218 (2018) 346–348. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.02.049>.
- [14] M. Masoumian, P. Kopacek, End-of-Life Management of Photovoltaic Modules, *IFAC-PapersOnLine* 48 (2015) 162–167. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.12.076>.
- [15] K.-L. Lin, T.-C. Chu, C.-J. Cheng, C.-H. Lee, T.-C. Chang, W. Kuen-Sheng, Recycling Solar Panel Waste Glass Sintered as Glass-Ceramics, *Environ Prog Sustain Energy* 31 (2012) 613–618. <https://doi.org/10.1002/ep.10587>.
- [16] V. Savvilotidou, A. Kritikaki, A. Stratakis, K. Komnitsas, E. Gidarakos, Energy efficient production of glass-ceramics using photovoltaic (P/V) glass and lignite fly ash, *Waste Management* 90 (2019) 46–58. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.04.022>.

- [17] Y.-W. Lin, W.-H. Lee, K.-L. Lin, A novel approach for preparing ecological zeolite material from solar panel waste lass and sandblasting waste: microscopic characteristics and humidity control performance, *Journal of Materials Research and Technology* 19 (2022) 4128–4140.
- [18] C. Wegener, Upcycling, in: *Creativity—A New Vocabulary*, Springer, 2016: pp. 181–188.
- [19] M.R. Vogt, H. Hahn, H. Holst, M. Winter, C. Schinke, M. Köntges, R. Brendel, P.P. Altermatt, Measurement of the optical constants of soda-lime glasses in dependence of iron content and modeling of iron-related power losses in crystalline Si solar cell modules, *IEEE J Photovolt* 6 (2015) 111–118.
- [20] ONIX-SOLAR, Photovoltaic Glass for Buildings, (2017). <https://www.onyx solar.com/> (accessed February 6, 2020).
- [21] TESLA, Tesla Solar Roof, (n.d.). [https://www.tesla.com/es\\_MX/solarroof](https://www.tesla.com/es_MX/solarroof) (accessed February 24, 2020).
- [22] T. Zhang, M. Wang, H. Yang, A review of the energy performance and life-cycle assessment of building-integrated photovoltaic (BIPV) systems, *Energies (Basel)* 11 (2018). <https://doi.org/10.3390/en11113157>.
- [23] M.A. Alim, Z. Tao, M.K. Hassan, A. Rahman, B. Wang, C. Zhang, B. Samali, Is it time to embrace building integrated Photovoltaics? A review with particular focus on Australia, *Solar Energy* 188 (2019) 1118–1133. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.07.002>.
- [24] I. Becerril-Romero, S. Giraldo, S. López-Marino, M. Placidi, Y. Sánchez, D. Sylla, A. Pérez-Rodríguez, E. Saucedo, P. Pistor, Vitreous enamel as sodium source for efficient kesterite solar cells on commercial ceramic tiles, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 154 (2016) 11–17. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2016.04.035>.

- [25] D. Fraga, T. Stoyanova Lyubenova, R. Martí, I. Calvet, E. Barrachina, J.B. Carda, Ecologic ceramic substrates for CIGS solar cells, *Ceram Int* 42 (2016) 7148–7154. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.01.104>.
- [26] D. Fraga, E. Barrachina, I. Calvet, T.S. Stoyanova Lyubenova, J.B. Carda, Developing CIGS solar cells on glass-ceramic substrates, *Mater Lett* 221 (2018) 104–106. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.03.111>.
- [27] S. Jain, T. Sharma, A.K. Gupta, End-of-life management of solar PV waste in India: Situation analysis and proposed policy framework, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 153 (2022) 111774.
- [28] K. Burrows, V. Fthenakis, Glass needs for a growing photovoltaics industry, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 132 (2015) 455–459.
- [29] M.P. Belançon, M. Sandrini, F. Tonholi, L.S. Herculano, G.S. Dias, Towards long term sustainability of c-Si solar panels: The environmental benefits of glass sheet recovery, *Renewable Energy Focus* 42 (2022) 206–210.
- [30] R.A. Afre, N. Sharma, M. Sharon, M. Sharon, Transparent conducting oxide films for various applications: A review, *Reviews on Advanced Materials Science* 53 (2018) 79–89.
- [31] E. Fortunato, D. Ginley, H. Hosono, D.C. Paine, Transparent conducting oxides for photovoltaics, *MRS Bull* 32 (2007) 242–247.
- [32] G.C. Morris, A.E. McElnea, Fluorine doped tin oxide films from spray pyrolysis of stannous fluoride solutions, *Appl Surf Sci* 92 (1996) 167–170.
- [33] E.T. Efaz, M.M. Rhaman, S. Al Imam, K.L. Bashar, F. Kabir, M.D.E. Mourtaza, S.N. Sakib, F.A. Mozahid, A review of primary technologies of thin-film solar cells, *Engineering Research Express* 3 (2021) 32001.
- [34] W. Witte, S. Spiering, D. Hariskos, Substitution of the CdS buffer layer in CIGS thin-film solar cells: Status of current research and record cell efficiencies, *Vakuum in Forschung Und Praxis* 26 (2014) 23–27.

- [35] R. Gahlot, S. Mir, N. Dhawan, Recycling of Discarded Photovoltaic Solar Modules for Metal Recovery: A Review and Outlook for the Future, *Energy & Fuels* 36 (2022) 14554–14572.
- [36] S. Sivaraj, R. Rathanasamy, G.V. Kaliyannan, H. Panchal, A. Jawad Alrubaie, M. Musa Jaber, Z. Said, S. Memon, A Comprehensive Review on Current Performance, Challenges and Progress in Thin-Film Solar Cells, *Energies* 2022, Vol. 15, Page 8688 15 (2022) 8688. <https://doi.org/10.3390/EN15228688>.
- [37] R.H. Bube, *Photovoltaic Materials*, Imperial College Press, Stanford, 1998.
- [38] D.R. Askeland, P.P. Fulay, W.J. Wright, *Ciencia e ingeniería de materiales*, Cengage learning EUA, 2011.
- [39] J.M. Fernández Navarro, *El vidrio*, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 2003.
- [40] P.W. McMillan, *Glass-ceramics*, (1964).
- [41] M. Powalla, S. Paetel, E. Ahlswede, R. Wuerz, C.D. Wessendorf, T. Magorian Friedlmeier, Thin-film solar cells exceeding 22% solar cell efficiency: An overview on CdTe-, Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> -, and perovskite-based materials, *Appl Phys Rev* 5 (2018). <https://doi.org/10.1063/1.5061809>.
- [42] J. Zarzycki, *Glasses and the vitreous state*, Cambridge university press, 1991.
- [43] T. Prabhakar, N. Jampana, Effect of sodium diffusion on the structural and electrical properties of Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> thin films, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 95 (2011) 1001–1004.
- [44] A. Romeo, CdTe and CuInGaSe<sub>2</sub> Thin-Film Solar Cells, in: *Solar Cells and Modules*, Springer, 2020: pp. 197–217.

- [45] P.M.P. Salome, A. Hultqvist, V. Fjallstrom, M. Edoff, B.G. Aitken, K. Zhang, K. Fuller, C. Kosik Williams, Incorporation of Na in Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> thin-film solar cells: A statistical comparison between Na from soda-lime glass and from a precursor layer of NaF, *IEEE J Photovolt* 4 (2014) 1659–1664. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2014.2357261>.
- [46] L. Kranz, J. Perrenoud, F. Pianezzi, C. Gretener, P. Rossbach, S. Buecheler, A.N. Tiwari, Effect of sodium on recrystallization and photovoltaic properties of CdTe solar cells, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 105 (2012) 213–219. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2012.06.019>.
- [47] J.O. Isard, The mixed alkali effect on glass, *J Non Cryst Solids* 1 (1969) 235–261.
- [48] J.P. Poole, Low-temperature viscosity of alkali silicate glasses, *Journal of the American Ceramic Society* 32 (1949) 230–233.
- [49] M.D. Ingram, Amorphous Materials: Mixed Alkali Effect, *Encyclopedia of Materials: Science and Technology* (2001) 220–223. <https://doi.org/10.1016/B0-08-043152-6/00047-4>.
- [50] N. Bansal, M. Gupta, B.C. Mohanty, K. Singh, Evaluating the role of composition and local structure on alkali out-diffusion in glasses for thin-film solar cells, *Journal of the American Ceramic Society* 104 (2021) 851–859. <https://doi.org/10.1111/jace.17491>.
- [51] ISO, ISO 14040:2006 -Environmental management - Life Cycle Assessment - Part 1: Principles and Framework, International Organization for Standardization (2006). <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Environmental+management+-+Life+Cycle+assessment+-+Principles+and+framework#0>.

- [52] ISO, Environmental Management. Life Cycle Assessment. Requirements and Guidelines., 2007. <http://tienda.icontec.org/brief/NTC-ISO14044.pdf>.
- [53] M.Z. Hauschild, R.K. Rosenbaum, S.I. Olsen, Life Cycle Assessment, Theory and Practice., Springer, 2019. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-56475-3>.
- [54] A. Vallejo, Utilización del Análisis del ciclo de vida en la evaluación del impacto ambiental del cultivo bajo invernadero mediterráneo, Universitat Politècnica de Catalunya (2004) 37.
- [55] A.E. Baumann, R. Hill, K.M. Hynes, Environmental impacts of PV systems - ground-based vs BIPV, Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference (1997) 1361–1364. <https://doi.org/10.1109/PVSC.1997.654343>.
- [56] E. Hellriegel, G. Hagedorn, Umweltvorsorgeprüfung bei Forschungsvorhaben - Am Beispiel von Photovoltaik, in: FORSCHUNGSZENTRUM JÜLICH GmbH, 1992.
- [57] L. Belussi, M. Mariotto, I. Meroni, C. Zevi, S.D. Svaldi, LCA study and testing of a photovoltaic ceramic tile prototype, Renew Energy 74 (2015) 263–270. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.07.053>.
- [58] E. Klugmann-Radziemska, A. Kuczyńska-Łażewska, The use of recycled semiconductor material in crystalline silicon photovoltaic modules production - A life cycle assessment of environmental impacts, Solar Energy Materials and Solar Cells 205 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2019.110259>.
- [59] A. Maalouf, T. Okoroafor, Z. Jehl, V. Babu, S. Resalati, A comprehensive review on life cycle assessment of commercial and emerging thin-film solar cell systems, Renewable and Sustainable Energy Reviews 186 (2023) 113652.

- [60] K. McGarry, J. Zilberman, T.R. Hull, W.D. Woolley, Decomposition and combustion of EVA and LDPE alone and when fire retarded with ATH, *Polym Int* 49 (2000) 1193–1198. [https://doi.org/10.1002/1097-0126\(200010\)49:10<1193::AID-PI537>3.0.CO;2-0](https://doi.org/10.1002/1097-0126(200010)49:10<1193::AID-PI537>3.0.CO;2-0).
- [61] A. Alvarez-Mendez, L.C. Torres-González, N. Alvarez, L.M. Torres-Martínez, Kinetic thermal analysis of glass ceramics from industrial wastes, *J Non Cryst Solids* 329 (2003) 73–76.
- [62] R. Muniramaiah, N.P. Reddy, R. Santhosh, J.M. Fernandes, D.B. Padmanaban, G. Maharana, M. Kovendhan, G. Veerappan, G. Laxminarayana, M. Banavoth, D.P. Joseph, Solvent effect on the optoelectronic properties of fluorine doped SnO<sub>2</sub> thin films prepared by spray-pyrolysis, *Surfaces and Interfaces* 33 (2022) 102174. <https://doi.org/10.1016/J.SURFIN.2022.102174>.
- [63] A.B. Workie, H.S. Ningsih, S.-J. Shih, An comprehensive review on the spray pyrolysis technique: historical context, operational factors, classifications, and product applications, *J Anal Appl Pyrolysis* (2023) 105915.
- [64] P. Fuchs, Y.E. Romanyuk, A.N. Tiwari, Chemical Bath Deposition, *Transparent Conductive Materials* (2018) 81–103. [https://doi.org/10.1002/9783527804603.ch2\\_2](https://doi.org/10.1002/9783527804603.ch2_2).
- [65] A. Mutalikdesai, S.K. Ramasesha, Solution process for fabrication of thin film CdS/CdTe photovoltaic cell for building integration, *Thin Solid Films* 632 (2017) 73–78. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2017.04.036>.
- [66] H. Il'chuk, P. Shapoval, V. Kusnezh, Chemical surface deposition of CdS ultra thin films from aqueous solutions, *Solar Cells-Thin-Film Technologies* (2011) 381–405.

- [67] F.-Q. Huang, M.-L. Liu, C. Yang, Highly enhanced p-type electrical conduction in wide band gap  $\text{Cu}_{1+x}\text{Al}_{1-x}\text{S}_2$  polycrystals, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 95 (2011) 2924–2927.
- [68] D. Naveena, T. Logu, K. Sethuraman, A.C. Bose, High crystalline  $\text{CuAlS}_2$  thin films via chemical spray pyrolysis route, in: *AIP Conf Proc*, AIP Publishing LLC, 2018: p. 80028.
- [69] A.K. Battu, N. Makeswaran, C. V Ramana, Fabrication, characterization and optimization of high conductivity and high quality nanocrystalline molybdenum thin films, *J Mater Sci Technol* 35 (2019) 2734–2741.
- [70] K. Wasa, I. Kanno, H. Kotera, *Handbook of Sputter Deposition Technology: Fundamentals and Applications for Functional Thin Films, Nano-Materials and MEMS: Second Edition*, 2012. <https://doi.org/10.1016/C2010-0-67037-4>.
- [71] P.D. Davidse, Theory and practice of RF sputtering, *Microelectronics Reliability* 6 (1967) 336. [https://doi.org/10.1016/0026-2714\(67\)90159-x](https://doi.org/10.1016/0026-2714(67)90159-x).
- [72] P. Chelvanathan, S.A. Shahahmadi, F. Arith, K. Sobayel, M. Aktharuzzaman, K. Sopian, F.H. Alharbi, N. Tabet, N. Amin, Effects of RF magnetron sputtering deposition process parameters on the properties of molybdenum thin films, *Thin Solid Films* 638 (2017) 213–219. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2017.07.057>.
- [73] B. Beckhoff, B. Kanngießler, N. Langhoff, R. Wedell, H. Wolff, *Handbook of practical X-ray fluorescence analysis*, Springer Science & Business Media, 2007.
- [74] D.N. Todor, *Thermal analysis of minerals*, Abacus press, 1976.
- [75] A.W.A. El-Shennawi, M.A. Mandour, M.M. Morsi, S.A.M. Abdel-Hameed, Monopyroxenic Basalt-Based Glass-Ceramics, *Journal of the American*

Ceramic Society 82 (2004) 1181–1186. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1999.tb01893.x>.

- [76] W. Zhou, R. Apkarian, Z.L. Wang, D. Joy, Fundamentals of scanning electron microscopy (SEM), in: Scanning Microscopy for Nanotechnology, Springer, 2006: pp. 1–40.
- [77] P.W. Hawkes, J.C.H. Spence, Springer handbook of microscopy, Springer Nature, 2019.
- [78] M. Naftaly, S. Das, J. Gallop, K. Pan, F. Alkhalil, D. Kariyapperuma, S. Constant, C. Ramsdale, L. Hao, Sheet resistance measurements of conductive thin films: A comparison of techniques, Electronics (Basel) 10 (2021) 960.
- [79] M.M. Ghorbani, R. Taherian, Methods of Measuring Electrical Properties of Material, Electrical Conductivity in Polymer-Based Composites: Experiments, Modelling, and Applications (2019) 365–394. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812541-0.00012-4>.
- [80] B. Mistry, H.K. Machhi, R.S. Vithalani, D.S. Patel, C.K. Modi, M. Prajapati, K.R. Surati, S.S. Soni, P.K. Jha, S.R. Kane, Harnessing the N-dopant ratio in carbon quantum dots for enhancing the power conversion efficiency of solar cells, Sustain Energy Fuels 3 (2019) 3182–3190.
- [81] A. Maalouf, T. Okoroafor, Z. Jehl, V. Babu, S. Resalati, A comprehensive review on life cycle assessment of commercial and emerging thin-film solar cell systems, Renewable and Sustainable Energy Reviews 186 (2023) 113652.
- [82] J. Houghton, Global warming, Reports on Progress in Physics 68 (2005) 1343.
- [83] R. van Zelm, P.-O. Roy, M.Z. Hauschild, M.A.J. Huijbregts, Acidification, Life Cycle Impact Assessment (2015) 163–176.

- [84] Z.H. Michael, K.R. Ralph, I.O. Stig, *Life Cycle Assessment: Theory and Practice*, (2018).
- [85] L. Barkat, M. Morsli, C. Amory, S. Marsillac, A. Khelil, J.C. Bernede, C. El Moctar, Study on the fabrication of n-type CuAlSe<sub>2</sub> thin films, *Thin Solid Films* 431 (2003) 99–104.
- [86] S. Haye, V.I. Slaveykova, J. Payet, Terrestrial ecotoxicity and effect factors of metals in life cycle assessment (LCA), *Chemosphere* 68 (2007) 1489–1496.
- [87] J. Moore, D.E. Sharp, Note on calculation of effect of temperature and composition on specific heat of glass, *Journal of the American Ceramic Society* 41 (1958) 461–463.
- [88] J. Rumble, *CRC handbook of chemistry and physics*, (2017).
- [89] R. Wang, E. Song, C. Zhang, X. Zhuang, E. Ma, J. Bai, W. Yuan, J. Wang, Pyrolysis-based separation mechanism for waste crystalline silicon photovoltaic modules by a two-stage heating treatment, *RSC Adv* 9 (2019) 18115–18123. <https://doi.org/10.1039/c9ra03582f>.
- [90] A. Saleki-Gerhardt, C. Ahlneck, G. Zografis, Assessment of disorder in crystalline solids, *Int J Pharm* 101 (1994) 237–247.
- [91] J.W. Martin, Glasses and ceramics, *Materials for Engineering* (2006) 133–158. <https://doi.org/10.1533/9781845691608.2.133>.
- [92] M. Hasanuzzaman, A. Rafferty, M. Sajjia, A.-G. Olabi, *Properties of Glass Materials*, Reference Module in Materials Science and Materials Engineering (2016). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.03998-9>.
- [93] Soda-Lime Glass - an overview | ScienceDirect Topics, (n.d.). <https://www.sciencedirect.com/topics/chemistry/soda-lime-glass> (accessed October 18, 2020).

- [94] M. Chromčíková, M. Liška, J. Macháček, J. Chovanec, Thermodynamic model and viscosity of Na<sub>2</sub>O–MgO–CaO–SiO<sub>2</sub> glasses, *J Non Cryst Solids* 401 (2014) 237–240.
- [95] S. Mageswari, L. Dhivya, B. Palanivel, R. Murugan, Structural, morphological and optical properties of Na and K dual doped CdS thin film, *J Alloys Compd* 545 (2012) 41–45.
- [96] V.S. Savenko, *Ecosphere and Biosphere, Geography and Natural Resources* 44 (2023) 9–15.
- [97] M. Krebs-Moberg, M. Pitz, T.L. Dorsette, S.H. Gheewala, Third generation of photovoltaic panels: A life cycle assessment, *Renew Energy* 164 (2021) 556–565. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.09.054>.
- [98] N. Suppen, M. Carranza, M. Huerta, M. Hernández, Environmental management and life cycle approaches in the Mexican mining industry, *Journal of Cleaner Production - J CLEAN PROD* 14 (2006) 1101–1115. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2004.12.020>.
- [99] T. Hamasaki, H. Nagase, Y. Yoshioka, T. Sato, Formation, distribution, and ecotoxicity of methylmetals of tin, mercury, and arsenic in the environment, *Crit Rev Environ Sci Technol* 25 (1995) 45–91.
- [100] R.P. Scott, A.C. Cullen, Reducing the life cycle environmental impacts of kesterite solar photovoltaics: comparing carbon and molybdenum back contact options, *International Journal of Life Cycle Assessment* 21 (2016) 29–43. <https://doi.org/10.1007/s11367-015-0978-4>.
- [101] C.F. Blanco, S. Cucurachi, W.J.G.M. Peijnenburg, A. Beames, M.G. Vijver, Are Technological Developments Improving the Environmental Sustainability of Photovoltaic Electricity?, *Energy Technology* 8 (2020). <https://doi.org/10.1002/ente.201901064>.

- [102] V. Aryan, M. Font-Brucart, D. Maga, A comparative life cycle assessment of end-of-life treatment pathways for photovoltaic backsheets, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 26 (2018) 443–459. <https://doi.org/10.1002/pip.3003>.
- [103] E.A. Ostrakhovitch, Tin, in: *Handbook on the Toxicology of Metals*, Elsevier, 2022: pp. 807–856.
- [104] H. Bruijn, R. Duin, M.A.J. Huijbregts, J.B. Guinee, M. Gorree, R. Heijungs, G. Huppes, R. Kleijn, A. Koning, L. Oers, *Handbook on life cycle assessment: operational guide to the ISO standards*, Springer, 2004.
- [105] D.P. Joseph, P. Renugambal, M. Saravanan, S.P. Raja, C. Venkateswaran, Effect of Li doping on the structural, optical and electrical properties of spray deposited SnO<sub>2</sub> thin films, *Thin Solid Films* 517 (2009) 6129–6136.
- [106] R.H. Brugge, R.J. Chater, J.A. Kilner, A. Agüero, Experimental determination of Li diffusivity in LLZO using isotopic exchange and FIB-SIMS, *Journal of Physics: Energy* 3 (2021) 34001.
- [107] S. Muto, K. Tatsumi, Detection of local chemical states of lithium and their spatial mapping by scanning transmission electron microscopy, electron energy-loss spectroscopy and hyperspectral image analysis, *Microscopy* 66 (2017) 39–49.
- [108] F. Maisel, C. Neef, F. Marscheider-Weidemann, N.F. Nissen, A forecast on future raw material demand and recycling potential of lithium-ion batteries in electric vehicles, *Resour Conserv Recycl* 192 (2023) 106920.
- [109] L.V. Garcia, Y.-C. Ho, M.M. Myo Thant, D.S. Han, J.W. Lim, Lithium in a sustainable circular economy: A comprehensive review, *Processes* 11 (2023) 418.

