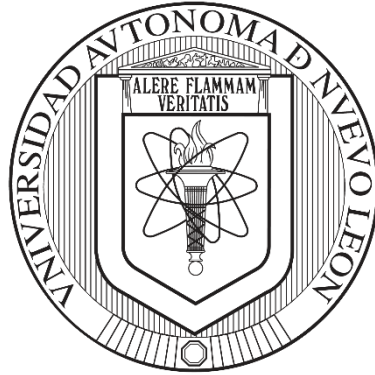


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



**ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA COMPARATIVO DEL
USO DE TECNOLOGÍAS DE PELÍCULAS DELGADAS
DE ÓXIDOS SEMICONDUCTORES PARA SU
APLICACIÓN EN VENTANAS INTELIGENTES EN
RASCACIELOS: DEPÓSITO, CARACTERIZACIÓN Y
EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL**

POR:

CARLOS ENRIQUE CABALLERO GÜERCA

Como requisito parcial para obtener el Grado de
MAESTRÍA EN CIENCIAS con Orientación en
Ingeniería Ambiental

junio de 2023

Aquí va el formato sellado de solicitud de examen de grado.

Aquí va la carta de notificación de término de tesis.

Aquí va la carta de aprobación de tesis por parte de evaluador.

APROBACIÓN DE LA TESIS

Dra. María Rocío Alfaro Cruz
DIRECTORA DE TESIS

Dra. Edith Luévano Hipólito
CO-DIRECTORA DE TESIS

Dra. María Guadalupe Paredes Figueroa
EVALUADORA EXTERNA

Dr. Gerardo de Jesús Fajardo San Miguel
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

A

*Leonor Patricia Güereca Hernández
y Carlos Antonio Caballero Valdés*

ÍNDICE DE CONTENIDO

Glosario	XXIV
Resumen	XXVI
Abstract	XXX
Auszug	XXXIV
Agradecimientos.....	XXXVII
Capítulo 1: Introducción y marco teórico	1
1.1 Introducción	1
1.2 Marco teórico	2
1.2.1 Categorización de ventanas inteligentes.....	3
1.2.2 Películas delgadas	5
1.2.3 Análisis de Ciclo de Vida.....	12
1.4 Hipótesis	19
1.5 Objetivos.....	20
1.5.1 Objetivo General	20
1.5.2 Objetivos Específicos	20
Capítulo 2: Metodología experimental.....	22
2.1 Metodología	22
2.2 Nomenclatura de muestras.....	23
2.3 Métodos de caracterización.....	26
Capítulo 3: Caracterización y resultados de los materiales.....	27
3.1 Vidrio de ventana tradicional.....	28
3.1.1 Difracción de rayos X	28
3.1.2 Microscopía de fuerza atómica	29

3.1.3 Espectroscopía UV-Vis	30
3.1.4 Análisis de la forma de gota	31
3.2 SiO ₂	32
3.2.1 Difracción de rayos X	32
3.2.2 Microscopía de fuerza atómica	33
3.2.3 Espectroscopía UV-Vis	35
3.2.4 Análisis de la forma de gota	36
3.3 ZnO.....	36
3.3.1 Difracción de rayos X	37
3.3.2 Microscopía de fuerza atómica	40
3.3.3 Espectroscopía UV-Vis	42
3.3.4 Análisis de la forma de gota	45
3.4 TiO ₂	46
3.4.1 Difracción de rayos X	47
3.4.2 Microscopía de fuerza atómica	47
3.4.3 Espectroscopía UV-Vis	49
3.4.4 Análisis de la forma de gota	49
3.5 VO ₂	50
3.5.1 Difracción de rayos X	50
3.5.2 Microscopía de fuerza atómica	51
3.5.3 Espectroscopía UV-Vis	53
3.5.4 Análisis de la forma de gota	54
3.6 Multicapas.....	55
3.6.1 Difracción de rayos X	56

3.6.2 Microscopía de fuerza atómica	56
3.6.3 Espectroscopía UV-Vis	58
3.6.4 Análisis de la forma de gota	58
3.7 Intemperismo acelerado	59
3.7.1 Difracción de rayos X	59
3.7.2 Microscopía de fuerza atómica	60
3.7.3 Espectroscopía UV-Vis	61
3.7.4 Análisis de la forma de gota	62
3.8 Resultados del capítulo: de la caracterización de materiales al Análisis de Ciclo de Vida.....	64
3.8.1 Películas delgadas	64
3.8.2 Multicapas e intemperismo.....	65
Capítulo 4: Análisis de Ciclo de Vida.....	66
4.1 Definición del objetivo y alcance.....	66
4.1.1 Objetivo	66
4.1.2 Función	66
4.1.3 Unidad Funcional	66
4.2 Descripción y límite de los sistemas	67
4.2.1 Descripción de los escenarios propuestos	69
4.2.2 Metodología de evaluación de impacto seleccionada	71
4.3 Análisis de Inventario.....	76
4.3.1 Hidrofobicidad y ahorros hídricos	80
4.3.2 Fotocatálisis y mejoras en la calidad del aire	83
4.3.3 Termocromicidad y ahorros energéticos	84

4.4 Evaluación de los impactos del ciclo de vida	90
4.4.1 Evaluación simultánea de todas las propiedades	92
4.4.2 Hidrofobicidad y ahorros hídricos	95
4.4.3 Fotocatálisis y mejoras en la calidad del aire	97
4.4.4 Termocromicidad y ahorros energéticos	99
4.5 Interpretación y discusión de los resultados de Análisis de Ciclo de Vida .	101
4.5.1 Todas las propiedades	101
4.5.2 Hidrofobicidad y ahorros hídricos	121
4.5.3 Fotocatálisis y mejoras en la calidad del aire	129
4.5.4 Termocromicidad y ahorros energéticos	135
4.6 Análisis de sensibilidad.....	141
4.6.1 Agotamiento de recursos hídricos (ARH)	143
4.6.2 Toxicidad humana (TH).....	145
4.6.3 Formación de materia particulada (FMP)	148
4.6.4 Ecotoxicidad en agua dulce (EAD).....	149
4.6.5 Agotamiento de metales (AM)	151
4.6.6 Formación de oxidantes fotoquímicos (FOF)	152
4.6.7 Acidificación terrestre (AT)	154
4.6.8 Cambio climático (CC)	155
Capítulo 5: Conclusiones	157
5.1 Conclusiones de la caracterización de los materiales	157
5.2 Conclusiones del Análisis de Ciclo de Vida	158
5.3 Limitaciones, recomendaciones y futuras líneas de estudio	160
Referencias	163

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estructura del marco teórico. *Análisis de Ciclo de Vida	3
Figura 2. Clasificación de tipos de ventanas inteligentes	4
Figura 3. Síntesis de películas mediante el método sol-gel: Dip-coating. Adaptado de [23].	8
Figura 4. A) Diagrama de fuerza de la ecuación de Young y medida del ángulo de contacto asociado. Adaptado de [25]. B) Modelo de Wenzel C) Modelo de Cassie-Baxter. Adaptado de [29].	9
Figura 5. Estructura de un Análisis de Ciclo de Vida. Fuente: adaptado de ISO 14040. Adaptado de [49].	15
Figura 6. Ciclo de vida de una ventana. Adaptado de [51].	16
Figura 7. Equipos utilizados para el depósito y caracterización de las muestras..	26
Figura 8. Difractograma de rayos X del vidrio tradicional	29
Figura 9. Morfología superficial caracterizada por MFA del vidrio tradicional, área de $6.25\mu\text{m}\times 6.25\mu\text{m}$	30
Figura 10. Porcentaje de transmitancia en UV-Vis del vidrio tradicional.	31
Figura 11. Mojabilidad (ángulo de contacto con el agua) de la superficie del vidrio tradicional.	32
Figura 12. Difractograma de rayos X de las películas de SiO_2 depositadas variando la temperatura del tratamiento térmico (200°C , 300°C y 400°C).	33
Figura 13. Morfología superficial caracterizada por MFA de las películas delgadas de SiO_2 depositadas variando la temperatura del tratamiento térmico (A) 200°C , B) 300°C y C) 400°C). Área de $6.25\mu\text{m}\times 6.25\mu\text{m}$	34
Figura 14. Porcentaje de transmitancia en UV-Vis de las películas delgadas de SiO_2 depositadas variando la temperatura del tratamiento térmico (200°C , 300°C y 400°C).	35

Figura 15. Mojabilidad (ángulo de contacto con el agua) de la superficie de las películas delgadas de SiO ₂ depositadas variando la temperatura del tratamiento térmico (A) 200°C, B) 300°C y C) 400°C).....	36
Figura 16. Difractograma de rayos X de las películas de ZnO depositadas variando la temperatura del tratamiento térmico (200°C, 300°C, 400°C y 500°C) y la molaridad de la solución precursora (0.25M, 0.50M, 1.00M, 1.25M).....	38
Figura 17. Morfología superficial caracterizada por MFA de las películas delgadas de ZnO depositadas variando la temperatura del tratamiento térmico (200°C, 300°C, 400°C y 500°C) y la molaridad de la solución precursora (0.25M, 0.50M, 1.00M, 1.25M). Área de 1µmx1µm.....	41
Figura 18. Porcentaje de transmitancia en UV-Vis de las películas delgadas de ZnO depositadas variando la temperatura del tratamiento térmico (200°C, 300°C, 400°C y 500°C) y la molaridad de la solución precursora (0.25M, 0.50M, 1.00M, 1.25M).	44
Figura 19. Gráficas de Tauc de las películas delgadas de ZnO depositadas variando la temperatura del tratamiento térmico (200°C, 300°C, 400°C y 500°C) y la molaridad de la solución precursora (0.25M, 0.50M, 1.00M, 1.25M).....	45
Figura 20. Mojabilidad (ángulo de contacto con el agua) de la superficie de las películas delgadas de ZnO depositadas variando la temperatura del tratamiento térmico (200°C, 300°C, 400°C y 500°C) y la molaridad de la solución precursora (0.25M, 0.50M, 1.00M, 1.25M).	46
Figura 21. Difractograma de rayos X de las películas de TiO ₂ depositadas variando la temperatura del tratamiento térmico (200°C, 300°C, 400°C y 500°C).	47
Figura 22. Morfología superficial caracterizada por MFA de las películas delgadas de TiO ₂ depositadas variando la temperatura del tratamiento térmico (A) 200°C, B) 300°C, C) 400°C y D) 500°C). Área de 6.25µmx6.25µm.....	48
Figura 23. Porcentaje de transmitancia en UV-Vis de las películas delgadas de TiO ₂ depositadas variando la temperatura del tratamiento térmico (200°C, 300°C, 400°C y 500°C).	49

Figura 24. Mojabilidad (ángulo de contacto con el agua) de la superficie de las películas delgadas de TiO ₂ depositadas variando la temperatura del tratamiento térmico (A) 200°C, B) 300°C, C) 400°C y D) 500°C).....	50
Figura 25. Difractograma de rayos X de las películas delgadas de VO ₂ depositadas variando el tiempo de envejecimiento de la solución precursora (24h, 48h y 72h).	51
Figura 26. Morfología superficial caracterizada por MFA de las películas delgadas de VO ₂ depositadas variando el tiempo de envejecimiento de la solución precursora (A) 24h, B) 48h y C) 72h). Área de 6.25µm x 6.25µm.	52
Figura 27. Porcentaje de transmitancia en UV-Vis de las películas delgadas de VO ₂ depositadas variando el tiempo de envejecimiento de la solución precursora (24h, 48h y 72h).	54
Figura 28. Mojabilidad (ángulo de contacto con el agua) de la superficie de las películas delgadas de VO ₂ depositadas variando el tiempo de envejecimiento de la solución precursora (A) 24h, B) 48h y C) 72h).	55
Figura 29. Difractograma de rayos X de las multicapas depositando un material encima del anterior (SiO ₂ ; SiO ₂ + VO ₂ ; SiO ₂ + VO ₂ + TiO ₂ y SiO ₂ + VO ₂ + TiO ₂ + ZnO).	56
Figura 30. Morfología superficial caracterizada por MFA de las multicapas depositando un material encima del anterior (A) SiO ₂ ; B) SiO ₂ + VO ₂ ; C) SiO ₂ + VO ₂ + TiO ₂ y D) SiO ₂ + VO ₂ + TiO ₂ + ZnO). Área de 6.25µm x 6.25µm.	57
Figura 31. Porcentaje de transmitancia en UV-Vis de las multicapas depositando un material encima del anterior (SiO ₂ ; SiO ₂ + VO ₂ ; SiO ₂ + VO ₂ + TiO ₂ y SiO ₂ + VO ₂ + TiO ₂ + ZnO).	58
Figura 32. Mojabilidad (ángulo de contacto con el agua) de la superficie de las multicapas depositando un material encima del anterior (A) SiO ₂ ; B) SiO ₂ + VO ₂ ; C) SiO ₂ + VO ₂ + TiO ₂ y D) SiO ₂ + VO ₂ + TiO ₂ + ZnO).....	59

Figura 33. Difractograma de rayos X de las películas delgadas y sus multicapas antes y después de las pruebas de intemperismo.	60
Figura 34. Difractograma de rayos X de las películas delgadas y sus multicapas antes y después de las pruebas de intemperismo. Área de $6.25\mu\text{m} \times 6.25\mu\text{m}$	61
Figura 35. Porcentaje de transmitancia en UV-Vis de las películas delgadas y sus multicapas antes y después de las pruebas de intemperismo.	62
Figura 36. Mojabilidad (ángulo de contacto con el agua) de la superficie de las películas delgadas y sus multicapas antes y después de las pruebas de intemperismo.	63
Figura 37. Influencia de las pruebas de intemperismo después de 0, 100 y 200 horas en la mojabilidad (ángulo de contacto con el agua) de la superficie de las películas delgadas y sus multicapas.	63
Figura 38. Fotografía del complejo Torres Obispado, donde se aprecia la torre TOP a la derecha. Elaboración propia.	67
Figura 39. Diagrama que ilustra el flujo de materia a través del ciclo de vida de los escenarios propuestos.	69
Figura 40. Lista de categorías de impacto de punto medio y punto final. Adaptado de [85].	76
Figura 41. Gráfica rendimiento-tiempo para describir la degradación de las propiedades de las películas delgadas a través del tiempo.	82
Figura 42. Mecanismo de degradación fotocatalítica. Adaptado de [92].	84
Figura 43. Impacto ambiental normalizado por escenario y por categoría de impacto. Evaluación de impacto ambiental simultánea de todas las propiedades.	93
Figura 44. Síntesis de los impactos ambientales de punto final a la calidad de ecosistemas, salud humana y recursos, en puntos. Evaluación simultánea de todas las propiedades.	94

Figura 45. Impacto ambiental normalizado por escenario y por categoría de impacto. Evaluación de impacto ambiental de las propiedades hidrofóbicas.	96
Figura 46. Impacto ambiental normalizado por escenario y por categoría de impacto. Evaluación de impacto ambiental de las propiedades fotocatalíticas.	98
Figura 47. Impacto ambiental normalizado por escenario y por categoría de impacto. Evaluación de impacto ambiental de las propiedades termocrómicas.	100
Figura 48. Contribución por etapas al impacto total para la categoría de agotamiento de recursos hídricos. Evaluación simultánea de todas las propiedades.	103
Figura 49. Contribución por etapas al impacto total para la categoría de toxicidad humana. Evaluación simultánea de todas las propiedades.	105
Figura 50. Contribución por etapas al impacto total para la categoría de formación de materia particulada. Evaluación simultánea de todas las propiedades.	107
Figura 51. Contribución por etapas al impacto total para la categoría de ecotoxicidad en agua dulce. Evaluación simultánea de todas las propiedades.	109
Figura 52. Contribución por etapas al impacto total para la categoría de agotamiento de metales. Evaluación simultánea de todas las propiedades.	113
Figura 53. Contribución por etapas al impacto total para la categoría de formación de oxidantes fotoquímicos. Evaluación simultánea de todas las propiedades. ...	115
Figura 54. Contribución por etapas al impacto total para la categoría de acidificación terrestre. Evaluación simultánea de todas las propiedades.	118
Figura 55. Contribución por etapas al impacto total para la categoría de cambio climático. Evaluación simultánea de todas las propiedades.	120
Figura 56. Contribución por etapas al impacto total para la categoría de agotamiento de recursos hídricos. Evaluación de las propiedades hidrofóbicas.	123
Figura 57. Contribución por etapas al impacto total para la categoría de toxicidad humana. Evaluación de las propiedades hidrofóbicas.	126

Figura 58. Contribución por etapas al impacto total para la categoría de cambio climático. Evaluación de las propiedades hidrofóbicas.	128
Figura 59. Contribución por etapas al impacto total para la categoría de formación de oxidantes fotoquímicos. Evaluación de las propiedades fotocatalíticas.	131
Figura 60. Contribución por etapas al impacto total para la categoría de acidificación terrestre. Evaluación de las propiedades fotocatalíticas.	133
Figura 61. Contribución por etapas al impacto total para la categoría de cambio climático. Evaluación de las propiedades fotocatalíticas.	134
Figura 62. Contribución por etapas al impacto total para la categoría de ecotoxicidad en agua dulce. Evaluación de las propiedades termocrómicas.	137
Figura 63. Contribución por etapas al impacto total para la categoría de agotamiento de metales. Evaluación de las propiedades termocrómicas.	139
Figura 64. Contribución por etapas al impacto total para la categoría de cambio climático. Evaluación de las propiedades termocrómicas.	141
Figura 65. Síntesis de los impactos ambientales de punto final a la calidad de ecosistemas, salud humana y recursos, en puntos, por ciudad. Evaluación de las propiedades termocrómicas.	143
Figura 66. Impactos normalizados para la categoría de impacto de agotamiento de recursos hídricos, por ciudad. Evaluación de las propiedades termocrómicas. ..	145
Figura 67. Impactos normalizados para la categoría de impacto de toxicidad humana, por ciudad. Evaluación de las propiedades termocrómicas.	146
Figura 68. Impactos normalizados para la categoría de impacto de formación de materia particulada, por ciudad. Evaluación de las propiedades termocrómicas.	149
Figura 69. Impactos normalizados para la categoría de impacto de ecotoxicidad en agua dulce, por ciudad. Evaluación de las propiedades termocrómicas.	150
Figura 70. Impactos normalizados para la categoría de impacto de agotamiento de metales, por ciudad. Evaluación de las propiedades termocrómicas.	152

Figura 71. Impactos normalizados para la categoría de impacto de formación de oxidantes fotoquímicos, por ciudad. Evaluación de las propiedades termocrómicas.	153
Figura 72. Impactos normalizados para la categoría de impacto de acidificación terrestre, por ciudad. Evaluación de las propiedades termocrómicas.	155
Figura 73. Impactos normalizados para la categoría de impacto de cambio climático, por ciudad. Evaluación de las propiedades termocrómicas.	156

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Revisión bibliográfica de películas delgadas de diferentes materiales semiconductores y sus respectivos ángulos de contacto con el agua θ	11
Tabla 2. Revisión bibliográfica de publicaciones sobre evaluaciones de impacto ambiental de película delgadas con un enfoque de ACV.	17
Tabla 3. Revisión bibliográfica de publicaciones sobre evaluaciones de impacto ambiental de ventanas inteligentes con base en películas delgadas con un enfoque de ACV.....	19
Tabla 4. Sistemas químicos utilizados para la elaboración de las películas delgadas mediante sol-gel.....	22
Tabla 5. Condiciones de depósito para las películas delgadas y sus multicapas, depositadas mediante sol-gel.....	24
Tabla 6. Caracterización de las películas delgadas.	27
Tabla 7. Valores de rugosidad de las películas delgadas de SiO ₂ depositadas variando la temperatura del tratamiento térmico (200°C, 300°C y 400°C). Área de 6.25 μ m x 6.25 μ m.	34
Tabla 8. Condiciones de depósito de las películas delgadas de ZnO depositadas variando la temperatura del tratamiento térmico (200°C, 300°C, 400°C y 500°C) y la molaridad de la solución precursora (0.25M, 0.50M, 1.00M, 1.25M).....	37
Tabla 9. Coeficientes de textura para los principales picos de las películas delgadas de ZnO.	39
Tabla 10. Propiedades estructurales de las películas de ZnO.	40
Tabla 11. Valores de rugosidad superficial de las películas delgadas de ZnO depositadas variando la temperatura del tratamiento térmico (200°C, 300°C, 400°C y 500°C) y la molaridad de la solución precursora (0.25M, 0.50M, 1.00M, 1.25M). Área de 1 μ m x 1 μ m.....	42

Tabla 12. Valores de rugosidad de las películas delgadas de TiO ₂ depositadas variando la temperatura del tratamiento térmico (200°C, 300°C, 400°C y 500°C). Área de 6.25µm x 6.25µm.....	48
Tabla 13. Valores de rugosidad de las películas delgadas de VO ₂ depositadas variando el tiempo de envejecimiento de la solución precursora (24h, 48h y 72h). Área de 6.25µm x 6.25µm.....	53
Tabla 14. Valores de rugosidad de las multicapas depositando un material encima del anterior (SiO ₂ ; SiO ₂ + VO ₂ ; SiO ₂ + VO ₂ + TiO ₂ y SiO ₂ + VO ₂ + TiO ₂ + ZnO). Área de 6.25µm x 6.25µm.	57
Tabla 15. Valores de rugosidad de las películas delgadas y sus multicapas antes y después de las pruebas de intemperismo. Área de 6.25µm x 6.25µm.....	61
Tabla 16. Designación de nomenclatura y características de los escenarios propuestos que representan a la ventana tradicional, la ventana aislante y las ventanas inteligentes con base en las distintas películas delgadas y sus multicapas	67
Tabla 17. Categorías de impacto seleccionadas.....	74
Tabla 18. Matriz de transporte para ubicaciones propuestas.....	77
Tabla 19. Asignación de propiedades especiales por escenario.....	79
Tabla 20. Asignación de ahorros hídricos por escenario.....	80
Tabla 21. Inventario de entradas y salidas para el proceso fotocatalítico de las películas delgadas y multicapas de TiO ₂	84
Tabla 22. Asignación de ahorros energéticos por escenario.....	85
Tabla 23. Requerimientos energéticos para calefacción y enfriamiento en MWh para los 40 años y 63 pisos de la Unidad Funcional.	90
Tabla 24. Impacto ambiental absoluto por escenario y por categoría de impacto. Evaluación de impacto ambiental simultánea de todas las propiedades.....	93

Tabla 25. Síntesis de los impactos ambientales de punto final a la calidad de ecosistemas, salud humana y recursos, en puntos. Evaluación simultánea de todas las propiedades.....	95
Tabla 26. Impacto ambiental absoluto por escenario y por categoría de impacto. Evaluación de impacto ambiental de las propiedades hidrofóbicas.	97
Tabla 27. Impacto ambiental absoluto por escenario y por categoría de impacto. Evaluación de impacto ambiental de las propiedades fotocatalíticas.....	98
Tabla 28. Impacto ambiental absoluto por escenario y por categoría de impacto. Evaluación de impacto ambiental de las propiedades termocrómicas.	100
Tabla 29. Contribución absoluta en [m ³ agua eq.] por etapas al impacto total para la categoría de agotamiento de recursos hídricos. Evaluación simultánea de todas las propiedades.....	104
Tabla 30. Contribución absoluta en [kg 1.4-DB eq.] por etapas al impacto total para la categoría de toxicidad humana. Evaluación simultánea de todas las propiedades.	105
Tabla 31. Contribución absoluta en [kg PM10 eq.] por etapas al impacto total para la categoría de formación de materia particulada. Evaluación simultánea de todas las propiedades.....	107
Tabla 32. Contribución absoluta en [kg P eq.] por etapas al impacto total para la categoría de ecotoxicidad en agua dulce. Evaluación simultánea de todas las propiedades.....	109
Tabla 33. Contribución absoluta en [kg Fe eq.] por etapas al impacto total para la categoría de agotamiento de metales. Evaluación simultánea de todas las propiedades.....	113
Tabla 34. Contribución absoluta en [kg NMCOV eq.] por etapas al impacto total para la categoría de formación de oxidantes fotoquímicos. Evaluación simultánea de todas las propiedades.	116

Tabla 35. Contribución absoluta en [kg SO ₂ eq.] por etapas al impacto total para la categoría de acidificación terrestre. Evaluación simultánea de todas las propiedades.....	118
Tabla 36. Contribución absoluta en [kg CO ₂ eq.] por etapas al impacto total para la categoría de cambio climático. Evaluación simultánea de todas las propiedades.	120
Tabla 37. Contribución absoluta en [m ³ agua eq.] por etapas al impacto total para la categoría de impacto de agotamiento recursos hídricos. Evaluación de las propiedades hidrofóbicas.	124
Tabla 38. Contribución absoluta en [kg 1.4-DB eq.] por etapas al impacto total para la categoría de toxicidad humana. Evaluación de las propiedades hidrofóbicas.	126
Tabla 39. Contribución absoluta en [kg CO ₂ eq.] por etapas al impacto total para la categoría de cambio climático. Evaluación de las propiedades hidrofóbicas.	129
Tabla 40. Contribución absoluta en [kg NMCOV eq.] por etapas al impacto total para la categoría de formación de oxidantes fotoquímicos. Evaluación de las propiedades fotocatalíticas.	131
Tabla 41. Contribución absoluta en [kg SO ₂ eq.] por etapas al impacto total para la categoría de acidificación terrestre. Evaluación de las propiedades fotocatalíticas.	133
Tabla 42. Contribución absoluta en [kg CO ₂ eq.] por etapas al impacto total para la categoría de cambio climático. Evaluación de las propiedades fotocatalíticas....	135
Tabla 43. Contribución absoluta en [kg P eq.] por etapas al impacto total para la categoría de ecotoxicidad en agua dulce. Evaluación de las propiedades termocrómicas.....	137
Tabla 44. Contribución absoluta en [kg Fe eq.] por etapas al impacto total para la categoría de agotamiento de metales. Evaluación de las propiedades termocrómicas.....	139

Tabla 45. Contribución absoluta en [kg CO ₂ eq.] por etapas al impacto total para la categoría de cambio climático. Evaluación de las propiedades termocrómicas. .	141
Tabla 46. Síntesis de los impactos ambientales de punto final, sumatoria total, en puntos, por ciudad. Evaluación de las propiedades termocrómicas.....	143
Tabla 47. Impactos absolutos en [m ³ agua eq.] para la categoría de impacto de agotamiento de recursos hídricos, por ciudad. Evaluación de las propiedades termocrómicas.....	145
Tabla 48. Impactos absolutos en [kg 1.4-DB eq.] para la categoría de impacto de toxicidad humana, por ciudad. Evaluación de las propiedades termocrómicas. .	147
Tabla 49. Impactos absolutos en [kg PM10 eq.] para la categoría de impacto de formación de materia particulada, por ciudad. Evaluación de las propiedades termocrómicas.....	149
Tabla 50. Impactos absolutos en [kg P eq.] para la categoría de impacto de ecotoxicidad en agua dulce, por ciudad. Evaluación de las propiedades termocrómicas.....	151
Tabla 51. Impactos absolutos en [kg Fe eq.] para la categoría de impacto de agotamiento de metales, por ciudad. Evaluación de las propiedades termocrómicas.	152
Tabla 52. Impactos absolutos en [en kg NMCOV eq.] para la categoría de impacto de formación de oxidantes fotoquímicos, por ciudad. Evaluación de las propiedades termocrómicas.....	153
Tabla 53. Impactos absolutos en [kg SO ₂ eq.] para la categoría de impacto de acidificación terrestre, por ciudad. Evaluación de las propiedades termocrómicas.	155
Tabla 54. Impactos absolutos en [kg CO ₂ eq.] para la categoría de impacto de cambio climático, por ciudad. Evaluación de las propiedades termocrómicas. ...	156

GLOSARIO

Español	English	Deutsch
ACV: Análisis de Ciclo de Vida	LCA: Lifecycle Assessment	LZA: Lebenszyklusanalyse
AM: Agotamiento de metales	MD: Metal depletion	AM: Abbau von Metallen
ARH: Agotamiento de recursos hídricos	WD: Water depletion	WV: Wasserverbrauch
AT: Acidificación terrestre	TA: Terrestrial acidification	BV: Bodenversauerung
CC: Cambio climático	CC: Climate Change	KW: Klimawandel
CIGS: Cobre-Indio-Galio-Selenio-Sulfuro	CIGS: Copper-Indium-Gallium-Selenium-Sulfide	CIGS: Kupfer-Indium-Gallium-Selen-Sulfid
CO ₂ : Dióxido de carbono	CO ₂ : Carbon dioxide	CO ₂ : Kohlenstoffdioxid
COP: Coeficiente de rendimiento	COP: Coefficient of performance	COP: Leistungskoeffizient
CVD: Deposición química de vapor	CVD: Chemical Vapor Deposition	CVD: Chemische Gasphasenabscheidung
EAD: Ecotoxicidad en agua dulce	FE: Freshwater ecotoxicity	ÖS: Ökotoxizität im Süßwasser
FMP: Formación de materia particulada	PMF: Particulate matter formation	BF: Bildung von Feinstaub
FOF: Formación de oxidantes fotoquímicos	POF: Photochemical oxidant formation	BPO: Bildung photochemischer Oxidantien

FWHM: Anchura a media altura	FWHM: Full width at half maximum	FWHM: Halbwertsbreite
ICV: Inventario de Ciclo de Vida	LCI: Life Cycle Inventory	LZI: Lebenszyklusinventur
ISO: Organización Internacional de Estandarización	ISO: International Organization for Standardization	ISO: Internationale Standardisierungsorganisation
MBE: Epitaxia de haz molecular	MBE: Molecular-beam epitaxy	MSE: Molekularstrahlepitaxie
SiO ₂ : Dióxido de silicio	SiO ₂ : Silicon dioxide	SiO ₂ : Siliciumdioxid
TH: Toxicidad humana	HT: Human toxicity	MT: Menschliche Toxizität
TiO ₂ : Dióxido de titanio	TiO ₂ : Titanium dioxide	TiO ₂ : Titandioxid
tkm: tonelada-kilómetro	tkm: metric ton-kilometer	tkm: Tonne-Kilometer
VO ₂ : Dióxido de vanadio	VO ₂ : Vanadium dioxide	VO ₂ : Vanadiumdioxid
ZMM: Zona Metropolitana de Monterrey	MZM: Metropolitan Zone of Monterrey	MRM: Metropolregion Monterrey
ZnO: Óxido de zinc	ZnO: Zinc oxide	ZnO: Zinkoxid

RESUMEN

Carlos Enrique Caballero Güereca

Fecha de Graduación: agosto de 2023

Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Civil

Título del estudio: Análisis de Ciclo de Vida comparativo del uso de tecnologías de películas delgadas de óxidos semiconductores para su aplicación en ventanas inteligentes en rascacielos: depósito, caracterización y evaluación del impacto ambiental.

Número de páginas: 219

**Candidato para el Grado de Maestría en
Ciencias con Orientación en Ingeniería
Ambiental**

Área de Estudio: Ingeniería Ambiental

Propósito y método del estudio:

El presente trabajo se divide en dos partes. En la primera parte, se llevó a cabo el depósito y caracterización de películas delgadas sobre sustratos de vidrio. Se seleccionaron cuatro materiales semiconductores: SiO_2 , VO_2 , TiO_2 y ZnO , debido a sus propiedades específicas que los hacen adecuados para su aplicación en ventanas inteligentes. El SiO_2 se utilizó como capa ligante para prolongar la vida útil de los recubrimientos, el VO_2 por sus propiedades termocrómicas que podrían generar ahorros energéticos al regular la transmisión de calor, el TiO_2 por sus propiedades fotocatalíticas que podrían contribuir a la limpieza del aire exterior del edificio, y el ZnO por sus propiedades hidrofóbicas que podrían conducir a ahorros en el consumo de agua para la limpieza de las fachadas.

El método de depósito utilizado fue el Sol-Gel, y las películas depositadas fueron caracterizadas mediante técnicas como Difracción de Rayos X (DRX), Microscopía de Fuerza Atómica (AFM), Espectroscopía UV-Vis y Análisis de la forma de gota (DSA). Se analizaron las propiedades ópticas, estructurales y la hidrofobicidad de las películas. Además, se depositaron multicapas compuestas por diferentes combinaciones de los materiales seleccionados. Las muestras se sometieron a

pruebas de intemperismo acelerado para evaluar el efecto de las condiciones climáticas habituales en la hidrofobicidad de las películas. Se observó que las películas de ZnO mostraron un comportamiento hidrofóbico antes de las pruebas de intemperismo, mientras que los otros materiales presentaron un comportamiento hidrofílico. Después de las pruebas de intemperismo, la mayoría de las películas y multicapas exhibieron un comportamiento hidrofóbico, lo que indica que las condiciones climáticas mejoraron su propiedad de repelencia al agua.

En la segunda parte del trabajo, se realizó una evaluación del impacto ambiental utilizando el enfoque de Análisis de Ciclo de Vida (ACV, ISO 14040/14044) prospectivo. El objetivo fue comparar el desempeño ambiental de las diferentes tecnologías de películas delgadas de óxidos semiconductores en ventanas inteligentes, tomando como caso de estudio la fachada del rascacielos Torre TOP en Monterrey, México, considerado el edificio más alto de América Latina. Se definió la Unidad Funcional como la cantidad de vidrio que recubre la envolvente de la Torre TOP durante un período de estudio de 40 años.

Se establecieron siete escenarios que representan a las diferentes ventanas inteligentes depositadas con las películas delgadas y sus multicapas, y se compararon con un escenario base de vidrio tradicional sin recubrimiento y un escenario adicional con ventanas aislantes de doble capa de vidrio. Se propuso un escalado del proceso de deposición desde la escala de laboratorio a la escala industrial. Los datos experimentales obtenidos en la primera parte del trabajo se utilizaron para alimentar el inventario en la sección de hidrofobicidad y ahorros hídricos, mientras que se recurrió a la revisión bibliográfica para el inventario de fotocatalisis y mejoras en la calidad del aire. Para el inventario de termocromicidad y ahorros energéticos, se utilizó un modelo de flujo de energía en edificios basado en la norma suiza SIA 380/1.

La evaluación se realizó utilizando el software Umberto LCA+, la base de datos Ecoinvent 3.6 y la metodología ReCiPe 2008. Se seleccionaron ocho categorías de impacto, que incluyen a los potenciales de agotamiento de recursos hídricos (ARH), toxicidad humana (TH), formación de materia particulada (FMP), ecotoxicidad en

agua dulce (EAD), agotamiento de metales (AM), formación de oxidantes fotoquímicos (FOF), acidificación terrestre (AT) y de cambio climático (CC). Estas categorías fueron elegidas debido a su relevancia para las propiedades previstas de las ventanas inteligentes.

Los resultados mostraron que, en la mayoría de las categorías de impacto evaluadas, el uso de ventanas aislantes de doble capa de vidrio presentó un mejor desempeño ambiental en comparación con las ventanas inteligentes con películas delgadas y las ventanas tradicionales sin recubrimiento. Esto se debe a los ahorros energéticos asociados con las ventanas aislantes. Sin embargo, las diferentes propiedades de los materiales semiconductores utilizados mostraron mejores resultados: las propiedades hidrofóbicas de las ventanas inteligentes contribuyeron a una disminución significativa de los impactos en la categoría de agotamiento de recursos hídricos (ARH), las propiedades fotocatalíticas de las ventanas inteligentes mostraron mejoras en la calidad del aire, manifestadas en menores impactos en las categorías de formación de materia particulada (FMP) y formación de oxidantes fotoquímicos (FOF), aunque también generaron un mayor potencial de cambio climático (CC). Por otro lado, las propiedades termocrómicas de las ventanas inteligentes mostraron una disminución en los impactos ambientales en la mayoría de las categorías evaluadas debido a los ahorros energéticos asociados con la climatización.

Dado que las propiedades termocrómicas de las ventanas inteligentes demostraron ser las más relevantes, se realizó un análisis de sensibilidad variando la ubicación de la Torre TOP a diferentes ciudades del mundo, como Barcelona, Berlín, Ciudad de México, Monterrey y Zúrich. Esto afectó los datos de temperatura y radiación solar utilizados en el modelo de flujo de energía, así como la calidad del mix eléctrico de cada ubicación. Los resultados indicaron que el uso de películas termocrómicas en climas cálidos, como la Ciudad de México y Monterrey, generó mayores ahorros energéticos. Sin embargo, para estos climas cálidos, el escenario de ventanas aislantes mostró un mejor desempeño ambiental en la mayoría de las categorías de impacto seleccionadas. Por otro lado, el uso de películas termocrómicas en climas

más fríos, como Barcelona, Berlín y Zúrich, mostró un mejor desempeño en comparación con el escenario de ventanas aislantes, debido a que el uso de ventanas aislantes implicó una mayor demanda energética para la calefacción de los espacios interiores en edificios con fachadas totalmente acristaladas y grandes impactos debido a la mayor demanda de aluminio y vidrio en la etapa de fabricación.

Contribuciones y conclusiones:

Se logró el depósito de las películas delgadas de SiO_2 , VO_2 , TiO_2 y ZnO , así como sus multicapas en sustratos de vidrio mediante la técnica de Sol-Gel; favoreciendo la hidrofobicidad de su superficie a largo plazo. Se observó que la rugosidad de la superficie de los materiales afecta inversamente proporcional sus propiedades repelentes de agua, por lo que se muestra un comportamiento de mojabilidad correspondiente al modelo de Wenzel. Se confirmó la presencia de propiedades termocrómicas en las películas delgadas y multicapas compuestas de VO_2 . La caracterización de estos materiales fue indispensable para alimentar al Inventario de Ciclo de Vida. En conclusión, este estudio comparativo del análisis de ciclo de vida de tecnologías de películas delgadas de óxidos semiconductores para su aplicación en ventanas inteligentes en rascacielos proporciona una evaluación integral del impacto ambiental y los beneficios asociados con estas tecnologías. Los resultados destacan la importancia de considerar las propiedades específicas de las películas delgadas al evaluar su desempeño ambiental y resaltan la relevancia de los ahorros energéticos y la hidrofobicidad en la reducción de los impactos ambientales. Además, se destaca la influencia de las condiciones climáticas locales en la eficacia de estas tecnologías, lo que permite tomar decisiones más informadas en la selección de ventanas inteligentes en función del clima y las características del edificio.

Dra. María Rocío Alfaro Cruz
Directora de tesis

Dra. Edith Luévano Hipólito
Co-directora de tesis

ABSTRACT

Purpose and method of the study:

The present work is divided into two parts. In the first part, the deposition and characterization of thin films on glass substrates were carried out. Four semiconductor materials were selected: SiO₂, VO₂, TiO₂, and ZnO, due to their specific properties that make them suitable for application in smart windows. SiO₂ was used as a binder layer to extend the lifespan of the coatings, VO₂ for its thermochromic properties that could generate energy savings by regulating heat transmission, TiO₂ for its photocatalytic properties that could contribute to the cleaning of the building's outdoor air, and ZnO for its hydrophobic properties that could lead to water consumption savings for facade cleaning.

The deposition method used was Sol-Gel, and the deposited films were characterized using techniques such as X-Ray Diffraction (XRD), Atomic Force Microscopy (AFM), UV-Vis Spectroscopy and Drop Shape Analysis (DSA). The optical properties, structural properties, and hydrophobicity of the films were analyzed. In addition, multilayers composed of different combinations of the selected materials were deposited. The samples were subjected to accelerated weathering tests to evaluate the effect of typical weather conditions on the films' hydrophobicity. It was observed that the ZnO films showed hydrophobic behavior before the weathering tests, while the other materials showed hydrophilic behavior. After the weathering tests, most of the films and multilayers exhibited hydrophobic behavior, indicating that weather conditions improved their water repellency property.

In the second part of the work, an environmental impact assessment was carried out using the prospective Life Cycle Analysis (LCA, ISO 14040/14044) approach. The aim was to compare the environmental performance of different semiconductor oxide thin film technologies in smart windows, taking the facade of the skyscraper Torre TOP in Monterrey, Mexico, considered the tallest building in Latin America, as a case study. The Functional Unit was defined as the amount of glass covering the envelope of the Torre TOP over a study period of 40 years.

Seven scenarios representing different smart windows deposited with thin films and their multilayers were established and compared with a base scenario of traditional glass without coating and an additional scenario with double layer insulating window glass. A scale-up of the deposition process from the laboratory scale to the industrial scale was proposed. The experimental data obtained in the first part of the work were used to feed the inventory in the hydrophobicity and water savings section, while a literature review was used for the photocatalysis inventory and improvements in air quality. For the thermochromicity inventory and energy savings, a building energy flow model based on the Swiss standard SIA 380/1 was used.

The evaluation was carried out using the Umberto LCA+ software, the Ecoinvent 3.6 database, and the ReCiPe 2008 methodology. Eight impact categories were selected, including potential for water depletion (WD), human toxicity (HT), particulate matter formation (PMF), freshwater ecotoxicity (FET), metal depletion (MD), photochemical oxidant formation (POF), terrestrial acidification (TA), and climate change (CC). These categories were chosen due to their relevance to the anticipated properties of smart windows.

The results showed that in most of the impact categories assessed, the use of double-layer insulating windows showed better environmental performance compared to smart windows with thin films and traditional windows without coating. This is due to the energy savings associated with insulating windows. However, the different properties of the semiconductor materials used showed significant benefits: the hydrophobic properties of the smart windows contributed to a significant decrease in impacts in the water depletion category (WD), the photocatalytic properties of the smart windows showed improvements in air quality, reflected in lower impacts in the categories of particulate matter formation (PMF) and photochemical oxidant formation (POF), although they also generated a greater potential for climate change (CC). On the other hand, the thermochromic properties of the smart windows showed a decrease in environmental impacts in most of the assessed categories due to the energy savings associated with air conditioning.

Since the thermochromic properties of smart windows proved to be the most significant, a sensitivity analysis was conducted by changing the location of the Torre TOP to different cities around the world, such as Barcelona, Berlin, Mexico City, Monterrey, and Zurich. This affected the temperature and solar radiation data used in the energy flow model, as well as the quality of the electrical mix at each location. The results indicated that the use of thermochromic films in warm climates, such as Mexico City and Monterrey, generated greater energy savings. However, for these warm climates, the insulating window scenario showed better environmental performance in most of the selected impact categories. On the other hand, the use of thermochromic films in colder climates, like Barcelona, Berlin, and Zurich, showed better performance compared to the insulating window scenario, as the use of insulating windows implied a higher energy demand for heating the interior spaces in buildings with fully glazed facades and high impacts due to the increased demand for aluminum and glass at the manufacturing stage.

Contributions and conclusions:

The deposition of SiO_2 , VO_2 , TiO_2 , and ZnO thin films, as well as their multilayers on glass substrates, was achieved by the Sol-Gel technique, favoring the long-term hydrophobicity of their surface. It was observed that the roughness of the surface of the materials inversely affects their water repellent properties, showing a wettability behavior corresponding to the Wenzel model. The presence of thermochromic properties in thin films and multilayers composed of VO_2 was confirmed. The characterization of these materials was indispensable for feeding the Life Cycle Inventory. In conclusion, this comparative study of the life cycle analysis of semiconductor oxide thin film technologies for their application in smart windows in skyscrapers provides a comprehensive assessment of the environmental impact and the benefits associated with these technologies. The results highlight the importance of considering the specific properties of thin films when assessing their environmental performance and underline the relevance of energy savings and hydrophobicity in reducing environmental impacts. Moreover, the influence of local weather conditions on the efficacy of these technologies is highlighted, allowing

more informed decisions to be made in the selection of smart windows based on the climate and the characteristics of the building.

AUSZUG

Zweck und Methode der Studie:

Die vorliegende Arbeit besteht aus zwei Teilen. Im ersten Teil wurde die Abscheidung und Charakterisierung von dünnen Schichten auf Glassubstraten durchgeführt. Vier Halbleitermaterialien wurden ausgewählt: SiO_2 , VO_2 , TiO_2 und ZnO , aufgrund ihrer spezifischen Eigenschaften, die sie für den Einsatz in intelligenten Fenstern geeignet machen. SiO_2 wurde als Binderschicht verwendet, um die Lebensdauer der Beschichtungen zu verlängern, VO_2 für seine thermochromen Eigenschaften, die Energieeinsparungen durch die Regulierung der Wärmeübertragung erzeugen könnten, TiO_2 für seine photokatalytischen Eigenschaften, die zur Reinigung der Außenluft des Gebäudes beitragen könnten, und ZnO für seine hydrophoben Eigenschaften, die zu Wassereinsparungen bei der Fassadenreinigung führen könnten.

Die verwendete Abscheidungsmethode war Sol-Gel, und die abgeschiedenen Filme wurden mit Techniken wie Röntgendiffraktion (XRD), Atomkraftmikroskopie (AFM), UV-Vis-Spektroskopie und Drop Shape Analysis (DSA) charakterisiert. Die optischen Eigenschaften, strukturellen Eigenschaften und die Hydrophobizität der Filme wurden analysiert. Darüber hinaus wurden Mehrschichten, bestehend aus verschiedenen Kombinationen der ausgewählten Materialien, abgeschieden. Die Proben wurden beschleunigten Bewitterungstests unterzogen, um den Einfluss typischer Wetterbedingungen auf die Hydrophobie der Filme zu bewerten. Es wurde festgestellt, dass die ZnO -Filme vor den Bewitterungstests ein hydrophobes Verhalten zeigten, während die anderen Materialien ein hydrophiles Verhalten zeigten. Nach den Bewitterungstests zeigten die meisten Filme und Mehrschichten ein hydrophobes Verhalten, was darauf hindeutet, dass Wetterbedingungen ihre Wasserabweisungseigenschaft verbesserten.

Im zweiten Teil der Arbeit wurde eine Umweltauswirkungsbewertung durchgeführt, die den prospektiven Ansatz der Lebenszyklusanalyse (LCA, ISO 14040/14044) nutzt. Ziel war es, die Umweltleistung verschiedener Technologien für dünne

Halbleiteroxidfilme in intelligenten Fenstern zu vergleichen, wobei die Fassade des Wolkenkratzers Torre TOP in Monterrey, Mexiko, der als höchstes Gebäude in Lateinamerika gilt, als Fallstudie herangezogen wurde. Die funktionale Einheit wurde als die Menge an Glas definiert, die die Gebäudehülle des Torre TOP über einen Untersuchungszeitraum von 40 Jahren bedeckt.

Sieben Szenarien, die verschiedene intelligente Fenster mit dünnen Filmen und deren Mehrschichten darstellen, wurden etabliert und mit einem Basisszenario aus traditionellem Glas ohne Beschichtung und einem zusätzlichen Szenario mit doppelschichtigem Isolierfensterglas verglichen. Eine Hochskalierung des Abscheidungsprozesses von der Laborebene auf die industrielle Ebene wurde unter Verwendung der industriellen Abscheidungsverfahren Magnetronspütern und chemische Gasphasenabscheidung (CVD) simuliert. Außerdem wurde ein Energieflussmodell entwickelt, das den Energieverbrauch für die Gebäudeklimatisierung im Zusammenhang mit der Sonneneinstrahlung, der Außentemperatur und den thermochromen Eigenschaften des intelligenten Fensters darstellt.

Die Ergebnisse zeigten, dass im Vergleich zum Basisszenario (keine Beschichtung) und dem Isolierfensterszenario, die intelligenten Fenster mit dünnen Filmen eine höhere Umweltauswirkung in den meisten ausgewählten Wirkungskategorien aufweisen, die hauptsächlich durch die Herstellung der Filme verursacht wurde. Im Vergleich zum Szenario mit wasserabweisenden dünnen Filmen (WRD) verbesserten die photokatalytischen Eigenschaften der intelligenten Fenster die Luftqualität, was sich in geringeren Auswirkungen in den Kategorien Partikelbildung (PMF) und Bildung photochemischer Oxidantien (POF) niederschlug, obwohl sie auch ein größeres Potential für den Klimawandel (CC) erzeugten. Auf der anderen Seite zeigten die thermochromen Eigenschaften der intelligenten Fenster eine Abnahme der Umweltauswirkungen in den meisten der bewerteten Kategorien aufgrund der Energieeinsparungen im Zusammenhang mit der Klimaanlage.

Da die thermochromen Eigenschaften der intelligenten Fenster am bedeutendsten waren, wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, indem der Standort des Torre

TOP zu verschiedenen Städten auf der ganzen Welt geändert wurde, wie Barcelona, Berlin, Mexiko-Stadt, Monterrey und Zürich. Dies beeinflusste die Temperatur- und Solarstrahlungsdaten, die im Energieflussmodell verwendet wurden, sowie die Qualität des Elektromixes an jedem Standort. Die Ergebnisse zeigten, dass der Einsatz von thermochromen Filmen in warmen Klimazonen wie Mexiko-Stadt und Monterrey größere Energieeinsparungen erzeugte. Allerdings zeigte sich für diese warmen Klimazonen, dass das Szenario mit Isolierfenstern in den meisten der ausgewählten Wirkungskategorien eine bessere Umweltleistung aufwies. Auf der anderen Seite zeigte der Einsatz von thermochromen Filmen in kälteren Klimazonen, wie Barcelona, Berlin und Zürich, eine bessere Leistung im Vergleich zum Isolierfensterszenario, da der Einsatz von Isolierfenstern eine höhere Energieanforderung für das Heizen der Innenräume in Gebäuden mit vollverglasten Fassaden und hohe Auswirkungen aufgrund des erhöhten Bedarfs an Aluminium und Glas in der Herstellungsphase implizierte.

Beiträge und Schlussfolgerungen:

Die Abscheidung von SiO_2 , VO_2 , TiO_2 und ZnO dünnen Schichten sowie deren Mehrschichten auf Glassubstraten wurde durch die Sol-Gel-Technik erreicht, was die langfristige Hydrophobie ihrer Oberflächen verbessert hat. Dies kann in Zukunft zu Wassereinsparungen bei der Fassadenreinigung führen, obwohl es bei der Auswertung der Umweltauswirkungen keine signifikanten Unterschiede gab. Die thermochromen Eigenschaften der intelligenten Fenster, insbesondere in Kombination mit dem Mehrschichtsystem, konnten die Auswirkungen auf den Klimawandel reduzieren, indem sie zur Energieeffizienz beitrugen. Daher kann die Nutzung von intelligenten Fenstern eine praktikable Alternative für energieeffiziente Gebäude darstellen, insbesondere in Klimazonen, die eine ständige Kühlung erfordern. Die photokatalytischen Eigenschaften der intelligenten Fenster könnten zur Verbesserung der Luftqualität beitragen, obwohl sie einen höheren CO_2 -Fußabdruck erzeugen. Insgesamt sind weitere Forschungen und technologische Verbesserungen notwendig, um die Auswirkungen der Herstellung von dünnen Schichten und deren Anwendung in intelligenten Fenstern zu minimieren.

AGRADECIMIENTOS

A la **Dra. María Rocío Alfaro Cruz** por su invaluable apoyo, dirección y motivación a lo largo de la maestría, en el desarrollo de esta tesis y por haber posibilitado la realización de la estancia de investigación en ETH Zürich, Suiza.

A la **Dra. Edith Luévano Hipólito** por sus acertados comentarios y revisiones del presente trabajo.

A la **Dra. María Guadalupe Paredes Figueroa**, por su confianza y su experiencia para formar parte del comité evaluador de este trabajo.

A los Doctores **Sergio Alberto Obregón Alfaro**, **Daniel Sánchez Martínez** e **Isaías Juárez Ramírez** por su orientación como revisores a lo largo del avance de la tesis.

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt)** por su ininterrumpido apoyo económico, el cual fue indispensable para la elaboración de esta tesis y término del programa de posgrado.

A la **Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL)** por facilitar las instalaciones, procesos y estándares académicos necesarios para la obtención del título de posgrado.

A la **Facultad de Ingeniería Civil (FIC)** y a su director, el **Dr. Ricardo González Alcorta**, así como a la Subdirección de Estudios de Posgrado y al subdirector, el **Dr. Gerardo de Jesús Fajardo San Miguel** por su apoyo y dirección al organizar el *3er Encuentro Ciencia, Tecnología e Ingeniería de Estudiantes de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Civil*, el cual se llevó a cabo en el marco de las festividades del 89° Aniversario de la FIC y de la UANL.

Al departamento de **Ecomateriales y Energía**, así como a **Laura, Silvia, José Ángel, David, Daniel, Javier, Víctor** y el resto de los integrantes del laboratorio por su indispensable apoyo, facilitación y capacitación del equipo requerido para la realización de los análisis y caracterización de materiales.

Al **Laboratorio de Investigación e Innovación de Materiales de Construcción (LIIMC)**, en especial al **Dr. Ismael Flores Vivián** y a las maestras **Iris Alessandra**

Alanis Leal y Meraly Delladely López Morales por su apoyo y capacitación en la técnica de medición de ángulo de contacto.

Al **Centro de Investigación en Materiales Avanzados (CIMAV)** y a su directora general, la **Dra. Leticia Myriam Torres Martínez** por su apoyo en la técnica de Difracción de Rayos X de las muestras y por su invaluable motivación para la presentación de este trabajo en conferencias internacionales y la publicación de artículos científicos y de divulgación.

Al grupo de investigación en **Ciclo de Vida, Cambio Climático y Sostenibilidad (CiViCCS)** del **Instituto de Ingeniería (iingen)** de la **Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)** por brindar acceso al servidor y al software necesario para llevar a cabo los Análisis de Ciclo de Vida presentados en esta tesis.

Special thanks to **Prof. Dr. Stephan Pfister**, for his guiding and example during the research stay carried out as part of the last semester of my master's in the research group **Ecological Systems Design (ESD)** at **ETH Zürich**, as well as to **Prof. Dr. Stephanie Hellweg** for making the international collaboration possible.

A la **OpenAI** por haber desarrollado la herramienta **ChatGPT**, la cual fue utilizada en este trabajo con fines de traducción del resumen y revisión de la redacción de distintas secciones de la tesis.

A los responsables de mis felicidades y risas durante la Maestría en Ciencias con Orientación en Ingeniería Ambiental (MCOIA) en la UANL: **Dariela Vázquez, Adriana Álvarez, Deyna de la Fuente, Lourdes Mata, Ana Reyna González, Paola Romo, Karla Medellín, Linda Torres, Mariana Pérez, Ilse Álvarez, Leslie Uribe, Gabriela Correa, Edwin Fariz, Ramón Morales, Guillermo Elizondo, Shaiel Vázquez, Sebastián Rodríguez, Gabriel Morales, Alan Acevedo, Óscar Quintero, Damián Mendoza y Luis Rodríguez.**

A mis bisabuelos **José Carlos Valdés Huerta[†]** y **Elvira Guerrero Velarde[†]**, por todo el cariño que me brindaron y por ser motivaciones e inspiraciones de vida.

A mi hermana, **Constanza Eleonor Caballero Güereca** y a **Einar López Altamirano** por ser consientes, considerados y ordenados, facilitando la convivencia diaria como cohabitantes y permitiendo así la redacción de esta tesis.

A mis padres, **Carlos Antonio Caballero Valdés** y **Leonor Patricia Güereca Hernández**, por seguir apoyándome en este escalón y facilitarme más de lo necesario tanto personal- como académicamente para poder desarrollar esta tesis.

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y MARCO TEÓRICO

1.1 Introducción

La Zona Metropolitana de Monterrey (ZMM) y el resto del estado de Nuevo León recientemente han registrado los años más secos de la última década [1]. El crecimiento poblacional desmesurado, aunado a las altas temperaturas y bajas precipitaciones características del clima seco y semiseco que corresponde al 68% del territorio de la entidad federativa [2] conllevan a que la ZMM tenga un estrés hídrico “alto” y sequía moderada, según datos de Conagua [3]. El cambio climático y el aumento en la frecuencia de eventos climatológicos extremos han provocado que en el estado se presenten períodos de largas sequías, las cuales son interrumpidas por etapas cortas de precipitaciones extraordinarias que causan inundaciones tanto en zonas urbanas como rurales. Esta situación se agrava debido a que la infraestructura de captación y abastecimiento de agua potable no cuenta con la capacidad necesaria para almacenar la gran cantidad de agua proveniente de huracanes o trombas, aunado a la falta de mantenimiento y presencia de fugas en las cortinas de las presas que abastecen a la ZMM [4].

El uso consuntivo de agua en Nuevo León está dividido de la siguiente manera: 70% del agua es destinada al sector agrícola, 25% al abastecimiento público y 4% a la industria [5]. En el caso particular de la industria de la construcción, el déficit de agua genera grandes impactos, dado que, para la producción del concreto, los morteros y las lechadas se requiere de agua para su hidratación. Para que esta reacción se realice de manera correcta, el agua utilizada debe de estar libre de contaminantes, materiales orgánicos, sales, aceites y otras sustancias potencialmente nocivas para la resistencia mecánica del material. Además, el uso de agua requerido para el mantenimiento de fachadas entra dentro del porcentaje para el abastecimiento público, y en el caso de edificios, estos llegan a necesitar hasta cuatro lavados al año, para los cuales se requiere de gran cantidad de agua y detergente [6]. Por consecuencia, el uso de grandes cantidades de agua en el ciclo de las construcciones es inevitable, por lo que es de gran importancia el buscar

alternativas para que el mantenimiento de las construcciones demande la menor cantidad de agua posible.

Como ya se mencionó, en el caso del mantenimiento de los edificios; cuya fachada es totalmente de vidrio, los gastos anuales hídricos y monetarios alcanzan hasta 2,000L y 10 millones de pesos, respectivamente. Esto debido a que es necesaria la contratación de personal para la limpieza de ventanas, así como plataformas volantes y equipo especializado para esta tarea. La actividad de limpieza de ventanas tiene la categoría de alto riesgo (IV) por el Instituto Mexicano del Seguro Social IMSS [7], ya que la contratación de personal requiere altas primas de seguro, el uso de equipo de protección personal (EPP) y líneas de vida (arneses) en todo momento.

Una alternativa sustentable para la solución de estos problemas es el uso de ventanas inteligentes hidrofóbicas en las fachadas de edificios de vidrio, ya que pueden generar impactos ambientales positivos no sólo en el uso de recursos hídricos, sino también en la demanda de recursos energéticos debido a las propiedades adicionales que estas ventanas pueden llegar a tener (autolimpieza o regulación de temperatura). El rendimiento de las ventanas inteligentes es dependiente de la tecnología utilizada para su manufactura, por lo que el diseño de materiales avanzados es una gran opción para esta aplicación.

En este trabajo se propone el uso de semiconductores de películas delgadas en vidrios de ventana convencionales para disminuir los requerimientos hídricos y energéticos durante el ciclo de vida prospectivo de las ventanas utilizadas en edificios.

1.2 Marco teórico

En este capítulo se describe el estado de arte y los antecedentes necesarios para la elaboración de esta investigación. La estructura que se seguirá en el capítulo se muestra en la Figura 1.

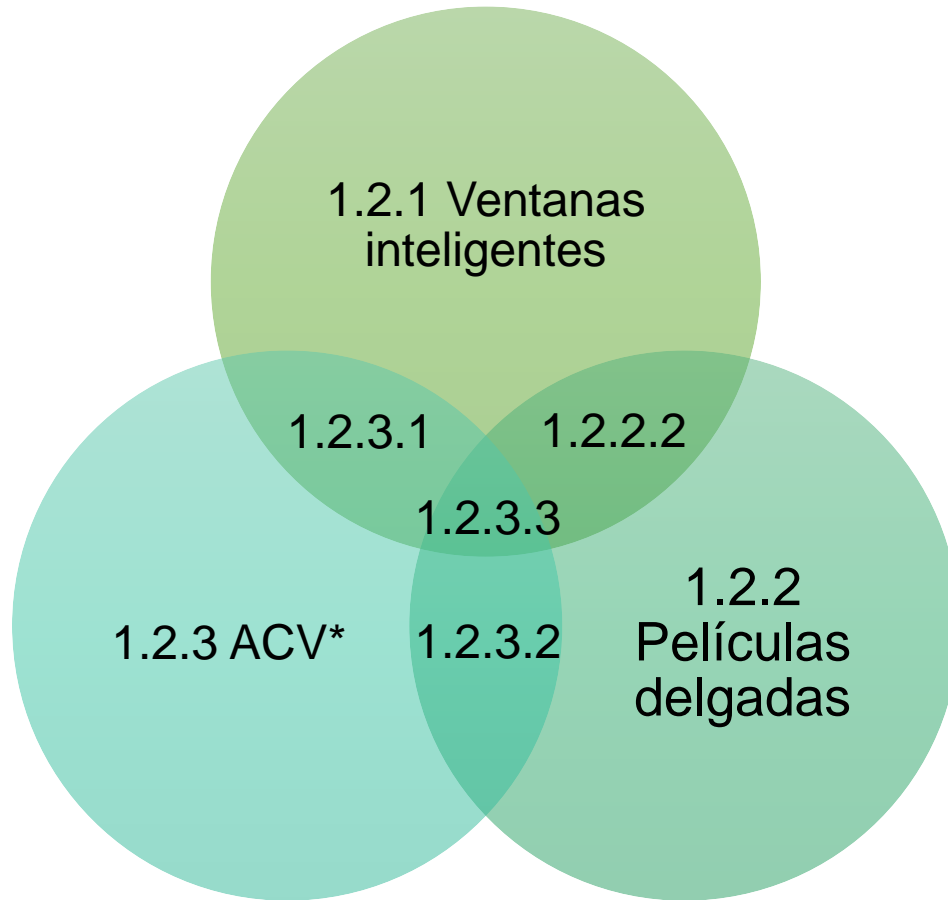


Figura 1. Estructura del marco teórico. *Análisis de Ciclo de Vida

1.2.1 CATEGORIZACIÓN DE VENTANAS INTELIGENTES

Una ventana inteligente se define como aquella que se compone de vidrio o un recubrimiento tecnológicamente avanzado que cambie o regule sus propiedades ópticas, térmicas o su mojabilidad de manera que se obtengan beneficios energéticos o hídricos a lo largo de su vida útil. Estas pueden ser clasificadas en dos grupos: ventanas inteligentes activas o pasivas.

Las ventanas activas necesitan de una conexión a un circuito eléctrico para su funcionamiento y pueden ser reguladas de manera activa por el usuario. La mayoría de estas se denominan electrocrómicas y funcionan gracias a una capa de cristal líquido que es opaca en su estado inactivo y se vuelve transparente al aplicar un potencial eléctrico [8]. Las ventanas pasivas poseen propiedades que no requieren de una corriente eléctrica, y son reguladas bajo ciertas condiciones externas como

la temperatura, precipitación o radiación solar. Estas ventanas pasivas son una tecnología aún en desarrollo y generalmente funcionan gracias a películas transparentes de semiconductores con distintas propiedades y objetivos. Las películas de óxidos semiconductores pueden tener propiedades fotocatalíticas, termocrómicas o autolimpiantes, por nombrar algunas. Los distintos tipos de ventanas inteligentes y sus propiedades se resumen en la Figura 2.

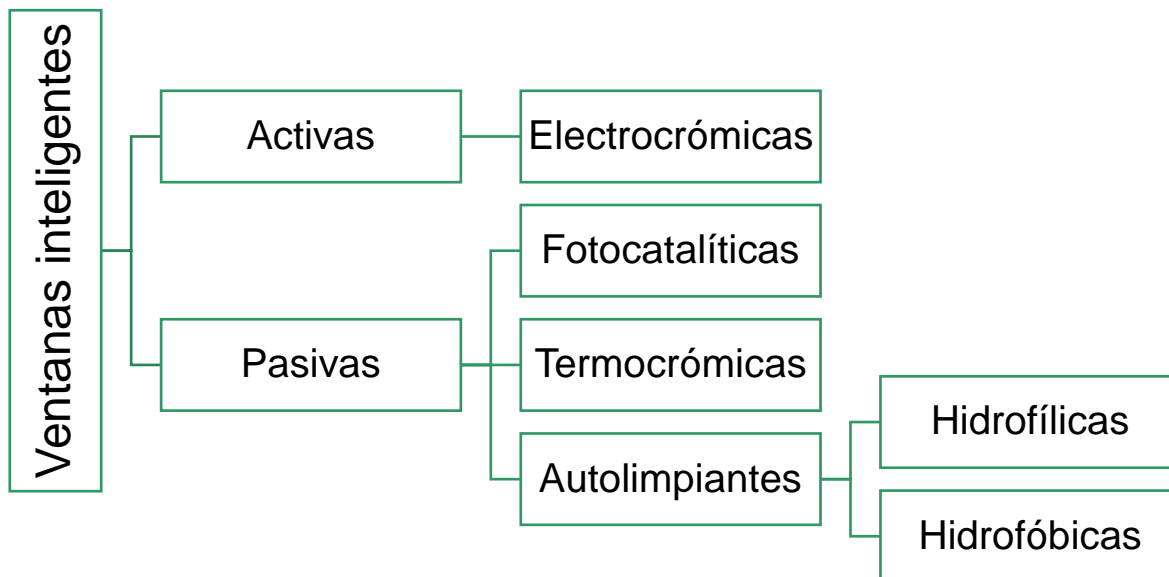


Figura 2. Clasificación de tipos de ventanas inteligentes

Las ventanas tradicionales son categorizadas como el elemento constructivo con menor eficiencia energética, ya que en verano llegan a calentar hasta en un 70% el interior de las construcciones. Mientras que, en invierno, las ventanas tradicionales generan una pérdida de hasta un 30% de la energía calorífica. Adicionalmente, al estar expuestas a la intemperie, se ensucian rápidamente debido a la contaminación e impurezas presentes en el agua de lluvia de zonas urbanas. Por lo que la incorporación de materiales con propiedades autolimpiantes ayudará a disminuir el consumo de agua en las etapas de mantenimiento y uso del ciclo de vida de las ventanas. Este trabajo centra la investigación en ventanas inteligentes pasivas autolimpiantes hidrofóbicas. Las ventanas autolimpiantes hidrofílicas (atraen el agua) trabajan bajo el principio de que el agua de lluvia limpie la suciedad acumulada, mientras que las que son hidrofóbicas (repelen el agua) evitan que la

precipitación que pueda traer consigo contaminantes se adhiera a las ventanas, permaneciendo limpias [9]–[11]. Adicionalmente, las superficies autolimpiantes pueden ser fotocatalizadoras, es decir, producen radicales libres $\bullet\text{OH}$, mediante los cuales se descomponen los contaminantes orgánicos superficiales, y sus productos son arrastrados por el agua de lluvia [12]–[15]. Debido a que la aplicación de estas tecnologías a la industria de los vidrios está en constante desarrollo, existen distintos métodos y técnicas para producirlos. Dentro de estas, la aplicación de películas delgadas mediante distintos métodos de depósito es de gran interés, por lo que es necesario realizar una revisión al respecto del estado del arte y así poder definir la metodología que tenga más escalabilidad y menos requerimientos energéticos para lograr un mejor rendimiento ambiental; es decir, que tenga menores impactos ambientales a lo largo de su ciclo de vida.

1.2.2 PELÍCULAS DELGADAS

Una película delgada se define como una delgada capa de material cuyo espesor puede variar desde algunos cuantos nanómetros (menor a 150nm [16]) hasta algunos cientos de micrómetros y son producidas por la deposición atómica o molecular de una materia [17]. Las películas delgadas existen desde hace varias décadas y hoy en día, su uso forma parte de nuestras vidas diarias dentro de nuestros celulares, computadoras, paneles solares, anteojos, aparatos biomédicos y recientemente, ha aumentado el interés de utilizarlas en los sectores de arquitectura y construcción sostenible [18]. Para la manufactura de las películas delgadas es necesario el uso de técnicas avanzadas de depósito, las cuales se resumen en la siguiente sección.

1.2.2.1 Técnicas de depósito

Existe una gran variedad de métodos de depósito de películas delgadas, los cuales se dividen en métodos químicos y métodos físicos. Dentro de los métodos químicos de depósito el más utilizado a nivel industrial (sobre todo en la industria de semiconductores) es la deposición química de vapor (CVD), la cual consta en la exposición del sustrato a precursores volátiles, usualmente con un flujo de gas inerte y altas temperaturas, para producir la deposición sólida del material deseado [18].

Esta técnica ha sido expandida y en la actualidad, existen variaciones para aplicaciones específicas como el CVD activado térmicamente y asistido con plasma, entre otros.

Dentro de los métodos de deposición físicos existen varias técnicas que pueden ser utilizadas para la fabricación de películas delgadas. Uno de estos es la evaporación en vacío, la cual consta en el uso de bajas presiones y altas temperaturas para depositar películas delgadas sobre un sustrato (dentro de este método se engloban la evaporación asistida por resistencia, por haz de electrones y epitaxia de haz molecular MBE). Otro método de deposición física es la pulverización catódica (Sputtering), el cual consta en la pulverización de átomos de un blanco (Target) mediante iones de un gas inerte para producir el depósito de estos en el sustrato. Dentro de este método se engloban la pulverización catódica mediante diodos DC, radiofrecuencia RF y magnetrón. La ablación láser es otro método físico de depósito y similar a la pulverización catódica, consta en la ablación de átomos de un blanco para que estos se depositen sobre el sustrato, utilizando la pulsación de un láser de alta potencia. Estos métodos físicos tienen la ventaja de brindar un alto control sobre las condiciones de depósito como la presión, la temperatura o la potencia; lo cual genera gran replicabilidad y películas delgadas de alta calidad atómica. No obstante, son métodos altamente costosos y con grandes requerimientos energéticos. Por lo que escalar estas metodologías para su uso en grandes áreas no es viable ni económica ni energéticamente.

Por otro lado, existen técnicas simples de depósito de películas y recubrimientos utilizando métodos químicos de depósito, los cuales brindan mayor facilidad al escalarlos a nivel industrial y recubrir grandes áreas. La aplicación de recubrimientos utilizando aerosol (*spray coating*) y serigrafía (*screen printing*) han demostrado tener buenos resultados en el ámbito de pigmentos y pinturas. Dentro del campo de películas delgadas, ambos son muy atractivos debido a su facilidad y bajo costo, por lo que han sido utilizados en estudios como [19] y [20]. No obstante, se ha reportado problemas de durabilidad debido a la baja adherencia entre el material y el sustrato. Desde el punto de vista del Análisis de ciclo de vida (ACV),

esto significa que la aplicación del recubrimiento tendría que ser recurrente durante la vida útil del producto; incrementando su costo y requerimientos energéticos, haciéndolo inviable para algunas aplicaciones.

Dentro de las técnicas químicas de depósito, el método Sol-Gel presenta buena adherencia al sustrato sin sacrificar escalabilidad y con menores requerimientos energéticos en comparación con otros métodos avanzados de depósito de películas delgadas. Esta técnica es altamente eficiente para el depósito de películas delgadas, ya que esta técnica permite la obtención de un material sólido a través de un “sol” o un gel a bajas temperaturas y en áreas mayores [14], [21], [22], a diferencia de otros métodos de preparación de películas delgadas. El método sol-gel consiste en la preparación de una solución precursora, la cual; con el paso del tiempo, desencadena reacciones de polimerización que permiten la formación de una solución con viscosidad adecuada para adherirse a un sustrato, y así formar la película o recubrimiento. Existen dos formas de formar la película sobre el sustrato: por centrifugación e inmersión. En el primero, el sustrato es recubierto con la solución precursora, para después ser esparcida homogéneamente mediante el giro del porta-muestras a una velocidad angular constante. En el segundo caso, el sustrato se sumerge en la solución precursora, controlando la velocidad y el tiempo de inmersión para obtener una película homogénea. En ambos casos, dado que la solución precursora tiene componentes orgánicos, los sustratos son calentados a temperaturas mayores de 150°C para que los componentes orgánicos se volatilicen. Finalmente, las películas obtenidas son tratadas térmicamente, para formar una película sólida sobre la superficie del sustrato. Este proceso se puede observar en la Figura 3. La ventaja de este método es que las películas tienen una mejor adherencia, lo que les brinda mayor durabilidad que los métodos de recubrimiento por aerosol o serigrafía.

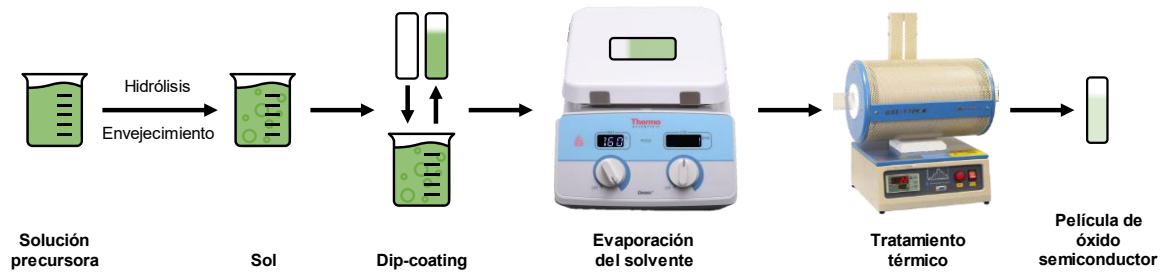


Figura 3. Síntesis de películas mediante el método sol-gel: Dip-coating.

Adaptado de [23].

1.2.2.2 Películas delgadas hidrofóbicas y su aplicación a ventanas inteligentes

Para el estudio de las superficies hidrofóbicas, es necesario conocer el término de mojabilidad de una superficie. La mojabilidad es descrita mediante las ecuaciones del ángulo de contacto estático y dinámico de Young [24]. En donde este ángulo está en función de las energías del equilibrio termodinámico de la fase sólida de la superficie “S”, la fase líquida de la gota “L” y la fase gaseosa del aire en el ambiente “V”. Este ángulo es calculado teóricamente utilizando las energías intersuperficiales sólido-vapor (σ_{SV}), sólido-líquido (σ_{SL}) y líquido-vapor (σ_{LV}), como se observa en la ecuación (1).

$$\cos(\theta) = (\sigma_{SV} - \sigma_{SL})/\sigma_{LV} \quad (1)$$

Donde:

θ : Ángulo de contacto de Young

σ_{SV} : Tensión superficial de la interfaz sólido-vapor (energía por unidad de superficie).

σ_{SL} : Tensión superficial de la interfaz sólido-líquido (energía por unidad de superficie).

σ_{LV} : Tensión superficial de la interfaz líquido-vapor (energía por unidad de superficie).

En la Figura 4 se puede observar la relación del ángulo de contacto con una gota de agua en la superficie, siendo $\theta < 90^\circ$ en el caso de materiales hidrofílicos y $\theta > 90^\circ$ para los materiales hidrofóbicos [25]. Nuevas categorizaciones de la mojabilidad de una superficie, como lo son las superhidrofílicas ($\theta < 10^\circ$) y superhidrofóbicas (θ

$> 150^\circ$), se publicarían décadas después con el desarrollo de nuevos materiales con dichos comportamientos [26]. Existen dos modelos que relacionan la rugosidad de la superficie con su mojabilidad: el modelo de Wenzel, desarrollado en 1936 [27] y el modelo de Cassie-Baxter, desarrollado en 1944 [28]. El primer modelo propone que el aumento de la rugosidad de una superficie incrementa el área efectiva de contacto entre la gota y el sólido, lo cual causa el incremento del ángulo de contacto a bajas rugosidades. Este comportamiento sólo se cumple si la gota tiene contacto completo con la superficie sólida, lo cual se denomina el estado Wenzel. Por otro lado, Cassie y Baxter describen que, al aumentar la rugosidad, es posible que se quede aire atrapado entre la gota y el sólido, lo cual genera un aumento en la hidrofobicidad aparente de la superficie. A esto se le denomina el estado Cassie. Las diferencias entre ambos estados se muestran en la Figura 4.

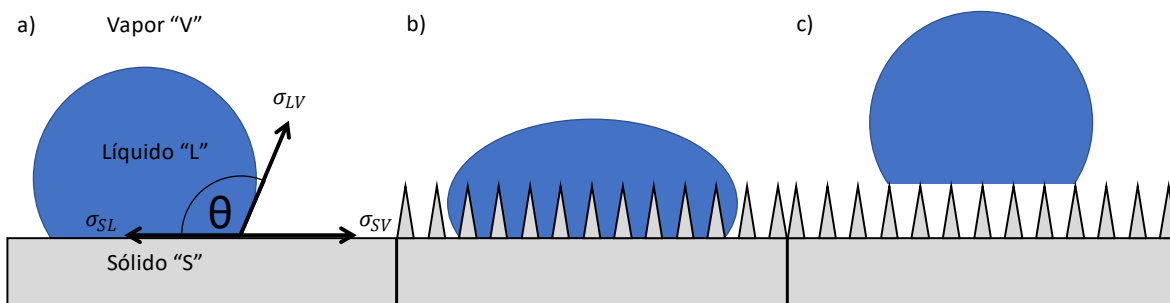


Figura 4. A) Diagrama de fuerza de la ecuación de Young y medida del ángulo de contacto asociado. Adaptado de [25]. B) Modelo de Wenzel C) Modelo de Cassie-Baxter. Adaptado de [29].

En urbes de gran tamaño, la calidad del aire es tan pobre que, al caer la lluvia, esta arrastra consigo partículas y contaminantes tóxicos; tal como el mercurio, que causan que esta no tenga la calidad necesaria para consumo humano [30]–[35]. Adicionalmente, los contaminantes suspendidos en las gotas de lluvia se depositan en las superficies cuando estas se evaporan, dejando atrás manchas que requieren de limpieza. Por esta razón, los vidrios hidrofóbicos ($\theta > 90^\circ$) pueden llegar a tener un mejor rendimiento ambiental al mantenerse limpios por un mayor período de tiempo que los vidrios tradicionales, los cuales son hidrofílicos. Es sabido que la

mojabilidad de una superficie sólida depende tanto de su composición química como de su microestructura [36]. Es por esto por lo que se han reportado diferentes estrategias para modificar las superficies, tal es el caso de Zeshan Hu, et.al. [37], quienes lograron obtener una superficie súper hidrofóbica en papel, utilizando un recubrimiento de carbonato de calcio (CaCO_3) y de ácidos grasos, los cuales, se pueden representar como una molécula con un lado hidrofílico y otro hidrofóbico. Este tipo de hidrofobicidad depende de la composición química, pero no ha sido aplicable en ventanas inteligentes debido a su baja durabilidad al intemperismo. Por lo que, si se quiere aplicar a las películas delgadas con propiedades hidrofóbicas en ventanas inteligentes, se debe dar prioridad a la estructura cristalina del material, ya que esta puede propiciar mayores cambios en las propiedades físicas del material originando mayores ángulos de contacto.

Como ya se mencionó, las superficies autolimpiantes pueden aplicarse a través del uso de películas delgadas, ya que esto propicia la facilidad en el reciclaje del vidrio de una ventana, a diferencia de las ventanas inteligentes activas, las cuales requieren de la incorporación de un gran número de capas que imposibilitan un reciclaje efectivo al terminar su vida útil.

Hoy en día la elaboración de ventanas inteligentes es un proceso costoso, lo cual ocasiona que estas tecnologías no sean accesibles y no sean utilizadas en edificaciones de nivel socioeconómico medio o bajo, lo cual equivale al 97.5% de las viviendas de México [38]. El uso de metodologías eficientes y accesibles pueden abaratar el costo en la obtención de estas ventanas minimizando el costo en su manufactura haciéndolas más accesibles para su uso generalizado y consecuentemente generando ahorros energéticos y de agua a grandes escalas. Para ello se debe de considerar el uso de materiales abundantes en la naturaleza, con bajos impactos ambientales en su extracción y producción, comparativamente. La elección del material a utilizar para la formación de ventanas inteligentes es muy importante, ya que los materiales que se utilicen formaran parte del ciclo de vida de dichas ventanas. Es por ello por lo que los materiales semiconductores más utilizados en estas aplicaciones son el óxido de silicio (SiO_2), óxido de zinc (ZnO),

óxido de vanadio (VO₂) y óxido de titanio (TiO₂). Ya que estos materiales han demostrado tener propiedades hidrofóbicas y termocrómicas (en el caso del VO₂) lo que los hace ideales para ser utilizados en superficies autolimpiantes. Existen varias técnicas de depósito para aplicar estos materiales en forma de películas delgadas altamente transparentes, facilitando la fundición y reciclaje del vidrio de ventana sin pérdidas de sus propiedades ópticas o estructurales [39]–[41]. En la Tabla 1 se enlistan las distintas propiedades, técnicas de depósito y aplicaciones de las películas delgadas.

Tabla 1. Revisión bibliográfica de películas delgadas de diferentes materiales semiconductores y sus respectivos ángulos de contacto con el agua θ .

Material	Técnica	Sustrato	Aplicaciones	θ	Ref.
SiO₂	Sol-gel	cobre	Recubrimiento anticorrosivo para cobre	113.6° a 158.2°	[11]
VO₂ dopado con W	Sol-gel	Cuarzo	Hidrofilicidad y termocromicidad	12°	[13]
ZrO₂/TiO₂ patrón compuesto	Sol-gel	Silicio	Hidrofobicidad y adherencia simultáneas	154°	[29]
ZnO	<i>Sputtering</i>	FTO	Celdas solares, revestimientos antirreflejantes, LEDs, fotocatalizadores, sensores de gas.	108°	[42]
SiO₂	Sol-gel	vidrio	Resistencia al agua y a la	115° a 165°	[43]

			condensación, previene contaminación superficial.		
TEOS, APTEOS, CMTS	Sol-gel	vidrio	Películas transparentes hidrofóbicas	145° a 161°	[44]
ZrO₂	Sol-gel	Vidrio recubierto con SiO ₂	Hidrofilicidad y antibacterial.	2° a 14°	[45]
ZnO+TiO₂+SiO₂	Sol-gel	Vidrio recubierto con SiO ₂	Disminución de acumulación de suciedad y antirreflectividad en paneles solares.	84° a 124°	[46]
TiO₂ dopado con N	Sputtering	Vidrio	Fotocatálisis	2° a 50°	[47]

1.2.3 ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

Tratándose de una solución a un problema ambiental, es necesaria la evaluación ambiental de las ventanas inteligentes propuestas en este trabajo, por medio de una metodología holística de evaluación de impacto ambiental. Con este propósito se elige el enfoque de Análisis de Ciclo de Vida (ACV), la cual es una herramienta que permite evaluar los impactos ambientales de productos o servicios de una forma global. Ya que, considera todas las etapas del ciclo de vida, desde la extracción de las materias primas hasta su disposición final y todos los vectores involucrados (de la cuna a la tumba) [48].

La Organización Internacional de Estandarización (ISO, por sus siglas en inglés) tiene normado el ACV mediante las normas ISO 14040 y 14044 [49]. En estas normas se establece que el ACV consta de cuatro fases (Figura 5):

1. **Definición de objetivo y alcance**
2. **Análisis del inventario del Ciclo de Vida**
3. **Evaluación del impacto del Ciclo de Vida**
4. **Interpretación del Ciclo de Vida**

A continuación, se describen dichas fases:

1. Definición de objetivo y alcance:

- a. **Objetivo:** Un objetivo completo debe de responder a las preguntas: ¿Qué?, ¿Cómo?, ¿Para qué?, ¿Para quién?, ¿En dónde? y ¿En qué período de tiempo? De este modo, se procura trabajar con las menores ambigüedades e inexactitudes posibles. Este objetivo es el del ACV y puede ser distinto al objetivo de la tesis.
- b. **Función:** Para poder comparar los impactos generados por el ciclo de vida de varios productos o servicios, es necesario que estos tengan la misma función.
- c. **Unidad Funcional:** La unidad funcional se define como la cantidad de productos o servicios necesarios, para cumplir con la función que se compara. Debe de ser muy cuidadosamente definida para evitar resultados erróneos, y debe de poder responder a las preguntas enumeradas anteriormente, en el objetivo.
- d. **Descripción y límites de los sistemas:** En esta etapa se delimita y describe de forma completa y visual a través de un diagrama de flujo, todos los procesos y pasos contenidos en el ciclo de vida del producto o servicio.
- e. **Metodologías de evaluación de impacto ambiental y categorías de impacto:** La selección de categorías de impacto debe ser correspondiente a los objetivos planteados [49]. Distintas categorías

de impacto pueden ser evaluadas con distintas metodologías, por ejemplo, IPCC, ReCiPe o CML.

2. Análisis del Inventario de Ciclo de Vida (ICV): En esta fase se obtienen las entradas y las salidas de cada uno de los procesos desglosados en el paso anterior, ya sea de manera medida, calculada o estimada. Esta información es obtenida de artículos de investigación recientes, reportes o encuestas en el sitio de los procesos, y se debe procurar siempre que los datos obtenidos sean representativos [49]. Para la elaboración del inventario, se utilizan hojas de cálculo para poder tener dicha cuantificación en términos de la Unidad Funcional y la vida útil de cada escenario. Durante esta etapa, los escenarios deben de ser validados conforme a balances de materia y energía para asegurar que los procesos unitarios hayan sido calculados de manera correcta.

3. Evaluación de impactos de Ciclo de Vida (EICV): Esta fase consta en relacionar las entradas y salidas con los potenciales impactos ambientales causados, determinando las asociaciones que existen entre los datos del inventario y las categorías de impacto específicas [49]. Para su correcta comparación, los impactos por categoría deben de ser multiplicados por un factor de caracterización, para formar los indicadores de ciclo de vida.

Existen dos tipos de análisis: de punto medio (en los que se cuantifican los flujos ambientales y se utilizan los indicadores) y el de punto final (en el que se cuantifican daños al medio ambiente o al humano).

Se debe llevar a cabo una selección de las categorías de impacto relevantes y correspondientes al objetivo del trabajo, una clasificación de los impactos ambientales en dichas categorías de impacto y una caracterización o cálculo de los impactos ambientales por categoría con ayuda de los factores de caracterización. Para el manejo de información del inventario y el cálculo de la EICV en este trabajo se utilizará el software Umberto LCA+ (IFU Hamburg).

4. Interpretación: Esta sección concluye el procedimiento para realizar un ACV y consta en razonar la procedencia de las discrepancias de impactos entre los productos o servicios analizados y concluir; en el caso de tratarse de una

comparación, qué opción genera menores impactos ambientales para cada una de las categorías de impacto y la razón de estas diferencias.



Figura 5. Estructura de un Análisis de Ciclo de Vida. Fuente: adaptado de ISO 14040. Adaptado de [49].

1.2.3.1 Análisis de ciclo de vida de ventanas inteligentes

Se han reportado diferentes estudios de ACV enfocados a diversos sistemas de ventanas, los cuales llegan a tomar en cuenta el marco y el calafateo dentro del inventario. Se encontró que, en sistemas donde las ventanas constan de una serie de capas de distintos materiales, como el caso de las ventanas aislantes con Argón, su reciclaje o recuperación al fin del ciclo de vida es prácticamente nula y éstas acaban en rellenos sanitarios [50], lo cual genera grandes impactos en la etapa final de su ciclo de vida. La Figura 6 describe el ciclo de vida común de una ventana, tomando en cuenta todos los posibles materiales y conceptos que puedan ser utilizados tanto para ventanas tradicionales, como ventanas aislantes.

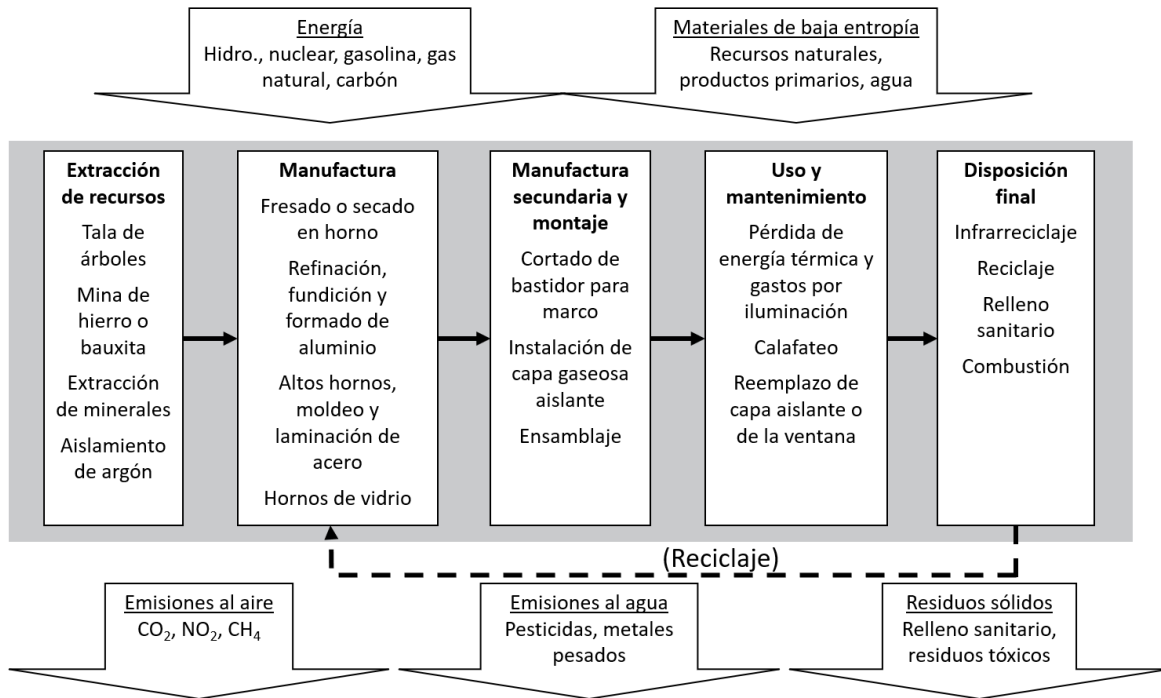


Figura 6. Ciclo de vida de una ventana. Adaptado de [51].

Como se observa en la Figura 6, para la elaboración de ventanas aislantes tradicionales, en la etapa de extracción de materias primas se requiere de metales, crudo, gas natural, tala de árboles y la extracción de sílice para manufacturar el vidrio. Estos materiales son transportados hacia sus respectivos sitios de manufactura, en donde se corta la madera, el gas natural es procesado a etileno y combinado con cloro mediante electrólisis para producir PVC. Mientras que las aleaciones metálicas se funden para producir aluminio, al igual que la sílice para producir vidrio. Estos productos refinados son transportados al sitio de manufactura de ventanas, en donde son cortados, moldeados o ensamblados. Después de esto, las ventanas son transportadas al sitio de instalación, donde son ensambladas, ajustadas y calafateadas. Al final de su vida útil, la gran parte de estas ventanas aislantes termina en rellenos sanitarios, incrementando los impactos ambientales del producto. Por esta razón, la incorporación de películas delgadas transparentes es una opción viable para evitar que el producto termine en un relleno sanitario, dado que al reciclarse (o infra-reciclarse [50]). Esto debido a que la cantidad de

material depositado sobre la superficie no afectaría la reciclabilidad del vidrio para su uso en nuevos productos [39]–[41].

1.2.3.2 Análisis de ciclo de vida de películas delgadas

La mayoría de los estudios de ACV aplicados a películas delgadas trata con la producción de energía eléctrica a partir de paneles fotovoltaicos (Tabla 2). También existe un número considerable de análisis de ciclo de vida prospectivos sobre la producción de materiales avanzados con propósitos sostenibles como el fotorreformado o la degradación de contaminantes. Estos estudios han concluido que el uso de las películas delgadas ha mejorado el rendimiento ambiental de los productos o servicios evaluados, y en varios casos se concluye que el punto débil del ciclo de vida de las películas delgadas es su producción, debido a la demanda energética de los métodos de depósito. Por otro lado, hay un déficit en la investigación relacionada con estudios de ACV prospectivos acerca de las películas delgadas y que incluyan un análisis holístico de la síntesis, caracterización y la evaluación de sus impactos ambientales mediante la metodología de ACV, abriendo una oportunidad para ampliar este tipo de investigaciones.

Tabla 2. Revisión bibliográfica de publicaciones sobre evaluaciones de impacto ambiental de película delgadas con un enfoque de ACV.

Producto o servicio	Lugar de estudio	Ref.
Nanoestructuras de ZnO	Sudáfrica	[52]
Celdas solares estructuradas con base en perovskitas	Reino Unido	[53]
Celdas solares con base en películas delgadas de calcogenuros	Barcelona, España	[54]
Películas delgadas fotovoltaicas basadas en CIGS	Estados Unidos	[55]
Fotorreformado con luz UV y visible	Santander, España	[56]

Paneles fotovoltaicos de tercera generación	Estados Unidos	[57]
Películas delgadas fotovoltaicas	Dinamarca	[58]

1.2.3.3 Análisis de ciclo de vida de películas delgadas en ventanas

Por lo mencionado anteriormente, es de gran importancia evaluar las distintas alternativas que nos ofrecen las ventanas inteligentes, y así poder tomar decisiones informadas que disminuyan impactos ambientales y no sólo los muevan de una etapa del ciclo de vida a otra. Para cumplir este propósito, es necesario investigar la factibilidad, durabilidad, eficiencia y rendimiento ambiental de estas películas delgadas con propiedades autolimpiantes, termocrómicas, fotocatalíticas, etc. a través del estudio de sus propiedades fisicoquímicas, estructurales, hidrofóbicas y de durabilidad. Por otro lado, los potenciales impactos ambientales generados por el uso de estas películas delgadas pueden ser cuantificados, evaluados mediante la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) normada por las ISO 14040/14044 y comparar sus diferencias con los impactos del vidrio tradicional.

El método de ACV es una herramienta que nos ayuda a calcular y evaluar los impactos ambientales de cualquier producto o servicio de manera holística, ya que toma en cuenta todas las etapas del ciclo de vida de un producto: desde la extracción de materia prima, procesado, manufactura, transportes, uso y disposición final (de la cuna a la tumba).

La investigación sobre películas delgadas de semiconductores aplicadas a ventanas es relativamente reciente, dado que este método de evaluación de impacto ambiental se aplica usualmente a servicios o productos ya industrializados. No obstante, como menciona [59], es de gran importancia lograr identificar las fortalezas y debilidades dentro de la cadena de producción de la tecnología para realizar cambios antes de que los procesos estén bien establecidos y su modificación infiera un costo mayor.

Por todo esto, en el presente trabajo se propone el uso de la metodología de ACV prospectivo para comparar el impacto ambiental de películas delgadas compuestas de SiO₂, VO₂, TiO₂ y ZnO y su posible aplicación en ventanas inteligentes, con el impacto ambiental producido por las ventanas tradicionales.

Tabla 3. Revisión bibliográfica de publicaciones sobre evaluaciones de impacto ambiental de ventanas inteligentes con base en películas delgadas con un enfoque de ACV.

Producto o servicio	Lugar de estudio	Ref.
Revisión de ventanas tradicionales y aislantes	Varios	[50]
Ventanas de VO₂ termocrómicas	Barcelona, Cairo y Londres	[59]
Ventana termocrómica	Grecia	[60]
Ventana recubierta con TiO₂ mediante spray coating	Estados Unidos	[61]
Ventanas fotovoltacrómicas	Italia	[62]
Ventanas fotovoltaicas semitransparentes	China	[63]

1.4 Hipótesis

Los impactos ambientales prospectivos de las películas delgadas y multicapas de MO_x (M= Si, V, Ti, Zn) cuantificados mediante Análisis de Ciclo de Vida serán menores que los impactos ambientales del vidrio tradicional, gracias al uso del sol-gel y a la variación de las condiciones de depósito de las películas.

1.5 Objetivos

1.5.1 OBJETIVO GENERAL

Depositar películas delgadas y multicapas de MO_x ($M= Si, V, Ti, Zn$) mediante sol-gel y caracterizar sus propiedades ópticas, estructurales y su hidrofobicidad a corto y mediano plazo para poder generar un inventario y comparar los impactos ambientales prospectivos (mediante el uso de la metodología de ACV) del uso de estas tecnologías aplicadas a vidrio de ventanas y compararlos con los impactos ambientales de las ventanas tradicionales.

1.5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Depositar películas de SiO_2 , ZnO , TiO_2 y VO_2 utilizando el método Sol-Gel sobre sustratos convencionales de vidrio, cuantificando los insumos y energía necesarios para la elaboración del inventario de ciclo de vida.
- Caracterizar y analizar propiedades estructurales y ópticas de las películas delgadas de SiO_2 , ZnO , TiO_2 y VO_2 , con el objetivo de cuantificar sus rendimientos durante la etapa de uso del ciclo de vida.
- Estudiar las propiedades hidrofóbicas de la superficie de las películas delgadas de SiO_2 , ZnO , TiO_2 y VO_2 a través de mediciones de ángulo de contacto con agua, eligiendo las condiciones de depósito que favorezcan ángulos mayores, los cuales representan ahorro de agua en la etapa de uso de las ventanas inteligentes.
- Obtener las multicapas MO_x ($M = Si, V, Ti, Zn$) utilizando el método Sol-Gel, cuantificando los insumos y energía necesarios para la elaboración del inventario de ciclo de vida.
- Caracterizar y analizar propiedades estructurales, ópticas e hidrofóbicas de las multicapas de MO_x ($M = Si, V, Ti, Zn$), con el objetivo de cuantificar sus rendimientos durante la etapa de uso del ciclo de vida.
- Analizar la durabilidad de las películas delgadas por medio de pruebas de intemperismo acelerado para cuantificar la vida útil de estas. El cual es un factor importante para el inventario de ciclo de vida.

- Cuantificar, evaluar y comparar los impactos ambientales de los escenarios propuestos, mediante Análisis de Ciclo de Vida (ISO 14040/14044) para analizar las diferencias en las distintas categorías de impacto seleccionadas dentro de la metodología ReCiPe, con la base de datos Ecoinvent 3.6 [64] en el software Umberto LCA+.

CAPÍTULO 2: METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

2.1 Metodología

Tal como se describió en la sección “1.2.2.1 Técnicas de depósito”, las películas delgadas MO_x (M= Si, Ti, V, Zn) fueron depositadas por el método Sol-gel debido a que este método presenta menores requerimientos energéticos. En donde las soluciones precursoras fueron obtenidas a partir del uso de una sal metálica, un agente acomplejante (aditivo) y un solvente. Todas las películas fueron depositadas sobre sustratos de vidrio, los cuales fueron limpiados utilizando tres baños de ultrasonido en acetona, isopropanol y agua desionizada, consecutivamente.

En la Tabla 4, se enlistan para los precursores utilizados y las condiciones de depósito para cada una de las películas antes mencionadas.

Tabla 4. Sistemas químicos utilizados para la elaboración de las películas delgadas mediante sol-gel

Material	Precursor	Solvente	Aditivo	Condición(es) variadas
SiO₂	TEOS	EtOH	AN	Temperatura de tratamiento térmico: 200°C, 300°C y 400°C.
VO₂	OV(V)	Agua	PH	Temperatura de tratamiento térmico: 200°C, 300°C, 400°C y 500°C; y tiempo de envejecimiento de solución precursora: 24h, 48h, 72h.
TiO₂	TIBO	EtOH	DEA	Temperatura de tratamiento térmico: 200°C, 300°C, 400°C y 500°C.
ZnO	AZ	EGME	DEA	Temperatura de tratamiento térmico y molaridad de solución precursora: 200°C, 300°C,

400°C y 500°C; 0.25M, 0.50M, 1.00M y 1.25M.

Abreviación	Nombre	Fórmula química
AZ	Acetato de Zinc	$(\text{CH}_3\text{CO}_2)_2\text{Zn}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$
AN	Ácido Nítrico	HNO_3
DEA	Dietanolamina	$(\text{HOCH}_2\text{CH}_2)_2\text{NH}$
EGME	2-Metoxietanol	$\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_2$
EtOH	Etanol	$\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$
OV(V)	Óxido de vanadio (V)	V_2O_5
PH	Peróxido de hidrógeno	H_2O_2
TEOS	Tetraetil ortosilicato	$\text{SiC}_8\text{H}_{20}\text{O}_4$
TIBO	Butóxido de titanio	$\text{C}_{16}\text{H}_{36}\text{O}_4\text{Ti}$

2.2 Nomenclatura de muestras

Para el depósito de las películas se utilizó el equipo de dip-coating marca *Nadetech Innovations* modelo ND-DC (Figura 7a), mediante el cual el sustrato fue sumergido y extraído de la solución precursora a una velocidad de movimiento constante de 150mm/min. Para evaporar los solventes orgánicos, después de cada depósito los sustratos fueron precalentados por diez minutos sobre una plancha de calentamiento a una temperatura de 165°C. Este procedimiento fue repetido tres veces para las películas de SiO_2 , VO_2 y TiO_2 , y cinco veces para las películas de ZnO . Al término del depósito los sustratos fueron tratados térmicamente en un horno tubular marca *Thermolyne* modelo F21135 (Figura 7b) a diversas temperaturas por una hora. Para la obtención de las multicapas, se realizó un tratamiento térmico después del depósito de cada material. En la Tabla 5 se define la nomenclatura para todas las muestras depositadas y sus respectivas condiciones de depósito.

Tabla 5. Condiciones de depósito para las películas delgadas y sus multicapas, depositadas mediante sol-gel.

Material	Envejecimiento (horas)	Capas	Molaridad	Temperatura (°C)	Nomenclatura
SiO ₂	24	3	---	200	SiO ₂ -200
				300	SiO ₂ -300
				400	SiO ₂ -400
VO ₂	24	3	---	400	VO ₂ -24
	48			400	VO ₂ -48
	72			400	VO ₂ -72
TiO ₂	24	3	---	200	TiO ₂ -200
				300	TiO ₂ -300
				400	TiO ₂ -400
				500	TiO ₂ -500
ZnO	24	5	0.25	200	ZnO-0.25-200
				300	ZnO-0.25-300
				400	ZnO-0.25-400
				500	ZnO-0.25-500
			0.50	200	ZnO-0.50-200
				300	ZnO-0.50-300

				400	ZnO-0.50-400
				500	ZnO-0.50-500
			1.00	200	ZnO-1.00-200
				300	ZnO-1.00-300
				400	ZnO-1.00-400
				500	ZnO-1.00-500
				200	ZnO-1.25-200
			1.25	300	ZnO-1.25-300
				400	ZnO-1.25-400
				500	ZnO-1.25-500
SiO₂+VO₂	24+72	3+3	---	400	SiO ₂ +VO ₂
SiO₂+VO₂+TiO₂	24+72+24	3+3+3	---	400	SiO ₂ +VO ₂ +TiO ₂
SiO₂+VO₂+TiO₂+ZnO	24+72+24+24	3+3+3+5	---	400	SiO ₂ +VO ₂ +TiO ₂ +ZnO

2.3 Métodos de caracterización

La caracterización de las propiedades estructurales, ópticas, morfológicas y mojabilidad de la superficie (ángulo de contacto con el agua) de las películas delgadas se realizó utilizando difracción de rayos X, espectroscopía UV-Vis, microscopía de fuerza atómica y análisis de forma de gota.

El estudio de la estructura cristalina de las películas se llevó a cabo mediante un difractómetro de rayos X de la marca *PANalytical* (Figura 7c) en modalidad ángulo rasante de 20° a 70° en 2θ . Las propiedades ópticas, como la transmitancia en el espectro visible, fueron estudiadas con un espectrofotómetro *Cary 5000 UV-Vis-Nir* marca *Agilent Technologies* (Figura 7d) en un rango de 300 a 800nm. La morfología de la superficie se analizó mediante el microscopio de fuerza atómica (MFA) modelo *Nai0AFM*, marca *Nanosurf* (Figura 7e) en modo contacto. Por último, la mojabilidad de las muestras fue analizada por medio del analizador de forma de gota (*Drop Shape Analyzer*) modelo DSA25E marca KRÜSS (Figura 7f) en modo gota *sessile*. En la sección de apéndices (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) se encuentra información adicional del principio y modo de operación de cada técnica de caracterización.

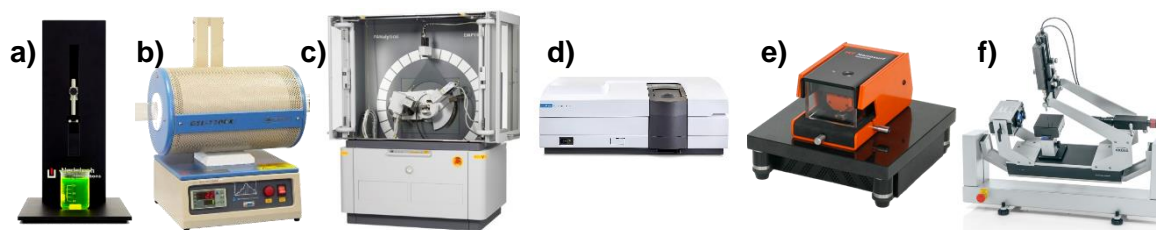


Figura 7. Equipos utilizados para el depósito y caracterización de las muestras

CAPÍTULO 3: CARACTERIZACIÓN Y RESULTADOS DE LOS MATERIALES

En este capítulo se presentan y discuten los resultados obtenidos de la caracterización realizada a las películas delgadas MO_x ($M = Si, V, Ti, Zn$) y sus multicapas depositadas por el método de Sol-gel correspondientes a la nomenclatura de muestras definida en el capítulo anterior. En sus respectivas secciones, se analizan los efectos que la variación de ciertas condiciones de depósito tiene en las películas delgadas y se eligen las que propicien mejores comportamientos para las multicapas y para su implementación en los modelos generados para el ACV.

En la Tabla 6 se resumen el tipo de caracterización y las técnicas utilizadas para el análisis de las propiedades estructurales, ópticas, morfológicas y la mojabilidad (ángulo de contacto) de cada una de las películas delgadas preparadas por el método Sol-gel, previamente descritas.

Tabla 6. Caracterización de las películas delgadas.

Tipo de caracterización	Técnica	Equipo	Objetivo
Estructural	Difracción de Rayos X	<i>PANalytical</i> – ángulo rasante	Identificación de fases cristalinas presentes en las películas delgadas.
Óptica	Espectroscopía UV-VIS	<i>Cary 5000</i> UV-Vis-NIR	Porcentaje de transmitancia de las películas, así como la determinación del valor del band-gap (E_g).
Morfológica	Microscopio de Fuerza Atómica	<i>Nanosurf</i> <i>NaioAFM</i>	Determinar morfología de la superficie.
Mojabilidad	Análisis de Ángulo de Contacto	<i>Drop Shape Analyzer</i> KRÜSS	Determinar la hidrofobicidad de las películas delgadas.

3.1 Vidrio de ventana tradicional

Dado que la aplicación potencial de estas películas es su uso en ventanas, se realizó un análisis de las propiedades del vidrio comercial sin recubrimiento alguno. Esta información es importante para incorporarla en el Inventario de Ciclo de Vida (ICV) que se discutirá más adelante.

3.1.1 DIFRACCIÓN DE RAYOS X

Los resultados del análisis de DRX (Figura 8) muestran que el vidrio de ventana tradicional es amorfo, dada su naturaleza, pues su componente principal es el dióxido de silicio (SiO_2), el cual no es cristalino. Otros componentes principales del vidrio tradicional son el carbonato de sodio (Na_2CO_3) y el carbonato de calcio (CaCO_3) los cuales se agregan para disminuir la temperatura de fundición del vidrio, haciéndolo más maleable, y para incrementar la dureza y resistencia química del material, respectivamente [65].

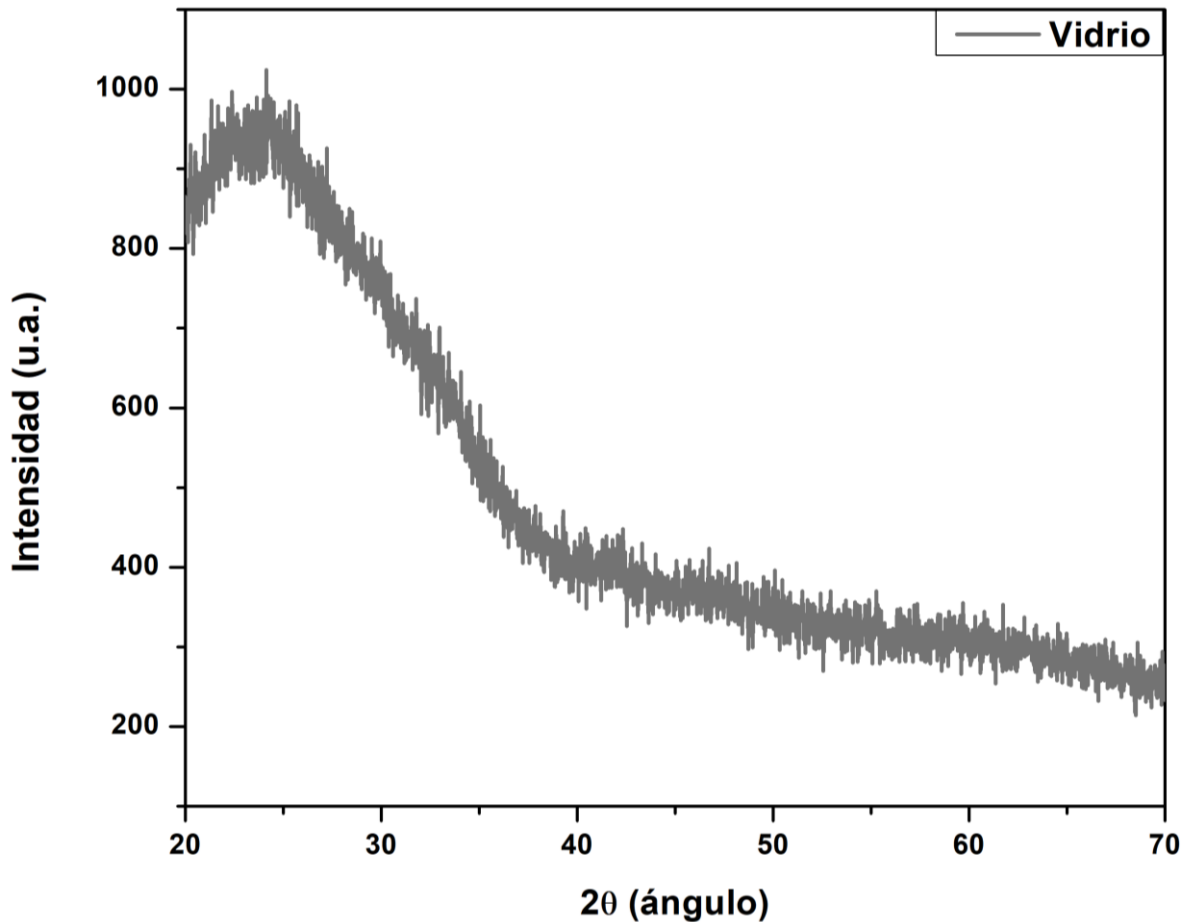


Figura 8. Difractograma de rayos X del vidrio tradicional

3.1.2 MICROSCOPIA DE FUERZA ATÓMICA

La superficie del vidrio de ventana tradicional se analizó con el microscopio de fuerza atómica en un área de $6.25\mu\text{m} \times 6.25\mu\text{m}$, como se muestra en la Figura 9. La superficie del vidrio de ventana tradicional se analizó con el microscopio de fuerza atómica en un área de $6.25\mu\text{m} \times 6.25\mu\text{m}$, como se muestra en la Figura 9. Observamos que la superficie del vidrio tradicional no presenta una morfología definida y la rugosidad de su superficie es de 0.932nm para el área definida. La rugosidad en la superficie del vidrio es afectada por el proceso de pulido al que se somete al vidrio de ventana en el proceso de manufactura. Este pulido puede afectar la adherencia de las soluciones aplicadas sobre la superficie del vidrio cuando se utilizan métodos como el *spray coating* y la serigrafía debido a la baja adherencia que se ha reportado para estos métodos [23].

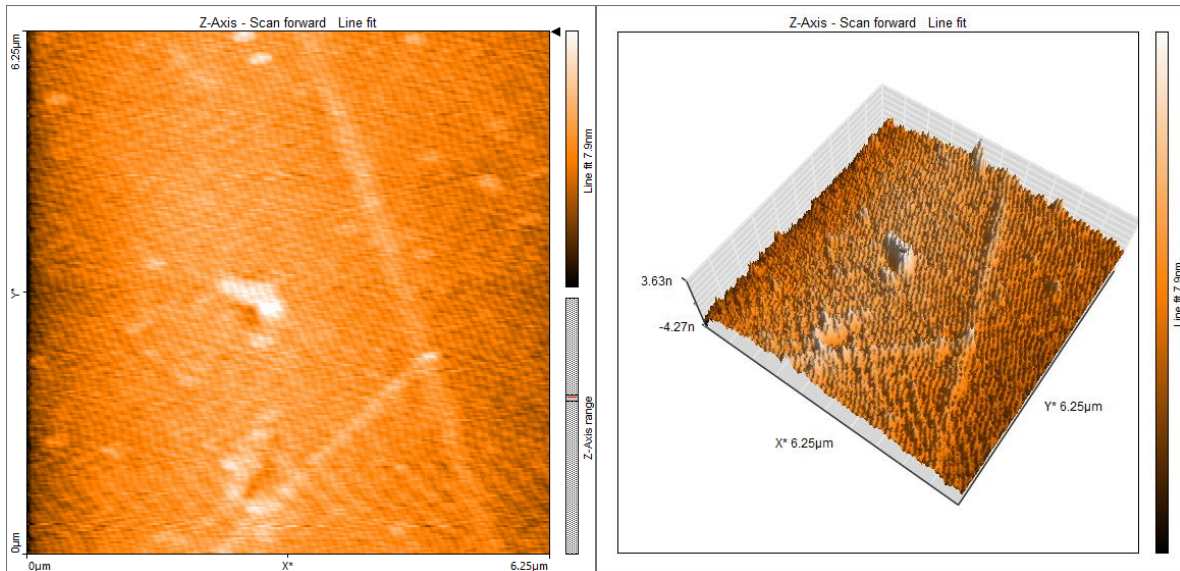


Figura 9. Morfología superficial caracterizada por MFA del vidrio tradicional, área de 6.25µmx6.25µm.

3.1.3 ESPECTROSCOPIA UV-VIS

La Figura 10 muestra el porcentaje de transmitancia de un sustrato de vidrio tradicional limpio, sin depósito alguno. En donde se observa que, el vidrio deja pasar entre el 90 a 95% de la luz visible, lo cual es el comportamiento ideal para utilizar este tipo de vidrios en ventanas.

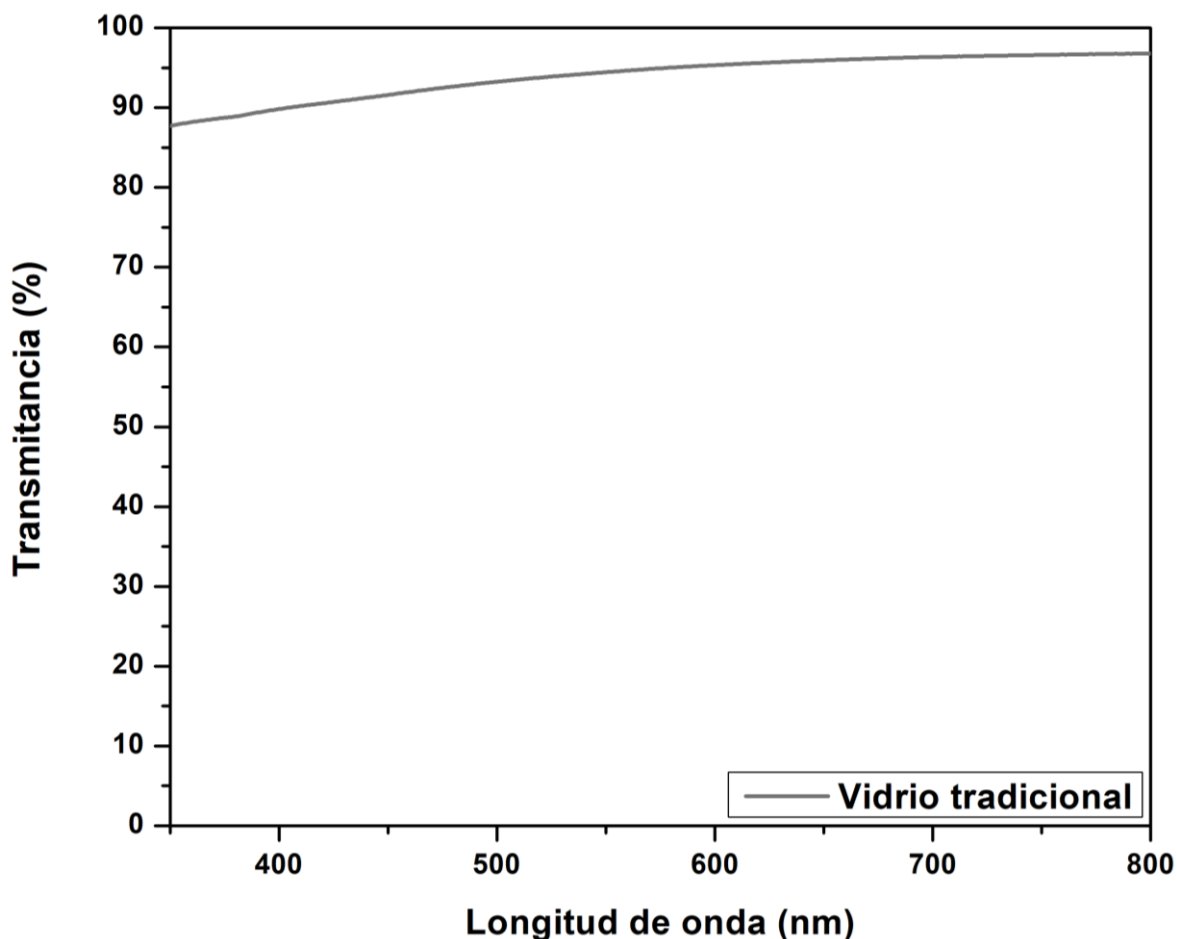


Figura 10. Porcentaje de transmitancia en UV-Vis del vidrio tradicional.

3.1.4 ANÁLISIS DE LA FORMA DE GOTA

Es bien sabido que los vidrios tradicionales muestran comportamientos totalmente hidrofílicos, pues cuando llueve observamos como la lluvia cae sobre la superficie del vidrio, dejando a su paso manchas, estas son producto de la contaminación que permanece depositada en la superficie. Para conocer cuál es el valor de mojabilidad de los vidrios tradicionales, se midió el ángulo de contacto entre la superficie del vidrio y una gota de agua (Figura 11), obteniendo valores de hasta 10° , lo cual está en el límite de los valores reportados para una superficie con comportamiento superhidrofóbico. Cuando llueve sobre la superficie de los vidrios de ventana tradicionales, las gotas (sobre todo en zonas urbanas) arrastran consigo contaminantes y diferentes partículas que se encuentran suspendidas en el aire, y debido al comportamiento hidrofílico de los vidrios, esta suciedad queda adherida a

su superficie. Después de que las gotas de lluvia se evaporan, dejan atrás manchas en forma de polvo, ocasionando un incremento en gastos monetarios, hídricos y de mano de obra para la limpieza de las ventanas.

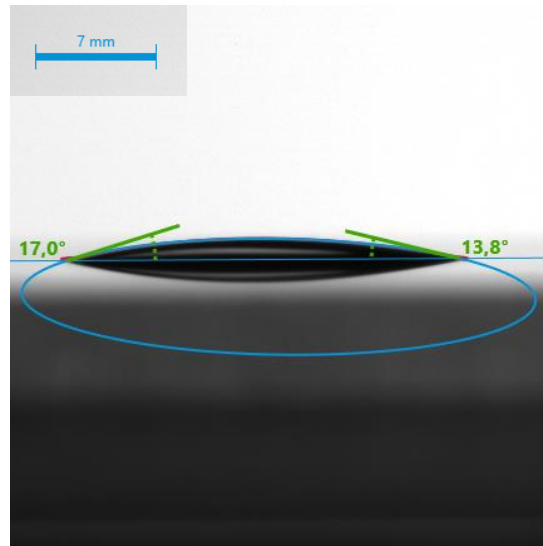


Figura 11. Mojabilidad (ángulo de contacto con el agua) de la superficie del vidrio tradicional.

3.2 SiO₂

Dado que la superficie del vidrio de ventana tradicional tiene propiedades superhidrofóbicas, se propone que sobre el vidrio de ventana se recubra con una película delgada de SiO₂, la cual ayudará a que las capas de los óxidos semiconductores mencionados puedan crecer sobre la superficie de las ventanas sin ningún problema. A continuación, se presenta la caracterización integral de las películas delgadas de SiO₂ depositadas por el método sol gel.

3.2.1 DIFRACCIÓN DE RAYOS X

En la Figura 12 se observa el difractograma de rayos X de las películas delgadas de SiO₂ depositadas sobre sustratos de vidrio. Se aprecia que independientemente de la variación en la temperatura del tratamiento térmico, el SiO₂ no muestra cristalinidad alguna, ya que las temperaturas utilizadas son muy bajas para poder obtener las fases cristalinas del SiO₂. En este trabajo se utiliza mayoritariamente la

temperatura de tratamiento térmico de 400°C debido a la mejor adherencia con el sustrato.

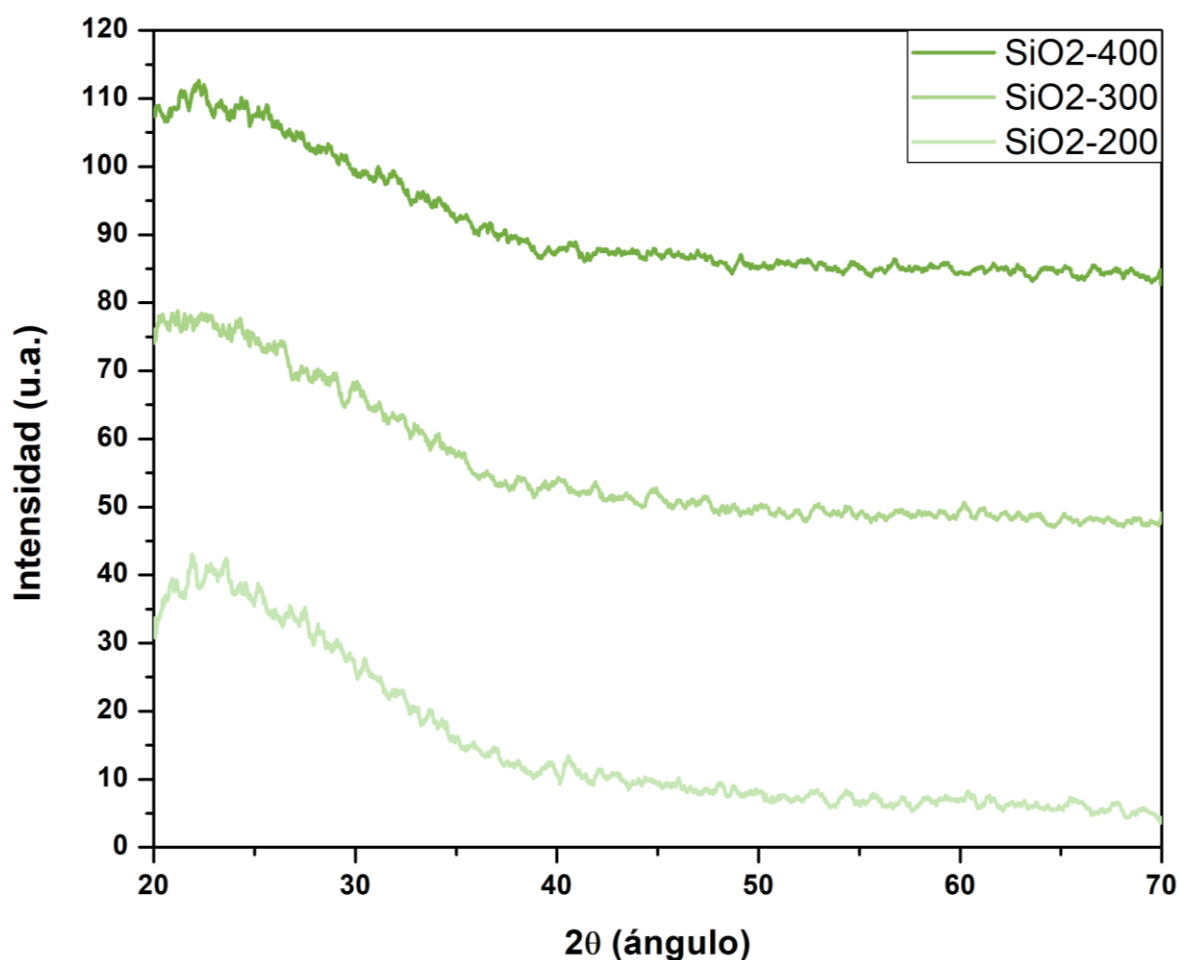


Figura 12. Difractograma de rayos X de las películas de SiO₂ depositadas variando la temperatura del tratamiento térmico (200°C, 300°C y 400°C).

3.2.2 MICROSCOPIA DE FUERZA ATÓMICA

Tanto en la Figura 13 como en la Tabla 7 se observan los datos obtenidos del análisis de la morfología superficial de las películas delgadas de SiO₂ depositadas variando la temperatura del tratamiento térmico. Se encontró que los valores en la rugosidad disminuyen conforme aumenta la temperatura de tratamiento térmico, debido a que, a mayores temperaturas hay una relajación en la estructura producto de la remoción de los materiales orgánicos utilizados como precursores, permitiendo que la película se siga densificando.

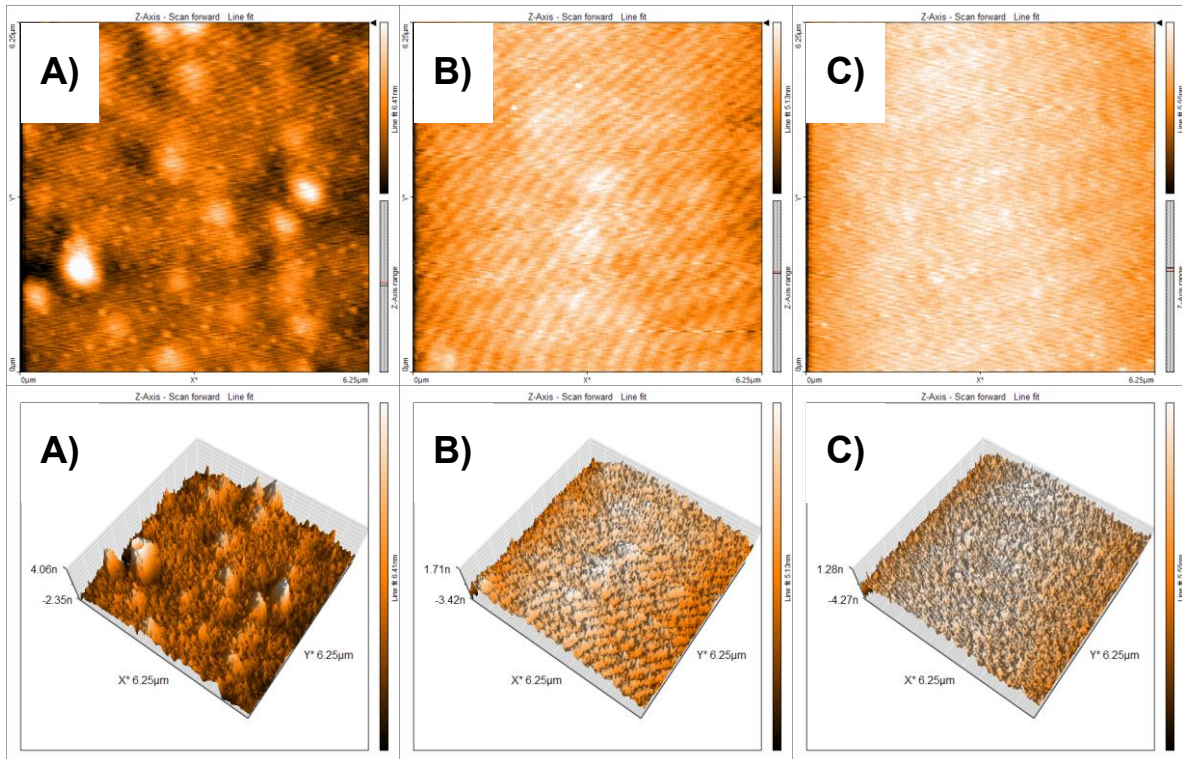


Figura 13. Morfología superficial caracterizada por MFA de las películas delgadas de SiO₂ depositadas variando la temperatura del tratamiento térmico (A) 200°C, B) 300°C y C) 400°C). Área de 6.25µm x 6.25µm.

Tabla 7. Valores de rugosidad de las películas delgadas de SiO₂ depositadas variando la temperatura del tratamiento térmico (200°C, 300°C y 400°C). Área de 6.25µm x 6.25µm.

Muestra	Valores de rugosidad en nm para área de 6.25µm x 6.25µm
SiO₂-200	0.976
SiO₂-300	0.724
SiO₂-400	0.694

3.2.3 ESPECTROSCOPIA UV-VIS

En la Figura 14 se muestra el patrón de transmitancia de las películas de SiO₂. Se observa que no existe una correlación lineal entre la temperatura de tratamiento y la transmitancia. Por lo general, sin importar la variación en la temperatura de tratamiento térmico, el porcentaje de transmitancia de las películas de SiO₂ es mayor del 85%, lo cual no afectaría el paso de la luz visible a través del vidrio convencional, para fines estéticos.

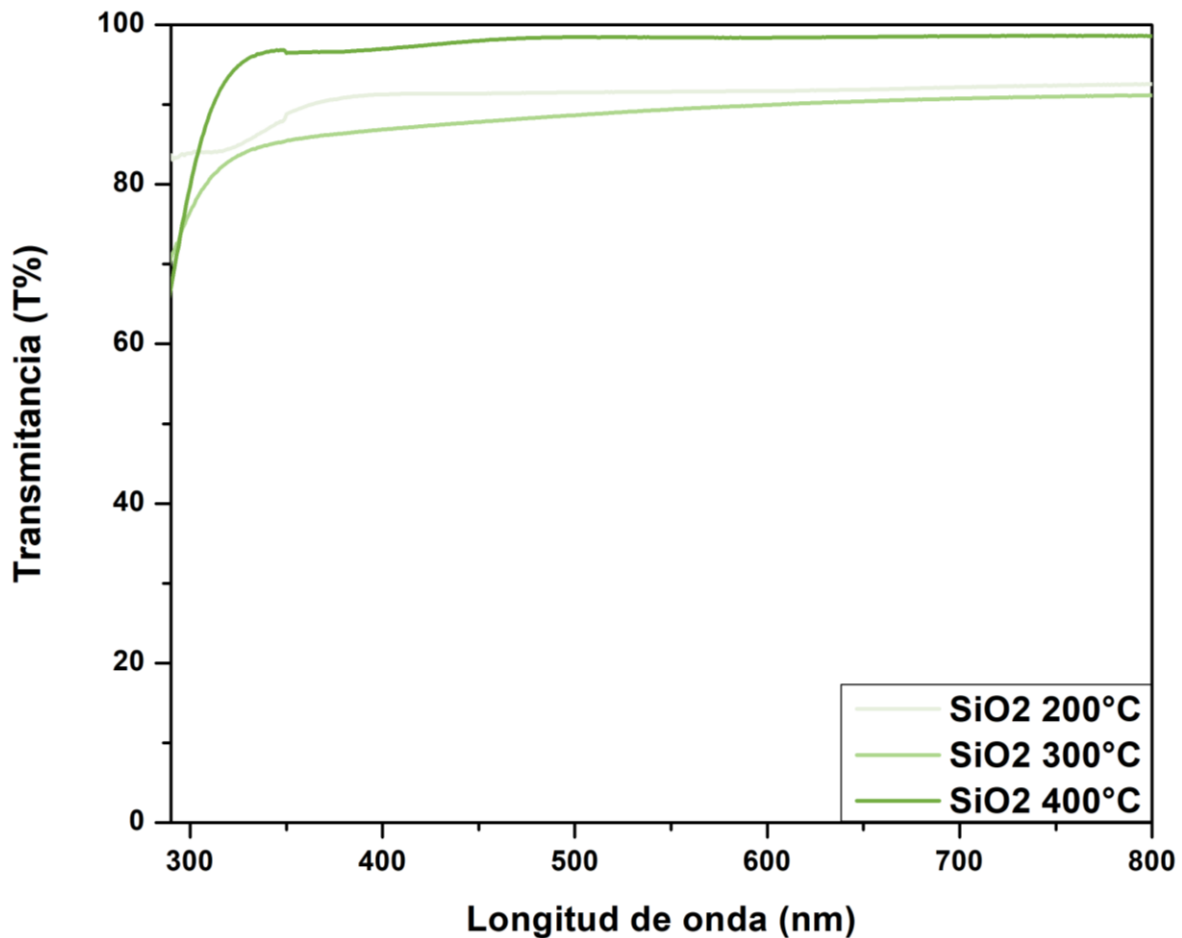


Figura 14. Porcentaje de transmitancia en UV-Vis de las películas delgadas de SiO₂ depositadas variando la temperatura del tratamiento térmico (200°C, 300°C y 400°C).

3.2.4 ANÁLISIS DE LA FORMA DE GOTA

La Figura 15 muestra las imágenes del análisis de forma de gota de agua de las superficies de las películas de SiO₂. Se observó que, la mojabilidad de la superficie de todas las películas es independiente de la temperatura de tratamiento térmico, ya que todas presentan comportamiento hidrofílico. Sin embargo, al incrementar la temperatura de tratamiento térmico, el ángulo de contacto disminuye. Como se describió en la Introducción, la superficie de las películas de SiO₂ depositadas por el método sol gel tiene una mojabilidad que coincide con el modelo de Cassie-Baxter, el cual describe que a que mayores rugosidades el ángulo de contacto también será mayor. Tomando en cuenta estos resultados se concluye que la mejor temperatura de tratamiento para generar el Inventario de Ciclo de Vida (ICV) es 400°C.

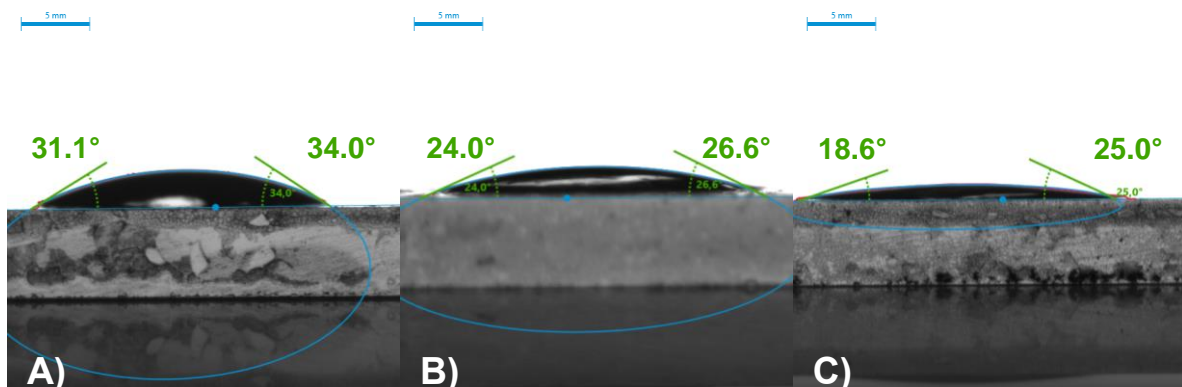


Figura 15. Mojabilidad (ángulo de contacto con el agua) de la superficie de las películas delgadas de SiO₂ depositadas variando la temperatura del tratamiento térmico (A) 200°C, B) 300°C y C) 400°C).

3.3 ZnO

En esta sección se presentan y discuten los resultados obtenidos para las películas de ZnO depositadas variando la temperatura de tratamiento térmico y la molaridad de la solución precursora, tal como se enlista en la Tabla 8. Los resultados de la caracterización de este material fueron publicados en un artículo científico [66].

Tabla 8. Condiciones de depósito de las películas delgadas de ZnO depositadas variando la temperatura del tratamiento térmico (200°C, 300°C, 400°C y 500°C) y la molaridad de la solución precursora (0.25M, 0.50M, 1.00M, 1.25M).

Muestra	Mol.	Temp.	Muestra	Mol.	Temp.	Muestra	Mol.	Temp.	Muestra	Mol.	Temp.
ZnO-0.25M-200°C	0.25	200°C	ZnO-0.50M-200°C	0.50	200°C	ZnO-1.00M-200°C	1.00	200°C	ZnO-1.25M-200°C	1.25	200°C
ZnO-0.25M-300°C		300°C	ZnO-0.50M-300°C		300°C	ZnO-1.00M-300°C		300°C	ZnO-1.25M-300°C		300°C
ZnO-0.25M-400°C		400°C	ZnO-0.50M-400°C		400°C	ZnO-1.00M-400°C		400°C	ZnO-1.25M-400°C		400°C
ZnO-0.25M-500°C		500°C	ZnO-0.50M-500°C		500°C	ZnO-1.00M-500°C		500°C	ZnO-1.25M-500°C		500°C

3.3.1 DIFRACCIÓN DE RAYOS X

Los difractogramas correspondientes a las películas depositadas con diferente molaridad y tratadas a diferentes temperaturas se presentan en la Figura 16. Se observa que independientemente de la temperatura y la molaridad, en todas las muestras se presentan los picos característicos de la tarjeta de difracción correspondiente al ZnO (JCDS-01-079-0208). Se observó que la cristalinidad y la orientación de las películas son afectadas tanto por la variación en la molaridad como en la temperatura de tratamiento térmico. Al aumentar la molaridad de la solución precursora, los picos de ZnO incrementan su intensidad (sobre todo para las temperaturas de tratamiento térmico de 400°C y 500°C) y, por lo tanto, su cristalinidad.

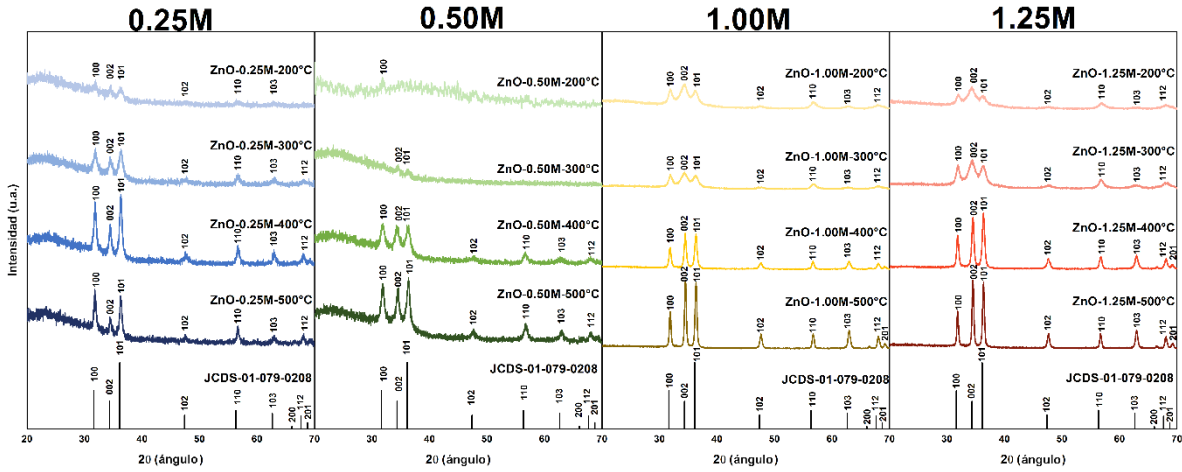


Figura 16. Difractograma de rayos X de las películas de ZnO depositadas variando la temperatura del tratamiento térmico (200°C, 300°C, 400°C y 500°C) y la molaridad de la solución precursora (0.25M, 0.50M, 1.00M, 1.25M).

Dado que la intensidad de los picos es similar, se calculó el coeficiente de textura mediante la ecuación (2) [67]:

$$T_{c(hkl)} = \frac{\left(\frac{I_{(hkl)}}{I_{c(hkl)}} \right)}{\left[\frac{1}{n} \sum \left(\frac{I_{(hkl)}}{I_{c(hkl)}} \right) \right]} \quad (2)$$

Donde:

$I_{(hkl)}$: Intensidad experimental de DRX.

$I_{c(hkl)}$: Intensidad del patrón de datos de DRX.

n : Número de picos

$T_{c(hkl)}$: Coeficiente de textura. $T_{c(hkl)} < 1$: crecimiento de grano aleatorio y

$T_{c(hkl)} > 1$: crecimiento preferencial para ese plano (h k l) [68].

La Tabla 9 muestra los coeficientes de textura para los planos (100), (002) y (101) de cada película. Independientemente de la molaridad de la solución precursora, a bajas temperaturas de tratamiento (200°C y 300°C), las películas muestran una orientación en el plano (002), pero a partir de los 400°C, la orientación cristalina cambia a otros planos. Estos cambios no incluyen a las películas con una concentración de 0.50M y tratadas térmicamente a 200°C y 300°C, dado que las

intensidades de los picos de difracción para estas dos películas son muy pequeñas por lo que no fue posible determinar sus coeficientes de textura.

Tabla 9. Coeficientes de textura para los principales picos de las películas delgadas de ZnO.

ZnO	0.25M			0.50M			1.00M			1.25M		
Temp. (°C)	T _{c(100)}	T _{c(002)}	T _{c(101)}	T _{c(100)}	T _{c(002)}	T _{c(101)}	T _{c(100)}	T _{c(002)}	T _{c(101)}	T _{c(100)}	T _{c(002)}	T _{c(101)}
200	1.29	1.43	0.58	---	---	---	1.21	1.95	0.66	1.07	2.05	0.57
300	1.30	1.05	1.25	---	---	---	1.28	1.86	0.68	1.20	1.92	0.67
400	0.70	0.81	1.10	0.78	0.63	1.24	0.97	2.05	0.88	0.95	0.48	1.02
500	1.45	1.02	0.74	0.76	0.59	1.34	0.91	2.23	0.22	0.84	2.03	0.85

En la Tabla 10 se muestran las propiedades estructurales como el tamaño de cristalito, la densidad de dislocaciones y los parámetros de red de las películas delgadas de ZnO. Se observa que los parámetros de red *a* y *c* no cambian significativamente con respecto a la tarjeta de difracción JCDS-01-079-0208. Adicionalmente, el tamaño de cristalito fue calculado utilizando la ecuación de Scherrer [69]:

$$D = \frac{0.9\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (3)$$

Donde:

λ : Longitud de onda de rayos X.

β : Anchura a media altura del pico (FWHM por sus siglas en inglés).

θ : Ángulo de difracción de Braggs.

D: Tamaño de cristalito.

Mientras que el tamaño de cristalito aumenta conforme aumenta la temperatura, lo cual concuerda con los picos observados en la Figura 16. Por otro lado, se calculó la densidad de dislocaciones con la ecuación (4), la cual define el número aproximado de defectos que existen en la estructura cristalina de las películas

delgadas [70]. Al igual que el tamaño de cristalito y los parámetros de red, la densidad de dislocaciones de las muestras se presenta en la Tabla 10.

$$\delta = \frac{1}{D^2} \quad (4)$$

Donde:

D: Tamaño de cristalito.

δ : Densidad de dislocaciones

Independientemente de la molaridad de la solución precursora, el aumento en el tamaño de cristalito y en la cristalinidad de las películas disminuye los valores en la densidad de dislocaciones. Por lo tanto, las películas con valores menores de cristalinidad son aquellas cuya estructura tiene un mayor número de defectos.

Tabla 10. Propiedades estructurales de las películas de ZnO.

Muestra	Tamaño de cristalito D (nm)	Densidad de dislocaciones δ (nm ⁻²)	a (Å)	c (Å)
ZnO (JCDS-01-079-0208)	---	---	3.26	5.21
ZnO-0.25-200	12.3	6.65x10 ⁻⁰³	3.23	5.18
ZnO-0.25-300	10.4	9.18 x10 ⁻⁰³	3.23	5.20
ZnO-0.25-400	15.0	4.42 x10 ⁻⁰³	3.24	5.19
ZnO-0.25-500	19.0	2.77 x10 ⁻⁰³	3.24	5.21
ZnO-0.50-200	---	---	---	---
ZnO-0.50-300	---	---	---	---
ZnO-0.50-400	9.61	1.08 x10 ⁻⁰²	3.23	5.21
ZnO-0.50-500	14.89	4.51 x10 ⁻⁰³	3.24	5.20
ZnO-1.00-200	7.47	1.79 x10 ⁻⁰²	3.24	5.21
ZnO-1.00-300	7.59	1.74 x10 ⁻⁰²	3.22	5.21
ZnO-1.00-400	16.81	3.54 x10 ⁻⁰³	3.23	5.19
ZnO-1.00-500	21.23	2.22 x10 ⁻⁰³	3.24	5.19
ZnO-1.25-200	6.30	2.52 x10 ⁻⁰²	3.22	5.21
ZnO-1.25-300	7.94	1.59 x10 ⁻⁰²	3.23	5.19
ZnO-1.25-400	16.99	3.47 x10 ⁻⁰³	3.23	5.19
ZnO-1.25-500	21.33	202 x10 ⁻⁰³	3.24	5.20

3.3.2 MICROSCOPIA DE FUERZA ATÓMICA

La morfología de las películas depositadas (variando la molaridad y temperatura de tratamiento) se muestra en la Figura 17. La superficie de las películas fue analizada

utilizando un microscopio de fuerza atómica en modo contacto en un área de $1\mu\text{m}^2$. La morfología en las películas de ZnO no presenta cambios con las modificaciones realizadas en las condiciones de depósito, ya que, tal como se observa en las imágenes de la Figura 17, la superficie de las películas de ZnO está conformada por cúmulos de partículas de diferentes tamaños. En donde, las películas depositadas a menores molaridades presentan una mayor concentración de partículas en la superficie mientras que, a mayores molaridades, las partículas aumentan su tamaño.

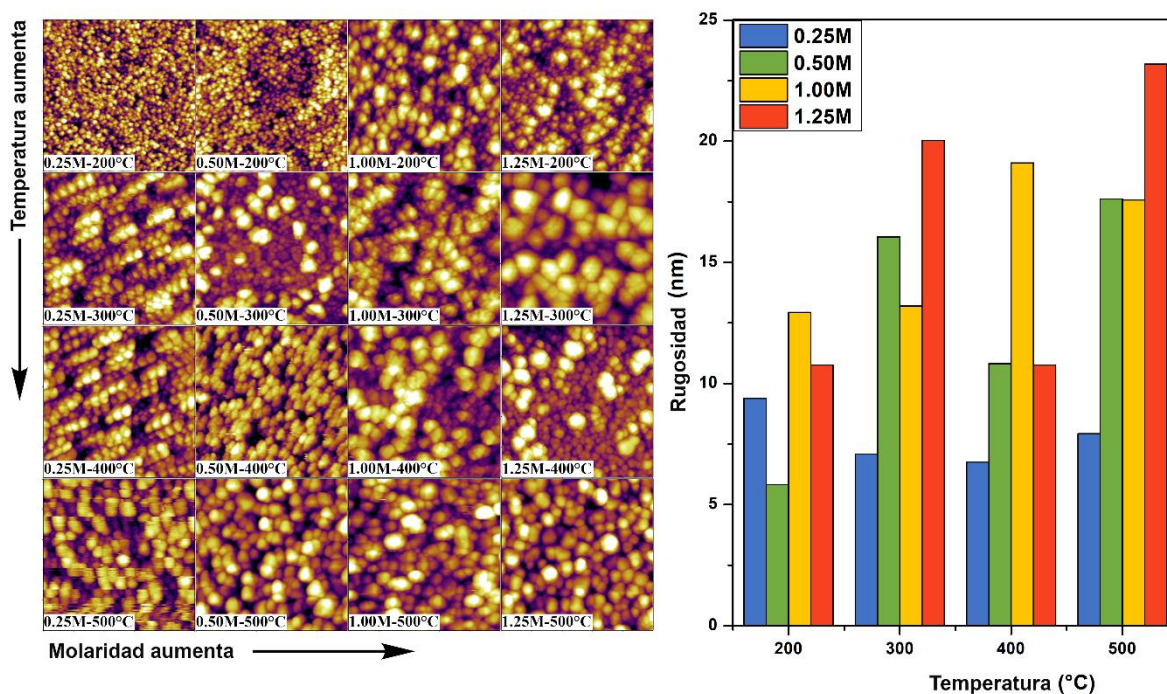


Figura 17. Morfología superficial caracterizada por MFA de las películas delgadas de ZnO depositadas variando la temperatura del tratamiento térmico (200°C, 300°C, 400°C y 500°C) y la molaridad de la solución precursora (0.25M, 0.50M, 1.00M, 1.25M). Área de $1\mu\text{m} \times 1\mu\text{m}$.

Utilizando las imágenes obtenidas con el microscopio de fuerza atómica (MFA), se calcularon las rugosidades de las películas y se muestran en la Tabla 11. En cuanto a los valores de rugosidad, se observa una tendencia en la cual tanto el incremento en la temperatura de tratamiento como el incremento en la molaridad ocasionan un incremento en la rugosidad de la muestra. Esto es una combinación de dos factores:

el aumento en la molaridad de la solución precursora facilita el crecimiento de estructuras cristalinas de mayor escala, cuyo crecimiento también es facilitado por mayores temperaturas de tratamiento térmico [71].

Tabla 11. Valores de rugosidad superficial de las películas delgadas de ZnO depositadas variando la temperatura del tratamiento térmico (200°C, 300°C, 400°C y 500°C) y la molaridad de la solución precursora (0.25M, 0.50M, 1.00M, 1.25M). Área de 1µmx1µm.

ZnO	0.25M	0.50M	0.75M	1.25M
Temp. (°C)	Rugosidad (nm)	Rugosidad (nm)	Rugosidad (nm)	Rugosidad (nm)
200	9.39	5.83	12.94	10.76
300	7.08	16.06	13.20	20.04
400	6.75	10.83	19.11	10.76
500	7.93	17.61	17.57	23.18

3.3.3 ESPECTROSCOPIA UV-VIS

En la Figura 18 se presenta el porcentaje de transmitancia de las películas delgadas de ZnO, en donde se observa que independientemente de la molaridad, la mayoría de las películas presentan una transmitancia mayor al 90%, exceptuando ZnO-1.00-200 y ZnO-1.25-200, cuyo porcentaje de transmitancia fue de aproximadamente 80%. Se ha reportado que el porcentaje de transmitancia está relacionado con la cristalinidad del material, ya que las películas con menor cristalinidad tienen un tamaño de cristalito más pequeño, lo que provoca mayor dispersión de la luz y menor transmitancia [72]. A pesar de que no haya habido significantes diferencias entre la transmitancia en el espectro visible de las muestras evaluadas (exceptuando ZnO-1.00-200 y ZnO-1.25-200), las muestras que presentan el mayor porcentaje de transmitancia son aquellas tratadas a una temperatura de 400°C, independientemente de la molaridad a la que fueron depositadas. El incremento en la transmitancia puede deberse a la cristalinidad de las películas. Ya que las películas con una mayor transmitancia son las mismas que obtuvieron una mayor

intensidad en sus picos de difracción, tal y como se observó en los resultados de DRX (Figura 16).

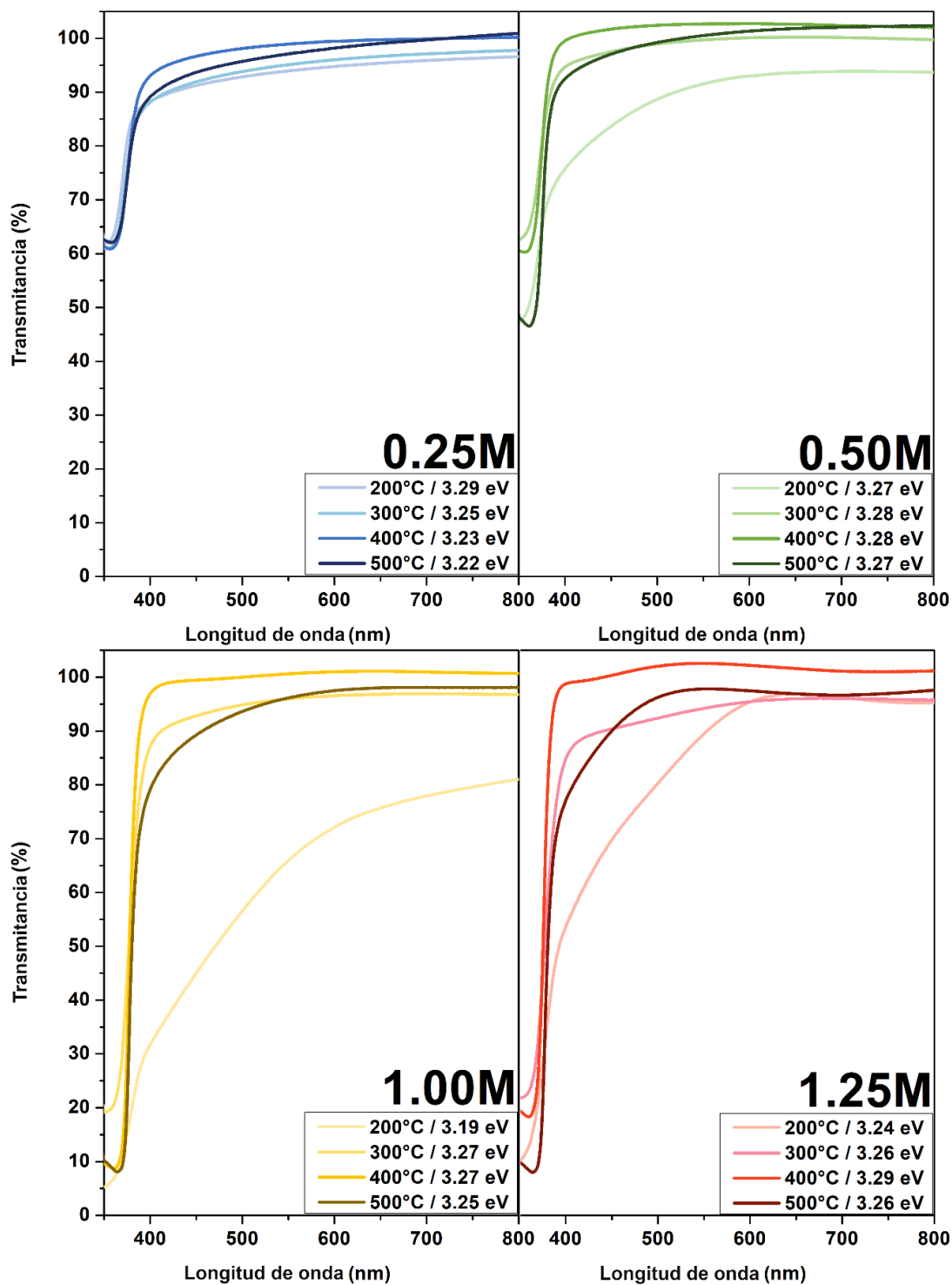


Figura 18. Porcentaje de transmitancia en UV-Vis de las películas delgadas de ZnO depositadas variando la temperatura del tratamiento térmico (200°C, 300°C, 400°C y 500°C) y la molaridad de la solución precursora (0.25M, 0.50M, 1.00M, 1.25M).

El borde de absorción en todas las películas de ZnO se encuentra en las longitudes de onda cercanas al valor del Band-Gap del material (370 - 380 nm). Para conocer este valor, se utilizó la gráfica de Tauc, la cual se muestra en la Figura 19. El band-gap de las películas es calculado alrededor de 3.37 eV, el cual concuerda con el del band-gap reportado para el ZnO [73], [74], confirmando la formación del óxido después del tratamiento térmico.

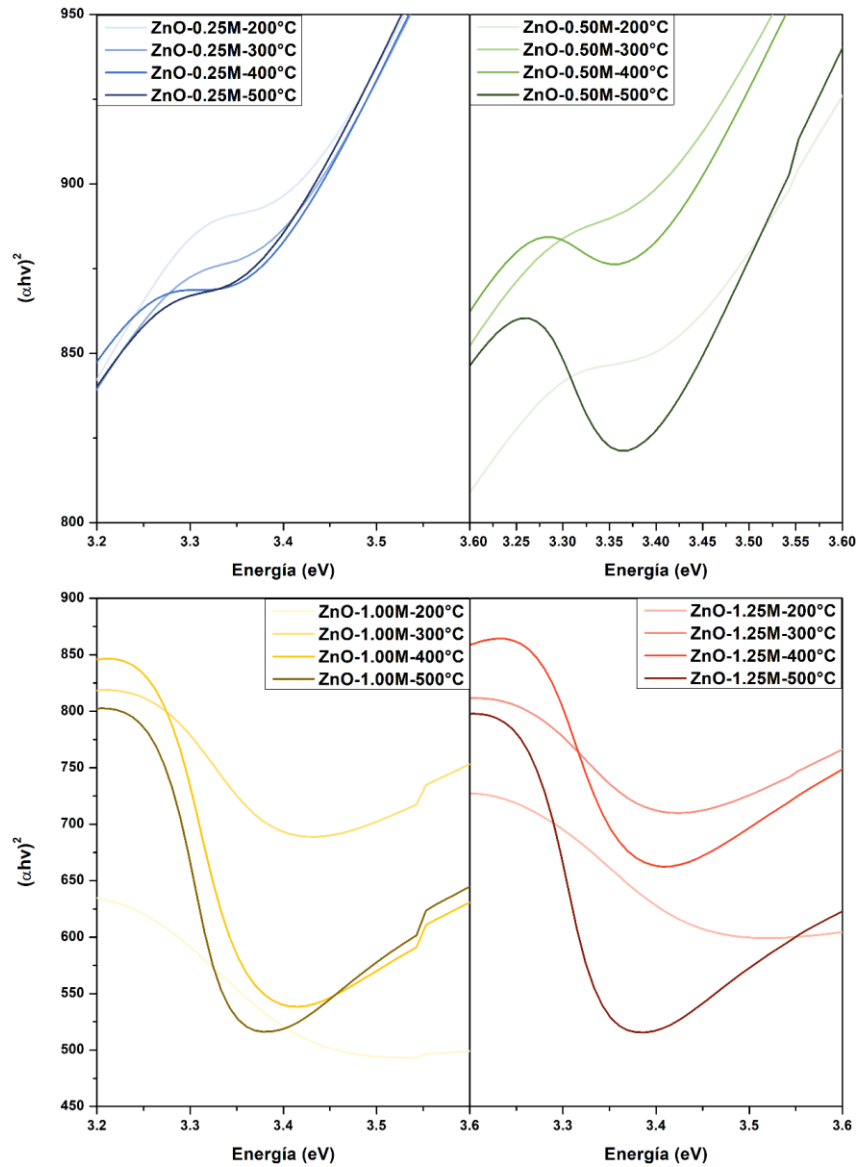


Figura 19. Gráficas de Tauc de las películas delgadas de ZnO depositadas variando la temperatura del tratamiento térmico (200°C, 300°C, 400°C y 500°C) y la molaridad de la solución precursora (0.25M, 0.50M, 1.00M, 1.25M).

3.3.4 ANÁLISIS DE LA FORMA DE GOTA

En la Figura 20 se observan los ángulos de contacto de las películas de ZnO depositadas por el método sol gel variando la molaridad de la solución precursora. En donde las muestras que presentan un comportamiento hidrofóbico son aquellas que fueron depositadas con una molaridad de la solución precursora menor (0.25M) y que fueron tratadas a una temperatura de 200°C. Este comportamiento coincide

con las muestras que mostraron menores rugosidades, por lo que el modelo de Wenzel se ajusta mejor para explicar estas observaciones. En donde a mayores rugosidades, se presentan menores ángulos de contacto, debido al incremento en el área efectiva entre la gota y la superficie de la película. Tomando en cuenta estos resultados se concluye que las mejores condiciones de depósito para tomar en cuenta en la elaboración del ICV es una molaridad de 0.25M con una temperatura de tratamiento térmico de 400°C.

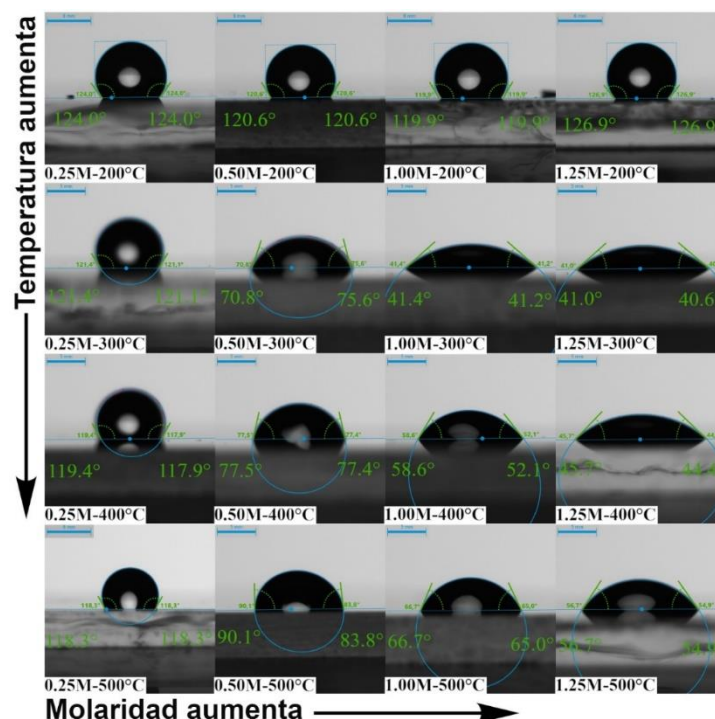


Figura 20. Mojabilidad (ángulo de contacto con el agua) de la superficie de las películas delgadas de ZnO depositadas variando la temperatura del tratamiento térmico (200°C, 300°C, 400°C y 500°C) y la molaridad de la solución precursora (0.25M, 0.50M, 1.00M, 1.25M).

3.4 TiO₂

En esta sección se presenta la caracterización de las propiedades ópticas, estructurales y el ángulo de contacto de las películas delgadas de TiO₂. Los resultados obtenidos definen las mejores condiciones para realizar las multicapas y el ACV.

3.4.1 DIFRACCIÓN DE RAYOS X

En la Figura 21 se observa el difractograma de rayos X de las películas de TiO_2 depositadas por el método sol gel variando la temperatura de tratamiento térmico. De la figura se aprecia que independientemente de la temperatura de tratamiento, todas las películas muestran una estructura amorfa. Esto puede deberse a que, las temperaturas utilizadas son demasiado bajas, por lo que el TiO_2 no alcanza a cristalizarse por completo.

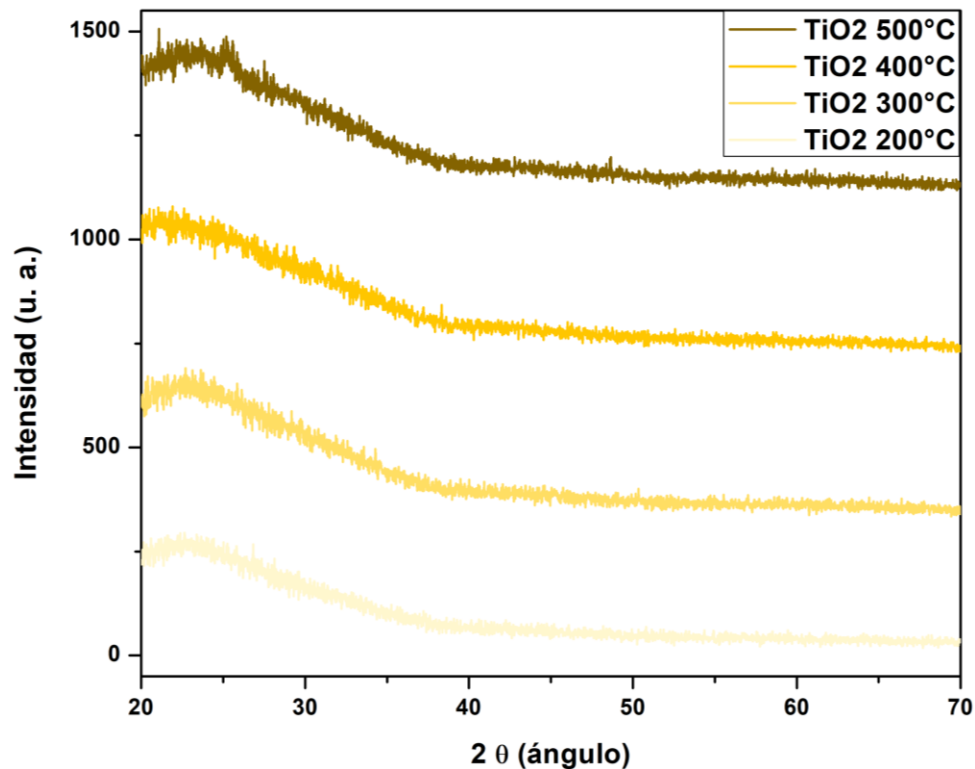


Figura 21. Difractograma de rayos X de las películas de TiO_2 depositadas variando la temperatura del tratamiento térmico (200°C, 300°C, 400°C y 500°C).

3.4.2 MICROSCOPIA DE FUERZA ATÓMICA

Tanto en la Figura 22 como en la Tabla 12 se observan los datos obtenidos del análisis de la morfología superficial de las películas delgadas de TiO_2 depositadas variando la temperatura del tratamiento térmico. Dada la poca cristalinidad de las películas, estas no muestran una morfología definida sobre su superficie. Por lo que

la morfología no se ve afectada por las condiciones de depósito. De esta manera, los valores de rugosidad en la superficie de cada película son cercanos a 3 μm , excepto para la película tratada a 200°C, la cual tiene un valor de rugosidad cercano a 1.3 μm .

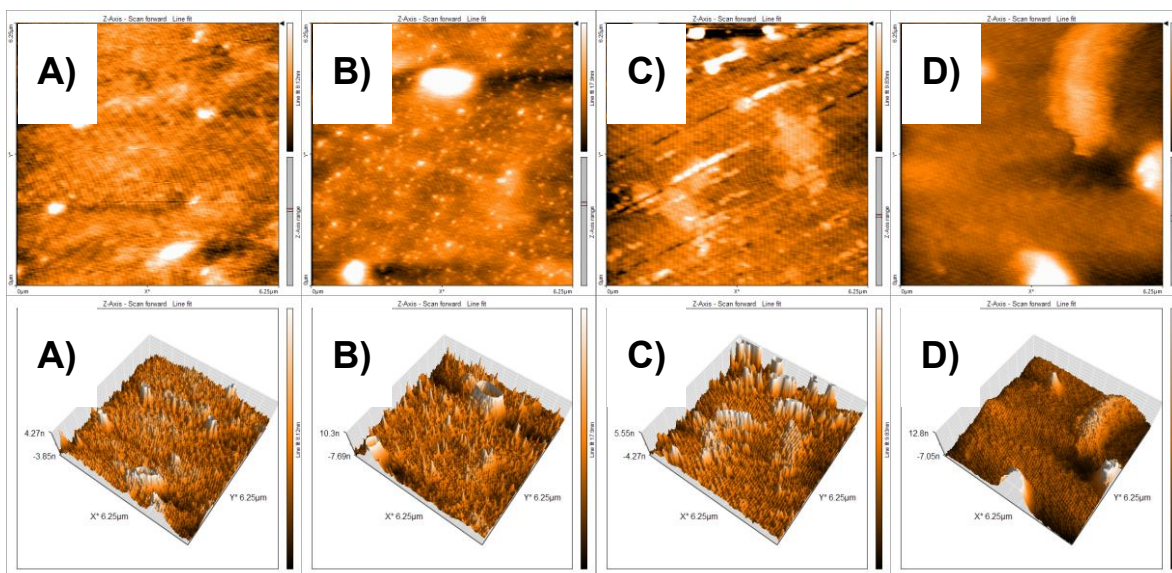


Figura 22. Morfología superficial caracterizada por MFA de las películas delgadas de TiO_2 depositadas variando la temperatura del tratamiento térmico (A) 200°C, B) 300°C, C) 400°C y D) 500°C). Área de $6.25\mu\text{m} \times 6.25\mu\text{m}$.

Tabla 12. Valores de rugosidad de las películas delgadas de TiO_2 depositadas variando la temperatura del tratamiento térmico (200°C, 300°C, 400°C y 500°C). Área de $6.25\mu\text{m} \times 6.25\mu\text{m}$.

Muestra	Valores de rugosidad en nm para área de $6.25\mu\text{m} \times 6.25\mu\text{m}$
TiO_2 -200	1.227
TiO_2 -300	3.265
TiO_2 -400	2.753
TiO_2 -500	3.257

3.4.3 ESPECTROSCOPIA UV-VIS

La Figura 23 muestra el porcentaje de transmitancia en UV-Vis para las películas de TiO₂. En donde se observa que, independientemente de la temperatura de tratamiento térmico, las películas exhiben una transmitancia mayor al 80% en el espectro visible. Además, se observa que para las películas con temperaturas de tratamiento mayores (400°C y 500°C, el porcentaje de transmitancia aumenta a más del 90%.

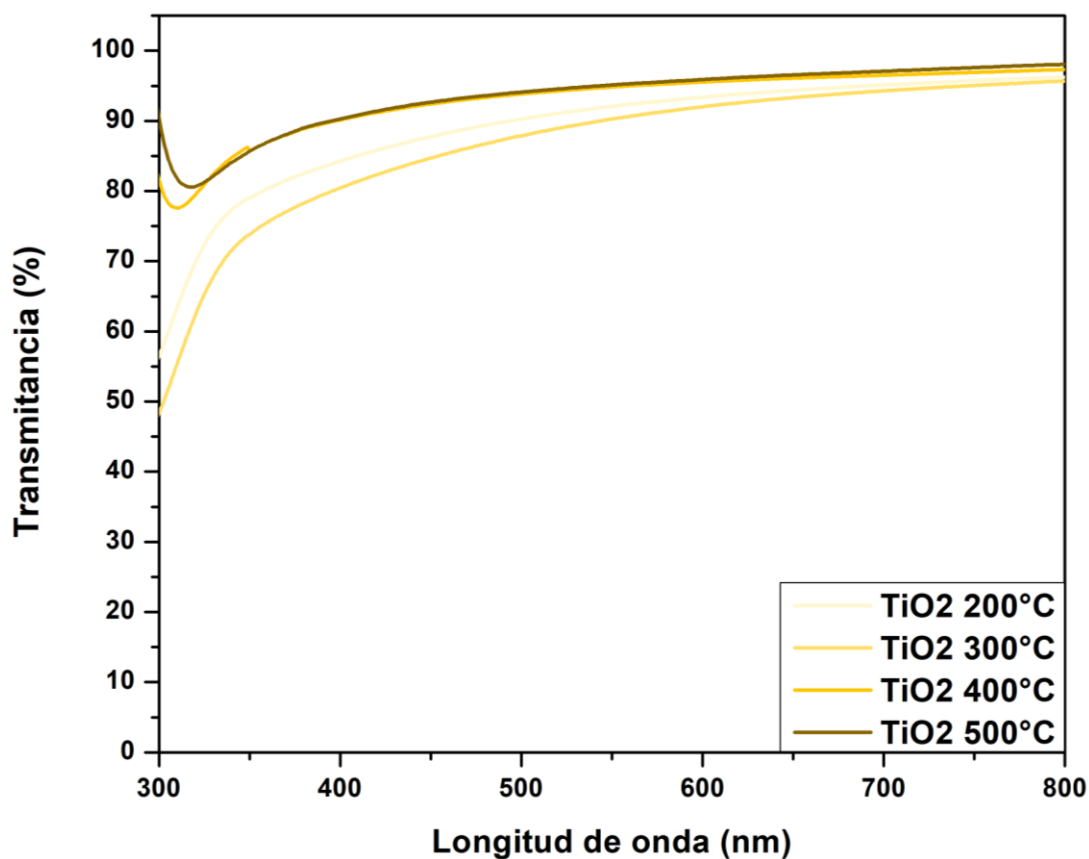


Figura 23. Porcentaje de transmitancia en UV-Vis de las películas delgadas de TiO₂ depositadas variando la temperatura del tratamiento térmico (200°C, 300°C, 400°C y 500°C).

3.4.4 ANÁLISIS DE LA FORMA DE GOTA

En la Figura 24 se muestran las imágenes de las mediciones de ángulo de contacto para las películas delgadas de TiO₂. Se observa que, sin importar la temperatura del tratamiento térmico, todas las muestras exhiben un comportamiento hidrofílico,

sin embargo, las películas tratadas a 400°C presentaron un ángulo de contacto menor a 8°. Dada su propiedad fotocatalítica, tanto para las multicapas como para el ICV se elige la temperatura de tratamiento térmico de 400°C.

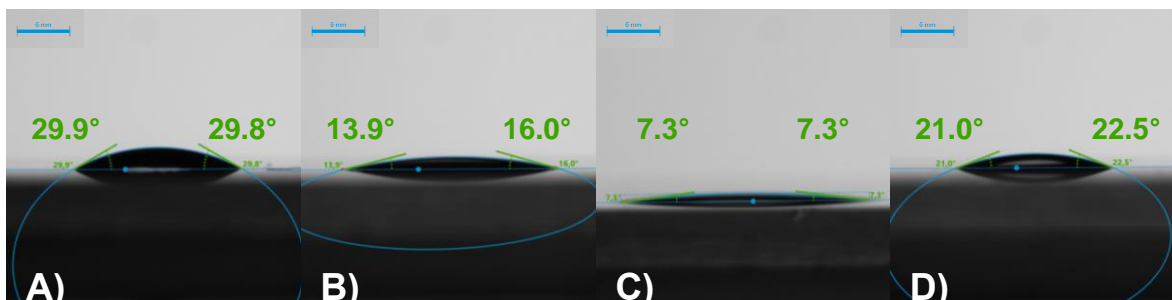


Figura 24. Mojabilidad (ángulo de contacto con el agua) de la superficie de las películas delgadas de TiO₂ depositadas variando la temperatura del tratamiento térmico (A) 200°C, B) 300°C, C) 400°C y D) 500°C).

3.5 VO₂

En esta sección se presenta la caracterización de las propiedades ópticas, estructurales y el ángulo de contacto de las películas delgadas de VO₂. Los resultados obtenidos definen las mejores condiciones para realizar las multicapas y el ACV.

3.5.1 DIFRACCIÓN DE RAYOS X

En la Figura 25 se observa el difractograma de rayos X de las películas de VO₂ depositadas variando el tiempo de envejecimiento de las soluciones precursoras. En donde, independientemente del tiempo de envejecimiento, las películas de VO₂ son amorfas.

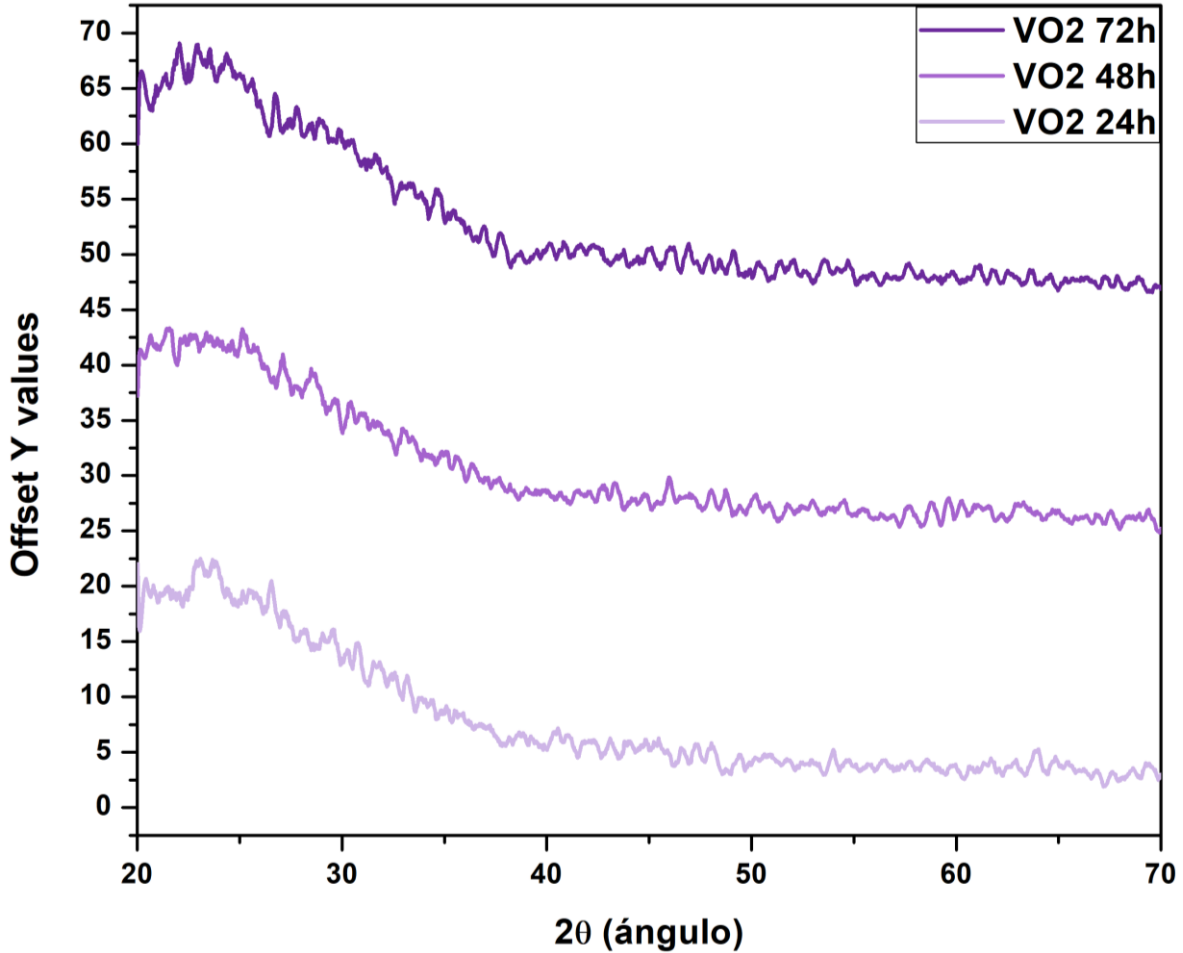


Figura 25. Difractograma de rayos X de las películas delgadas de VO₂ depositadas variando el tiempo de envejecimiento de la solución precursora (24h, 48h y 72h).

3.5.2 MICROSCOPIA DE FUERZA ATÓMICA

En la Figura 26 se observan los datos obtenidos del análisis de la morfología superficial de las películas delgadas de VO₂, depositadas variando el tiempo de envejecimiento de las soluciones precursoras. La superficie de las películas cuyos tiempos de envejecimiento son menores (24 y 48h) presentan una combinación de diferentes morfologías, ya que la superficie la mayoría de la superficie se ve homogénea sin ninguna morfología definida, mientras que en algunos lugares de la superficie se observan pequeños agregados de partículas redondas. En el caso de las películas depositadas después de 72 horas, se presenta un crecimiento de

partículas en forma de barras. Por otro lado, la rugosidad de la superficie de cada una de las películas se muestra en la Tabla 13. Las películas depositadas después de 24 y 48 horas de envejecimiento presentan valores de rugosidad de 6.3 y 0.8 μm , respectivamente. Mientras que la película depositada después de 72 horas tiene un valor de rugosidad de casi 26 μm . Estos valores están relacionados con la morfología en la superficie, ya que las películas VO₂ 24h y VO₂ 72h, que presentaron diferentes morfologías, el valor en la rugosidad es alto, comparadas con la película VO₂ 48h, la cual presentó una superficie más homogénea. Como ya ha sido observado en los otros sistemas de óxidos semiconductores, la rugosidad de la superficie es mayormente afectada por la morfología de las películas que por las condiciones de depósito.

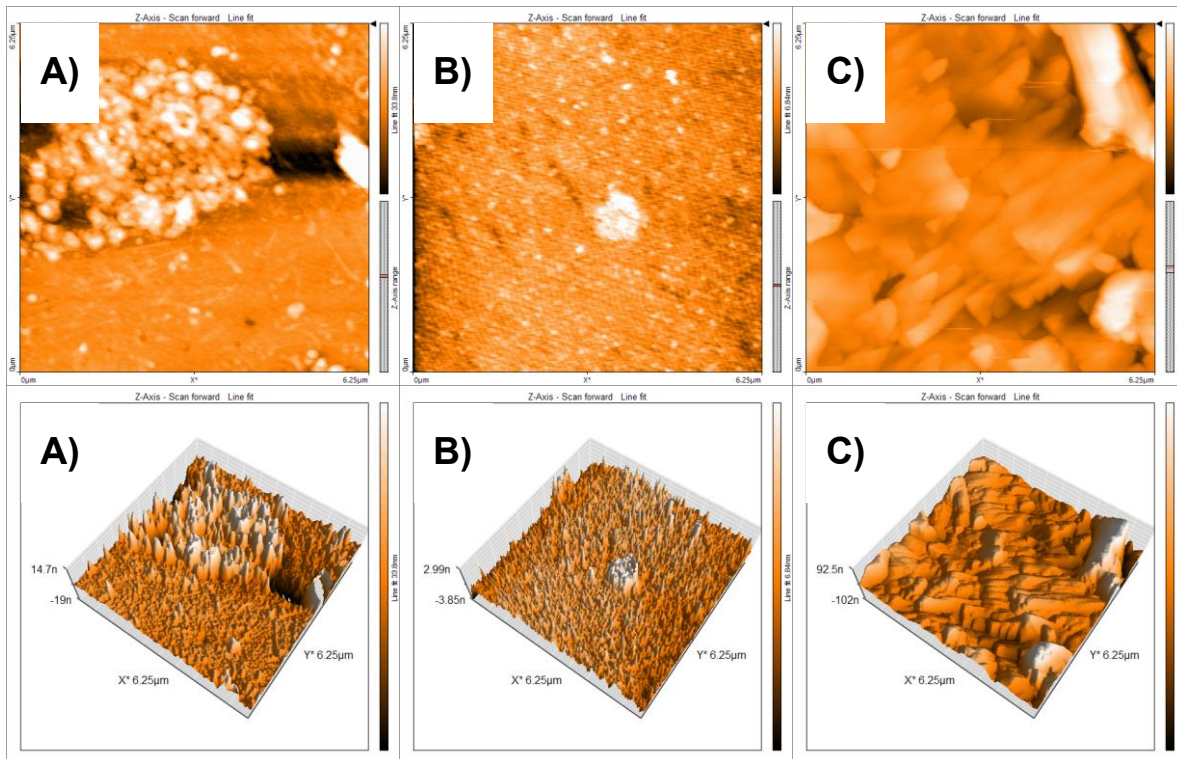


Figura 26. Morfología superficial caracterizada por MFA de las películas delgadas de VO₂ depositadas variando el tiempo de envejecimiento de la solución precursora (A) 24h, B) 48h y C) 72h). Área de 6.25 μm x6.25 μm .

Tabla 13. Valores de rugosidad de las películas delgadas de VO₂ depositadas variando el tiempo de envejecimiento de la solución precursora (24h, 48h y 72h). Área de 6.25µm x 6.25µm.

Muestra	Valores de rugosidad en nm para área de 6.25µm x 6.25µm
VO₂-24	6.359
VO₂-48	0.872
VO₂-72	25.846

3.5.3 ESPECTROSCOPIA UV-VIS

En la Figura 27 se muestra la gráfica de transmitancia de las películas de VO₂. Se aprecia que independientemente del tiempo de envejecimiento, todas las muestras analizadas presentan un porcentaje de transmitancia mayor al 90% en el espectro visible.

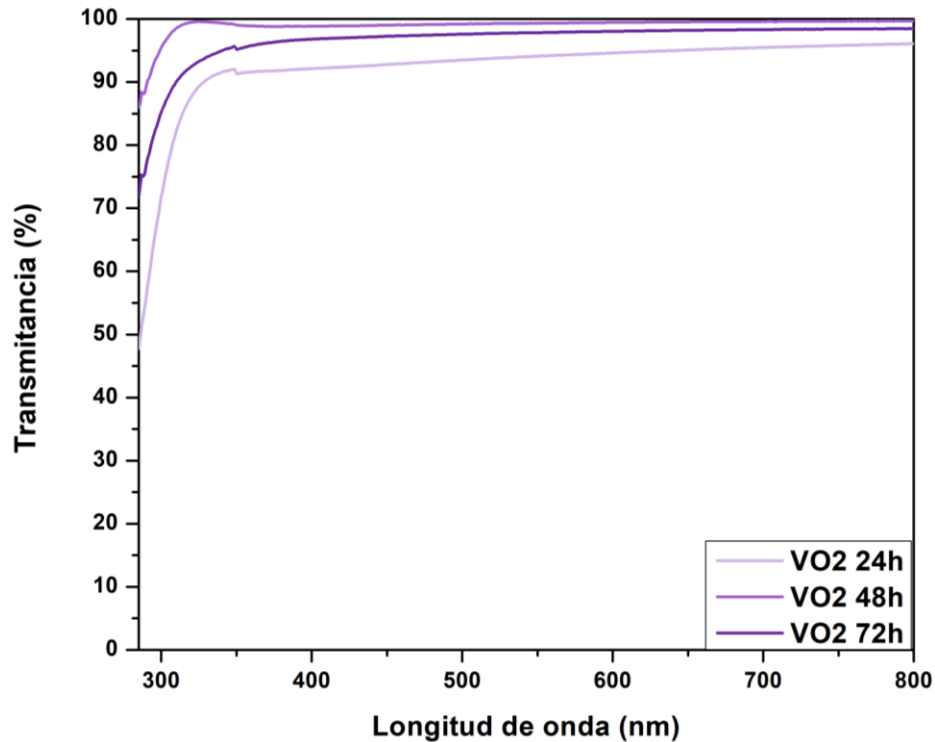


Figura 27. Porcentaje de transmitancia en UV-Vis de las películas delgadas de VO₂ depositadas variando el tiempo de envejecimiento de la solución precursora (24h, 48h y 72h).

3.5.4 ANÁLISIS DE LA FORMA DE GOTA

La Figura 28 muestra las mediciones del ángulo de contacto para las películas de VO₂. Se observa que, sin importar el tiempo de envejecimiento, la superficie de las películas exhibe un comportamiento hidrofílico. En donde para mayores tiempos de envejecimiento, se muestran mayores ángulos de contacto.

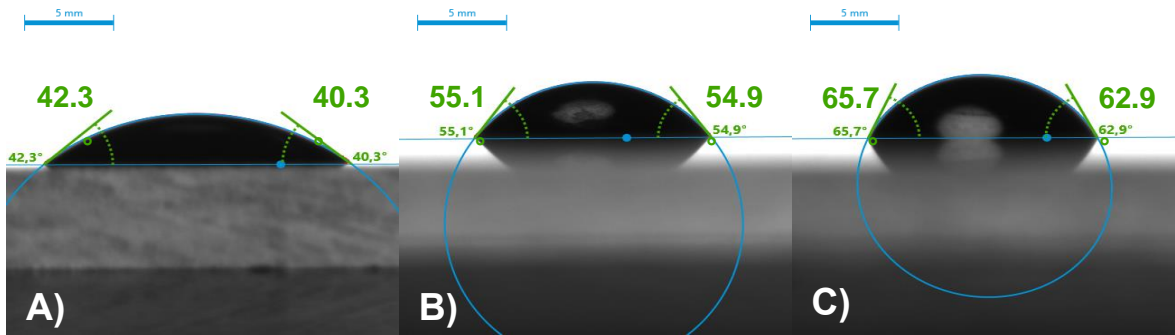


Figura 28. Mojabilidad (ángulo de contacto con el agua) de la superficie de las películas delgadas de VO₂ depositadas variando el tiempo de envejecimiento de la solución precursora (A) 24h, B) 48h y C) 72h).

3.6 Multicapas

Para formar las multicapas primero se depositó la película de SiO₂ (la cual fue tratada térmicamente, dados los resultados de la caracterización) con la finalidad de que la película del siguiente óxido semiconductor tuviera una adherencia al sustrato de vidrio. La segunda capa fue la película de VO₂ (cuyas condiciones de depósito elegidas según la caracterización de este material fueron un tiempo de envejecimiento de 72 horas y un tratamiento térmico de 400°C), dado que en caso de querer tener una ventana con propiedades termocrómicas únicamente es necesario elevar la temperatura. Subsecuentemente se depositaron las capas de TiO₂ (cuya temperatura de tratamiento térmico fue elegida a 400°C, dado que según la caracterización realizada esto favorecería en teoría su actividad fotocatalítica), las cuales muestran un comportamiento hidrofílico por sí solas, y de presentarse alguna irregularidad en la capa superior de ZnO, las propiedades fotocatalíticas del TiO₂ serán aprovechadas para la generación de radicales libres que degraden moléculas de smog en el aire. Finalmente, se depositó la capa superior de ZnO con una molaridad de 0.25M y tratado térmicamente a 400°C, dado que estas condiciones de depósito no solo propiciaron un comportamiento hidrofílico sino también tienen una gran transparencia, lo que es conveniente para su uso en ventanas.

3.6.1 DIFRACCIÓN DE RAYOS X

En la Figura 29 se presentan los difractogramas correspondientes a las multicapas depositadas por el método sol gel. Como se discutió en secciones anteriores, las películas de SiO_2 , VO_2 y TiO_2 muestran un crecimiento amorfo, siendo la única película cristalina la de ZnO .

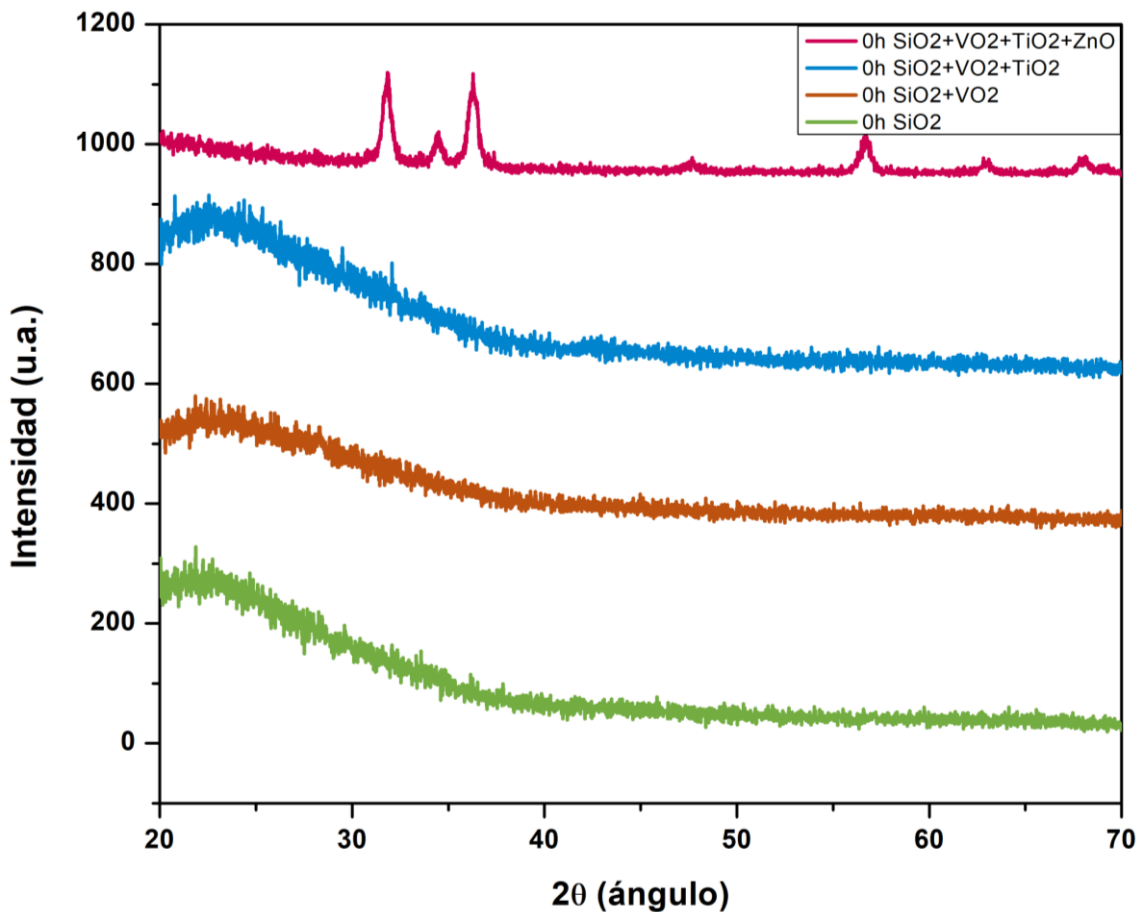


Figura 29. Difractograma de rayos X de las multicapas depositando un material encima del anterior (SiO_2 ; $\text{SiO}_2 + \text{VO}_2$; $\text{SiO}_2 + \text{VO}_2 + \text{TiO}_2$ y $\text{SiO}_2 + \text{VO}_2 + \text{TiO}_2 + \text{ZnO}$).

3.6.2 MICROSCOPIA DE FUERZA ATÓMICA

La morfología correspondiente a la superficie de las multicapas se presenta en la Figura 30. Las muestras no muestran una morfología definida, el material semiconductor depositado en la superficie. Se aprecia que conforme se van depositando más capas, aumentan los valores de rugosidad, llegando a un máximo

de 31.733nm para la multicapa de SiO₂ + VO₂ + TiO₂ + ZnO. Esto muy probablemente es ocasionado a que cada capa agrega profundidad y grosor al depósito. Los valores de rugosidad se muestran en la Tabla 14.

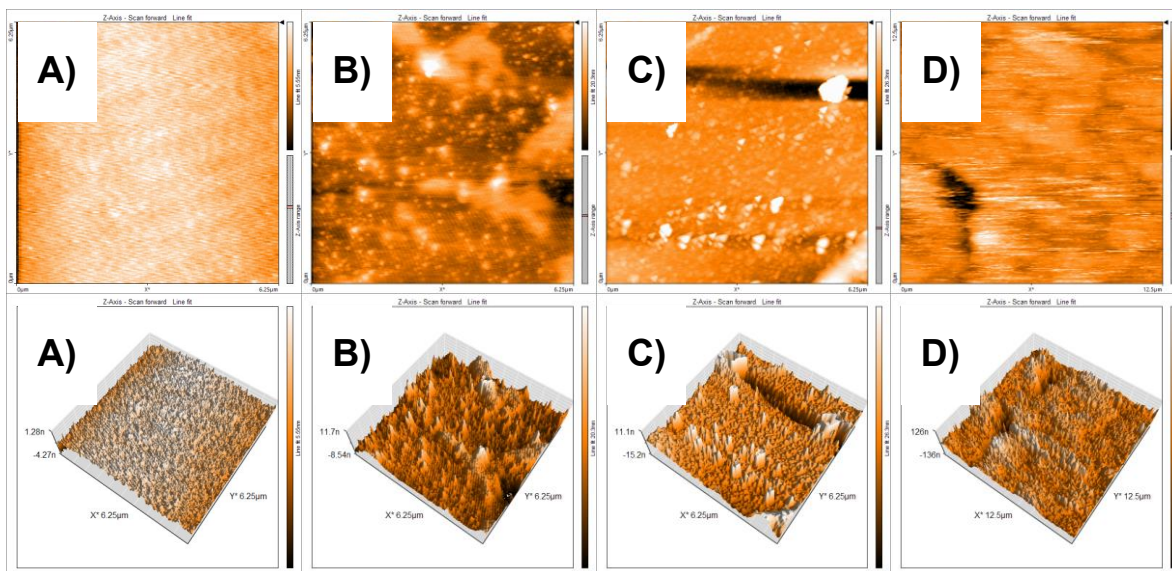


Figura 30. Morfología superficial caracterizada por MFA de las multicapas depositando un material encima del anterior (A) SiO₂; B) SiO₂ + VO₂; C) SiO₂ + VO₂ + TiO₂ y D) SiO₂ + VO₂ + TiO₂ + ZnO). Área de 6.25µm x 6.25µm.

Tabla 14. Valores de rugosidad de las multicapas depositando un material encima del anterior (SiO₂; SiO₂ + VO₂; SiO₂ + VO₂ + TiO₂ y SiO₂ + VO₂ + TiO₂ + ZnO). Área de 6.25µm x 6.25µm.

Muestra	Valores de rugosidad en nm para área de 6.25µm x 6.25µm
SiO ₂	0.694
SiO ₂ + VO ₂	2.842
SiO ₂ + VO ₂ + TiO ₂	6.614
SiO ₂ + VO ₂ + TiO ₂ + ZnO	31.733

3.6.3 ESPECTROSCOPIA UV-VIS

En la Figura 31 se muestra el porcentaje de transmitancia en UV-Vis de las multicapas. De los resultados observamos que las tres primeras capas sobre la superficie del vidrio mantienen una transmitancia mayor al 85%, sin embargo, al agregar la capa de ZnO, este valor decrece un 35%. Por lo que, si queremos utilizar estas multicapas en exteriores, el decrecimiento de la transmitancia no ayudara al paso eficiente de la luz y no se podrán activar las propiedades de los semiconductores colocados en las primeras capas.

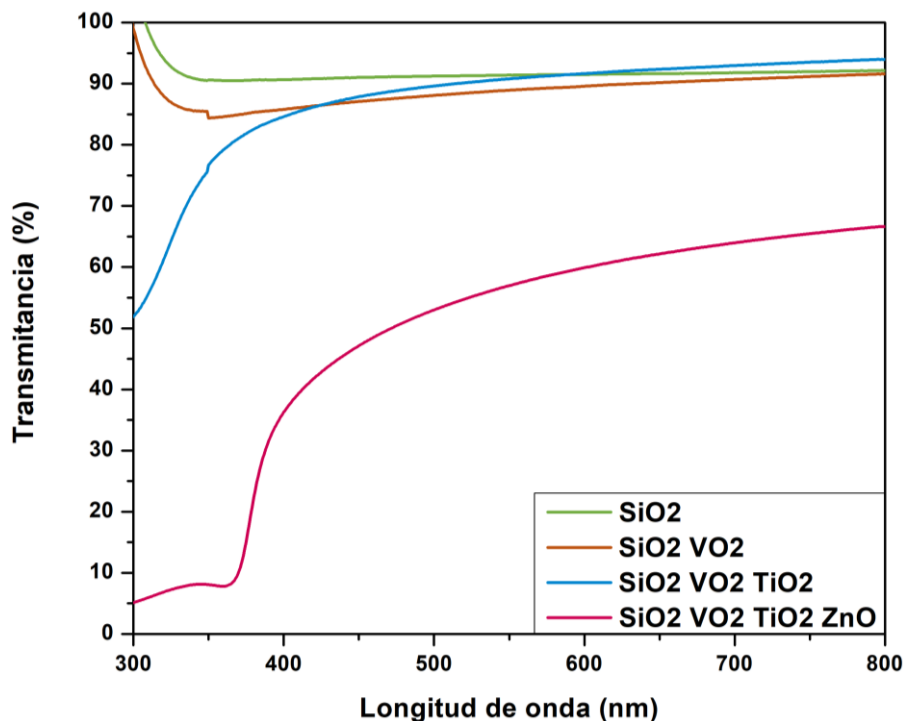


Figura 31. Porcentaje de transmitancia en UV-Vis de las multicapas depositando un material encima del anterior (SiO₂; SiO₂ + VO₂; SiO₂ + VO₂ + TiO₂ y SiO₂ + VO₂ + TiO₂ + ZnO).

3.6.4 ANÁLISIS DE LA FORMA DE GOTTA

En la Figura 32 se muestran las mediciones correspondientes a los diferentes ángulos de contacto de cada una de las multicapas. En donde se observa que cada capa de los diferentes materiales mantiene su comportamiento hidrofílico. Sin embargo, el ángulo de contacto de la capa de ZnO disminuye con respecto a los

ángulos que se habían encontrado para las películas de ZnO depositadas sobre vidrio. Esto puede deberse a que, a pesar de tener una estructura cristalina amorfa, el sustrato de vidrio y el TiO₂ presentan diferentes rugosidades en su superficie, lo que provoca que el crecimiento de la película de ZnO cambie.

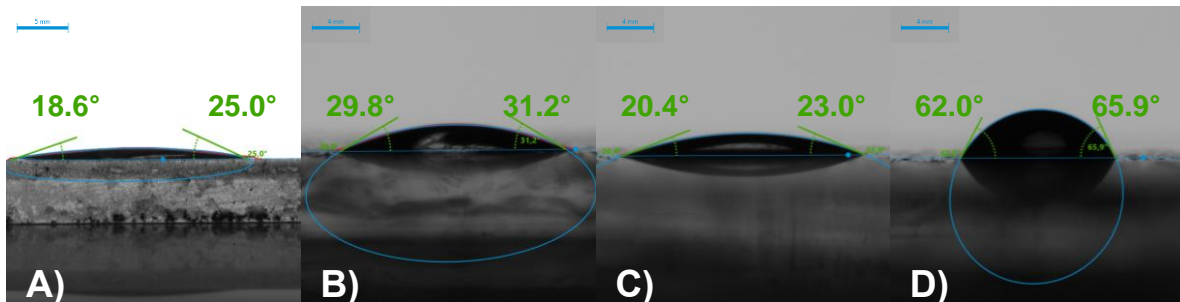


Figura 32. Mojabilidad (ángulo de contacto con el agua) de la superficie de las multicapas depositando un material encima del anterior (A) SiO₂; B) SiO₂ + VO₂; C) SiO₂ + VO₂ + TiO₂ y D) SiO₂ + VO₂ + TiO₂ + ZnO).

3.7 Intemperismo acelerado

La durabilidad y estabilidad de los materiales depositados fue estudiada mediante pruebas de intemperismo acelerado utilizando la metodología ASTM G155-13. Anteriormente, se han reportado vidas útiles para películas de VO₂ y TiO₂ de 20 [59] y 40 [61] años, respectivamente. Adicionalmente, en 2006, Parkin et. al. evaluaron la durabilidad de películas delgadas termocrómicas de dióxido de vanadio y estas no mostraron deteriorarse después de cientos de ciclos térmicos de envejecimiento acelerado [75]. La metodología ASTM G155-13 consiste someter a las películas delgadas a repetidos ciclos de radiación y temperatura, que asemejen las condiciones diurnas, seguidos de ciclos de alta humedad y oscuridad similares a las condiciones nocturnas. Las pruebas de intemperismo se realizaron durante 200 horas, lo cual corresponde a una duración de cerca de un año de exposición.

3.7.1 DIFRACCIÓN DE RAYOS X

En la Figura 33 se muestran los resultados de difracción de rayos X de las películas delgadas y sus multicapas antes y después de las 200 horas de intemperismo. De la figura se aprecia que en la mayoría de los casos no existe una diferencia

significativa. La única diferencia notable es que en el caso de la película delgada de ZnO, el plano preferencia cambió de (002) a (101), donde dicho plano está relacionado con la hidrofobicidad del ZnO. La ausencia de cambios significativos demuestra que, a pesar de haber estado sujetas a radiación y humedad por 200 horas, las películas delgadas mantienen sus propiedades, lo cual demuestra una larga vida útil para el ACV.

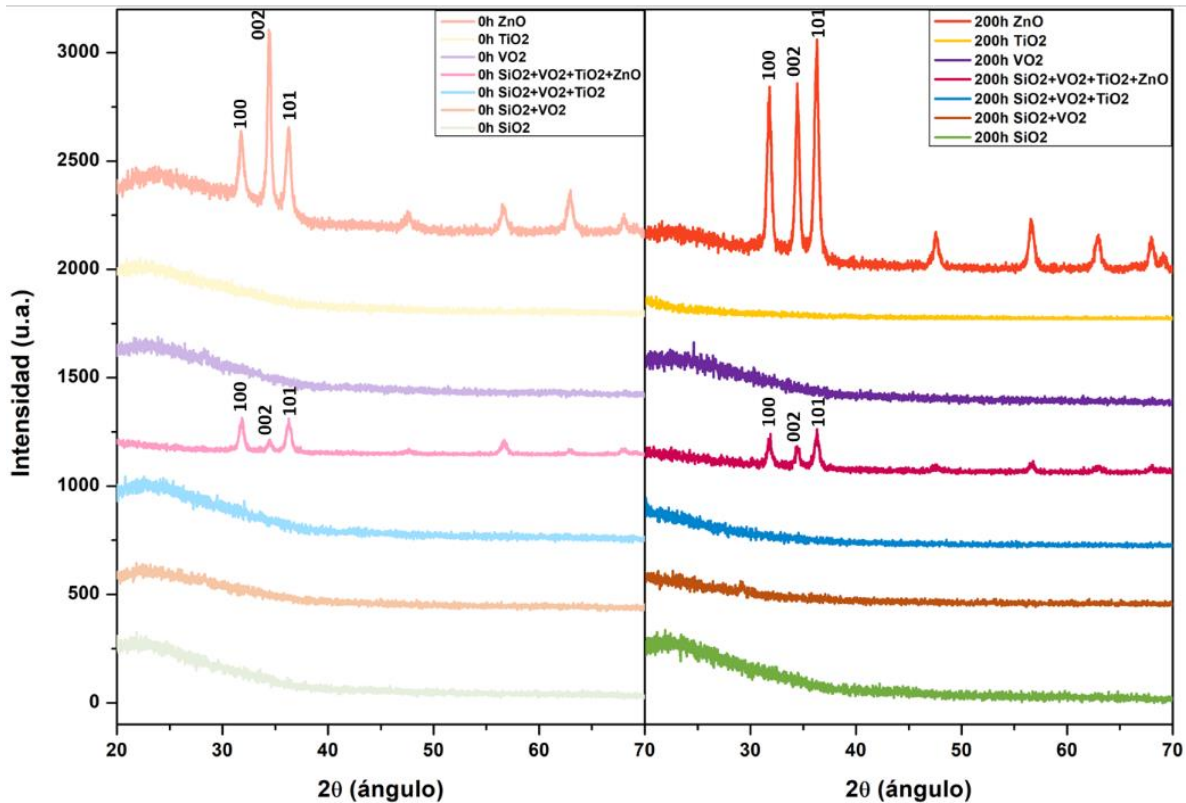


Figura 33. Difractograma de rayos X de las películas delgadas y sus multicapas antes y después de las pruebas de intemperismo.

3.7.2 MICROSCOPIA DE FUERZA ATÓMICA

En la Figura 34 se muestra la superficie de cada una de las muestras antes y después de la prueba de intemperismo. Se aprecian cambios en las rugosidades para todas las muestras, pero la morfología permanece más o menos igual. No se muestra una correlación entre el tiempo de intemperismo y la rugosidad, ya que esta sube o baja dependiendo del material. Tabla 15

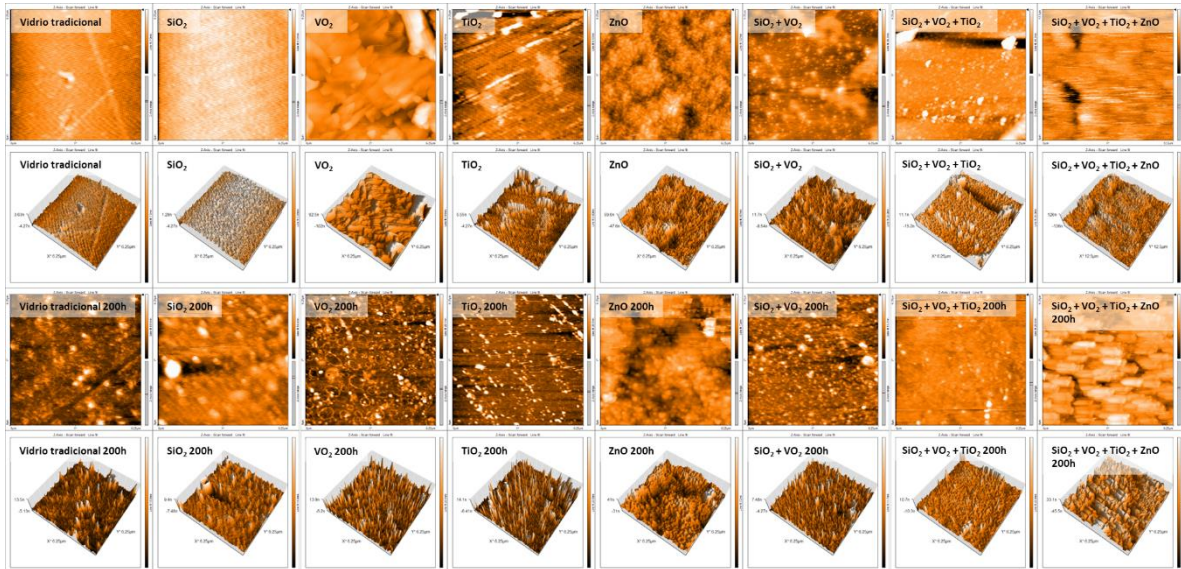


Figura 34. Difractograma de rayos X de las películas delgadas y sus multicapas antes y después de las pruebas de intemperismo. Área de 6.25µm x 6.25µm.

Tabla 15. Valores de rugosidad de las películas delgadas y sus multicapas antes y después de las pruebas de intemperismo. Área de 6.25µm x 6.25µm.

Intemperismo	Vidrio tradicional	SiO ₂	VO ₂	TiO ₂	ZnO	SiO ₂ + VO ₂	SiO ₂ + VO ₂ + TiO ₂	SiO ₂ + VO ₂ + TiO ₂ + ZnO
0h	0.933	0.694	25.856	2.753	6.754	2.842	6.614	31.733
200h	2.691	2.734	3.785	3.885	10.971	1.772	2.034	11.099

3.7.3 ESPECTROSCOPIA UV-VIS

En la Figura 35 se muestra el porcentaje de transmitancia en UV-Vis para las películas delgadas y sus multicapas antes y después de la prueba de intemperismo. Por lo general, el porcentaje de transmitancia después de la cámara de intemperismo no tiene cambios significativos, lo que demuestra que la transparencia

de las películas se mantiene después de las 200 horas de radiación y humedad en la cámara de intemperismo.

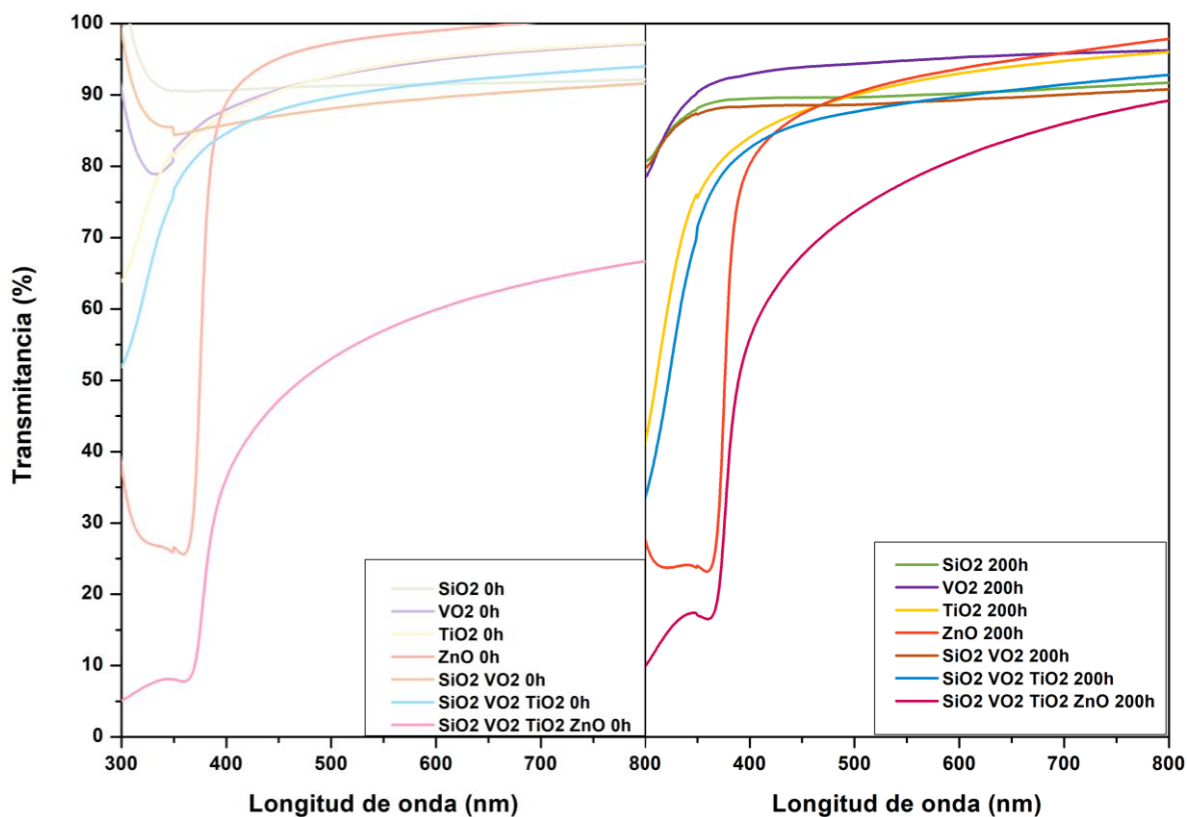


Figura 35. Porcentaje de transmittancia en UV-Vis de las películas delgadas y sus multicapas antes y después de las pruebas de intemperismo.

3.7.4 ANÁLISIS DE LA FORMA DE GOTA

En la Figura 36 y en la Figura 37 se muestra la influencia de las pruebas de intemperismo sobre el ángulo de contacto de las películas delgadas y sus multicapas. Después de las 200 horas de intemperismo, el vidrio tradicional (usado como control) mantuvo sus propiedades hidrofílicas, sin embargo, la mayoría de las películas y multicapas, excepto la película de SiO₂, mostraron comportamientos hidrofóbicos. Este comportamiento probablemente se deba a la adherencia de algún grupo funcional hidrofóbico, como las moléculas OH, sobre la superficie, los cuales influyen en el ángulo de contacto de las películas y sus multicapas. En el caso de la superficie de las películas de ZnO antes de los ciclos de intemperismo tuvieron un comportamiento hidrofóbico, pero después de las primeras 100h el ángulo de

contacto sobre la superficie disminuye, pero pasadas otras 100 horas el ángulo de contacto se incrementa.

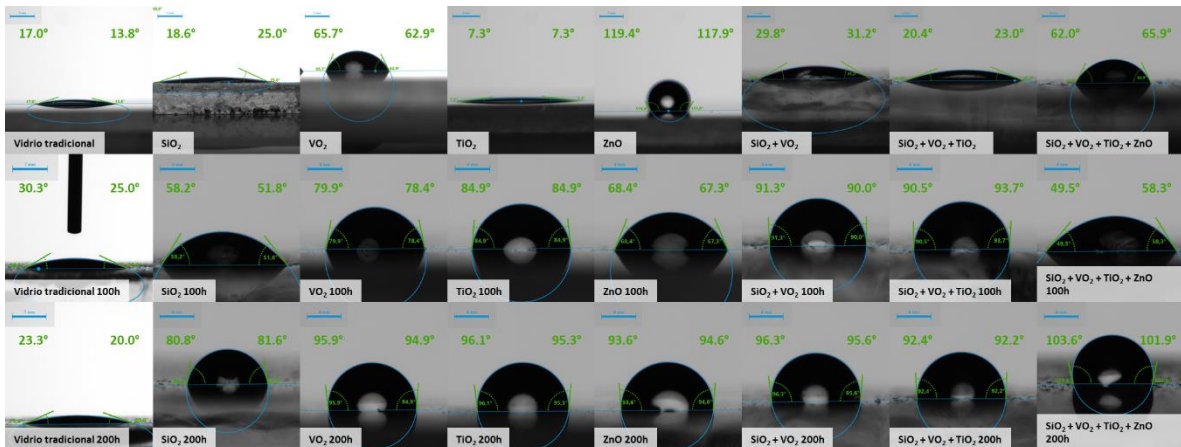


Figura 36. Mojabilidad (ángulo de contacto con el agua) de la superficie de las películas delgadas y sus multicapas antes y después de las pruebas de intemperismo.

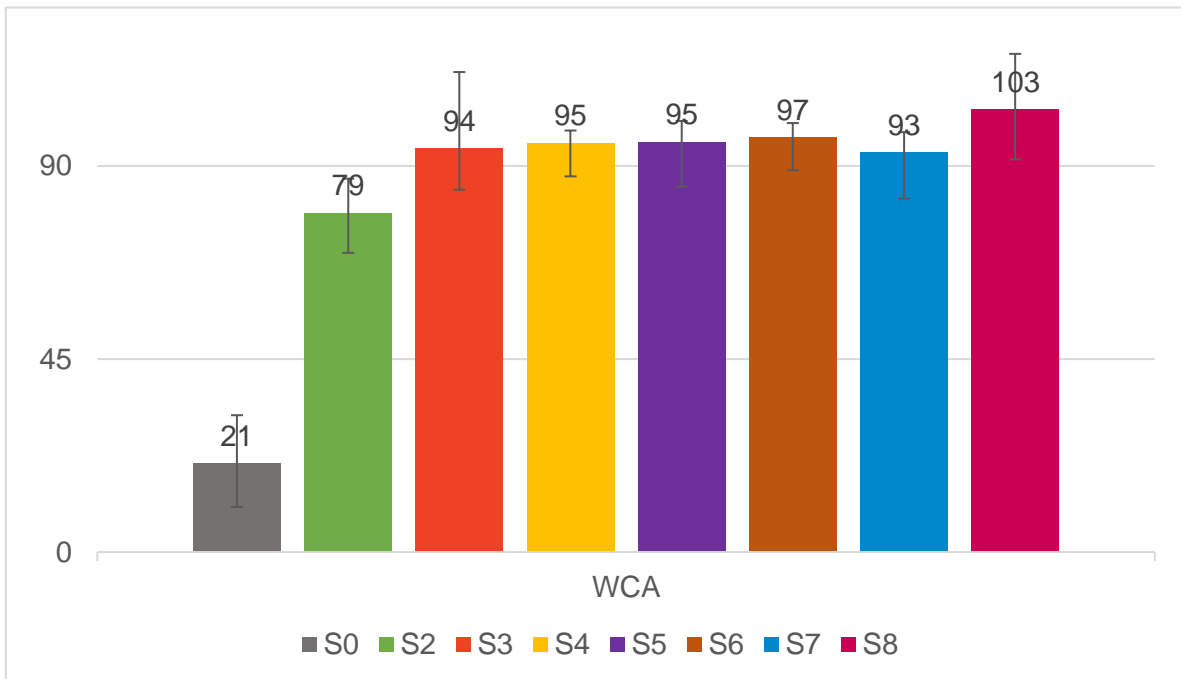


Figura 37. Influencia de las pruebas de intemperismo después de 0, 100 y 200 horas en la mojabilidad (ángulo de contacto con el agua) de la superficie de las películas delgadas y sus multicapas.

3.8 Resultados del capítulo: de la caracterización de materiales al Análisis de Ciclo de Vida

Esta sección denota los resultados más sobresalientes del capítulo anterior y su influencia en el Inventario de Ciclo de Vida (ICV). Esto incluye, pero no se limita a las condiciones de depósito que favorecieron a las propiedades hidrofóbicas, fotocatalíticas y termocrómicas de las películas delgadas y multicapas para su potencial aplicación en ventanas inteligentes.

3.8.1 PELÍCULAS DELGADAS

3.8.1.1 SiO_2

Las películas delgadas de SiO_2 que presentaron ángulos de contacto mayores a los del sustrato de vidrio tradicional fueron elegidas para alimentar el ICV. Sin embargo, estos ángulos no llegaron a superar los 90° después de las pruebas de intemperismo, lo que nos indica que estas películas van a mostrar ahorros hídricos bajos. En este sentido, para el ICV se seleccionaron las películas con tratamiento térmico a $400^\circ C$, dado que esta temperatura brindó una mejor transparencia y mayor densidad.

3.8.1.2 ZnO

En el caso de las películas de ZnO se concluye que las condiciones que favorecen más la vida útil de las películas, así como su hidrofobicidad son las películas depositadas con una molaridad de 0.25M y una temperatura de tratamiento térmico de $400^\circ C$, por lo que estas condiciones de depósito se introducirán en el ICV.

3.8.1.3 TiO_2

Las películas delgadas de TiO_2 que fueron elegidas para realizar el ICV fueron aquellas tratadas térmicamente a una temperatura de $400^\circ C$, ya que estas tuvieron mayores ángulos de contacto después de las pruebas de intemperismo. En este trabajo no se evaluó la capacidad fotocatalítica de este material experimentalmente debido a que ya han sido reportados rendimientos de degradación de contaminantes

atmosféricos como son los NO_x de hasta 0.3 mmol*(m²)⁻¹*día⁻¹ (no hay información en cuanto a películas delgadas, pero se recurrió al uso del rendimiento de pinturas fotocatalíticas) [76], [77]. Para el ICV se tomarán en cuenta estos rendimientos fotocatalíticos ya reportados para agregar la degradación de contaminantes en la etapa de uso de estas películas al aplicarse al modelo de ventana utilizado.

3.8.1.4 VO₂

Para las películas delgadas de VO₂, se eligieron las condiciones de depósito que favorecieron a su hidrofobicidad después de las pruebas de intemperismo y a su transparencia. Las condiciones de depósito elegidas para introducir en el ICV fueron las de las películas con un tiempo de envejecimiento de 72 horas y una temperatura de tratamiento térmico de 400°C. Mediante un estudio de la transmitancia de estas películas en UV-Vis-NIR (el cual se encuentra en el “**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**”) se confirmó que el cambio de temperatura disminuye el porcentaje de transmitancia tanto en el espectro infrarrojo como en el visible. Se ha reportado que, utilizando Tungsteno como dopante la temperatura a la cual se presentan las propiedades termocrómicas de las películas puede bajar hasta los 25°C [13], [21], [59], [78]–[81]. A pesar de no haber tomado en cuenta el dopaje en la caracterización de materiales, se tomará en cuenta el uso de Tungsteno en una relación molar de W/(W+V)=0.02 en la realización del ICV para poder contabilizar las propiedades termocrómicas de este material para las películas a partir de los 25°C en el modelo de requerimiento energético aplicado de las ventanas.

3.8.2 MULTICAPAS E INTEMPERISMO

Para la adición de los escenarios de las multicapas en el modelo de ACV, se tomará en cuenta que los insumos requeridos en cada etapa son la suma de las entradas y salidas requeridas para sus componentes. Dado que el ICV toma en cuenta el desempeño de las ventanas a lo largo de su vida útil, es imperativo para las películas delgadas y sus multicapas el tomar en cuenta los ángulos de contacto mostrados después de las pruebas de intemperismo.

CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

4.1 Definición del objetivo y alcance

4.1.1 OBJETIVO

Evaluar los impactos ambientales de 6 escenarios que representan a ventanas inteligentes con base en sustratos de vidrio depositados mediante Sol-Gel con películas delgadas de SiO_2 , ZnO , TiO_2 y VO_2 (y sus multicapas). Estos serán comparados con impactos ambientales de dos escenarios que representan a los vidrios sin recubrimiento, utilizados en ventanas tradicionales y a los de vidrios aislantes, con el objetivo de determinar los beneficios ambientales que estas películas delgadas podrían generar al ser utilizadas como ventanas inteligentes. El estudio se llevará a cabo mediante el enfoque de Análisis de Ciclo de Vida con base en las normas ISO 14040/14044 [49], tomando como referente la envolvente de Torre TOP en Monterrey, NL, México (Figura 38), cuyas características serán definidas más adelante.

4.1.2 FUNCIÓN

La función de una ventana es proveer iluminación natural y visibilidad al exterior, al mismo tiempo que se protege el interior de la edificación de las condiciones climáticas ordinarias (precipitación, viento, temperatura) y del ruido.

4.1.3 UNIDAD FUNCIONAL

Se define la Unidad Funcional de este estudio como la cantidad de vidrio necesaria para cubrir la envolvente de Torre TOP en su totalidad durante un período de estudio de 40 años ($50,000\text{m}^2$ [82]), tomando en cuenta los impactos positivos y negativos provenientes del uso de las películas delgadas y sus multicapas para de los escenarios de ventanas inteligentes propuestos.

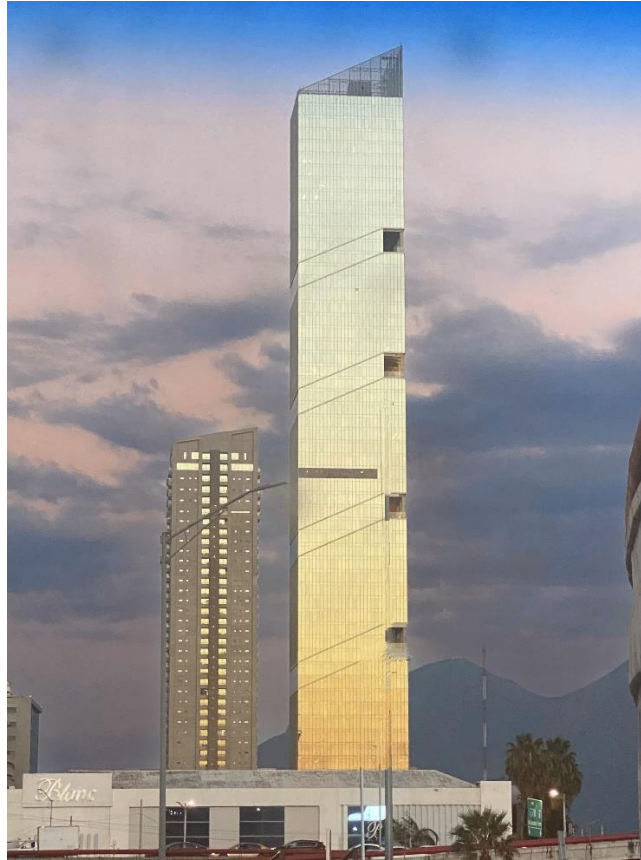


Figura 38. Fotografía del complejo Torres Obispado, donde se aprecia la torre TOP a la derecha. Elaboración propia.

4.2 Descripción y límite de los sistemas

En esta sección se describen los diferentes escenarios propuestos. Las etapas del ciclo de vida tomadas en cuenta para los escenarios constan de la fabricación, el transporte, el depósito de películas delgadas (si aplica), la instalación, el uso y mantenimiento y la disposición final o reciclaje de los materiales. Cabe resaltar que para todos los escenarios se ha considerado un periodo de estudio de 40 años. En la Tabla 16 se resumen las características y la nomenclatura que será utilizada para cada uno de los escenarios, mientras que en la Figura 39 se presenta el diagrama del ciclo de vida y límites del sistema.

Tabla 16. Designación de nomenclatura y características de los escenarios propuestos que representan a la ventana tradicional, la ventana aislante y

las ventanas inteligentes con base en las distintas películas delgadas y sus multicapas

Escenario	Descripción	Propiedades
E0: Ventana tradicional	Vidrio templado para ventana tradicional con un espesor de 10mm. Marco de aluminio de 1kg/m.	N/A
E1: Ventana aislante	Sistema de ventana de doble capa de vidrio templado de 10mm c/u, con una separación de aire de 10mm. Marco de aluminio de 3kg/m.	Ahorros energéticos en climatización.
E2: Ventana con SiO₂	Vidrio con un espesor de 10mm, película de SiO ₂ y templado mediante tratamiento térmico. Marco de aluminio de 1kg/m.	Ahorros hídricos medianos.
E3: Ventana con ZnO	Vidrio con un espesor de 10mm, película de ZnO y templado mediante tratamiento térmico. Marco de aluminio de 1kg/m.	Ahorros hídricos altos.
E4: Ventana con TiO₂	Vidrio con un espesor de 10mm, película de TiO ₂ y templado mediante tratamiento térmico. Marco de aluminio de 1kg/m.	Ahorros hídricos altos, degradación de contaminantes atmosféricos.
E5: Ventana con VO₂	Vidrio con un espesor de 10mm, película de VO ₂ y templado mediante tratamiento térmico. Marco de aluminio de 1kg/m.	Ahorros hídricos altos, ahorros energéticos en climatización.
E6: Ventana con SiO₂ y VO₂	Vidrio con un espesor de 10mm y multicapa de SiO ₂ y VO ₂ . Dos tratamientos térmicos. Marco de aluminio de 1kg/m.	Ahorros hídricos altos, ahorros energéticos en climatización.
E7: Ventana con SiO₂, VO₂ y TiO₂	Vidrio con un espesor de 10mm y multicapa de SiO ₂ , VO ₂ y TiO ₂ . Tres	Ahorros hídricos altos, ahorros energéticos en climatización,

	tratamientos térmicos. Marco de degradación de contaminantes aluminio de 1kg/m.	degradación de contaminantes atmosféricos.
E8: Ventana con SiO₂, VO₂, TiO₂ y ZnO	Vidrio con un espesor de 10mm y multicapa de SiO ₂ , VO ₂ , TiO ₂ y ZnO. Cuatro tratamientos térmicos. Marco de aluminio de 1kg/m.	Ahorros hídricos altos, ahorros energéticos en climatización, degradación de contaminantes atmosféricos.

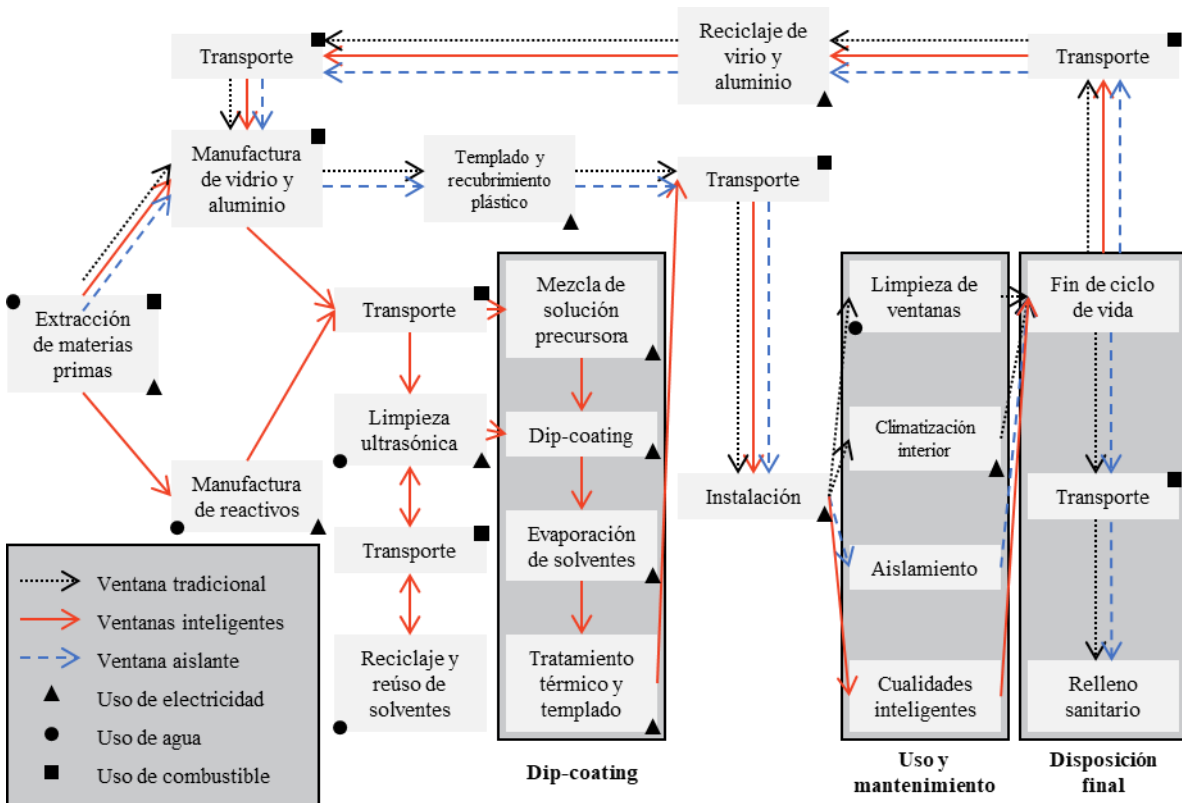


Figura 39. Diagrama que ilustra el flujo de materia a través del ciclo de vida de los escenarios propuestos.

4.2.1 DESCRIPCIÓN DE LOS ESCENARIOS PROPUESTOS

Como se mostró en la Tabla 16, tanto escenario base E0 como todos los escenarios de ventanas inteligentes E2-E8 requieren de una capa de vidrio con un espesor de 10mm. En el caso del E0, este vidrio se temple durante la etapa de fabricación, mientras que, para los escenarios correspondientes a las ventanas inteligentes, el vidrio se temple durante el tratamiento térmico dentro de la etapa de depósito de las

películas o multicapas. Estos escenarios requieren también de un marco de aluminio delgado, cuyo peso lineal es de alrededor de 1kg/m. Por otro lado, el escenario E1; el cual representa a la ventana aislante, requiere de dos vidrios con un espesor de 10mm cada uno, con una separación de aire de 10mm y de marco de aluminio grueso, con un peso lineal de aproximadamente 3kg/m.

Cabe destacar que para el escenario E1 se considera el valor de control solar (SHGC) de 0.23, ya que para la construcción de la torre TOP se utilizaron vidrios de la empresa Vitro correspondientes a la línea de vidrios *Solarban®* [82]. Sin embargo, este es el único valor utilizado en el ICV por parte de la empresa, pues las cantidades de vidrio, aluminio y demás insumos fueron calculados a partir de otras referencias. Los efectos de estas consideraciones se pueden apreciar en la sección “4.3.3 Termocromicidad y ahorros energéticos”. También hay que mencionar que, para todos los escenarios con recubrimientos de películas delgadas y multicapas, el uso de detergente para la limpieza no será considerado ya que puede dañar la superficie de los materiales depositados.

Adicionalmente a sus respectivas propiedades hidrofóbicas, a los escenarios E4, E7 y E8 se les atribuyen las entradas y salidas del proceso de degradación fotocatalítica de contaminantes (las cuales son mencionadas en la sección 4.3.2 Fotocatálisis y mejoras en la calidad del aire), utilizando el rendimiento fotocatalítico del TiO_2 conforme a lo reportado en la bibliografía [76].

Finalmente, a los escenarios E5, E6, E7 y E8 se les atribuyen las entradas y salidas durante la etapa de uso gracias a los ahorros energéticos a causa de las propiedades termocrómicas del VO_2 . Por lo que incorporamos el rendimiento termocrómico de este material al ICV con base en lo reportado en la bibliografía [13] y en el uso de un modelo de flujo de energía calorífica para edificaciones (4.3.3 Termocromicidad y ahorros energéticos).

4.2.2 METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE IMPACTO SELECCIONADA

Para evaluar los distintos escenarios de ventanas inteligentes basadas en películas delgadas y multicapas de los diferentes semiconductores, es necesario realizar una evaluación de impacto del ciclo de vida dividida en las distintas propiedades de las ventanas inteligentes. Esto es necesario para poder evaluar qué propiedad está beneficiando en qué categoría de impacto evaluada y en qué medida. De realizarse únicamente una corrida general, tomando en cuenta todas las propiedades simultáneamente, no se lograría apreciar qué disminuciones de impactos están asociadas a qué propiedad de las ventanas inteligentes. Por esta razón, tanto el inventario, como la evaluación de los impactos del ciclo de vida, como la interpretación de discusión de resultados del ACV se dividen en 4: primero, se muestra la evaluación simultánea de todas las propiedades y después de realizan corridas del modelo tomando en cuenta las entradas y salidas referentes a cada una de las propiedades por separado, de manera que se aprecien los beneficios y perjuicios causados por cada cualidad. Se realiza el análisis de resultados en tres niveles: primero se realiza una evaluación general para las tres propiedades y la combinación simultánea de estas, luego se realiza la interpretación con la discusión de resultados, tomando en cuenta las etapas de ciclo de vida de cada escenario y tomando en cuenta todas las categorías de impacto evaluadas. Por último, se realiza un análisis de sensibilidad en el cual se analizan los efectos que tiene el cambio del mix eléctrico, y la latitud en la que se encuentra el edificio, al cambiarlo de ubicación a las ciudades de Barcelona, Berlín, Ciudad de México, Monterrey y Zürich. Este análisis de sensibilidad se realiza tomando en cuenta únicamente las propiedades termocrómicas de las ventanas inteligentes y se analizan únicamente los escenarios E0, E1 y E5, los cuales representan a las ventanas tradicionales, a las ventanas aislantes y a las ventanas inteligentes termocrómicas, respectivamente.

Para la evaluación de impactos ambientales se utilizó el software Umberto LCA+, debido a su amigable interfaz de usuario y a la capacidad del usuario para definir

etapas del ciclo de vida y establecerle procesos a cada una. Además, se utilizó la base de datos Ecoinvent 3.6 [64] y la metodología ReCiPe 2008. Es importante destacar que, para la realización del análisis de ciclo de vida en este trabajo, se contó con el apoyo del servidor del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

Dentro de la metodología ReCiPe, se eligieron las categorías de impacto de punto medio (H) y punto final (H, A) mostradas en la Tabla 17. A continuación, se da una breve explicación de la importancia de cada una de las categorías de impacto seleccionadas:

A. Categorías de Impacto de punto medio:

- **Agotamiento de recursos hídricos (ReCiPe 2008 H):** Cuantificación del potencial de agotamiento de recursos hídricos debido a actividades humanas. Dado que la ubicación geográfica del área de estudio de este trabajo está dentro de la ZMM y esta presenta un alto estrés hídrico, esta categoría de impacto es de especial importancia en este estudio. La unidad de esta categoría es kilogramos de agua equivalentes.
- **Toxicidad humana (ReCiPe 2008 H):** Cuantificación del potencial de efectos tóxicos a la salud humana debido a la exposición a contaminantes. Su unidad es kilogramos de 1.4-diclorobenceno equivalentes.
- **Formación de materia particulada (ReCiPe 2008 H):** Cuantificación del potencial de formación de materia particulada, la cual afecta la calidad del aire y genera problemas respiratorios, sobre todo en zonas urbanas. Su unidad es kilogramos de PM10 equivalentes.
- **Ecotoxicidad en agua dulce (ReCiPe 2008 H):** Cuantificación del potencial de toxicidad a organismos acuáticos debido a la emisión de contaminantes a sistemas de agua dulce. Dado que el abastecimiento de agua para la ZMM proviene mayoritariamente de presas, esta categoría influye directamente a la calidad del agua dentro de estos cuerpos de agua. La unidad de esta categoría de impacto es kilogramos de fósforo equivalentes.
- **Agotamiento de metales (ReCiPe 2008 H):** Cuantificación del potencial de agotamiento de metales debido a la actividad humana. Dado que los marcos

para ventanas utilizados en México son usualmente de aluminio y en la ZMM existen grandes empresas de metalurgia, esta categoría de impacto representa a un problema local. Su unidad es kilogramos de hierro equivalentes.

- **Formación de oxidantes fotoquímicos (ReCiPe 2008 H):** Cuantificación del potencial de formación de oxidantes fotoquímicos, tal como o precursores del ozono, los cuales propician una mala calidad del aire y problemas respiratorios, sobre todo en zonas urbanas [83]. La unidad para esta categoría de impacto es kilogramos de compuestos orgánicos volátiles distintos del metano equivalentes.
- **Acidificación terrestre (ReCiPe 2008 H):** Cuantificación del potencial de acidificación del suelo y agua debido a la emisión de contaminantes acidificantes, o precursores de lluvia ácida. Su unidad es kilogramos de dióxido de sulfuro equivalentes.
- **Cambio climático (ReCiPe 2008 H):** Cuantificación del potencial de calentamiento global debido a la emisión de gases de efecto invernadero. Esta categoría de impacto es importante a nivel global, más que a nivel local. Su unidad es kilogramos de dióxido de carbono equivalentes.

B. Categorías de Impacto de punto final:

- **Calidad en ecosistemas (ReCiPe 2008 H, A):** Representación de la afectación total a la calidad en ecosistemas, cuantificando los potenciales impactos ambientales a biodiversidad, hábitat y otros parámetros. Dado que las categorías de punto final conllevan mucha incertidumbre, en este trabajo sólo se utilizan a modo de resumen, dado que incluye ponderación aditiva de las categorías de impacto evaluadas.
- **Salud humana (ReCiPe 2008 H, A):** Representación de la afectación total a la salud humana, cuantificando los potenciales impactos a problemas respiratorios, riesgo cancerígeno y otros parámetros. Dado que las categorías de punto final conllevan mucha incertidumbre, en este trabajo sólo se utilizan a modo de resumen, dado que incluye ponderación aditiva de las categorías de impacto evaluadas.

- **Recursos (ReCiPe 2008 H, A):** Representación de la afectación total a la disponibilidad de recursos, cuantificando los potenciales impactos ambientales al agotamiento o consumo de recursos naturales, energéticos o materiales y otros parámetros. Dado que las categorías de punto final conllevan mucha incertidumbre, en este trabajo sólo se utilizan a modo de resumen, dado que incluye ponderación aditiva de las categorías de impacto evaluadas.

Las categorías de impacto de punto medio representan a puntos intermedios en la cadena de causa y efecto entre la emisión de contaminantes y los impactos finales [84]. Estas categorías proveen de la información necesaria en cuanto a la magnitud de impactos ambientales y sus causas dentro de un sistema y así ayudar a identificar áreas de intervención o mejoramiento. Por otro lado, las categorías de impacto de punto final tienen como objetivo el expresar los impactos ambientales de una manera más comprensible para el público general, asignando un peso a cada categoría de impacto y las integra en tres grupos, realizando un reparto a las categorías de impacto a los ecosistemas, impacto a la salud humana e impacto a la disponibilidad de recursos [85]. Para hacer dicho reparto de las categorías de impacto de punto medio a las categorías de punto final, ReCiPe aplica factores de caracterización para asignar puntos como unidad normalizada. En la Figura 40 se muestran gráficamente las categorías de impacto seleccionadas y su relación.

Tabla 17. Categorías de impacto seleccionadas.

Categoría de impacto	Abreviación	Unidad	Factor de caracterización
Agotamiento de recursos hídricos	ARH	m ³ agua eq.	Potencial de agotamiento de recursos hídricos
Toxicidad humana	TH	kg 1.4-DB eq.	Potencial de toxicidad humana
Formación de materia particulada	FMP	kg PM10 eq.	Potencial de formación de material particulada

Ecotoxicidad en agua dulce	EAD	kg P eq.	Potencial de ecotoxicidad en agua dulce
Agotamiento de metales	AM	kg Fe eq.	Potencial de agotamiento de metales
Formación de oxidantes fotoquímicos	FOF	kg NMCOV eq.	Potencial de formación de oxidantes fotoquímicos
Acidificación terrestre	AT	kg SO ₂ eq.	Potencial de acidificación terrestre
Cambio climático	CC	kg CO ₂ eq.	Potencial de calentamiento global
Calidad en ecosistemas	CE	Puntos	Potencial de impacto total a la calidad en ecosistemas
Salud humana	SH	Puntos	Potencial de impacto total a la salud humana
Recursos	R	Puntos	Potencial de impacto total a la disponibilidad de recursos

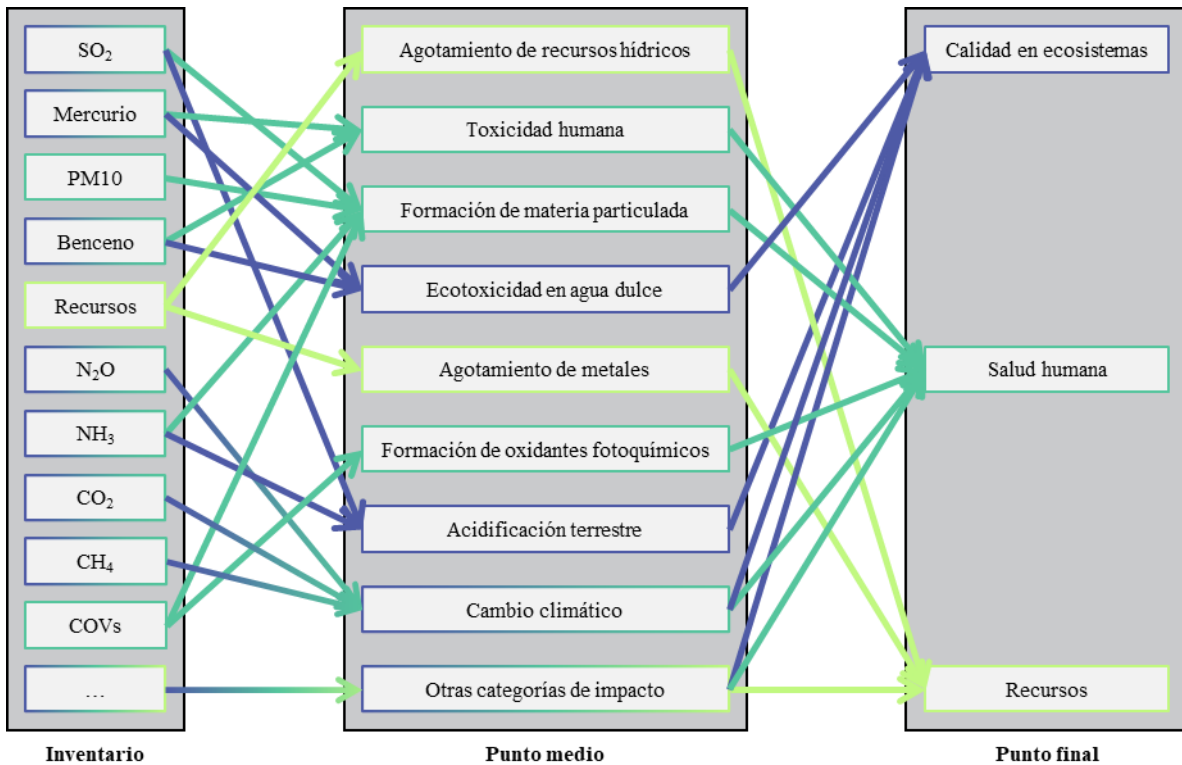


Figura 40. Lista de categorías de impacto de punto medio y punto final.

Adaptado de [85].

4.3 Análisis de Inventario

Los datos del Inventario de Ciclo de Vida (ICV) se recopilaron para las ventanas tradicionales, para el modelo de ventana aislante de doble acristalamiento y para los modelos de ventanas inteligentes de películas delgadas y sus multicapas. La recopilación de datos de ICV incluyó todos los procesos involucrados en las etapas de fabricación, transporte, depósito de las películas, instalación, uso y disposición final de los diferentes escenarios de ventanas. Los datos de ICV para las ventanas tradicionales y aislantes se obtuvieron de una combinación de bases de datos de la industria, datos de proveedores y revisión de la literatura; mientras que los datos de ICV para las ventanas inteligentes incluyeron fuentes experimentales, previamente presentadas en el Capítulo 3: Caracterización y resultados de los materiales.

Los datos de ICV para la fase de extracción y fabricación de materiales para las ventanas tradicionales y aislantes incluyeron el marco de aluminio, el vidrio y el

templado de vidrio. En el caso de las ventanas inteligentes, esta etapa no incluyó el templado del vidrio, pero se incluyen los datos relacionados a los diversos reactivos y solventes utilizados para el depósito de las películas delgadas.

Los datos de ICV para la fase de transporte para las ventanas tradicionales y aislantes incluyeron el transporte del marco de vidrio y aluminio al sitio de construcción. En el caso de las ventanas inteligentes, los datos para esta fase incluyeron el transporte del marco de aluminio desde el lugar de producción hasta el sitio de construcción, el transporte del vidrio desde el sitio de producción a una instalación hipotética de depósito de semiconductores y desde allí al sitio de construcción, y el transporte de los reactivos y solventes desde su sitio de producción hasta el sitio de preparación de la solución precursora y depósito de las películas. Las distancias entre estas ubicaciones, así como sus direcciones propuestas se aprecian en la Tabla 18.

Tabla 18. Matriz de transporte para ubicaciones propuestas.

Origen	Destino	Distancia (km)	Modo de transporte
Fábrica de vidrio ¹	Torre TOP ²	29.20	Camión
Fábrica aluminio ³	Torre TOP ²	9.80	Camión
Fábrica de vidrio ¹	Sitio de depósito ⁴	37.70	Camión
Sitio de depósito ⁴	Torre TOP ²	11.20	Camión
Producción solventes ⁵	Sitio de depósito ⁴	10.60	Camión
Producción reactivos Monterrey ⁶	– Sitio de depósito ⁴	24.50	Camión
Producción reactivos EE.UU. ⁷	– Sitio de depósito ⁴	2,518.62	Camión

¹ Carretera Km 10, Joaquín García, García, México.

² Constitución 2050, Obispado, Monterrey, N.L., México.

³ Av. Guerrero 121, Cuauhtémoc, Sin Nombre de Col 22, San Nicolás de los Garza, N.L., México.

⁴ Avenida Universidad s/n, Anáhuac, San Nicolás de los Garza, N.L., México.

⁵ Federico Gómez García No. 1932, Buenos Aires, Monterrey, Nuevo León, México.

⁶ Delta 1027, Parque Industrial Cd Mitras, Parque Industrial Cd Mitras, N.L., México.

⁷ 230 S Emmer Ln, Milwaukee, WI, Estados Unidos

Los datos de ICV para la etapa de depósito de las películas mediante *dip-coating* solo son aplicables para los escenarios de ventanas inteligentes e incluyen las demandas de energía del equipo con capacidad industrial (escalados a partir de datos de laboratorio y conforme lo reportado en la bibliografía [59]) para los baños de limpieza de vidrio ultrasónicos, la preparación y agitado de la solución precursora, la inmersión del vidrio, el precalentamiento y los procesos de tratamiento térmico, descritos anteriormente.

Los datos de ICV para la fase de instalación incluyeron en todos los casos la demanda de energía eléctrica de una grúa torre para levantar e instalar el peso respectivo de las ventanas para cada escenario, incluyendo el marco de aluminio.

Mientras que, los datos de ICV para la fase de uso fueron los más significativos para este estudio. Ya que, en el caso de la ventana tradicional, se incluyeron la demanda de agua, detergente y energía para limpiar las ventanas de vidrio en el exterior 4 veces al año durante 40 años, así como la demanda de energía para climatización calculada a través de la norma suiza para modelación de flujos de energía en edificios (SIA 380/1 [86]). En el caso de la ventana aislante, se incluyeron las mismas demandas de agua, detergente y energía para el lavado que la ventana tradicional, pero el coeficiente de ganancia de calor solar (SHGC) se redujo a 0.23 como reporta Vitro [82]. En contraste, en el caso de los escenarios de ventanas inteligentes basadas en película delgada de semiconductores, a cada material se le asignaron sus propiedades específicas, que se explican con más detalle en la sección “4.3.3.4 Modelación de flujos de energía en edificios”.

Los datos de ICV para la fase de fin de ciclo de vida para todos los escenarios incluyeron el transporte del aluminio y el vidrio a sus respectivos sitios de tratamiento. En el caso particular de las ventanas tradicionales y aislantes, el vidrio debe someterse a un proceso de incineración, mientras que, para las ventanas inteligentes, el vidrio pasa directamente al proceso de reciclaje. Por otra parte, en el caso de los escenarios de película delgada, esta etapa también incluyó el transporte y reciclaje de los solventes utilizados para los baños ultrasónicos requeridos en la limpieza del vidrio antes del procedimiento de depósito.

Todos los datos se recopilaron con base en la unidad funcional de 50.000m² de vidrio considerando un período de estudio de 40 años y fueron asignados a las distintas etapas del ciclo de vida. Los datos se procesaron utilizando el software Umberto LCA+ para calcular los impactos ambientales de todos los escenarios.

Dado que, los materiales caracterizados en esta tesis presentan propiedades hidrofóbicas, fotocatalíticas y termocrómicas; estas conllevan ahorros hídricos, mejoras en la calidad del aire y ahorros energéticos, respectivamente. Debido a esto, esta sección se dividirá en tres partes en las cuales se presenta la recopilación de datos para el ICV para cada una de las propiedades mencionadas. Las propiedades que se le asignan a cada escenario se muestran a manera de resumen en la Tabla 19.

Tabla 19. Asignación de propiedades especiales por escenario

	Propiedades		
	Ahorros hídricos	Mejora en la calidad del aire	Ahorros energéticos
E0: Ventana tradicional			
E1: Ventana aislante			✓
E2: Ventana con SiO₂	✓		
E3: Ventana con ZnO	✓		

E4: Ventana con TiO₂	✓	✓	
E5: Ventana con VO₂	✓		✓
E6: Ventana con SiO₂ y VO₂	✓		✓
E7: Ventana con SiO₂, VO₂ y TiO₂	✓	✓	✓
E8: Ventana con SiO₂, VO₂, TiO₂ y ZnO	✓	✓	✓

4.3.1 HIDROFOBICIDAD Y AHORROS HÍDRICOS

Dada la caracterización de las propiedades hidrofóbicas del vidrio tradicional y de las películas delgadas y multicapas de semiconductores llevada a cabo en la sección “3.7.4 Análisis de la forma de gota”, la asignación de gastos hídricos se describe en la Tabla 20.

Tabla 20. Asignación de ahorros hídricos por escenario

	Ahorros hídricos		
	Sin ahorros	Medianos	Ideales
E0: Ventana tradicional	✓		
E1: Ventana aislante	✓		
E2: Ventana con SiO₂		✓	
E3: Ventana con ZnO			✓
E4: Ventana con TiO₂			✓
E5: Ventana con VO₂			✓
E6: Ventana con SiO₂ y VO₂			✓
E7: Ventana con SiO₂, VO₂ y TiO₂			✓

4.3.1.1 Sin ahorros hídricos

Para el escenario base, el cual no genera ahorros hídricos en la etapa de uso y mantenimiento de las ventanas, se tomaron en cuenta el 100% de los gastos hídricos conforme a lo consultado en la literatura sobre limpieza de rascacielos. Se estima que para la limpieza y mantenimiento en exteriores y por piso se gastan anualmente alrededor de 12m³ de agua con una concentración del 1% de detergente. Lo que quiere decir que a lo largo de toda la UF (para todos los pisos de la Torre TOP por 40 años) se gastan alrededor de 32,000m³ de agua y 320 toneladas de detergente.

4.3.1.2 Ahorros hídricos medianos

En el caso del escenario 2, el cual corresponde a las ventanas con una película delgada de SiO₂, los resultados de hidrofobicidad encontrados mediante la caracterización del material en la sección “3.7.4 Análisis de la forma de gota” mostraron que este material a pesar de tener un ángulo de contacto mayor, después de las pruebas de intemperismo, este no llega a ser hidrofóbico, por lo cual no se le pueden asignar los mismos ahorros hídricos que a las películas hidrofóbicas. Por esta razón se asume que este escenario sólo llega a producir un ahorro del 50% en el uso de agua para limpieza y mantenimiento de la fachada de torre TOP, es decir, 16,000m³ de agua. No obstante, por tener un depósito encima, basta con limpiar este vidrio con agua simple, dado que el uso de cualquier detergente o sustancia abrasiva podría llegar a dañar a la película delgada.

4.3.1.3 Ahorros hídricos ideales

Tomando en cuenta los resultados obtenidos de la caracterización de las propiedades hidrofóbicas de las películas y sus multicapas llevadas a cabo en la sección “3.7.4 Análisis de la forma de gota”, los escenarios E3, E4, E5, E6, E7 y E8 presentan ángulos de contacto hidrofóbicos (por encima de 90°) a lo largo que su

vida útil. Ya que se demostró un aumento en el ángulo de contacto después de las 200 horas de ciclos en la cámara de intemperismo, y tomando en cuenta las durabilidades reportadas para las películas delgadas en la bibliografía [59], [61], [75], se opta por tomar en cuenta una curva de rendimiento, la cual se aprecia en la Figura 41 y está descrita por las ecuaciones (5) y (6). Esta curva de rendimiento describe que la durabilidad de las películas permitirá que sus propiedades fotocatalíticas, termocrómicas e hidrofóbicas se mantengan constantes durante los primeros 20 años del período de estudio. Ya que es de suponer que en la segunda mitad del período de estudio se presentará una disminución paulatina del rendimiento de las películas hasta llegar a ser nulo una vez que hayan pasado los 40 años. La incorporación de esta gráfica permite a los escenarios propuestos ser más apegados a la realidad, en donde sólo el área por debajo de la curva indica los ahorros hídricos generados. Para estos escenarios se baja la demanda hídrica de la etapa de uso y mantenimiento de exteriores al 25%, es decir, 8,000m³ de agua durante la UF. Como se mencionó anteriormente, al igual que el E2, estos escenarios tampoco requieren del uso de detergente en esta etapa.

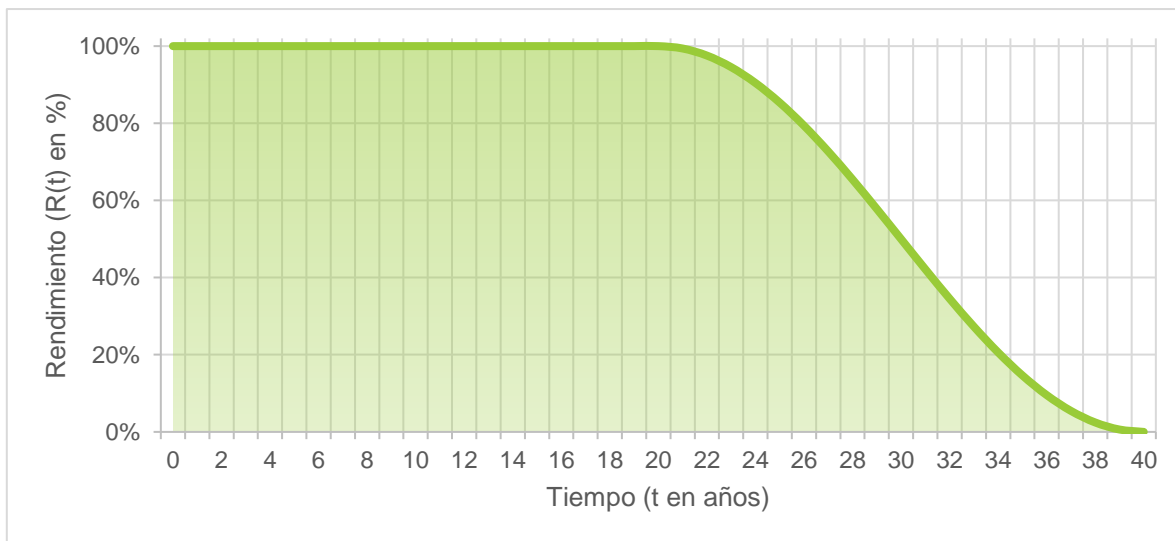


Figura 41. Gráfica rendimiento-tiempo para describir la degradación de las propiedades de las películas delgadas a través del tiempo.

Donde:

(5)

Para $0 < t < 20$: $R(t) = 1$

$$\text{Para } 20 < t < 40: R(t) = \frac{1 - \cos\left(\frac{\pi t}{20}\right)}{2} \quad (6)$$

4.3.2 FOTOCATÁLISIS Y MEJORAS EN LA CALIDAD DEL AIRE

A pesar de que se ha reportado que el SiO₂, el VO₂ y el ZnO presentan comportamientos fotocatalíticos de degradación de contaminantes (y producción de combustibles limpios) [87]–[91], sólo se toma en cuenta esta propiedad para el caso del TiO₂ (Escenarios E4, E7 y E8), debido a que es el fotocatalizador más utilizado y reportado en exteriores. Se ha reportado que un valor representativo para la capacidad fotocatalítica del TiO₂ en pinturas, recubrimientos en paredes y pavimentos es de 0.3mmol en 48 horas por metro cuadrado para el caso de NO_x [76]. Sin embargo, no existen reportes para la capacidad de degradación fotocatalítica de otro tipo de contaminantes por área unitaria de recubrimiento de TiO₂, por lo que se asume que este rendimiento es aplicable también a los SO_x y COVs en películas delgadas de TiO₂ depositadas en vidrios de ventana. Como se puede observar en la Figura 42, el mecanismo fotocatalítico de degradación de contaminantes atmosféricos genera agua y CO₂ (entre otros productos, los cuales se omiten para esta cuantificación), por lo que estos se añadieron en la etapa de uso de las películas como salidas.

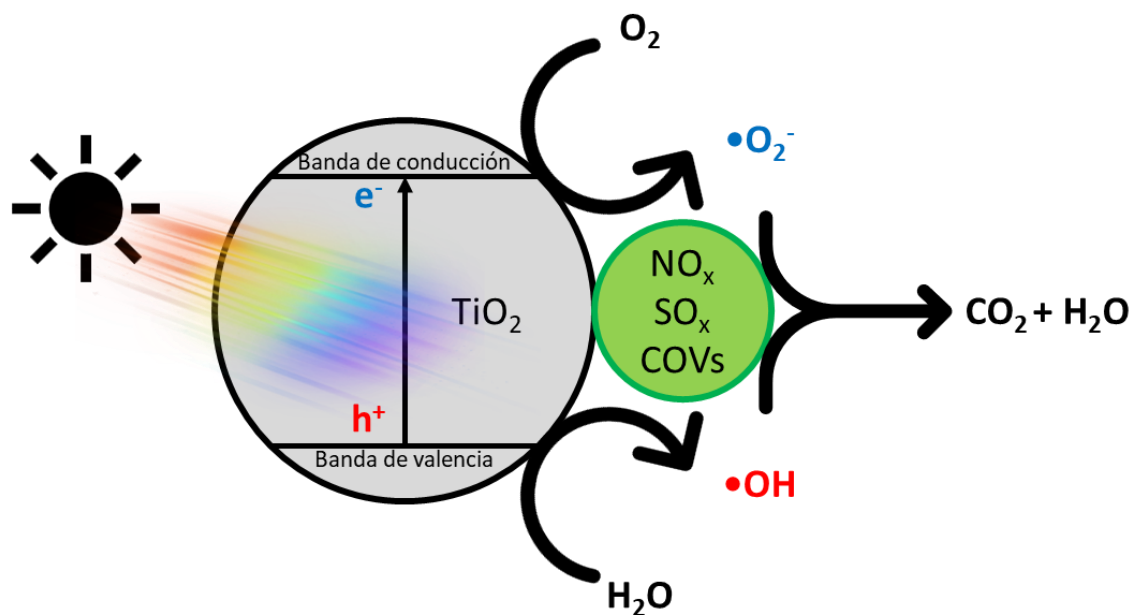


Figura 42. Mecanismo de degradación fotocatalítica. Adaptado de [92].

Las entradas y salidas para los escenarios cuyas películas delgadas o multicapas que contienen TiO₂ se muestran en la Tabla 21. Para el cálculo de estos datos se consideró el período de estudio de 40 años, afectado por la curva de rendimiento mostrada previamente en la Figura 41.

Tabla 21. Inventario de entradas y salidas para el proceso fotocatalítico de las películas delgadas y multicapas de TiO₂.

Entradas			Salidas		
Concepto	Unidad	Cantidad	Concepto	Unidad	Cantidad
NO _x	kg	8,327.70	H ₂ O	m ³	11.18
SO _x	kg	5,040.45	CO ₂	kg	11,183.88
COVs	kg	7,020.03			

4.3.3 TERMOCROMICIDAD Y AHORROS ENERGÉTICOS

En esta sección se cuantificó el flujo de energía anual dentro de un piso de la torre TOP y fue multiplicado por los 63 pisos durante los 40 años de duración del período

de estudio para incorporarse al ICV. Para esto, se evaluaron tres casos distintos de ahorros energéticos debido a la disminución del uso de climatización para calentar o enfriar las oficinas de la Torre TOP dependiendo del escenario utilizado para su uso en las ventanas, los cuales se asignan conforme a la Tabla 22, En donde “sin ahorros” representa al comportamiento térmico del escenario base, “ahorros medianos” representa al comportamiento termocrómico del VO₂ y “ahorros altos” representa al comportamiento térmico del vidrio aislante.

Tabla 22. Asignación de ahorros energéticos por escenario

	Ahorros energéticos		
	Sin ahorros	Medianos	Altos
E0: Ventana tradicional	✓		
E1: Ventana aislante			✓
E2: Ventana con SiO₂	✓		
E3: Ventana con ZnO	✓		
E4: Ventana con TiO₂	✓		
E5: Ventana con VO₂		✓	
E6: Ventana con SiO₂ y VO₂		✓	
E7: Ventana con SiO₂, VO₂ y TiO₂		✓	
E8: Ventana con SiO₂, VO₂, TiO₂ y ZnO		✓	

4.3.3.1 Sin ahorros energéticos

Este caso se refiere a los escenarios E0, E2, E3 y E4, en donde se tomaron los valores reportados para el coeficiente de transparencia del vidrio tradicional con 10mm de grosor (0.585 según cálculos tomando en cuenta lo reportado por [93]) y

el valor U (transmitancia calorífica del vidrio) para el vidrio tradicional en un valor de 5.6 [94]

4.3.3.2 Ahorros energéticos medianos

Este caso se refiere a los escenarios de ventanas inteligentes compuestos de VO₂ (escenarios E5-E8), y en esta sección se consideran las propiedades ópticas que se observaron para las películas delgadas de VO₂, tal como se aprecia en el “**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**”. Adicionalmente, se recurrió a la revisión bibliográfica para la cuantificación de la cantidad de Tungsteno utilizada para el dopaje de la solución precursora [13], la cual se estima en una relación molar definida por la Ecuación (7).

$$\frac{W}{W + V} = 0.02 \quad (7)$$

Donde:

W: moles de Tungsteno

V: moles de Vanadio

Dado el cambio de transmitancia reportado sobre el vanadio, se tomó el coeficiente de transparencia del vidrio tradicional con 10mm de grosor (0.585 según cálculos tomando en cuenta lo reportado por [93]) y se le aplicó la disminución en transmitancia reportada por diferentes autores [13], [41], [59], [75], [78], [80], [95] para obtener el coeficiente de transparencia del vidrio con depósito de VO₂ en fase caliente, el cual es de 0.468. Este coeficiente se consideró en la modelación de flujos de energía en edificios cuando la temperatura exterior fue mayor a 25°C. Por otro lado, el valor U (transmitancia calorífica del vidrio) se mantuvo conforme a lo reportado para el vidrio tradicional en un valor de 5.6 [94]. Estos valores se aplican para los escenarios E5, E6, E7 y E8 por contar con una película de VO₂.

4.3.3.3 Ahorros energéticos altos

Este caso corresponde solamente al escenario E1, el cual representa al uso de vidrio aislante de dos capas de vidrio de 10mm c/u con un espacio de aire de 10mm entre ambos. En donde se consideró el valor de control solar SHGC de 0.23 [82] (es

decir, un coeficiente de transparencia de 0.37) y el valor U correspondiente a lo reportado para el vidrio de 5.6 [94]. Debido a que estos valores provienen de distintas referencias, es posible que exista una ligera discrepancia con las especificaciones exactas del producto utilizado en la realidad para la Torre TOP.

4.3.3.4 Modelación de flujos de energía en edificios

La modelación de flujos de energía en edificios utilizada para la cuantificación de los requerimientos energéticos para la climatización de los espacios de la torre TOP fue realizada tomando como referencia la metodología establecida en la norma suiza SIA 380/1 [86], considerando los datos utilizados para los tres casos de ahorros energéticos mencionados anteriormente. Cabe resaltar que la cuantificación mostrada en esta sección se realizó para un piso de la torre TOP durante el período de un año, por lo que al final se debe de ser multiplicada por los 40 años y los 63 pisos, representando a la UF antes de incorporarse al ICV. Dado que la metodología está diseñada para usarse en climas fríos en donde únicamente es necesario calcular la demanda energética de calefacción, esta fue adaptada para aceptar valores negativos que representen también a la demanda energética para refrigeración. Para esta cuantificación es necesario realizar una modelación dinámica por hora, ya que la radiación solar y la temperatura exterior son altamente variables. Por esta razón se recurrió al uso de la herramienta de simulación horaria “*Renewables.ninja*” para la obtención de datos de radiación solar [96]–[98].

La metodología tiene sustento en la Ecuación (8), la cual define un balance entre la demanda energética y las fuentes y pérdidas térmicas que ocurren en el piso.

$$Q_{H,C} = Q_T + Q_V - \eta_g \times (Q_S + Q_I) \quad (8)$$

En donde:

$Q_{H,C}$: Demanda energética de calefacción o refrigeración.

Q_T : Pérdidas o ganancias térmicas debido a la transmitancia de las paredes y ventanas.

Q_V : Pérdidas o ganancias térmicas debido a la ventilación.

η_g : Coeficiente de eficiencia.

Q_S : Ganancias térmicas debido a la energía solar que entra por las ventanas.

Q_I : Ganancias térmicas debido a los ocupantes o el equipo.

Las pérdidas o ganancias térmicas debido a la transmitancia de las paredes y ventanas se definen conforme a la Ecuación (9).

$$Q_T = A_C \times U_C \times (T_{in} - T_{out}) \quad (9)$$

En donde:

Q_T : Pérdidas o ganancias térmicas debido a la transmitancia de las paredes y ventanas.

A_C : Área de la pared o ventana.

U_C : Coeficiente de transmitancia térmica del material utilizado para la pared o ventana. $\left[\frac{W}{m^2 \times ^\circ K} \right]$ (5.6 vidrio [94]).

T_{in} : Temperatura interior por hora. (En este trabajo: 21° al calentar, 25° al enfriar).

T_{out} : Temperatura exterior por hora. (Obtenida para Monterrey del histórico de clima por hora para el año 2021 en la estación climatológica del Aeropuerto del norte INTL MMAN [99]).

Las pérdidas o ganancias térmicas debido a la ventilación se definen conforme a la Ecuación (10).

$$Q_V = c_p \times \rho \times q_V \times \Delta T^\circ \quad (10)$$

En donde:

Q_V : Pérdidas o ganancias térmicas debido a la ventilación.

c_p : Capacidad térmica del aire a presión constante $(1000 \left[\frac{J}{kg^\circ K} \right])$.

ρ : Densidad del aire $(1.2 \left[\frac{kg}{m^3} \right])$.

q_V : Tasa de ventilación (3 cambios de aire por hora para oficinas [100]).

ΔT° : Diferencia de temperatura entre el interior y el exterior.

Las ganancias térmicas debido a la radiación solar se definen conforme a la Ecuación (11).

$$Q_S = G_S \times A_W \times 0.9 \times g_{\perp} \times f_f \times f_s \quad (11)$$

En donde:

Q_S : Ganancias térmicas por ventana debido a la radiación solar.

G_S : Irradiación solar por ventana.

A_W : Área de ventana (35m ancho \times 3m alto por ventana).

g_{\perp} : Coeficiente de transparencia (0.585 para vidrio tradicional de 10mm [93], 0.37 para vidrio aislante [82] y 0.468 para vidrio de 10mm con película termocrómica [13]).

f_f : Tasa de vidrio en la ventana.

f_S : Coeficiente de sombreado.

Las ganancias térmicas debido a los ocupantes y equipo electrónico se definen conforme a la Ecuación (12). La NOM-001-STPS-1993 [101] estipula un área mínima designada a cada persona en oficinas de 2m², no obstante, tomando en cuenta estándares de confort actuales se consideró un área de 4m² por persona.

$$Q_I = Q_P \times \frac{P}{1000} \quad (12)$$

En donde:

Q_I : Ganancia térmicas debidas a los ocupantes.

Q_P : Energía calorífica emitida por persona o por equipo (70 W/P [86]) o al equipo (8 W/m² [102]).

P : Número de personas o equipos.

A modo de resumen, se enlistan en la Tabla 23, los resultados para la energía eléctrica necesaria para la calefacción y enfriamiento durante los 40 años y 63 pisos del modelo utilizado para el vidrio tradicional, el vidrio aislante y el vidrio termocrómico. Se aprecia que la energía eléctrica utilizada para la calefacción es inferior a la requerida para el enfriamiento, esto es debido al tamaño de las ventanas y al cálculo para las temperaturas horarias medias mensuales utilizadas en el modelo. Estos datos serán divididos por sus respectivos coeficientes de rendimiento COP (3.5 para calentamiento y 2.5 para enfriamiento [103]) e incorporados dentro del ICV como energía eléctrica de bajo voltaje proveniente del mix eléctrico mexicano.

Tabla 23. Requerimientos energéticos para calefacción y enfriamiento en MWh para los 40 años y 63 pisos de la Unidad Funcional.

	Vidrio tradicional	Vidrio aislante	Vidrio termocrómico
Energía calefacción UF (MWh)	7,391.2	10,463.6	8,104.4
Energía enfriamiento UF (MWh)	618,614	458,384.8	540,665.2
Total (MWh)	626,005.2	468,848.4	548,769.6

4.4 Evaluación de los impactos del ciclo de vida

Esta sección presenta la evaluación de impactos ambientales (también denominado “perfil ambiental”) asociados con las etapas de fabricación, transporte, depósito de las películas, instalación, uso y disposición final de los 9 escenarios descritos anteriormente. El objetivo de este estudio es comparar el rendimiento ambiental de estos modelos de ventanas e identificar la opción más preferible desde el punto de vista ambiental. Para lograr este objetivo, se evaluó una variedad de categorías de impacto ambiental, incluido el agotamiento de recursos hídricos (ARH), la toxicidad humana (TH), la formación de materia particulada (FMP), la ecotoxicidad en agua dulce (EAD), el agotamiento de metales (AM), la formación de oxidantes fotoquímicos (FOF), la acidificación terrestre (AT), y el cambio climático (CC), utilizando la metodología de punto medio ReCiPe 2008 (H). Al realizar una evaluación de impacto integral de los 9 modelos de ventanas, es posible proporcionar información valiosa sobre los beneficios y perjuicios ambientales asociadas con las diferentes tecnologías de ventanas e informar para la toma de decisiones futura en el diseño y la construcción de edificios sostenibles. Al igual que la sección anterior, esta se divide por las propiedades correspondientes a las ventanas inteligentes.

En la sección “4.4.1 Evaluación simultánea de todas las propiedades”, se muestran los resultados de la evaluación de impactos del ciclo de vida considerando todas las entradas y salidas del ICV referentes a todas las propiedades de las ventanas. Esta sección concierne a todos los escenarios evaluados. Para analizar qué propiedades de las películas delgadas generan mejoras en las categorías de impacto evaluadas, se realizaron 3 evaluaciones adicionales al inventario general, tomando únicamente las entradas y salidas referentes a cada una de ellas.

En la sección “4.4.2 Hidrofobicidad y ahorros hídricos”, se muestran los resultados de la evaluación de impactos del ciclo de vida considerando únicamente las entradas y salidas del ICV referentes a la hidrofobicidad y al ahorro hídrico (es decir, en esa sección no se toman en cuenta los impactos asociados con el marco de aluminio, la instalación de las ventanas, la demanda energética para la climatización ni las propiedades fotocatalíticas). Esta sección sólo concierne a los escenarios E0, E2, E3, E4, E5, E6, E7 y E8.

En la sección “4.4.3 Fotocatálisis y mejoras en la calidad del aire”, se muestran los resultados de la evaluación de impactos del ciclo de vida considerando únicamente las entradas y salidas del ICV referentes a la fotocatalisis y a las mejoras en la calidad del aire (es decir, en esa sección no se toman en cuenta los impactos asociados con el marco de aluminio, la instalación de las ventanas, la demanda energética para la climatización ni la demanda hídrica ni de detergente para la limpieza de las ventanas). Esta sección sólo concierne a los escenarios E0, E4, E7 y E8.

Finalmente, en la sección “4.4.4 Termocromicidad y ahorros energéticos”, se muestran los resultados de la evaluación de impactos del ciclo de vida considerando únicamente las entradas y salidas del ICV referentes a la termocromicidad y a los ahorros energéticos (es decir, en esa sección no se toman en cuenta los impactos asociados con las propiedades fotocatalíticas ni la demanda hídrica ni de detergente para la limpieza de las ventanas). Esta sección sólo concierne a los escenarios E0, E1, E5, E6, E7 y E8.

Esta división es requerida para poder analizar la aportación de cada una de las propiedades a los impactos ambientales y determinar cuál tiene la mayor importancia.

4.4.1 EVALUACIÓN SIMULTÁNEA DE TODAS LAS PROPIEDADES

En la Figura 43 y en la Tabla 24 se presentan los resultados de la evaluación de los impactos ambientales para los escenarios E0 (ventana tradicional), E1 (ventana aislante), E2 (SiO₂), E3 (ZnO), E4 (TiO₂), E5 (VO₂), E6 (SiO₂ VO₂), E7 (SiO₂ VO₂ TiO₂) y E8 (SiO₂ VO₂ TiO₂ ZnO) para las categorías de impacto ARH, TH, RMP, EAD, AM, FOF, AT Y CC, tomando en cuenta todas las propiedades de las películas. Esta sección representa la combinación de las tres propiedades de las películas. Se observa que a pesar de que los escenarios E2, E3 y E4 generan una disminución apreciable para la categoría de agotamiento de recursos hídricos, estos tres escenarios son los peores seguidos del escenario base. Los escenarios E5, E6, E7 y E8 son por lo general mejores que los escenarios E2, E3 y E4, lo cual nos indica que las propiedades termocrómicas están generando mayores beneficios que las propiedades hidrofóbicas o fotocatalíticas. Para analizar más la interacción que muestran entre sí las distintas propiedades de las ventanas inteligentes, en las siguientes secciones se realiza la evaluación de los impactos de ciclo de vida aislando cada una de ellas. Como se observa en la Figura 47, los resultados obtenidos de la evaluación aislada de las propiedades termocrómicas son los que más se parecen a los resultados generales, debido al peso de los impactos debidos a la demanda energética de las ventanas. No obstante, se puede apreciar que para las categorías de impacto de FOF y AT, las propiedades fotocatalíticas que poseen los escenarios E7 y E8 adicionales a su termocromicidad, les dan la ventaja en comparación a los escenarios E5 y E6, los cuales no poseen las propiedades fotocatalíticas.

En la Figura 44 y en la Tabla 25 se muestra la síntesis de los resultados mediante la evaluación de los impactos de ciclo de vida mediante las tres categorías de impacto generales de punto final CE (calidad en ecosistemas), SH (salud humana) y R (recursos), en puntos. Estas categorías de impacto de punto final asignan un

peso a cada una de las categorías de impacto dentro ReCiPe 2008 y realizan una normalización tomando como referencia la asignación de puntos. Se observa que por lo general, el peor escenario es el escenario base, y el mejor escenario el E1, el cual representa a las ventanas aislantes. A pesar de que el escenario E1 genera los mayores impactos a la calidad en ecosistemas, compensa generando los menores impactos en las categorías de salud humana y disponibilidad de recursos. Esto se debe a que la demanda energética de este escenario es menor a todos los demás, y dado que el mix eléctrico mexicano tiene una alta dependencia de la quema de combustibles fósiles y genera impactos ambientales para todas las categorías de impacto evaluadas, los ahorros en energía eléctrica generan una mejoría generalizada para este escenario.

La discusión de resultados para la evaluación simultánea de todas las propiedades se lleva a cabo en la sección “4.5.1 Todas las propiedades”.

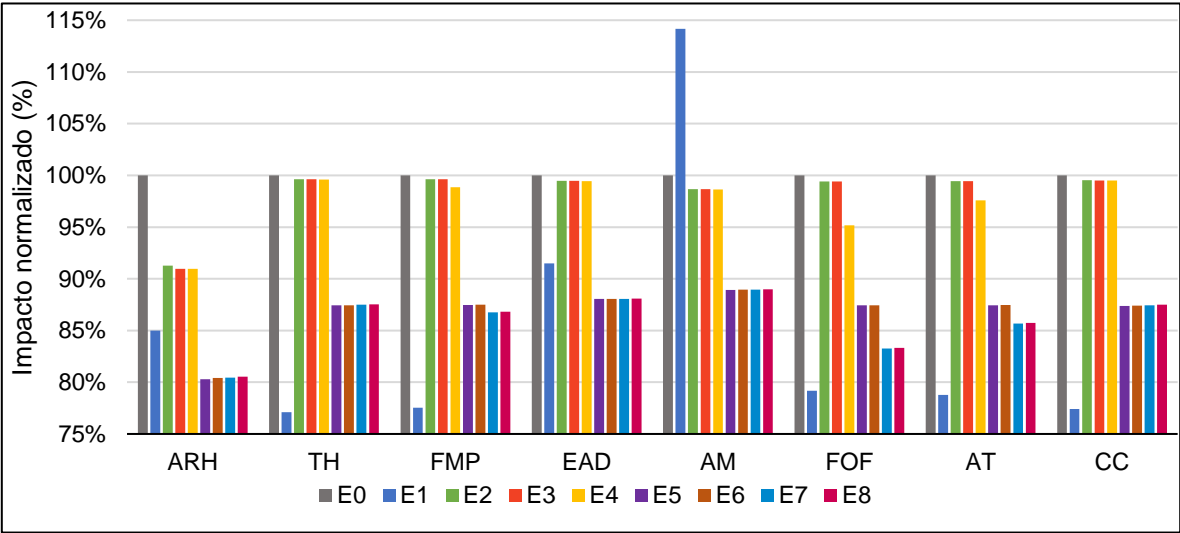


Figura 43. Impacto ambiental normalizado por escenario y por categoría de impacto. Evaluación de impacto ambiental simultánea de todas las propiedades.

Tabla 24. Impacto ambiental absoluto por escenario y por categoría de impacto. Evaluación de impacto ambiental simultánea de todas las propiedades.

	ARH	TH	FMP	EAD	AM	FOF	AT	CC
	m ³ agua eq.	kg 1.4-DB eq.	kg PM10 eq.	kg P eq.	kg Fe eq.	kg NMVOC eq.	kg SO ₂ eq.	kg CO ₂ eq.
Esc.								
E0	390,942	61,583,222	417,252	8,237,614	4,171,683	375,801	638,320	167,042,719
E1	332,290	47,484,402	323,550	7,536,135	4,763,273	297,601	502,881	129,302,192
E2	356,791	61,350,296	415,694	8,193,240	4,116,343	373,583	634,770	166,240,861
E3	355,664	61,343,701	415,654	8,192,953	4,115,727	373,557	634,714	166,229,987
E4	355,564	61,340,276	412,399	8,192,664	4,115,199	357,601	622,990	166,231,328
E5	313,944	53,842,560	364,963	7,253,352	3,709,966	328,547	558,118	145,956,976
E6	314,315	53,852,281	365,032	7,253,750	3,710,344	328,623	558,227	145,986,410
E7	314,526	53,878,743	361,997	7,254,671	3,710,899	312,897	546,848	146,080,793
E8	314,830	53,908,434	362,216	7,255,862	3,711,948	313,125	547,190	146,173,073

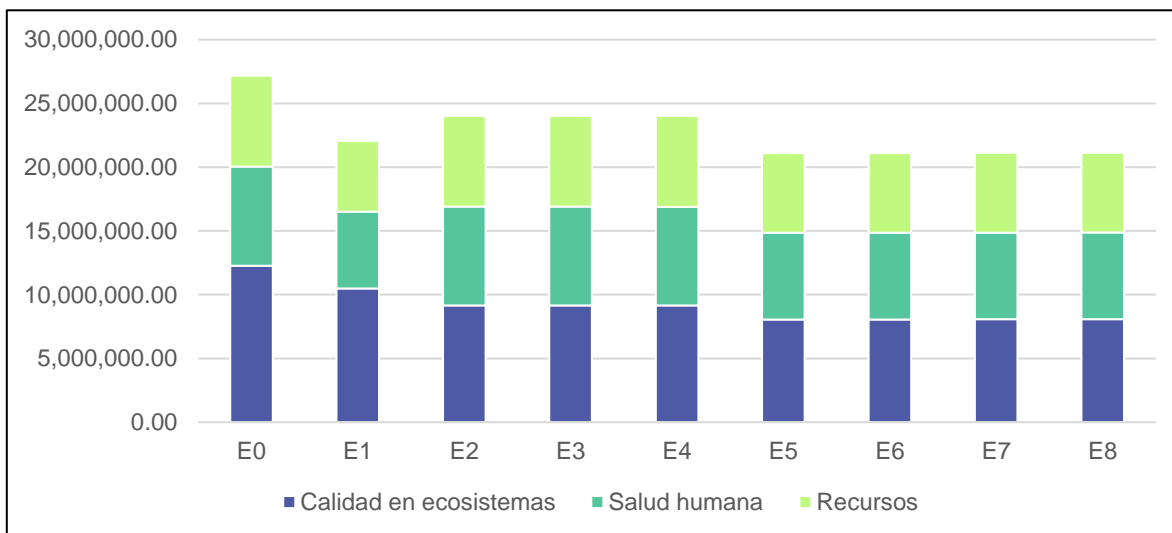


Figura 44. Síntesis de los impactos ambientales de punto final a la calidad de ecosistemas, salud humana y recursos, en puntos. Evaluación simultánea de todas las propiedades.

Tabla 25. Síntesis de los impactos ambientales de punto final a la calidad de ecosistemas, salud humana y recursos, en puntos. Evaluación simultánea de todas las propiedades.

Escenario	Calidad en ecosistemas	Salud humana	Recursos	Total
E0	12,261,131	7,778,559	7,128,073	27,167,764
E1	10,476,483	6,020,990	5,550,295	22,047,768
E2	9,162,073	7,744,376	7,111,667	24,018,116
E3	9,161,194	7,743,759	7,111,078	24,016,031
E4	9,160,437	7,734,201	7,110,417	24,023,944
E5	8,061,385	6,799,048	6,246,207	21,106,640
E6	8,062,907	6,800,379	6,247,611	21,110,898
E7	8,066,802	6,795,031	6,251,291	21,132,013
E8	8,071,397	6,799,210	6,255,577	21,145,072

4.4.2 HIDROFOBICIDAD Y AHORROS HÍDRICOS

En la Figura 45 y en la Tabla 26 se presentan los resultados de la evaluación de los impactos ambientales para los escenarios E0 (ventana tradicional), E2 (SiO₂), E3 (ZnO), E4 (TiO₂), E5 (VO₂), E6 (SiO₂ VO₂), E7 (SiO₂ VO₂ TiO₂) y E8 (SiO₂ VO₂ TiO₂ ZnO) para las categorías de impacto de ARH, TH, RMP, EAD, AM, FOF, AT Y CC, tomando en cuenta las propiedades hidrofóbicas de las películas. Se aprecia que, para todas las categorías de impacto, el escenario base E0 presenta los mayores impactos ambientales. Comparativamente, todos los escenarios propuestos basados en modelos de ventanas recubiertas con los distintos materiales muestran un mejor desempeño ambiental al mostrar menores impactos a lo largo de su ciclo de vida. Se observa que los escenarios correspondientes a las multicapas (E6, E7 y E8) muestran mayores impactos que los escenarios correspondientes a las películas delgadas (E2, E3, E4 y E5). Esto se debe a que, para su depósito, las multicapas requieren de varios procesos de tratamiento térmico, por lo que su demanda energética es mayor. Ya que el mix eléctrico mexicano se tiene un alto porcentaje de producción de energía eléctrica por medio de fuentes fósiles [104],

este comportamiento se aprecia en todas las categorías de impacto evaluadas (exceptuando al agotamiento de metales, ya que esta categoría no está relacionada con la producción de energía eléctrica), especialmente en las categorías de cambio climático y formación de materia particulada. El escenario con el mejor desempeño ambiental a lo largo de su ciclo de vida al evaluar únicamente las propiedades hidrofóbicas de las películas delgadas es el Escenario 4 (TiO₂), el cual genera una disminución de impactos del 43.57%, en promedio. Al observar los resultados de esta sección y compararlos con la evaluación simultánea de todas las propiedades, se aprecia que las propiedades hidrofóbicas y el ahorro hídrico de los escenarios ocasiona que las multicapas tengan un mejor rendimiento ambiental que las ventanas aislantes para la categoría de impacto de agotamiento de recursos hídricos y ecotoxicidad en agua dulce.

Dentro de la evaluación de impactos tomando en cuenta los impactos ambientales generados por las propiedades hidrofóbicas, las categorías de impacto más relevantes son ARH, CC y TH, las cuales se discuten a profundidad en el siguiente capítulo en la sección “4.5.2 Hidrofobicidad y ahorros hídricos”.

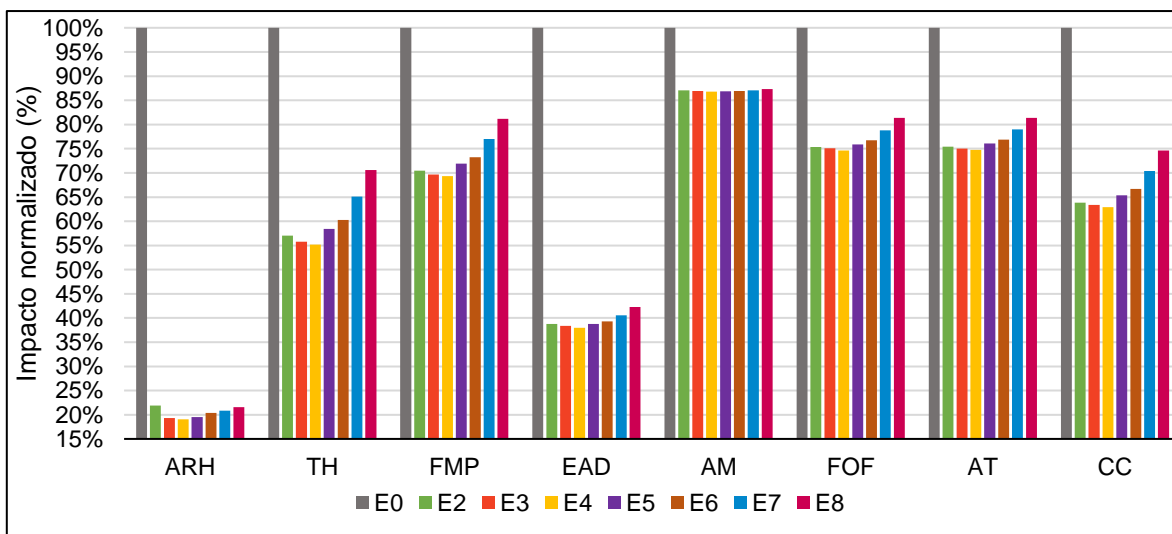


Figura 45. Impacto ambiental normalizado por escenario y por categoría de impacto. Evaluación de impacto ambiental de las propiedades hidrofóbicas.

Tabla 26. Impacto ambiental absoluto por escenario y por categoría de impacto. Evaluación de impacto ambiental de las propiedades hidrofóbicas.

	ARH	TH	FMP	EAD	AM	FOF	AT	CC
	m ³ agua eq.	kg 1.4-DB eq.	kg PM10 eq.	kg P eq.	kg Fe eq.	kg NMVOC eq.	kg SO ₂ eq.	kg CO ₂ eq.
Escenario								
E0	43,715	541,878	5,269	72,462	428,117	9,006	14,438	2,217,737
E2	9,564	308,952	3,712	28,089	372,777	6,787	10,887	1,415,879
E3	8,437	302,357	3,672	27,801	372,161	6,762	10,831	1,405,006
E4	8,325	298,932	3,653	27,513	371,633	6,722	10,791	1,395,163
E5	8,543	316,711	3,789	28,099	371,869	6,834	10,989	1,449,396
E6	8,913	326,432	3,858	28,498	372,247	6,909	11,098	1,478,830
E7	9,108	352,784	4,059	29,406	372,777	7,098	11,401	1,561,514
E8	9,418	382,586	4,279	30,609	373,851	7,329	11,744	1,654,309

4.4.3 FOTOCATÁLISIS Y MEJORAS EN LA CALIDAD DEL AIRE

En la Figura 46 y en la Tabla 27 se presentan los resultados de la evaluación de los impactos ambientales para los escenarios E0 (ventana tradicional), E4 (TiO₂), E7 (SiO₂ VO₂ TiO₂) y E8 (SiO₂ VO₂ TiO₂ ZnO) para las categorías de impacto ARH, TH, RMP, EAD, AM, FOF, AT Y CC, tomando en cuenta las propiedades fotocatalíticas de las películas. Se puede observar que, al incorporar la degradación de contaminantes atmosféricos (SO_x, NO_x y COVs), los impactos ambientales generados durante el ciclo de vida de los escenarios E4, E7 y E8 es negativo para las categorías de impactos de FOF y AT. Esto significa que el uso de estas tecnologías no solo compensa los impactos generados por su manufactura, sino también representan un beneficio ambiental para esas categorías de impacto. Se observa que, dado que la reacción fotocatalítica degrada moléculas que son precursoras de la formación de materia particulada, oxidantes fotoquímicos y acidificación terrestre, también se produce dióxido de carbono, el cual genera mayores impactos para las categorías de toxicidad humana y cambio climático.

Dentro de la evaluación de impactos tomando en cuenta los impactos ambientales generados por las propiedades fotocatalíticas, las categorías de impacto más relevantes son FOF, CC y AT, las cuales se discuten a profundidad en el siguiente capítulo en la sección “4.5.3 Fotocatálisis y mejoras en la calidad del aire”.

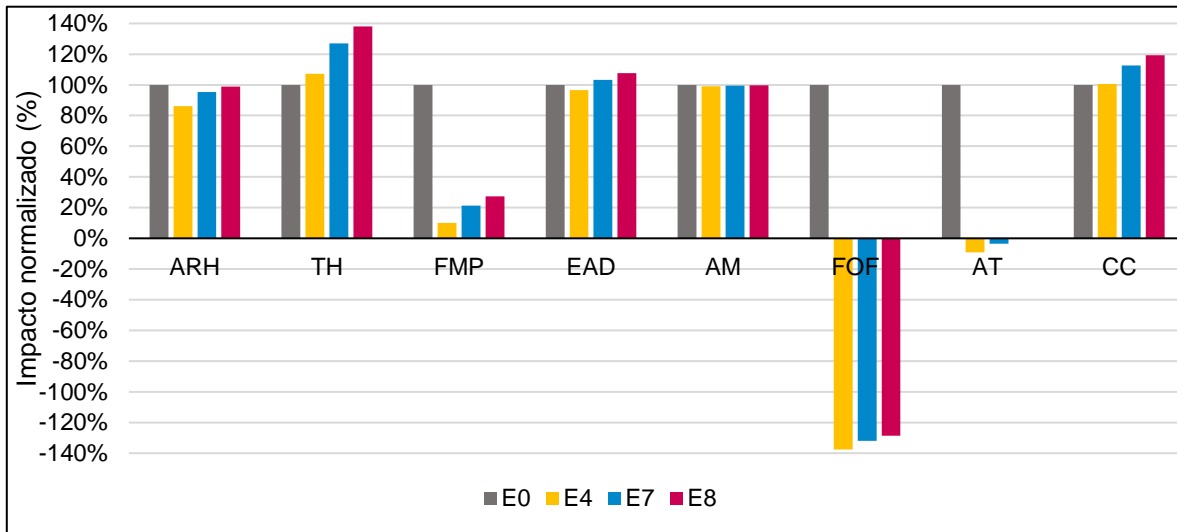


Figura 46. Impacto ambiental normalizado por escenario y por categoría de impacto. Evaluación de impacto ambiental de las propiedades fotocatalíticas.

Tabla 27. Impacto ambiental absoluto por escenario y por categoría de impacto. Evaluación de impacto ambiental de las propiedades fotocatalíticas.

	ARH	TH	FMP	EAD	AM	FOF	AT	CC
Escenario	m ³ agua eq.	kg 1.4-DB eq.	kg PM10 eq.	kg P eq.	kg Fe eq.	kg NMVOC eq.	kg SO ₂ eq.	kg CO ₂ eq.
E0	8,563	270,666	3,608	27,966	373,944	6,727	10,720	1,380,365
E4	7,379	289,931	361	26,988	370,572	-9,255	-982	1,387,098
E7	8,167	343,894	768	28,894	371,741	-8,876	-371	1,553,965
E8	8,471	373,585	987	30,084	372,790	-8,648	-29	1,646,244

4.4.4 TERMOCROMICIDAD Y AHORROS ENERGÉTICOS

En la Figura 47 y en la Tabla 28 se presentan los resultados de la evaluación de los impactos ambientales para los escenarios E0 (ventana tradicional), E1 (ventana aislante), E5 (VO₂), E6 (SiO₂ VO₂), E7 (SiO₂ VO₂ TiO₂) y E8 (SiO₂ VO₂ TiO₂ ZnO) para las categorías de impacto ARH, TH, RMP, EAD, AM, FOF, AT Y CC, tomando en cuenta las propiedades termocrómicas de las películas. Se aprecia que para la mayoría de las categorías impacto evaluadas, el escenario correspondiente al uso de ventanas aislantes (E1) representa menores impactos que los escenarios de películas delgadas y multicapas. Como se vio en la sección del inventario titulada “4.3.3 Termocromicidad y ahorros energéticos”, esto se debe a que el uso de las ventanas aislantes presenta una menor demanda eléctrica para la climatización del espacio. Se observa que para las categorías de EAD y AM, el escenario E1 genera mayores impactos que las ventanas inteligentes y en el caso de AM, mayores que los generados por el escenario base. Al compararse este gráfico con los resultados obtenidos por la evaluación simultánea de todas las propiedades, se aprecia que la energía eléctrica es lo que más está influenciando a los resultados generales.

Dentro de la evaluación de impactos tomando en cuenta los impactos ambientales generados por las propiedades termocrómicas, las categorías de impacto más relevantes son CC, EAD y AM, las cuales se discuten a profundidad en el siguiente capítulo en la sección “

4.5.4 Termocromicidad y ahorros energéticos”.

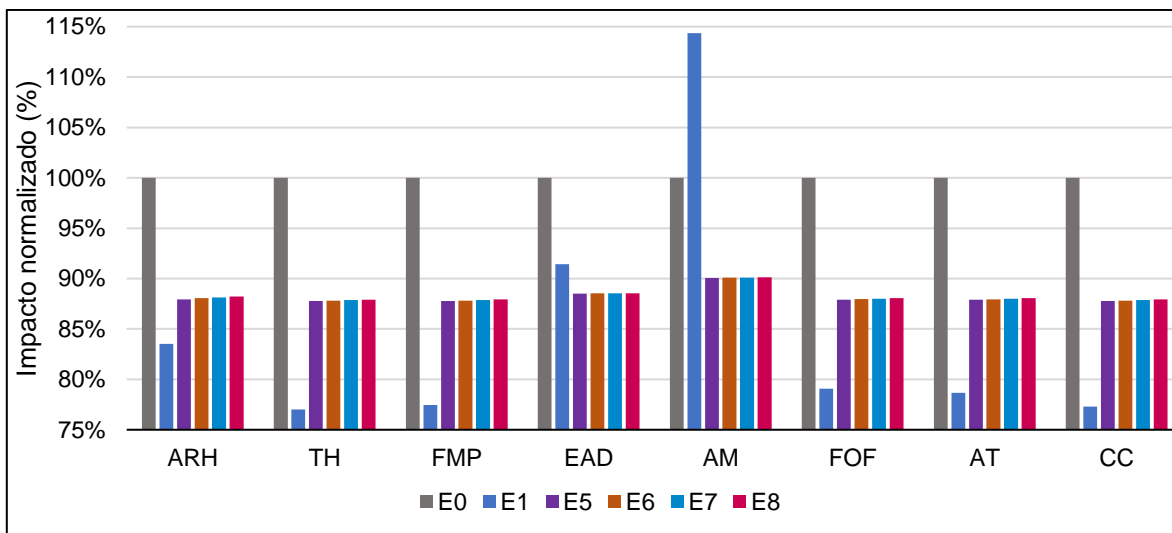


Figura 47. Impacto ambiental normalizado por escenario y por categoría de impacto. Evaluación de impacto ambiental de las propiedades termocrómicas.

Tabla 28. Impacto ambiental absoluto por escenario y por categoría de impacto. Evaluación de impacto ambiental de las propiedades termocrómicas.

	ARH	TH	FMP	EAD	AM	FOF	AT	CC
Esc.	m ³ agua eq.	kg 1.4-DB eq.	kg PM10 eq.	kg P eq.	kg Fe eq.	kg NMVOC eq.	kg SO ₂ eq.	kg CO ₂ eq.
E0	355,789	61,312,010	415,590	8,193,118	4,117,510	373,522	634,603	166,205,347
E1	297,138	47,213,190	321,888	7,491,639	4,709,100	295,322	499,164	128,464,820
E5	312,876	53,815,784	364,771	7,252,253	3,708,644	328,366	557,826	145,882,500
E6	313,357	53,843,280	364,976	7,253,226	3,709,282	328,563	558,137	145,967,161
E7	313,557	53,869,742	365,178	7,254,146	3,709,838	328,754	558,441	146,050,360
E8	313,861	53,899,433	365,397	7,255,337	3,710,887	328,982	558,783	146,142,640

4.5 Interpretación y discusión de los resultados de Análisis de Ciclo de Vida

En esta sección se discuten los resultados de la evaluación de impactos ambientales. Al igual que la sección anterior, esta se divide también en 4 subsecciones. Para primera sección; la cual trata con el análisis simultáneo de las propiedades de las películas, se optó por realizar una discusión a detalle para cada una de las categorías de impacto evaluadas. Para las secciones en las cuales se realizó la evaluación de impacto ambiental por calidad, se eligieron las tres categorías de impacto más relevantes para su discusión.

4.5.1 TODAS LAS PROPIEDADES

En este apartado se discuten todas las categorías de impacto evaluadas: agotamiento de recursos hídricos (ARH), toxicidad humana (TH), formación de materia particulada (FMP), ecotoxicidad en agua dulce (EAD), agotamiento de metales (AM), formación de oxidantes fotoquímicos (FOF), acidificación terrestre (AT) y cambio climático (CC), dado que se trata de la evaluación ambiental tomando en cuenta todas las propiedades y los respectivos ahorros e impactos ambientales positivos generados por las ventanas inteligentes y su comparación con el escenario base.

4.5.1.1 Agotamiento de recursos hídricos (ARH)

En la Figura 48 y en la Tabla 29 se aprecia la contribución por etapas de ciclo de vida a la categoría de impacto de agotamiento de recursos hídricos (ARH). En ella se observa que todos los escenarios propuestos generan menores impactos que el escenario base. Se observa que, para todos los escenarios, las etapas dominantes son la de fabricación y uso. Para los escenarios E0, E2-E8; dentro de la etapa de fabricación, la producción del marco de aluminio y del vidrio generan requerimientos hídricos de 9,505 y 7,015 m³ de agua equivalente, respectivamente. Para el escenario E1, dado que las cantidades de aluminio se triplican y de vidrio se duplican, sus impactos suben a 28,515 y 14,031 m³ de agua equivalente,

respectivamente. Dentro de la etapa de uso, el proceso que más afecta a la categoría de impacto de ARH es el uso de energía eléctrica de bajo voltaje para la climatización de la torre durante el período de estudio de 40 años. A pesar de que el escenario aislante (al igual que el escenario base) no presenta ahorros hídricos debido al ahorro en la limpieza de la fachada debido a que no tienen propiedades hidrofóbicas, el escenario E1 presenta una disminución significativa en los impactos referentes a la categoría de ARH debido a la menor demanda de energía eléctrica durante la etapa de uso. Para esta categoría, la unión de las propiedades hidrofóbicas y termocrómicas de los escenarios E5 a E8 propician que estos tengan menor agotamiento de recursos hídricos que el escenario aislante E1.

El módulo de Ecoinvent 3.6 que se utiliza para la energía eléctrica de bajo voltaje se denomina “*market for electricity, low voltage [MX]*”, el cual fue modelado con base en las estadísticas mundiales de energía y balances [105]. Este módulo fue actualizado en 2019, y describe la disponibilidad energética en México a nivel nacional para el año de 2014. Para ese año, se reporta que el consumo de electricidad del país provino en un 76.99% de combustibles fósiles [106], un 3.20% de energía nuclear y un 19.80% de fuentes renovables [107]. Muchas tecnologías de generación de energía eléctrica (como lo son las basadas en carbón, gas natural, gasolina y la energía nuclear) requieren de grandes cantidades de agua para su enfriamiento. En estos casos, como el agua es enfriada y regresada al ecosistema, los impactos ambientales para la categoría de impacto de ARH son menores en el caso de la generación de energía eléctrica a partir de combustibles fósiles que a partir de plantas hidroeléctricas. En el caso de la construcción de presas y plantas hidroeléctricas, estas contribuyen en gran medida a la categoría de impacto de ARH debido a que la alteración del flujo natural del agua afecta a la disponibilidad y a los ciclos de agua en los ecosistemas, aunado a que generan la evaporación de grandes volúmenes de agua [108]. La diferencia dentro de esta categoría de impacto dependiendo del mix eléctrico de México en comparación a otros países se explora con mayor detalle en el análisis de sensibilidad, en la sección “4.6.1 Agotamiento de recursos hídricos (ARH)”.

Dado que la producción de energía eléctrica tiene altos requerimientos de recursos y emite muchos contaminantes al ambiente (sobre todo en el caso de la producción eléctrica a partir de combustibles fósiles), la mayoría de las categorías de impacto evaluadas muestran un comportamiento similar, en el cual la disminución en la demanda energética está ligada a menores impactos ambientales.

Para esta categoría de impacto, el escenario con el mejor desempeño ambiental es el E6 (correspondiente a las ventanas inteligentes con multicapa de SiO₂ y VO₂), lo cual se atribuye simultáneamente a las propiedades termocrómicas y fotocatalíticas de este escenario, aunado a su menor requerimiento energético en la etapa del depósito de las películas, lo cual le da la ventaja en comparación a los escenarios E7 y E8.

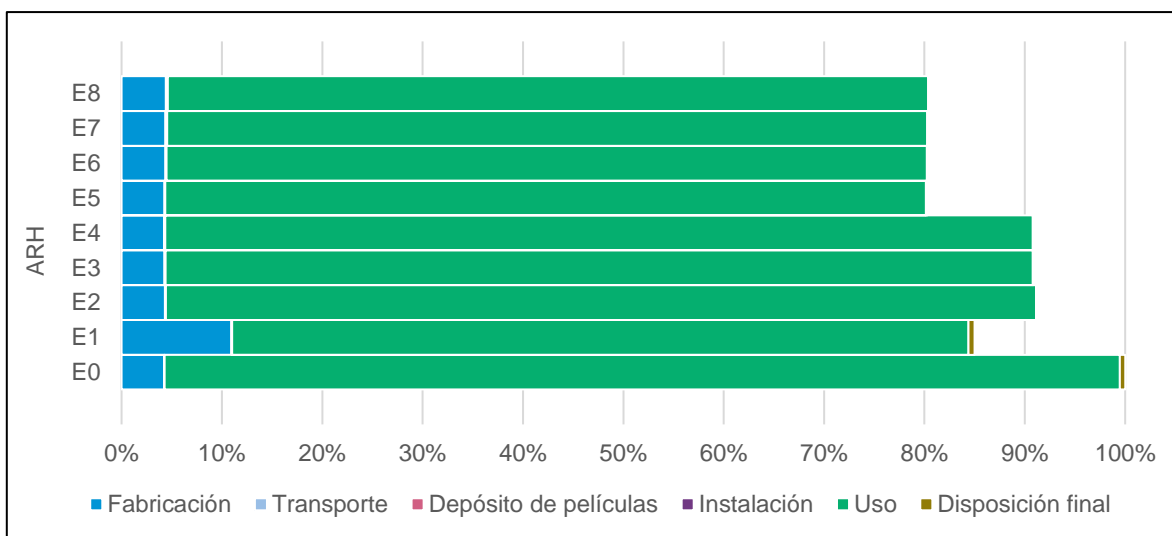


Figura 48. Contribución por etapas al impacto total para la categoría de agotamiento de recursos hídricos. Evaluación simultánea de todas las propiedades.

Tabla 29. Contribución absoluta en [m³ agua eq.] por etapas al impacto total para la categoría de agotamiento de recursos hídricos. Evaluación simultánea de todas las propiedades.

Escenario	Fabricación	Transporte	Depósito de películas	Instalación	Uso	Disposición final	Total
E0	16,640	7	0	139	372,121	2,036	390,942
E1	42,784	14	0	288	286,765	2,439	332,290
E2	16,953	9	159	139	338,884	647	356,791
E3	16,781	12	159	139	337,926	647	355,664
E4	16,672	9	159	139	337,937	647	355,564
E5	16,780	9	159	139	296,211	647	313,944
E6	17,102	9	317	139	296,101	647	314,315
E7	17,143	9	476	139	296,112	647	314,526
E8	17,285	12	635	139	296,112	647	314,830

4.5.1.2 Toxicidad humana (TH)

En la Figura 49 y en la Tabla 30 se muestra la contribución por etapas del ciclo de vida a la categoría de impacto de toxicidad humana. Se observa que los impactos son proporcionales al uso energético de cada escenario (descrito en la sección “4.3.3 Termocromicidad y ahorros energéticos”). Para todos los escenarios evaluados, la etapa de uso genera la mayoría de los impactos, los cuales son generados en su mayoría (entre el 95% y el 99% de los impactos de todo el ciclo de vida) por el módulo de “*market for electricity, low voltage [MX]*”, similarmente al caso de la categoría impacto de ARH. Dentro de este módulo, las emisiones de Manganeso (al agua o suelo, a largo plazo), Bario (al agua) y arsénico (al agua o suelo, a largo plazo) generan entre el 69% y el 71% de los impactos a la categoría de toxicidad humana. Estas emisiones son generadas durante las etapas de extracción y producción de los combustibles fósiles como carbón y gas [109], por lo que en países en donde en mix eléctrico tiene una menor contribución de producción

de energía eléctrica mediante fuentes fósiles, esta categoría de impacto se vería afectada positivamente, lo cual se explora a más profundidad en el análisis de sensibilidad, en la sección “4.6.2 Toxicidad humana (TH)”.

Para esta categoría de impacto, el escenario con el mejor desempeño ambiental es el E1, correspondiente a las ventanas aislantes. Esto se debe a que su requerimiento energético durante la etapa de uso es menor que el de todos los demás escenarios evaluados.

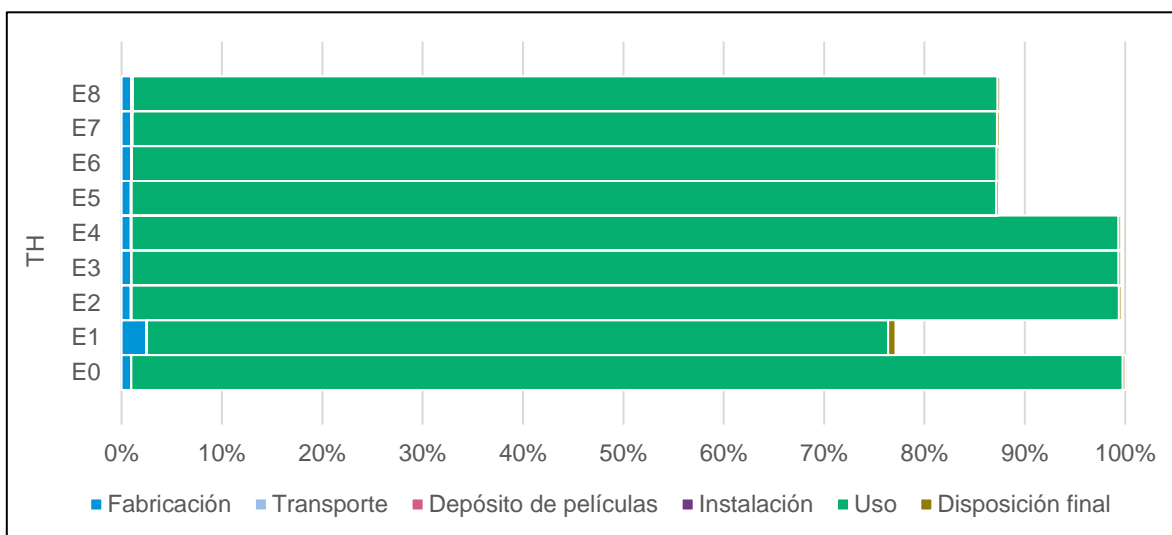


Figura 49. Contribución por etapas al impacto total para la categoría de toxicidad humana. Evaluación simultánea de todas las propiedades.

Tabla 30. Contribución absoluta en [kg 1.4-DB eq.] por etapas al impacto total para la categoría de toxicidad humana. Evaluación simultánea de todas las propiedades.

Esc.	Fabricación	Transporte	Depósito de películas	Instalación	Uso	Disposición final	Total
E0	586,958	1,001	0	22,336	60,820,102	152,825	61,583,222
E1	1,513,636	2,033	0	46,401	45,482,825	439,507	47,484,402
E2	570,838	1,308	25,547	22,336	60,566,892	163,375	61,350,296
E3	572,822	1,710	25,567	22,336	60,557,891	163,375	61,343,701

E4	569,836	1,286	25,552	22,336	60,557,891	163,375	61,340,276
E5	569,891	1,245	25,543	22,336	53,060,170	163,375	53,842,560
E6	571,780	1,313	51,081	22,336	53,042,395	163,375	53,852,281
E7	572,653	1,360	76,624	22,336	53,042,395	163,375	53,878,743
E8	576,342	1,806	102,180	22,336	53,042,395	163,375	53,908,434

4.5.1.3 Formación de materia particulada (FMP)

En la Figura 50 y en la Tabla 31 se muestra la contribución por etapas de ciclo de vida a la categoría de impacto de formación de materia particulada. La producción de energía eléctrica dentro de la etapa de uso es la causante de la mayor parte de los impactos para la categoría de FMP (entre el 94% y el 98% de los impactos del ciclo de vida de los escenarios evaluados). La combustión de combustibles fósiles genera grandes cantidades de materia particulada PM_{2.5}, SO₂ y NO_x al aire [110] en zonas no urbanas desde chimeneas industriales, los cuales en conjunto son responsables por aproximadamente entre el 73% y el 76% de los impactos ambientales para todos los escenarios evaluados en esta categoría. En primer lugar, se observa que los requerimientos energéticos de cada escenario son directamente proporcionales a los impactos ambientales para la categoría de FMP. No obstante, se aprecia también una ligera diferencia entre las ventanas inteligentes con propiedades fotocatalizadoras (E4, E7 y E8) y las ventanas inteligentes no fotocatalizadoras (E2, E3, E5 y E6). Esta diferencia se debe a la degradación de contaminantes ambientales que propician dichos escenarios y se explora con mayor detalle en la sección “4.5.3 Fotocatálisis y mejoras en la calidad del aire”, en donde se evalúan únicamente las propiedades fotocatalíticas de este material. Dentro de la etapa de fabricación de las ventanas, el aluminio utilizado para el marco y el vidrio generan también considerables emisiones de SO₂ y NO_x, pero a menor escala que la producción de energía eléctrica en el mix mexicano para satisfacer la demanda energética del edificio durante el período de estudio de 40 años. Por esta razón, a pesar de que el escenario E1; correspondiente a las ventanas aislantes, genera un mayor impacto durante la etapa de fabricación debido a su mayor demanda de

aluminio y vidrio, los ahorros que este escenario genera durante la etapa de uso compensan los impactos generales durante todo su ciclo de vida. Por esta razón, el escenario E1 es el que demuestra el mejor desempeño ambiental para esta categoría de impacto, en comparación a todos los demás escenarios evaluados.

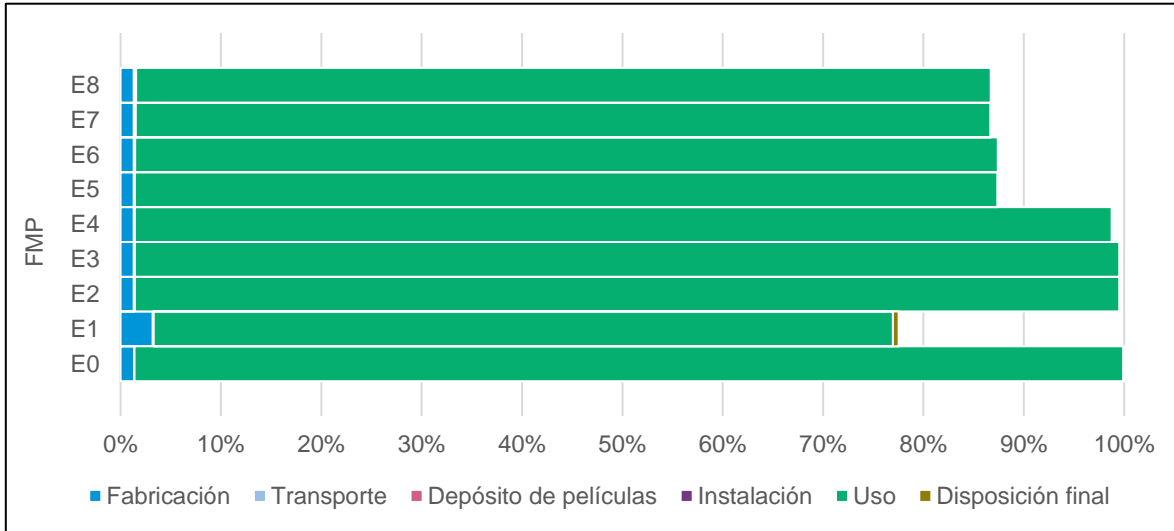


Figura 50. Contribución por etapas al impacto total para la categoría de formación de materia particulada. Evaluación simultánea de todas las propiedades.

Tabla 31. Contribución absoluta en [kg PM10 eq.] por etapas al impacto total para la categoría de formación de materia particulada. Evaluación simultánea de todas las propiedades.

Escenario	Fabricación	Transporte	Depósito de películas	Instalación	Uso	Disposición final	Total
E0	5,647	10	0	171	411,003	420	417,252
E1	13,447	19	0	356	307,315	2,412	323,550
E2	5,522	12	196	171	409,453	339	415,694
E3	5,534	16	196	171	409,397	339	415,654
E4	5,519	12	196	171	406,161	339	412,399
E5	5,519	12	196	171	358,725	339	364,963

E6	5,528	12	392	171	358,589	339	365,032
E7	5,533	13	588	171	355,353	339	361,997
E8	5,552	17	784	171	355,353	339	362,216

4.5.1.4 Ecotoxicidad en agua dulce (EAD)

En la Figura 51 y en la Tabla 32 se muestra la contribución por etapas del ciclo de vida a la categoría de ecotoxicidad en agua dulce. La etapa del ciclo de vida que más impactos genera para la categoría de EAD es la etapa de uso, en donde se generan entre el 76% y el 92% de los impactos para todos los escenarios evaluados. Dentro de la producción eléctrica de bajo voltaje mediante el mix eléctrico mexicano, la emisión de iones de Cobre, Nickel y Bromo al agua y suelo generan en conjunto entre el 68% y el 83% de los impactos ambientales para todos los escenarios evaluados. La emisión de estos contaminantes y de otros metales pesados se genera durante la operación de las plantas de generación de energía mediante carbón, gas y petróleo [106]. Otra etapa que también genera relevantes impactos para la categoría de EAD es la del fin de ciclo de vida o disposición final, la cual afecta especialmente al escenario E1 (generando un 23% de los impactos de su ciclo de vida), correspondiente a la ventana aislante. Esto se debe primordialmente a la recolección, separación, limpieza y compresión del aluminio después de su etapa de uso. Dado que el escenario E1 requiere de una cantidad de aluminio tres veces más grande que los otros escenarios, esto se ve reflejado en gran medida para este escenario. El módulo de Ecoinvent 3.6 utilizado para este proceso se llama *“treatment of aluminium scrap, post-consumer, by collecting, sorting, claning, pressing [RoW]”*, el cual está basado en datos de la Asociación Europea de Aluminio (EAA) [111], [112] y en la base de datos de Ecoinvent 2.2 [113] para la misma actividad, y fueron extrapolados para el mercado global. Durante este proceso de tratamiento del aluminio residual se generan emisiones de iones de Cobre, Plata, Nickel y otros metales pesados al agua y suelo, a las cuales se les atribuye la mayor parte del potencial de ecotoxicidad en agua dulce del proceso.

Para esta categoría, los escenarios que representan a las ventanas inteligentes con propiedades termocrómicas (E5, E6, E7 y E8) presentan prácticamente el mismo rendimiento ambiental, el cual es mejor al escenario E1 dado que el marco de aluminio utilizado para estos escenarios requiere de tan sólo un tercio de la cantidad de aluminio requerida para las ventanas aislantes. Para visualizar con más detalle los beneficios que generan las propiedades termocrómicas de las películas, se realiza un análisis aislando esta cualidad en la sección “4.5.4 Termocromicidad y ahorros energéticos”.

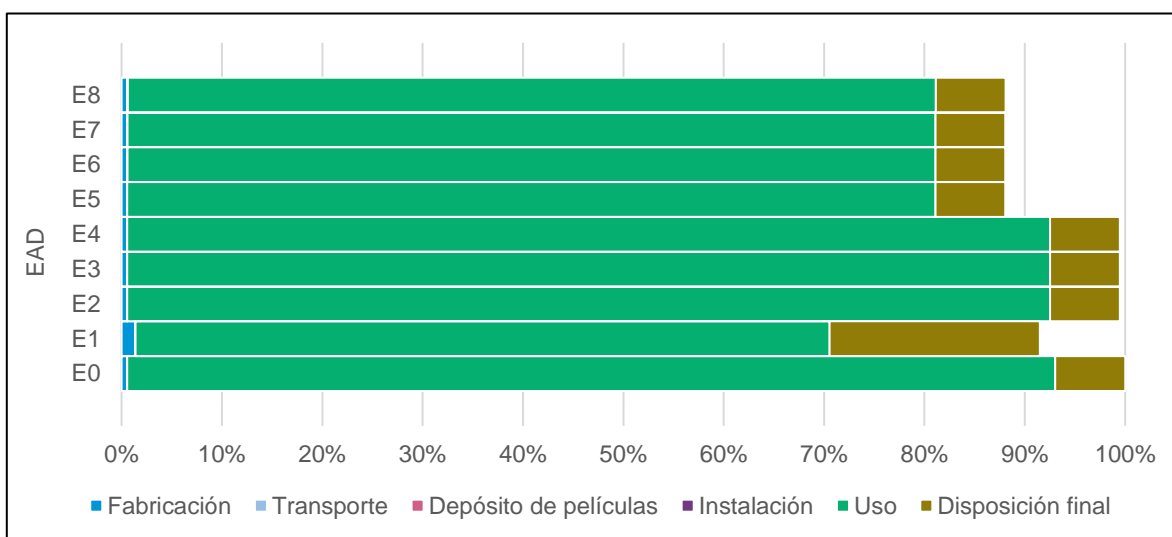


Figura 51. Contribución por etapas al impacto total para la categoría de ecotoxicidad en agua dulce. Evaluación simultánea de todas las propiedades.

Tabla 32. Contribución absoluta en [kg P eq.] por etapas al impacto total para la categoría de ecotoxicidad en agua dulce. Evaluación simultánea de todas las propiedades.

Esc.	Fabricación	Transporte	Depósito de películas	Instalación	Uso	Disposición final	Total
E0	45,985	38	0	721	7,616,830	574,041	8,237,614
E1	112,291	76	0	1,498	5,698,727	1,723,543	7,536,135

E2	45,623	49	825	721	7,573,383	572,639	8,193,240
E3	45,845	64	825	721	7,572,858	572,639	8,192,953
E4	45,573	48	825	721	7,572,858	572,639	8,192,664
E5	45,587	47	825	721	6,633,533	572,639	7,253,352
E6	45,733	49	1,649	721	6,632,959	572,639	7,253,750
E7	45,827	51	2,473	721	6,632,959	572,639	7,254,671
E8	46,176	68	3,298	721	6,632,959	572,639	7,255,862

4.5.1.5 Agotamiento de metales (AM)

En la Figura 52 y en la Tabla 33 se muestra la contribución por etapas del ciclo de vida a la categoría de agotamiento de metales. Se observa que, para todos los escenarios evaluados, las etapas de fabricación, uso y disposición final son las que generan prácticamente todos los impactos.

La etapa de fabricación genera aproximadamente un 30% de los impactos para el escenario E1, el cual corresponde a la ventana aislante y un 15% en el caso de todos los demás escenarios evaluados, en promedio. Para el escenario E1, los impactos dentro de esta categoría se dividen más o menos equitativamente entre la producción de vidrio (738,057 kg Fe equivalentes) y la producción del marco de aluminio para las ventanas (696,075 kg Fe equivalentes); mientras que, para los demás escenarios, el vidrio genera más impactos que el aluminio (369,029 y 206,025 kg Fe equivalentes, respectivamente). Tanto para el caso del vidrio como del aluminio, los tres requerimientos de materiales que están generando los mayores impactos para la categoría de AM son el Oro, el Cobre y el Estaño, siendo en el caso de los marcos el aluminio el cuarto metal que más impactos genera dentro del proceso.

Para modelar al vidrio de ventana, se utilizó en todos los escenarios el módulo de Ecoinvent 3.6 de “*flat glass production, uncoated [RoW]*”, el cual está basado en estudios europeos de Ecoinvent [64] y extrapolado al mercado global. Durante la etapa de fabricación del vidrio, se funden materiales como sílice, carbonato de

sodio, dolomita, piedra caliza (cal) y en ciertos casos, vidrio residual para reciclar. El vidrio fundido fluye sobre una tina de estaño líquido, el cual tiene la funcionalidad de aportarle al vidrio un espesor uniforme [114]. El módulo asume que el estaño sale del sistema en este proceso como materia particulada y como emisión al aire, lo cual significa que este estaño no se recupera.

El cobre se usa indirectamente durante los procesos de infraestructura de la red de suministro eléctrico y en cualquier subproceso que conlleve el uso o fabricación de cualquier electrónico. Un gran número de procesos como la extracción de las materias primas, el procesamiento y la fundición de las materias primas para la producción del vidrio necesitan de energía eléctrica, por lo que el uso de cobre se va acumulando.

Comparado con otros metales, el uso de oro genera uno de los más grandes impactos en el agotamiento de metales [115], por lo que su uso en procesos indirectos conlleva grandes impactos para la categoría de AM. Por esta razón, se analizó la contribución de impacto del módulo de producción de vidrio plano sin recubrir y se concluyó que los grandes impactos debidos al oro se pueden seguir a través procesos involucrados en la cadena de suministro de cal hasta módulo de operación de la mina de zinc "*zinc mine operation [GLO]*". La asociación de Ecoinvent menciona en el reporte técnico de cambios implementados en la base de datos Ecoinvent entre las versiones 3.7 y 3.7.1 [116] que la cantidad de oro como entrada de este proceso se cambiaría en la versión 3.7.1 de 1.37×10^{-3} a 1.04×10^{-6} kg, es decir mil veces menos. Dado que se sólo se tiene acceso a esta versión de la base de datos, se opta por trabajar con estos resultados para la realización de este estudio.

En el caso del marco de aluminio, el módulo de Ecoinvent 3.6 utilizado para la modelación fue "*window frame production, aluminium, $U=1.6 \text{ W/m}^2\text{K}$ [RER]*", el cual toma como referencias a Sinha y Kutnar [117] y a la base de datos de Ecoinvent 2.2 [118], en donde se describe que para la fabricación de los marcos de ventana de aluminio se requiere de una aleación compuesta de un 81% de aluminio, 9% hierro, 2% Zinc y 8% otras sustancias. Dentro del módulo en cuestión, existen varios sub-

procesos que generan considerables impactos a la categoría de AM, de los cuales los tres más relevantes son los módulos “market for synthetic rubber [GLO]”, “market for aluminium, wrought alloy [GLO]” y “aluminium production, primary, ingot [CN]”, produciendo el 28%, 16% y 13% de los impactos de este módulo al agotamiento de metales, respectivamente. Dentro de la cadena de producción de goma, se utiliza zinc, y como se discutió anteriormente, la operación de las minas de zinc tiene una demanda inflada de oro.

En la etapa de uso, para todos los escenarios evaluados, el módulo referente al mercado para la energía eléctrica de bajo voltaje en México es lo que está generando los mayores impactos para la categoría de impacto de AM. Esto se debe a la red de distribución de electricidad de bajo voltaje, dado que se requiere de grandes cantidades de cobre para su construcción y operación [119]. Este requerimiento de cobre genera grandes impactos en la etapa de uso debido al uso gran uso energético con fines de climatización durante el período de estudio de 40 años. Se aprecia una relación proporcional entre los impactos generados por la etapa de uso y los requerimientos energéticos de cada escenario, siendo el escenario base E0 el que mayores impactos genera y el escenario aislante E1 el que menores impactos genera para esta fase de sus respectivos ciclos de vida.

En la etapa de disposición final, para todos los escenarios evaluados, el módulo referente al reciclaje del aluminio presenta altas demandas de cobre para la preparación y operación de las instalaciones para la recolección, separación, lavado y compresión del aluminio. Estos impactos son proporcionales a la cantidad de aluminio residual generado, por lo que para el escenario aislante E1, los impactos para esta etapa son tres veces más grandes que para los demás escenarios evaluados.

Para esta categoría de impacto, los escenarios que presentan el mejor rendimiento ambiental son los escenarios que representan a las ventanas inteligentes con propiedades termocrómicas (E5, E6, E7 y E8). Esto se debe en conjunto a los ahorros energéticos que estos escenarios ocasionan y a los bajos requerimientos de aluminio y vidrio en comparación al escenario E1, el cual representa a las

ventanas aislantes. A pesar de que debido al bajo requerimiento energético del escenario E1, este genera los menores impactos durante la etapa de uso, sin embargo, como estas ventanas requieren dobles y triples cantidades de vidrio y aluminio, respectivamente, los impactos generados por las etapas de Fabricación y Disposición final ocasionan que este escenario tenga el peor rendimiento ambiental para esta categoría de impacto.

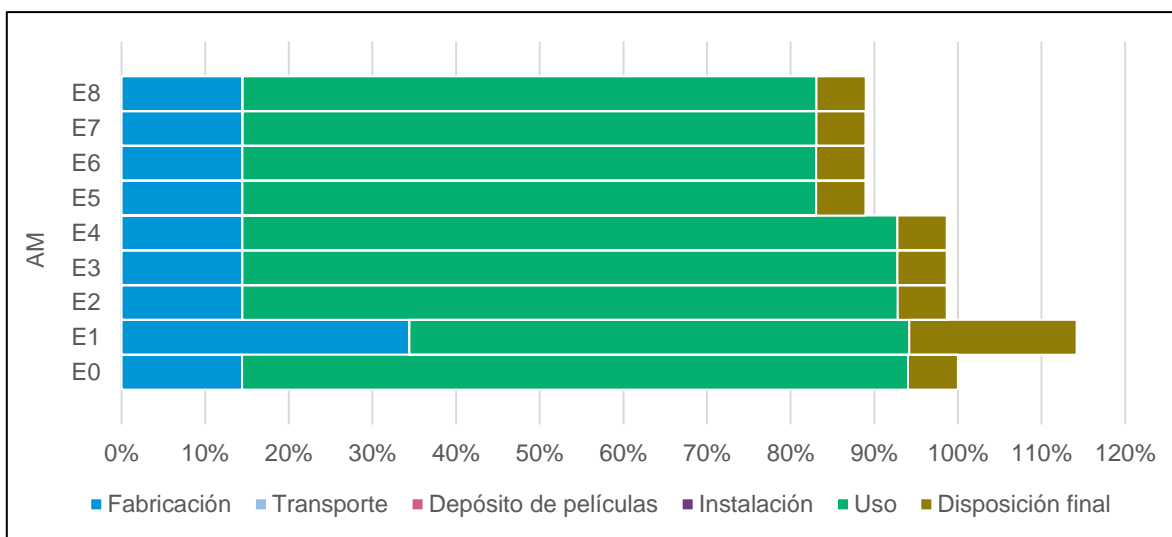


Figura 52. Contribución por etapas al impacto total para la categoría de agotamiento de metales. Evaluación simultánea de todas las propiedades.

Tabla 33. Contribución absoluta en [kg Fe eq.] por etapas al impacto total para la categoría de agotamiento de metales. Evaluación simultánea de todas las propiedades.

Esc.	Fabricación	Transporte	Depósito de películas	Instalación	Uso	Disposición final	Total
E0	601,333	125	0	327	3,320,854	249,044	4,171,683
E1	1,434,692	254	0	679	2,493,390	834,258	4,763,273
E2	601,709	163	374	327	3,268,804	244,966	4,116,343
E3	602,105	213	374	327	3,267,742	244,966	4,115,727
E4	601,629	160	374	327	3,267,742	244,966	4,115,199

E5	601,611	155	374	327	2,862,533	244,966	3,709,966
E6	601,866	164	748	327	2,862,273	244,966	3,710,344
E7	602,042	170	1,122	327	2,862,273	244,966	3,710,899
E8	602,661	225	1,496	327	2,862,273	244,966	3,711,948

4.5.1.6 Formación de oxidantes fotoquímicos (FOF)

En la Figura 53 y en la Tabla 34 se aprecia la contribución por etapas al impacto total para la categoría de formación de oxidantes fotoquímicos. Se observa que, para todos los escenarios evaluados, las etapas de fabricación y uso generan prácticamente todos los impactos. Dentro de la etapa de fabricación, la emisión de NO_x por los procesos referentes a la producción de energía eléctrica de alto voltaje, a la producción del marco de aluminio y a la producción del vidrio de ventana son los que más potencial de FOF están causando (7,773.85 kg NMCOV equivalentes en conjunto, para el caso del escenario base E0). Dentro de estos tres procesos, el que más impacto está ocasionando para esta categoría es el de producción de vidrio (6,347.87 kg NMCOV equivalentes para el escenario base E0), debido que tanto la producción de carbonato de sodio como de la sílice (arena) generan grandes emisiones de NO_x y SO_x a la atmósfera [114].

Por otro lado, la etapa de uso es la que mayor contribución tiene al impacto en la categoría de FOF para todos los escenarios evaluados (entre 92% y 97%). Dentro de esta etapa, el proceso que más impactos está generando para esta categoría es la generación de energía eléctrica de bajo voltaje en el mix eléctrico mexicano (363,209.84 kg NMCOV para el escenario E0). Este proceso tiene una contribución a su impacto en esta categoría proveniente en un 76% de la emisión de NO_x, un 11% de la emisión de COVs y alrededor de un 10% de SO_x. Esto demuestra la alta dependencia del mix mexicano a la quema de combustibles fósiles para la producción de energía eléctrica [105]–[107], [120], como se ha discutido anteriormente.

Para esta categoría de impacto, el escenario que presenta el mejor rendimiento ambiental es el escenario aislante E1, gracias a los ahorros energéticos que este presenta durante la etapa de uso. En segundo lugar, quedan los escenarios que representan a las ventanas inteligentes con propiedades termocrómicas y fotocatalíticas simultáneamente (E7 y E8), dado que generan ahorros energéticos y mejoras en la calidad del aire por la degradación de contaminantes atmosféricos. A diferencia de otras categorías de impacto evaluadas, se aprecia que especialmente para la categoría de formación de oxidantes fotoquímicos, las capacidades fotocatalíticas y termocrómicas de las películas delgadas y multicapas juegan un papel muy importante de manera simultánea. Para visualizar mejor los beneficios que ocasiona esta cualidad, se analizan las propiedades fotocatalíticas de manera aislada en la sección “4.5.3 Fotocatálisis y mejoras en la calidad del aire”.

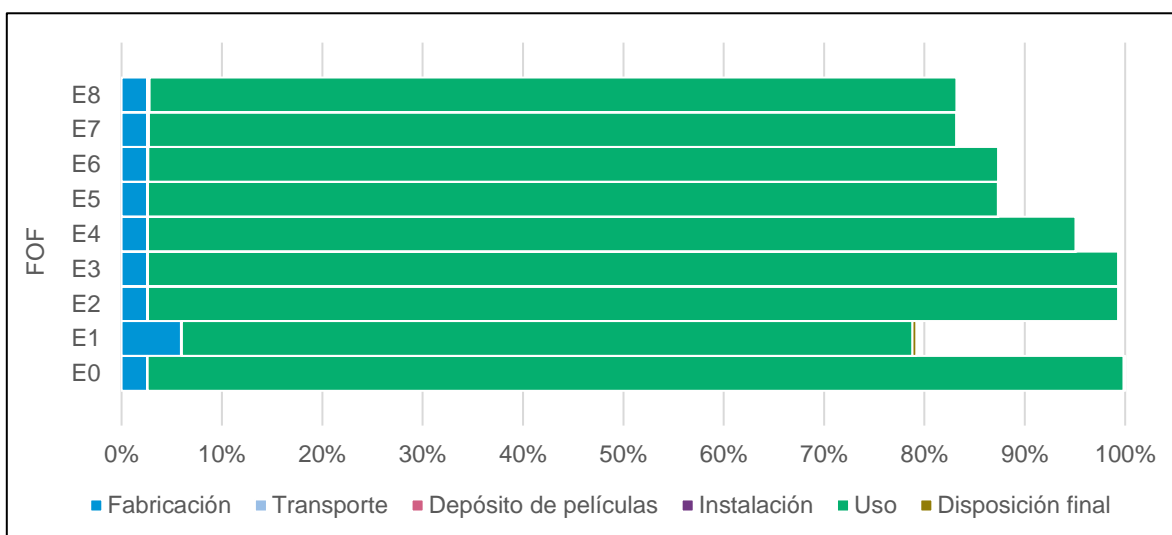


Figura 53. Contribución por etapas al impacto total para la categoría de formación de oxidantes fotoquímicos. Evaluación simultánea de todas las propiedades.

Tabla 34. Contribución absoluta en [kg NMCOV eq.] por etapas al impacto total para la categoría de formación de oxidantes fotoquímicos. Evaluación simultánea de todas las propiedades.

Escenario	Fabricación	Transporte	Depósito de películas	Instalación	Uso	Disposición final	Total
E0	9,580	27	0	152	365,489	553	375,801
E1	22,263	55	0	316	273,486	1,480	297,601
E2	9,513	36	174	152	363,330	378	373,583
E3	9,537	47	174	152	363,270	378	373,557
E4	9,509	35	174	152	347,353	378	357,601
E5	9,501	34	174	152	318,308	378	328,547
E6	9,521	36	348	152	318,187	378	328,623
E7	9,537	37	522	152	302,270	378	312,897
E8	9,579	49	697	152	302,270	378	313,125

4.5.1.7 Acidificación terrestre (AT)

En la Figura 54 y en la Tabla 35 se aprecia la contribución por etapas al impacto total para la categoría de potencial de acidificación terrestre. Se observa que, para todos los escenarios evaluados, las etapas de fabricación y uso generan prácticamente todos los impactos. Dentro de la etapa de fabricación, los procesos de fabricación del vidrio y del marco de aluminio son los que están generando más impactos en esta categoría (12,696 y 9,307 kg SO₂ eq. para el caso del escenario E1, respectivamente), esto debido a las emisiones de SO_x y NO_x que estos generan. Dentro de cadena de manufactura para los insumos del vidrio, el proceso de fundición y formado del vidrio, así como la producción de carbonato de sodio son los que más impactan en esta categoría [114]. Adicionalmente, dentro de la fabricación del marco de aluminio, el proceso de producción del aluminio y su incorporación en la aleación utilizada genera considerables emisiones de SO₂.

Por otro lado, dentro de la etapa de uso, el proceso de la producción eléctrica de bajo voltaje es el cual está generando los mayores impactos para esta categoría (de 92% a 97% de los impactos totales). Dentro de este proceso, los mayores impactos al potencial de acidificación terrestre vienen de la alta emisión de SO₂ y NO_x (74% y 25% de los impactos del módulo, respectivamente) en la producción de energía eléctrica mexicana. Conforme lo reportado, más del 65% del SO₂ generado por la producción eléctrica del país proviene de la operación de plantas de fuelóleo pesado y carbón (65% y 20%, respectivamente), principalmente por su alto contenido de sulfuros [106].

Cabe mencionar que las capacidades fotocatalíticas de los escenarios E4, E7 y E8 ocasionan leves beneficios al impacto total para esta categoría de impacto. Esto es debido a distintos contaminantes atmosféricos (como el SO₂ y los NO_x), y el proceso fotocatalítico del TiO₂ permite degradar esos contaminantes.

Para esta categoría de impacto, el escenario que presenta el mejor rendimiento ambiental es el escenario aislante E1, gracias a los ahorros energéticos que este presenta durante la etapa de uso. Las propiedades termocrómicas resultan de gran importancia, dado que los escenarios con esta cualidad presentan menores impactos que el resto de las ventanas inteligentes. Las propiedades fotocatalíticas, aunque no juegan un papel tan importante, le aportan al escenario E7 el segundo lugar, cuyo rendimiento ambiental es mejor que el del escenario E8 debido a sus menores requerimientos energéticos durante el tratamiento térmico dentro de la etapa del depósito de las películas.

Para esta categoría de impacto, el escenario que presenta el mejor rendimiento ambiental es el escenario aislante E1 ya que, a pesar de generar más impactos ambientales en la etapa de fabricación del vidrio y el aluminio, este presenta el mejor rendimiento ambiental de todos los escenarios evaluados. Debido a que la producción de energía eléctrica genera grandes cantidades de emisiones de contaminantes con potencial de acidificación terrestre, el ahorro de energía conlleva una disminución en la cantidad de contaminantes emitidos. Se observa que las propiedades fotocatalíticas de los escenarios E4, E7 y E8 les dan una ventaja, dado

que degradan una cantidad perceptible de SO_x y NO_x durante los 40 años del período de estudio. Para observar mejor los beneficios ambientales que trae consigo el uso de estas películas, se analizan aisladamente en la sección “4.5.3 Fotocatálisis y mejoras en la calidad del aire”.

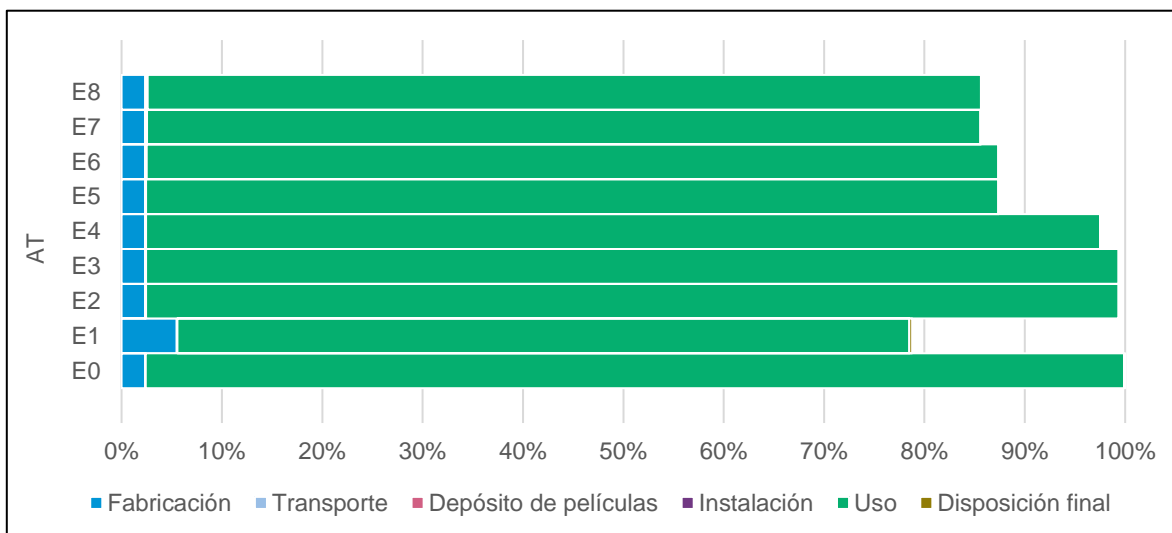


Figura 54. Contribución por etapas al impacto total para la categoría de acidificación terrestre. Evaluación simultánea de todas las propiedades.

Tabla 35. Contribución absoluta en [kg SO₂ eq.] por etapas al impacto total para la categoría de acidificación terrestre. Evaluación simultánea de todas las propiedades.

Escenario	Fabricación	Transporte	Depósito de películas	Instalación	Uso	Disposición final	Total
E0	15,185	18	0	254	622,085	778	638,320
E1	35,044	37	0	528	465,450	1,822	502,881
E2	15,028	24	291	254	618,548	625	634,770
E3	15,054	31	291	254	618,458	625	634,714
E4	15,022	24	291	254	606,774	625	622,990
E5	15,018	23	290	254	541,907	625	558,118
E6	15,038	24	581	254	541,704	625	558,227

E7	15,051	25	871	254	530,021	625	546,848
E8	15,094	33	1,162	254	530,021	625	547,190

4.5.1.8 Cambio climático (CC)

En la Figura 55 y en la Tabla 36 se aprecia la contribución por etapas al impacto total para la categoría de cambio climático. Al igual que la mayoría de las categorías de impacto evaluadas, las fases de fabricación y uso de las ventanas presentan la mayor parte de los impactos generados. Dentro de la etapa de uso, las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) que provocan los módulos de fabricación del vidrio y el aluminio generan notables impactos para esta categoría (46% y 52%, respectivamente, para el caso del escenario E1). Por otro lado, para todos los escenarios, la etapa de uso es la que mayor aportación genera, siendo esta entre el 95% y el 98% de los impactos totales. Dentro de esta etapa, la producción de energía eléctrica es la cual genera las mayores emisiones de GEI. Dentro de este proceso, las emisiones que más potencial de calentamiento global generan son el dióxido de carbono CO₂ (92% de los impactos del módulo), el óxido nitroso N₂O (3%), el metano CH₄ (3%) y el hexafluoruro de azufre SF₆ (0.5%). Como se ha discutido anteriormente, prácticamente todas estas emisiones se deben a la quema de combustibles fósiles para la producción energética de México [106]. Los efectos del mix eléctrico en los impactos ambientales de las categorías seleccionadas se aprecia en la sección “4.6 Análisis de sensibilidad”, en donde tomando en cuenta el mismo edificio, se varía la ubicación geográfica (latitud, temperatura y radiación solar introducidos en el modelo de flujo de energía) y el mix eléctrico para las ciudades de Barcelona, Berlín, Ciudad de México, Monterrey y Zúrich.

Para la categoría de impacto de cambio climático, el escenario que presenta el mejor rendimiento ambiental es el escenario aislante E1, seguido de los escenarios fotocatalíticos E5-E8. A diferencia de otras categorías de impacto, se observa que la presencia de las propiedades fotocatalíticas en las ventanas generan peores rendimientos ambientales. Debido a que estos escenarios descomponen contaminantes que afectan a la calidad del aire (pero no son GEI), y los convierte

en CO₂ y agua, se observa que el proceso fotocatalítico genera más potencial de calentamiento global. Para visualizar de manera más detallada los efectos de la fotocatalisis en el cambio climático, se evalúa un modelo considerando únicamente las propiedades fotocatalíticas de las ventanas inteligentes en la sección “4.5.3 Fotocatalisis y mejoras en la calidad del aire”.

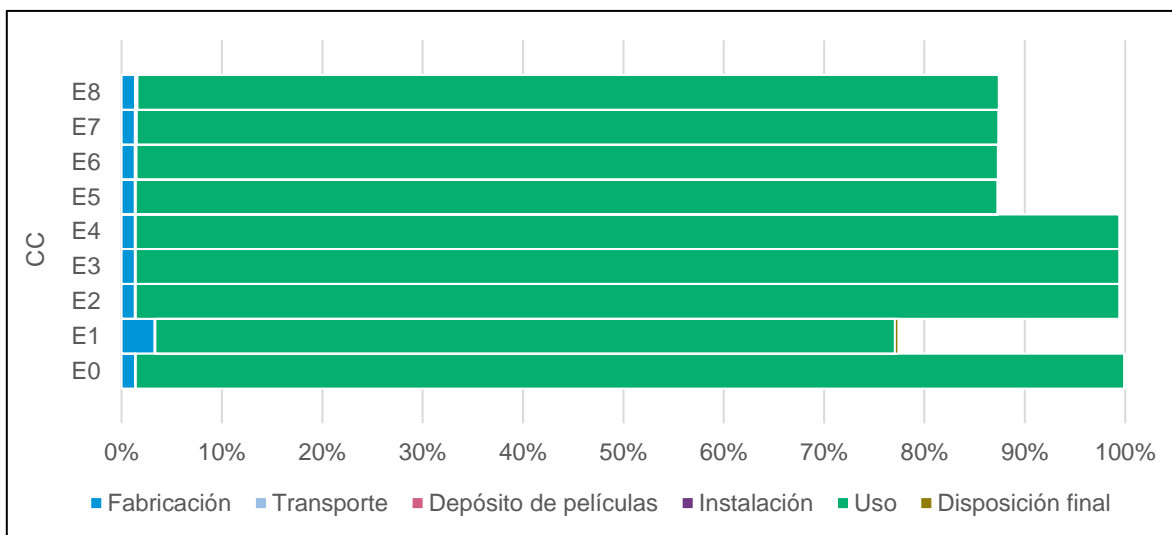


Figura 55. Contribución por etapas al impacto total para la categoría de cambio climático. Evaluación simultánea de todas las propiedades.

Tabla 36. Contribución absoluta en [kg CO₂ eq.] por etapas al impacto total para la categoría de cambio climático. Evaluación simultánea de todas las propiedades.

Esc.	Fabricación	Transporte	Depósito de películas	Instalación	Uso	Disposición final	Total
E0	2,276,416	2,602	0	69,397	164,525,321	168,984	167,042,719
E1	5,498,680	5,282	0	144,168	123,062,505	591,556	129,302,192
E2	2,232,686	3,398	79,375	69,397	163,726,446	129,558	166,240,861
E3	2,239,954	4,443	79,438	69,397	163,707,197	129,558	166,229,987
E4	2,231,260	3,342	79,390	69,397	163,718,381	129,558	166,231,328
E5	2,230,402	3,236	79,361	69,397	143,445,023	129,558	145,956,976

E6	2,235,538	3,413	158,708	69,397	143,389,795	129,558	145,986,410
E7	2,239,254	3,534	238,071	69,397	143,400,979	129,558	146,080,793
E8	2,250,972	4,692	317,474	69,397	143,400,979	129,558	146,173,073

4.5.2 HIDROFOBICIDAD Y AHORROS HÍDRICOS

En esta sección se analizan los resultados de la evaluación de los impactos de ciclo de vida del modelo de la torre TOP tomando en cuenta únicamente las propiedades hidrofóbicas de las ventanas inteligentes. Las categorías de impacto más relevantes para esta propiedad son el potencial de agotamiento de recursos hídricos (ARH), potencial de toxicidad humana (TH) y potencial de cambio climático (CC). Dado que el objetivo de esta sección es evaluar los beneficios que conllevan las cualidades hidrofóbicas de las ventanas inteligentes en comparación con el escenario base. Se observa que, en comparación a la evaluación simultánea de todas las propiedades de las ventanas inteligentes, los beneficios que trae consigo la hidrofobicidad de las ventanas está en una escala mucho menor que los beneficios propiciados por las propiedades termocrómicas de los materiales.

4.5.2.1 Agotamiento de recursos hídricos (ARH)

En la Figura 56 y en la Tabla 37 se aprecia la contribución por etapas al impacto total para la categoría de impacto de agotamiento de recursos hídricos. Se comparan los impactos ambientales del escenario base (E0) con los de los escenarios correspondientes al uso de ventanas inteligentes con tecnologías hidrofóbicas. Se observa que, a diferencia de la evaluación de todas las cualidades de manera simultánea, en esta escala se puede apreciar el efecto que tiene la etapa de depósito de las películas para todos los escenarios representantes a las ventanas inteligentes. Dentro de la etapa de fabricación, lo que más impactos está generando para todos los escenarios evaluados es la fabricación del vidrio, esto debido a que, durante este proceso, la producción del carbonato de sodio (Na_2CO_3) presenta grandes requerimientos hídricos. Alrededor del mundo, uno de los principales usos del carbonato de sodio es para la fabricación de vidrio, por lo que

este es manufacturado comúnmente mediante el proceso Solvay, el cual consiste burdamente en extraer CO_2 de carbonato de calcio y circularlo a través de salmuera (agua con una alta concentración de sales), para la obtención de NaHCO_3 , el cual es calentado para producir el Na_2CO_3 , en conjunto de CO_2 y vapor de agua [121]. Dado que se introduce agua en forma líquida, la cual es evaporada y no regresa al ecosistema del cual se extrajo, este proceso genera un apreciable impacto a la categoría de ARH.

Por otro lado, dentro de la etapa de depósito de las películas, lo que está generando mayor impacto es el uso de energía eléctrica de alto voltaje para todos los procesos dentro de esta etapa, los cuales incluyen el mezclado de la solución precursora, la limpieza ultrasónica del vidrio, la sumersión de los vidrios en la solución, el pretratamiento y el tratamiento térmicos (todo ello con maquinaria industrial). Dentro del depósito de las películas, el tratamiento térmico tiene una gran demanda energética, por lo que se puede ver que los escenarios E6, E7 y E8, los cuales necesitan múltiples tratamientos térmicos presentan los mayores impactos en estas fases de su ciclo de vida. Dentro de la producción de energía eléctrica del mix mexicano, el uso de centrales hidroeléctricas genera impactos grandes en comparación a otras fuentes de energía debido a la gran cantidad de pérdidas por evaporación que se presentan. En la sección [108] se discuten las diferencias entre los mix eléctricos de 5 diferentes ciudades del mundo.

Durante la etapa de uso, la relación másica agua-detergente para la limpieza exterior de la torre es 100 a 1. Dado que se contabiliza tratamiento de aguas residuales y esto disminuye el impacto en ARH, los impactos generados por el uso de agua en la limpieza de la torre son menores que los impactos ambientales de la producción del jabón. Dentro del proceso de manufactura de jabón, se requiere del aceite de coco y de palma, los cuales generan grandes impactos en esta categoría (68% y 25% de los impactos del módulo de fabricación del jabón, respectivamente). Para la obtención de estos aceites, se toma en cuenta una plantación que es fertilizada, pero no irrigada, y la demanda hídrica de estas plantas se suple mediante el uso de agua “verde” y “azul”, las cuales se definen como a los volúmenes de agua

de lluvia evapotranspirados por productos de agricultura y agua superficial que se pierde por evaporación o incorporación al producto, respectivamente [122].

Por último, dentro de la etapa de disposición final, el escenario base E0 muestra impactos mayores que los de los demás escenarios evaluados. Esta fase, a pesar de contribuir con tan sólo el 3% a los impactos totales en el caso del escenario E0, demuestra que el proceso de tratamiento del vidrio mediante incineración de la capa superficial genera considerables cantidades de agua residual (1,420 m³).

Para la categoría de ARH, el uso de ventanas hidrofóbicas demuestra una disminución de alrededor del 80% en los impactos ambientales durante la etapa de uso y mantenimiento de las ventanas exteriores. Tanto el ahorro en agua como la eliminación del uso de jabón para limpiar las ventanas les dan a los escenarios propuestos una considerable ventaja en comparación al escenario base E0. El escenario que mejor rendimiento ambiental presenta para esta categoría es el E4, dado que el impacto que genera la extracción de materias primas y procesamiento de estas para la manufactura del precursor del dióxido de titanio es menor a los impactos generados por la fabricación de los precursores utilizados en el depósito de las otras películas.

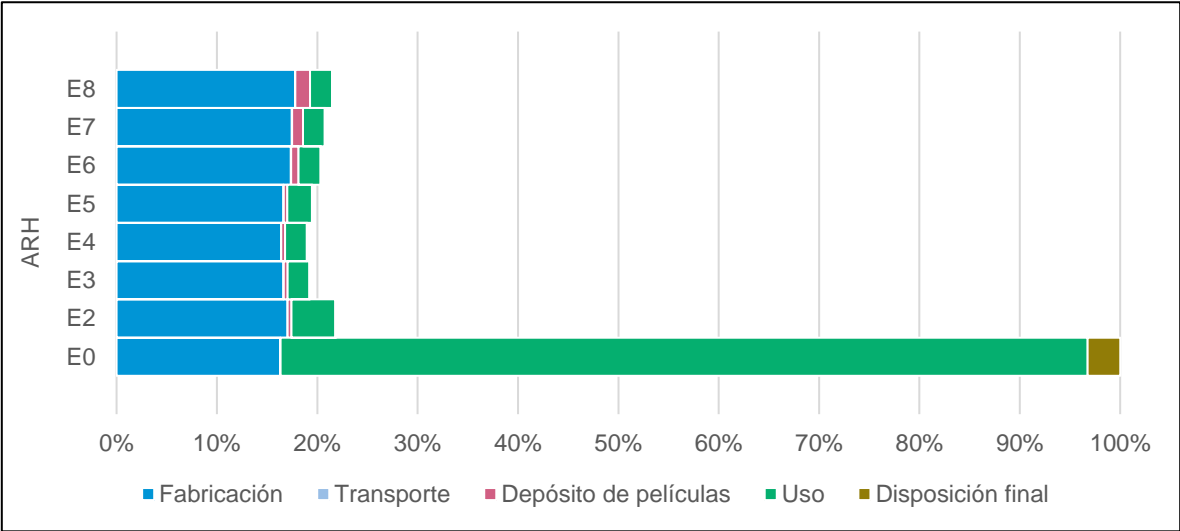


Figura 56. Contribución por etapas al impacto total para la categoría de agotamiento de recursos hídricos. Evaluación de las propiedades hidrofóbicas.

Tabla 37. Contribución absoluta en [m³ agua eq.] por etapas al impacto total para la categoría de impacto de agotamiento recursos hídricos. Evaluación de las propiedades hidrofóbicas.

Escenario	Fabricación	Transporte	Depósito de películas	Instalación	Uso	Disposición final	Total
E0	7,135	7	0	#N/D	35,152	1,421	43,715
E2	7,448	9	159	#N/D	1,916	33	9,564
E3	7,276	12	159	#N/D	958	33	8,437
E4	7,167	9	159	#N/D	958	33	8,325
E5	7,275	8	159	#N/D	1,068	33	8,543
E6	7,597	9	317	#N/D	958	33	8,913
E7	7,632	9	476	#N/D	958	33	9,108
E8	7,780	12	635	#N/D	958	33	9,418

4.5.2.2 Toxicidad humana (TH)

En la Figura 57 y en la Tabla 38 se muestran los impactos ambientales de la evaluación de las propiedades hidrofóbicas de las ventajas inteligentes en comparación al escenario base para la categoría de toxicidad humana. Se aprecia que en el caso del escenario base E0, las etapas de fabricación y uso son las que más impactos generan para esta categoría, mientras que, para los escenarios propuestos correspondientes a las ventanas inteligentes, los impactos ambientales durante la etapa de uso disminuyen, pero el depósito de las películas delgadas y multicapas genera un considerable potencial de toxicidad humana.

Dentro de la etapa de fabricación los impactos generados por todos los escenarios se quedan relativamente constantes debido a que el proceso de fabricación del vidrio genera los mayores impactos, y la cantidad de vidrio utilizada se mantiene entre el escenario base y los escenarios correspondientes a las ventanas inteligentes. La fabricación del vidrio genera impactos considerables en esta

categoría debido a que la producción del carbonato de sodio requerido para la fundición genera grandes emisiones de Manganeso, Arsénico y Bario, materiales con alto potencial de toxicidad humana [121].

Para el caso de la etapa del depósito de las películas, se aprecia que en el caso de los escenarios E2-E5, los impactos son menores que en los escenarios correspondientes a las multicapas (E6-E8). Esto se debe a que después del depósito de cada película, se requiere de un tratamiento térmico a 400°C, por lo que los impactos de esta fase son proporcionales al número de tratamientos térmicos requeridos por cada escenario.

Dentro de la etapa de uso (y al enfocarse en el uso hídrico y no energético), los mayores impactos provienen del uso de jabón, esto debido a la demanda de la industria química, la cual produce emisiones de mercurio al aire durante el proceso de fabricación del jabón. Esto puede deberse a que el módulo utilizado de jabón en Ecoinvent 3.6 se refiere a jabón para uso humano, el cual en ocasiones utiliza yoduro de mercurio como agente blanqueador [123].

Por último, en la etapa de disposición final se observa que los impactos generados por los escenarios propuestos son mayores que los generados por el escenario base E0. Esto se debe a que en el caso del escenario base, el proceso de incineración para tratar el vidrio genera menos potencial de toxicidad humana que el proceso de reciclaje de los escenarios propuestos. Esto se debe a que durante el proceso de reciclaje se emiten mayores cantidades de Manganeso, Arsénico y Plomo, mientras que en el proceso de incineración se emiten mayores cantidades de GEI, los cuales no conllevan un potencial de toxicidad humana.

Al evaluar únicamente las cualidades hidrofóbicas de los distintos escenarios, el que muestra el mejor desempeño ambiental para la categoría de impacto de toxicidad humana es el escenario E4, representando a las películas delgadas de TiO₂. Esto se debe a la combinación de los menores impactos que este material genera durante la etapa de fabricación y a las propiedades hidrofóbicas que este material demostró después del envejecimiento acelerado, dado que en esta sección no se

están contabilizando los impactos ambientales debido a las propiedades fotocatalíticas del material.

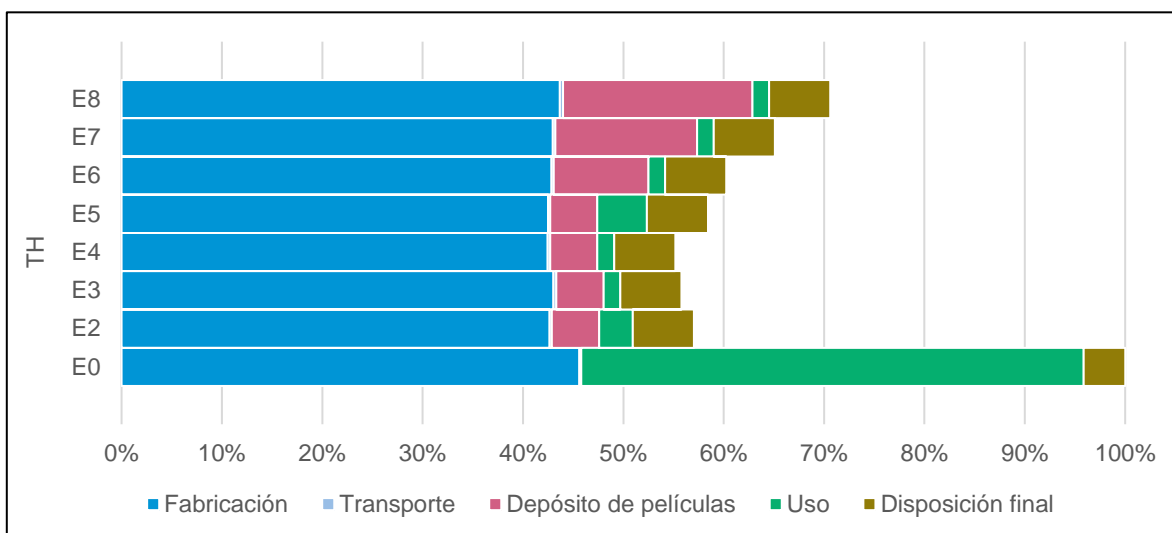


Figura 57. Contribución por etapas al impacto total para la categoría de toxicidad humana. Evaluación de las propiedades hidrofóbicas.

Tabla 38. Contribución absoluta en [kg 1.4-DB eq.] por etapas al impacto total para la categoría de toxicidad humana. Evaluación de las propiedades hidrofóbicas.

Escenario	Fabricación	Transporte	Depósito de películas	Instalación	Uso	Disposición final	Total
E0	247,237	971	0	#N/D	271,212	22,457	541,878
E2	231,117	1,278	25,547	#N/D	18,002	33,008	308,952
E3	233,101	1,680	25,567	#N/D	9,001	33,008	302,357
E4	230,115	1,256	25,552	#N/D	9,001	33,008	298,932
E5	230,170	1,215	25,543	#N/D	26,776	33,008	316,711
E6	232,060	1,283	51,081	#N/D	9,001	33,008	326,432
E7	232,822	1,330	76,624	#N/D	9,001	33,008	352,784
E8	236,621	1,776	102,180	#N/D	9,001	33,008	382,586

4.5.2.3 Cambio climático (CC)

En la Figura 58 y la Tabla 39 se observa la contribución por etapas al impacto en cambio climático tomando en cuenta únicamente las propiedades hidrofóbicas de las ventanas inteligentes. En ellas se observa que el uso de películas y multicapas hidrofóbicas disminuye significativamente los impactos ambientales durante la etapa de uso de las ventanas.

La etapa que más contribuye al cambio climático para todos los escenarios evaluados fue la de fabricación, en la cual no se presentan cambios significativos entre los escenarios. Dentro de esta etapa, el proceso de fabricación del vidrio es que conlleva los mayores impactos ambientales. Esto se debe a que durante el proceso de fundición de las materias primas necesarias para fabricar el vidrio se liberan grandes cantidades de dióxido de carbono. Debido a que en todos los escenarios evaluados se utiliza la misma cantidad y el mismo tipo de vidrio, las ligeras diferencias que se aprecian en esta etapa provienen de los distintos impactos que conlleva la fabricación de los diferentes reactivos.

Dentro de la etapa de depósito de las películas, se observa el mismo comportamiento observado en la categoría de TH. Como se ha discutido anteriormente, dado que el depósito de las multicapas requiere de más energía eléctrica para los tratamientos térmicos, y dado que el mix eléctrico mexicano se basa mayoritariamente en fuentes fósiles, el uso de energía eléctrica conlleva un impacto proporcional en la categoría de cambio climático.

Dentro de la etapa de uso, dado que no se cuantifican los impactos ambientales por el uso energético para climatización, se pueden apreciar los beneficios que traen consigo las propiedades hidrofóbicas de los materiales. Dentro de esta etapa, el proceso que genera mayor potencial de cambio climático es la producción de jabón, dado que este proceso conlleva la emisión de dióxido de carbono proveniente principalmente de la descomposición de la biomasa residual de la obtención del aceite de palma (62% del potencial de cambio climático de este módulo), seguido de la descomposición de la biomasa residual de la obtención del aceite de coco (11%) y de la producción del hidróxido de sodio requerido para la fabricación del

jabón (7%). Esto concuerda con Francke I. et. al., quienes realizaron un análisis de huella de carbono e hídrica al jabón producido en Brasil y obtuvieron resultados similares [122].

En la etapa de disposición final se observan resultados opuestos a la categoría de impacto de toxicidad humana, debido a que el proceso de incineración del vidrio con recubrimiento plástico del escenario base produce una mayor cantidad de dióxido de carbono. Por otro lado, el proceso de reciclaje del vidrio de en el caso de los escenarios que representan a las ventanas inteligentes (E2-E8) prácticamente no provoca potencial de cambio climático.

Para esta categoría de impacto y tomando en cuenta únicamente los beneficios que conllevan las propiedades hidrofóbicas de las ventanas inteligentes, el escenario con el mejor desempeño ambiental es el escenario E4 (película delgada de TiO_2), debido a la combinación de sus cualidades hidrofóbicas después de las pruebas de intemperismo (3.7.4 Análisis de la forma de gota) y a los menores impactos provenientes de su fabricación y transporte. No obstante, los impactos generados por los escenarios E2 y E3 (SiO_2 y ZnO , respectivamente) son prácticamente iguales.

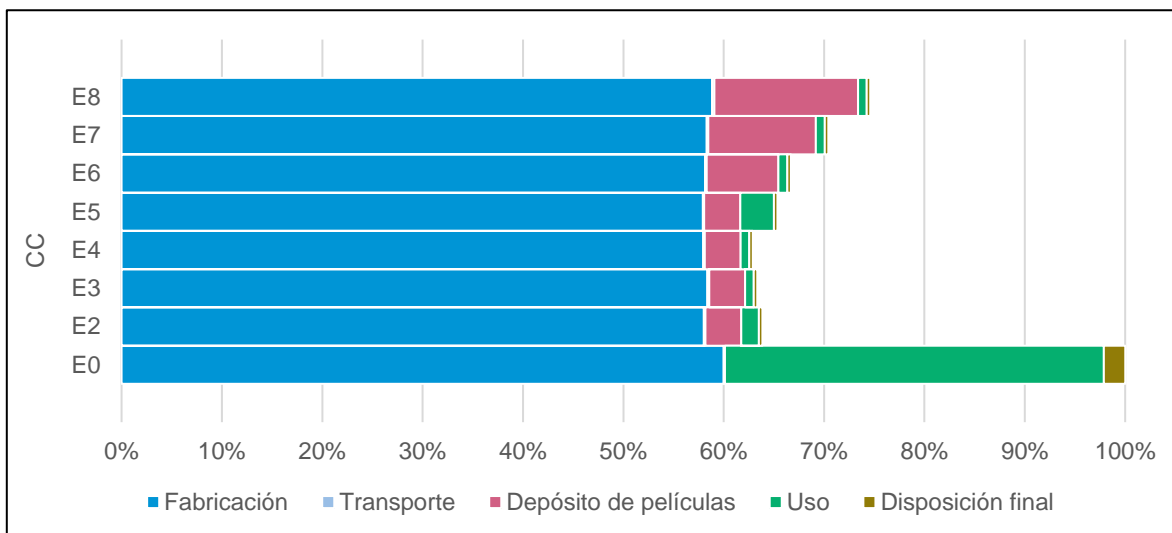


Figura 58. Contribución por etapas al impacto total para la categoría de cambio climático. Evaluación de las propiedades hidrofóbicas.

Tabla 39. Contribución absoluta en [kg CO₂ eq.] por etapas al impacto total para la categoría de cambio climático. Evaluación de las propiedades hidrofóbicas.

Escenario	Fabricación	Transporte	Depósito de películas	Instalación	Uso	Disposición final	Total
E0	1,330,568	2,523	0	#N/D	837,372	47,273	2,217,737
E2	1,286,838	3,320	79,375	#N/D	38,498	7,848	1,415,879
E3	1,294,107	4,364	79,438	#N/D	19,249	7,848	1,405,006
E4	1,285,412	3,264	79,390	#N/D	19,249	7,848	1,395,163
E5	1,284,554	3,157	79,361	#N/D	74,476	7,848	1,449,396
E6	1,289,690	3,335	158,708	#N/D	19,249	7,848	1,478,830
E7	1,292,891	3,455	238,071	#N/D	19,249	7,848	1,561,514
E8	1,305,125	4,614	317,474	#N/D	19,249	7,848	1,654,309

4.5.3 FOTOCATÁLISIS Y MEJORAS EN LA CALIDAD DEL AIRE

En esta sección se analizan los resultados de la evaluación de los impactos de ciclo de vida del modelo de la torre TOP tomando en cuenta únicamente las propiedades hidrofóbicas de las ventanas inteligentes. Se aprecia en la evaluación simultánea de todas las cualidades, que los beneficios que traen consigo las propiedades fotocatalíticas de las ventanas inteligentes impactan de manera significativa a las categorías de impacto de formación de oxidantes fotoquímicos (FOF), acidificación terrestre (AT) y cambio climático (CC), por lo que se eligen estas para la evaluación ambiental tomando en cuenta las propiedades fotocatalíticas y las mejoras en la calidad del aire generadas por las ventanas inteligentes y su comparación con el escenario base. Para esta sección de la discusión se toman en cuenta únicamente los escenarios referentes a las ventanas inteligentes de películas delgadas y multicapas que contengan TiO₂ (E4, E7 y E8) y se compararon con los impactos ambientales del escenario base E0.

4.5.3.1 Formación de oxidantes fotoquímicos (FOF)

Esta categoría de impacto refiere a la capacidad que tienen ciertos contaminantes de contribuir a la formación de oxidantes fotoquímicos (como el ozono) en la atmósfera bajo la influencia de la luz solar. Las principales causas de este efecto es la emisión de COVs o NO_x por medio de fuentes como procesos industriales, escapes de vehículos y el uso de combustibles fósiles. La FOF a nivel troposférico tiene efectos negativos en la salud humana, en la agricultura y en la formación de Smog en las ciudades.

En la Figura 59 y en la Tabla 40 se observa la contribución por etapas a los impactos ambientales en la categoría de FOF de los escenarios en los que se considera actividad fotocatalítica. Se observa que las etapas de fabricación y uso son las más relevantes en este caso. Primeramente, en la etapa de fabricación, el proceso que más impactos genera en esta categoría de impacto es la producción del vidrio y del aluminio, eso debido a que estos procesos requieren de una alta cantidad de energía para fundición del aluminio y del vidrio.

Por otro lado, se aprecia que la etapa de uso genera grandes impactos para los escenarios referentes a las ventanas inteligentes fotocatalíticas. No obstante, estos impactos llevan un signo positivo, lo que quiere decir que en vez de estarse formando oxidantes fotoquímicos, se están degradando los contaminantes precursores de estos. Dentro de la etapa de uso, la degradación de NO_x es lo que más está ayudando a contrarrestar los impactos del ciclo de vida de las ventanas inteligentes para este escenario, sin tomar en cuenta el uso energético para climatización durante el período de estudio para ningún escenario.

Para esta categoría, el escenario E4 es el que presenta el mejor rendimiento ambiental, el cual tiene la ventaja en comparación a los escenarios E7 y E8, debido al número de tratamientos térmicos que estos requieren. Se aprecia que como en la etapa de uso ocurre una degradación de contaminantes que contribuyen a la FOF, los impactos totales para el ciclo de vida de estas ventanas inteligentes sin contabilizar el requerimiento energético para climatización son negativos, es decir,

no sólo se contrarrestan los impactos ambientales para esta categoría, sino se presentan beneficios ambientales del uso de esta tecnología.

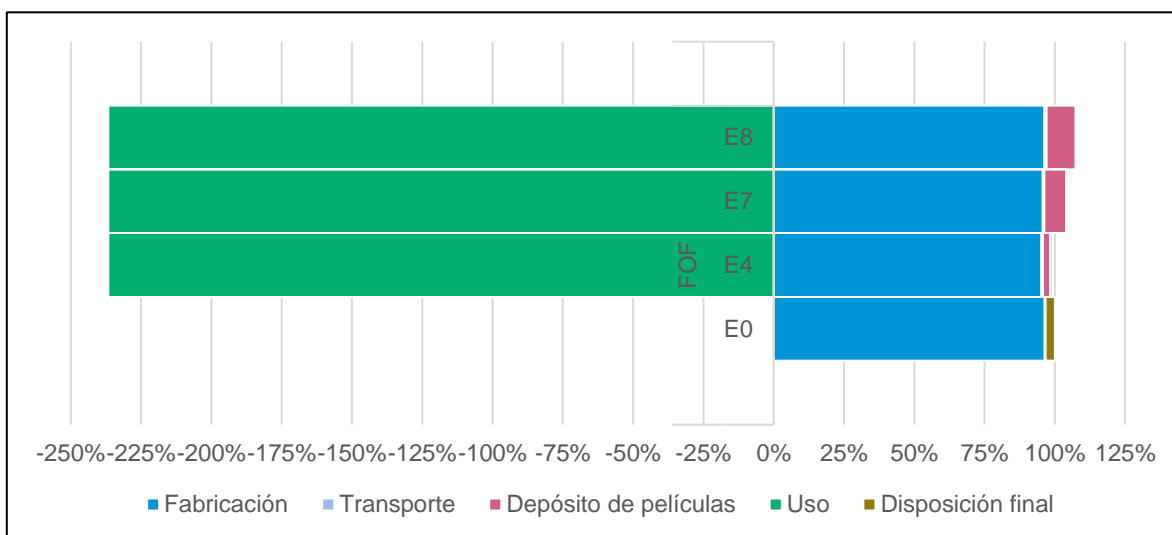


Figura 59. Contribución por etapas al impacto total para la categoría de formación de oxidantes fotoquímicos. Evaluación de las propiedades fotocatalíticas.

Tabla 40. Contribución absoluta en [kg NMCOV eq.] por etapas al impacto total para la categoría de formación de oxidantes fotoquímicos. Evaluación de las propiedades fotocatalíticas.

Escenario	Fabricación	Transporte	Depósito de películas	Instalación	Uso	Disposición final	Total
E0	6,478	26	0	#N/D	0	222	6,727
E4	6,407	34	174	#N/D	-15,917	47	-9,255
E7	6,435	36	522	#N/D	-15,917	47	-8,876
E8	6,477	48	697	#N/D	-15,917	47	-8,648

4.5.3.2 Acidificación Terrestre (AT)

Esta categoría de impacto se refiere a la capacidad de ciertos contaminantes a acidificar los ecosistemas terrestres. La causa primaria para la AT es la precipitación de lluvia ácida, la cual se genera debido a la emisión de contaminantes como el SO₂ y NO_x a la atmósfera. Estas emisiones resultan de distintas actividades antropogénicas como procesos industriales, generación de energía eléctrica y quema de combustibles fósiles, entre otros.

Como se puede observar en la Figura 60 y en la Tabla 41, las etapas con mayor contribución al impacto del ciclo de vida son la de fabricación y uso. Dentro de la fabricación, el proceso de fabricación del vidrio es el que más potencial de acidificación terrestre causa. Como se mencionó anteriormente, la producción del vidrio y del carbonato de sodio generan grandes emisiones de SO₂, molécula con gran potencial de acidificación terrestre [114].

Por otro lado, se observa que la degradación de esta misma molécula debido a la actividad fotocatalítica del escenario durante la etapa de uso contrarresta los impactos para las ventanas inteligentes en esta categoría de impacto.

El escenario que presenta el mayor rendimiento ambiental (sin tomar en cuenta el uso energético para climatización) es el escenario E4, dado que presenta un menor requerimiento energético durante la etapa de depósito de las películas, en comparación a los otros dos escenarios que consideran actividad fotocatalítica.

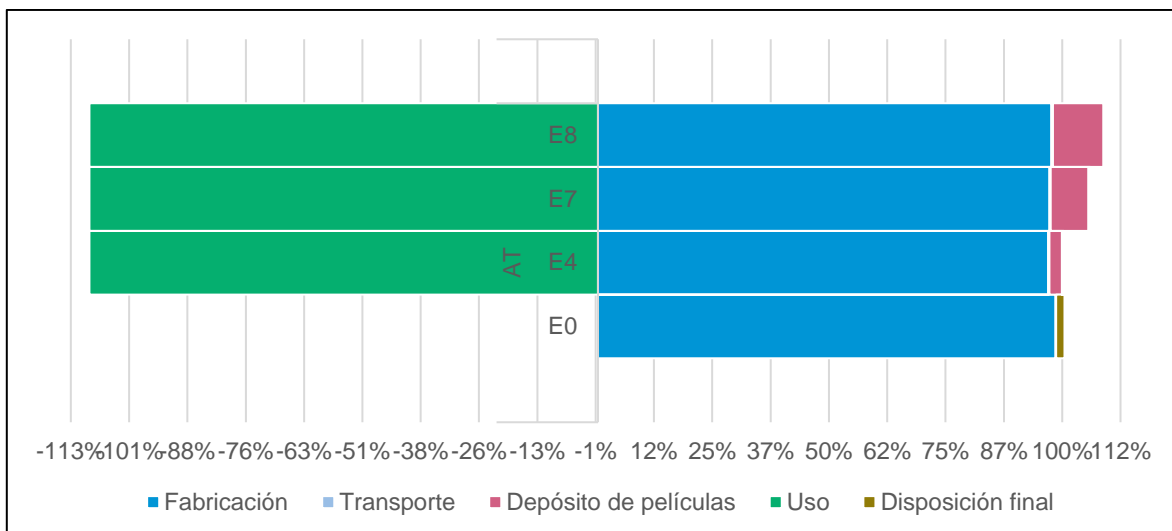


Figura 60. Contribución por etapas al impacto total para la categoría de acidificación terrestre. Evaluación de las propiedades fotocatalíticas.

Tabla 41. Contribución absoluta en [kg SO₂ eq.] por etapas al impacto total para la categoría de acidificación terrestre. Evaluación de las propiedades fotocatalíticas.

Escenario	Fabricación	Transporte	Depósito de películas	Instalación	Uso	Disposición final	Total
E0	10,510	18	0	#N/D	0	192	10,720
E4	10,347	23	291	#N/D	-11,684	40	-982
E7	10,377	24	871	#N/D	-11,684	40	-371
E8	10,420	33	1,162	#N/D	-11,684	40	-29

4.5.3.3 Cambio climático (CC)

En la Figura 61 y en la Tabla 42 se aprecia la contribución de las etapas al impacto de ciclo de vida para la categoría de impacto de cambio climático. Se observa que para todos los escenarios evaluados, la etapa de fabricación es la que tiene mayor contribución a los impactos totales, seguida de la disposición final en el caso del escenario base y el depósito de las películas en el caso de los escenarios

correspondientes a las ventanas inteligentes. Como se ha mencionado previamente, la manufactura del vidrio dentro de la etapa de fabricación genera considerables emisiones de GEI debido a la fabricación del carbonato de sodio y al requerimiento energético de los hornos de fundición de los materiales precursores del vidrio [114].

Por otro lado, dentro de la etapa de disposición final, el vidrio tradicional requiere de un proceso de incineración para eliminar el recubrimiento plástico reflejante, mientras que, para los escenarios propuestos, al no necesitar de este recubrimiento, va directamente al proceso de reciclaje, el cual conlleva menores emisiones de CO₂ y de otros GEI.

Por último, se observa que, debido al requerimiento energético de la etapa del depósito de las películas, los escenarios propuestos generan un mayor potencial de calentamiento global que el escenario base. Es decir, para la categoría de cambio climático el escenario que tiene el mejor rendimiento ambiental considerando únicamente las propiedades fotocatalíticas es el escenario base, debido a que se degradan contaminantes que no son GEI y se produce CO₂, entre otros productos. Se observa que, para esta categoría de impacto, no es conveniente el uso de materiales que sólo tengan propiedades fotocatalizadoras.

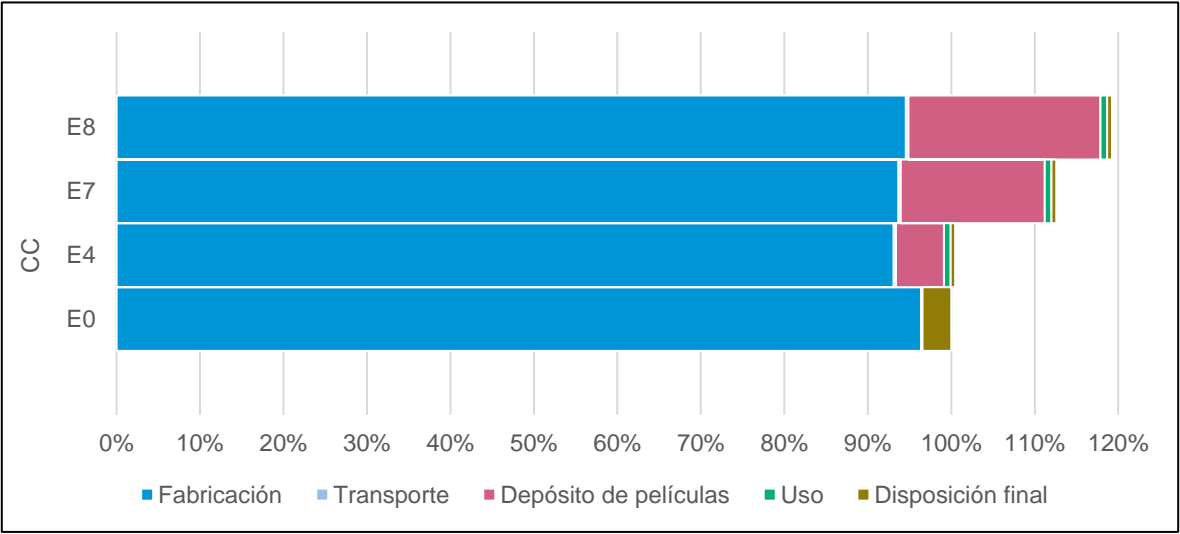


Figura 61. Contribución por etapas al impacto total para la categoría de cambio climático. Evaluación de las propiedades fotocatalíticas.

Tabla 42. Contribución absoluta en [kg CO₂ eq.] por etapas al impacto total para la categoría de cambio climático. Evaluación de las propiedades fotocatalíticas.

Escenario	Fabricación	Transporte	Depósito de películas	Instalación	Uso	Disposición final	Total
E0	1,330,568	2,523	0	#N/D	0	47,273	1,380,365
E4	1,285,412	3,264	79,390	#N/D	11,184	7,848	1,387,098
E7	1,293,407	3,455	238,071	#N/D	11,184	7,848	1,553,965
E8	1,305,125	4,614	317,474	#N/D	11,184	7,848	1,646,244

4.5.4 TERMOCROMICIDAD Y AHORROS ENERGÉTICOS

Dado que en la evaluación simultánea se observa que la energía eléctrica de bajo voltaje utilizada para climatización durante el período de estudio tiene grandes impactos para la mayoría de las categorías de impacto evaluadas, en esta sección se evalúan las cualidades termocrómicas y aislantes de las ventanas aisladamente. Con este fin se discuten las categorías de impacto de ecotoxicidad en agua dulce (EAD), agotamiento de metales (AM) y cambio climático (CC), dado que estas fueron las más relevantes para la evaluación ambiental tomando en cuenta las propiedades termocrómicas y los ahorros energéticos generados por las ventanas inteligentes y su comparación con el escenario base. En esta sección de la evaluación se toman en cuenta únicamente los escenarios con cualidades termocrómicas o aislantes (E1, E5-E8), y se comparan con el escenario base E0.

Se observa que los ahorros energéticos son los que generan los mayores efectos en los impactos del ciclo de vida de todos los escenarios, por lo que las propiedades termocrómicas son las más relevantes de las tres distintas cualidades evaluadas. Por esta razón, y para observar el efecto del cambio de las condiciones geográficas en los ahorros energéticos de los distintos escenarios, se realiza un análisis de sensibilidad (sección “4.6 Análisis de sensibilidad”) tomando en cuenta únicamente

las propiedades termocrómicas de las ventanas, variando la ubicación del proyecto a distintas ciudades del mundo. Esto con el objetivo de ver qué escenario presenta el mejor rendimiento ambiental en cada una de las ubicaciones geográficas modeladas.

4.5.4.1 Ecotoxicidad en agua dulce (EAD)

En la Figura 62 y en la Tabla 43 se observa la contribución de las distintas etapas al impacto ambiental de los distintos escenarios evaluados para la categoría de impacto de ecotoxicidad en agua dulce. Se observa (en comparación a la evaluación aislada de las otras propiedades) que la etapa de uso genera la mayor parte de los impactos generados en esta categoría de impacto (entre el 75% y el 92% de los impactos totales). Dentro de la etapa de uso, la generación de energía eléctrica es la que mayor potencial de ecotoxicidad de agua dulce genera debido a las emisiones de iones de cobre provenientes de la paulatina degradación de la red durante la operación de la infraestructura eléctrica y de la transformación de energía eléctrica de alto a bajo voltaje, dado que se reflejan como emisiones a largo plazo [106].

Dentro de la etapa de disposición final, el proceso que ocasiona los mayores impactos en esta categoría es el tratamiento del aluminio residual mediante la recolección, separación, limpieza y prensado. Dado que el escenario E1 requiere una mayor cantidad de aluminio para su marco que el escenario base E0 y que los escenarios propuestos E5-E8, el impacto generado para este escenario al final de su vida útil contrarresta los ahorros energéticos que se presentan durante la etapa de uso. Esto se debe a que durante el proceso de reciclaje del aluminio se liberan al suelo altas cantidades de iones de cobre, plata y níquel, contaminantes que poseen un gran potencial de ecotoxicidad en agua dulce.

El escenario que presenta los mejores rendimientos ambientales para esta categoría de impacto y tomando en cuenta únicamente las propiedades termocrómicas de las ventanas inteligentes es el escenario E5, el cual tiene la ventaja sobre los demás escenarios termocrómicos debido a su menor requerimiento durante el tratamiento térmico dentro de la etapa del depósito de las películas. Dado que el tratamiento del vidrio residual genera un alto impacto en la

etapa de disposición final, las ventanas inteligentes que poseen una capa de vidrio muestran mejor rendimiento ambiental que el escenario de las ventanas aislantes de doble capa de vidrio (E1).

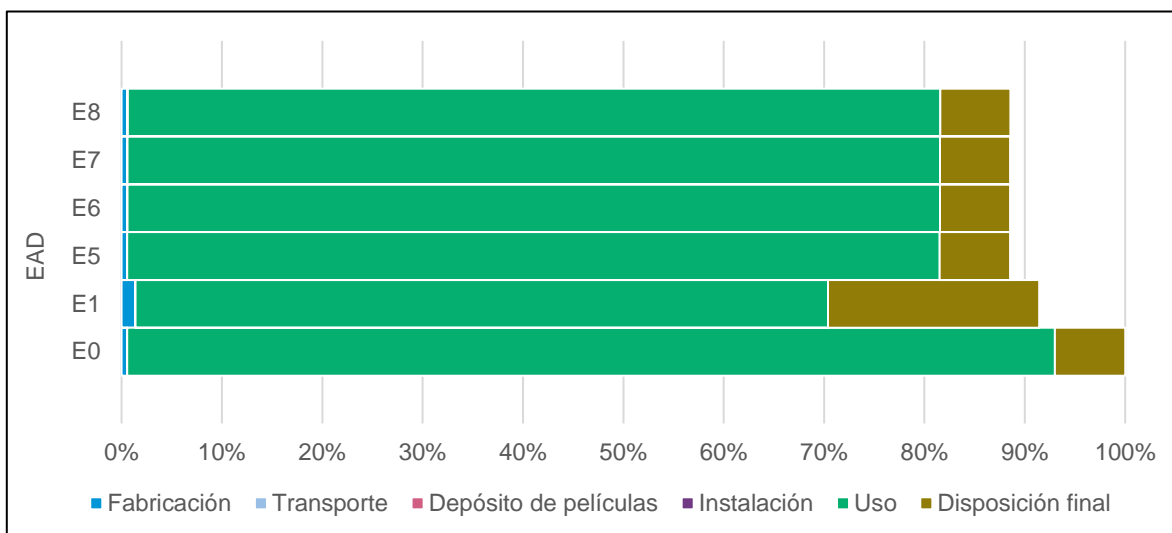


Figura 62. Contribución por etapas al impacto total para la categoría de ecotoxicidad en agua dulce. Evaluación de las propiedades termocrómicas.

Tabla 43. Contribución absoluta en [kg P eq.] por etapas al impacto total para la categoría de ecotoxicidad en agua dulce. Evaluación de las propiedades termocrómicas.

Esc.	Fabricación	Transporte	Depósito de películas	Instalación	Uso	Disposición final	Total
E0	45,985	38	0	721	7,572,333	574,041	8,193,118
E1	112,291	76	0	1,498	5,654,231	1,723,543	7,491,639
E5	45,587	47	825	721	6,632,434	572,639	7,252,253
E6	45,733	49	1,649	721	6,632,434	572,639	7,253,226
E7	45,827	51	2,473	721	6,632,434	572,639	7,254,146
E8	46,176	68	3,298	721	6,632,434	572,639	7,255,337

4.5.4.2 Agotamiento de metales (AM)

En la Figura 63 y en la Tabla 44 se muestra la contribución por etapas al impacto total para la categoría de agotamiento de metales, considerando únicamente las propiedades termocrómicas y aislantes de las ventanas inteligentes, en comparación con el escenario base. Se aprecia que la mayor parte de los impactos ambientales de esta categoría provienen de las etapas de fabricación, uso y disposición final.

Como se discutió en la evaluación simultánea de las propiedades de las ventanas inteligentes, dentro de la etapa de fabricación, los procesos que ocasionan los mayores impactos a la categoría de AM son la fabricación del vidrio y del aluminio debido al requerimiento de oro que posee el módulo de Ecoinvent 3.6 [64] referente a la operación de la mina de zinc y a la demanda de aluminio, respectivamente. Como se puede observar, dado que el escenario E1 requiere doble de vidrio y el triple de aluminio, los impactos de esta fase para este escenario son mayores que los de la misma fase para los demás escenarios evaluados.

Dentro de la etapa de uso, el proceso que mayor potencial de AM causa es el uso de energía eléctrica del mix mexicano. Esto debido al requerimiento de cobre para la construcción y operación de la red eléctrica, así como para la transformación de alto voltaje a bajo voltaje.

Finalmente, dentro de la etapa de disposición final, el proceso del tratamiento del aluminio es el que genera los mayores impactos para todos los escenarios evaluados. Por esta razón, y debido al mayor requerimiento de aluminio del escenario E1, los impactos en esta fase son tres veces más grandes que los impactos para los demás escenarios.

Para esta categoría de impacto, y considerando únicamente las propiedades termocrómicas y aislantes de las ventanas inteligentes, el escenario E5 es el que presenta el mejor rendimiento ambiental. Al igual que para la categoría de impacto de EAD, esto se debe al menor requerimiento energético del depósito de películas delgadas en comparación con el depósito de las multicapas, las cuales requieren

de un mayor número de tratamientos térmicos y consecuentemente, tienen un requerimiento energético mayor. Para esta categoría, el uso de ventanas aislantes no es conveniente, dado que los beneficios que ocasionan los ahorros energéticos del escenario E1 durante su etapa de uso no llegan a contrarrestar los impactos generados durante las etapas de fabricación y disposición final.

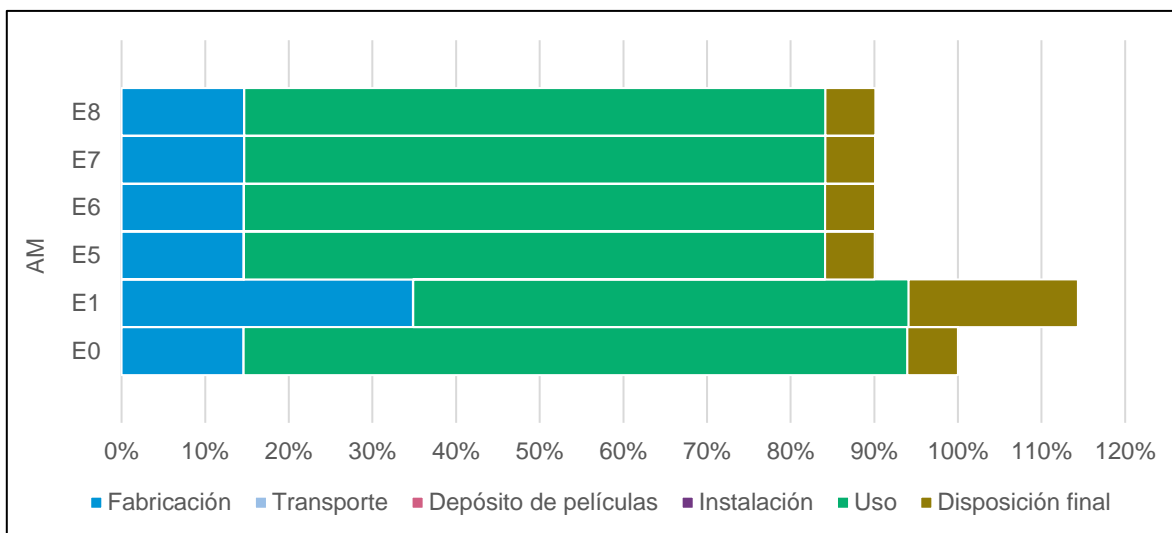


Figura 63. Contribución por etapas al impacto total para la categoría de agotamiento de metales. Evaluación de las propiedades termocrómicas.

Tabla 44. Contribución absoluta en [kg Fe eq.] por etapas al impacto total para la categoría de agotamiento de metales. Evaluación de las propiedades termocrómicas.

Esc.	Fabricación	Transporte	Depósito de películas	Instalación	Uso	Disposición final	Total
E0	601,333	125	0	327	3,266,681	249,044	4,117,510
E1	1,434,692	254	0	679	2,439,218	834,258	4,709,100
E5	601,611	155	374	327	2,861,211	244,966	3,708,644
E6	601,866	164	748	327	2,861,211	244,966	3,709,282
E7	602,042	170	1,122	327	2,861,211	244,966	3,709,838
E8	602,661	225	1,496	327	2,861,211	244,966	3,710,887

4.5.4.3 Cambio climático (CC)

En la Figura 64 y en la Tabla 45 se presenta la contribución por etapas al impacto total para la categoría de cambio climático, considerando únicamente las propiedades termocrómicas y aislantes de las ventanas inteligentes. Se observa que la etapa que genera la mayor parte de los impactos ambientales es la de uso (entre el XX% y el XX% de los impactos totales para esta categoría). Como se ha discutido anteriormente, esto se debe mayoritariamente al suministro de energía eléctrica proveniente del mix eléctrico mexicano, dado que este tiene una alta dependencia de la quema de combustibles fósiles, los cuales emiten grandes cantidades de CO₂ y otros GEI a la atmósfera [106].

Para esta categoría, el escenario E1, que representa a las ventanas aislantes, presenta el mejor rendimiento ambiental. A pesar de que este escenario presenta los mayores impactos dentro de la etapa de fabricación debido a su mayor demanda de aluminio y vidrio, los ahorros energéticos que presenta en su etapa de uso los contrarrestan. Dado que sólo se están evaluando las propiedades termocrómicas de los materiales, se observa que en comparación a la sección “4.5.1.8 Cambio climático (CC)”, estos resultados no muestran diferencias significativas entre los escenarios E5, E6, E7 y E8. Por esta razón, en el análisis de sensibilidad únicamente considera a los escenarios E0, E1 y E5 para su evaluación.

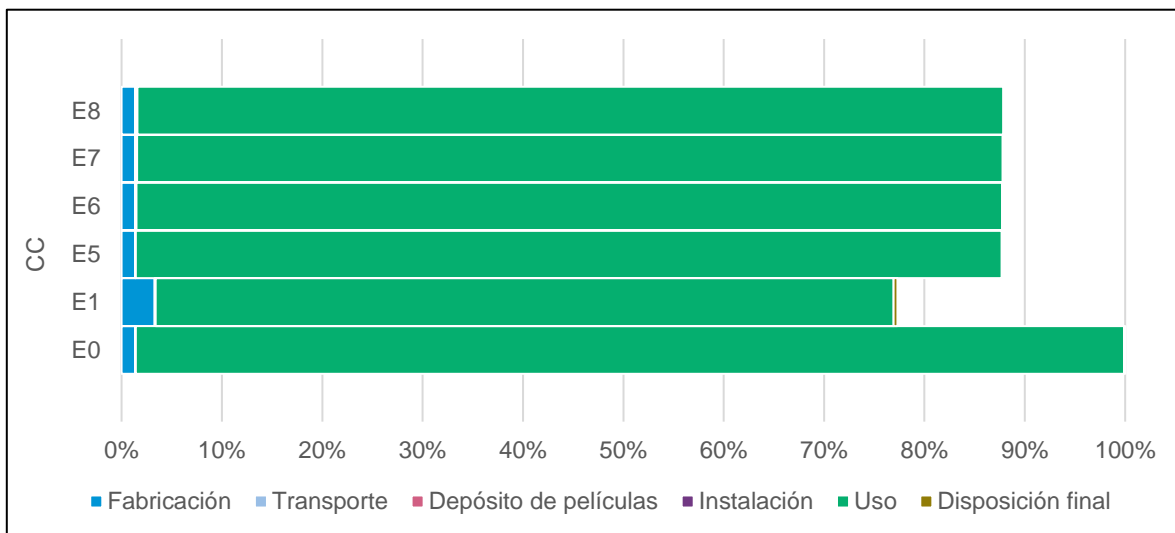


Figura 64. Contribución por etapas al impacto total para la categoría de cambio climático. Evaluación de las propiedades termocrómicas.

Tabla 45. Contribución absoluta en [kg CO₂ eq.] por etapas al impacto total para la categoría de cambio climático. Evaluación de las propiedades termocrómicas.

Esc.	Fabricación	Transporte	Depósito de películas	Instalación	Uso	Disposición final	Total
E0	2,276,416	2,602	0	69,397	163,687,948	168,984	166,205,347
E1	5,498,680	5,282	0	144,168	122,225,133	591,556	128,464,820
E5	2,230,402	3,236	79,361	69,397	143,370,546	129,558	145,882,500
E6	2,235,538	3,413	158,708	69,397	143,370,546	129,558	145,967,161
E7	2,239,254	3,534	238,071	69,397	143,370,546	129,558	146,050,360
E8	2,250,972	4,692	317,474	69,397	143,370,546	129,558	146,142,640

4.6 Análisis de sensibilidad

Dado que las propiedades termocrómicas y los ahorros energéticos son las que más están influenciando los resultados de la evaluación de impacto ambiental de las películas, se realizó un análisis de sensibilidad en el cual se comparan los impactos ambientales de los escenarios E0, E1 y E5 al aplicar el modelo de flujo energético para el mismo edificio en distintas ciudades alrededor del mundo. Se eligieron ciudades que tuvieran distintas latitudes en el hemisferio norte para analizar los efectos de la variación en temperatura exterior, radiación solar y proveniencia de la electricidad puedan tener en el desempeño ambiental de las ventanas termocrómicas en comparación con las aislantes y tradicionales. En cada caso, se cambió el módulo de Ecoinvent utilizado en cuanto a la energía eléctrica para que correspondiera con el de cada país. En la Figura 65 y en la Tabla 46 se muestra el resumen de los efectos de este análisis de sensibilidad en las tres categorías totales

de punto final, las cuales normalizan dentro todas las categorías de impacto de punto medio dentro de ReCiPe 2008. Los resultados por cada categoría de impacto de punto medio se analizan en su respectiva sección. Se puede apreciar, que cuando se aplican los escenarios en la ciudad de Zúrich, se generan los menores impactos ambientales, en promedio. Dentro de las categorías de impacto evaluadas, se aprecia que esta ciudad tiene los mayores impactos ambientales para la categoría de ARH, pero en todas las demás categorías de impacto evaluadas, esta ciudad representa los menores impactos ambientales para los tres escenarios. Esto concuerda con lo reportado por Pfister et. al. [108], quienes mencionan que la producción de energía eléctrica por medio de fuentes fósiles genera en su mayoría peores daños ambientales que la producción de energía por medio de centrales hidroeléctricas. Se observa que, debido a las distintas condiciones climáticas (temperatura y radiación solar) que se presentan en cada ciudad, la diferencia entre los impactos generados por el escenario base E0, el escenario de ventana aislante E1 y el escenario referente a la ventana inteligente termocrómica E5 van variando. Esto es de especial importancia para el caso de Zúrich, en donde a diferencia de las otras 4 ciudades, el escenario aislante E1 conlleva mayores impactos que en los otros dos escenarios evaluados. Para observar la diferencia que se presenta dentro de cada una de las categorías de impacto seleccionadas previamente, en esta sección final del capítulo se realiza la discusión de resultados por categoría de impacto, en donde no sólo se elabora sobre las diferencias en el mix eléctrico de cada país, sino también sobre las diferencias en demanda energética de cada escenario, provenientes de la modelación del flujo de energía en edificios reaqlizada en la sección “4.3.3.4 Modelación de flujos de energía en edificios”.

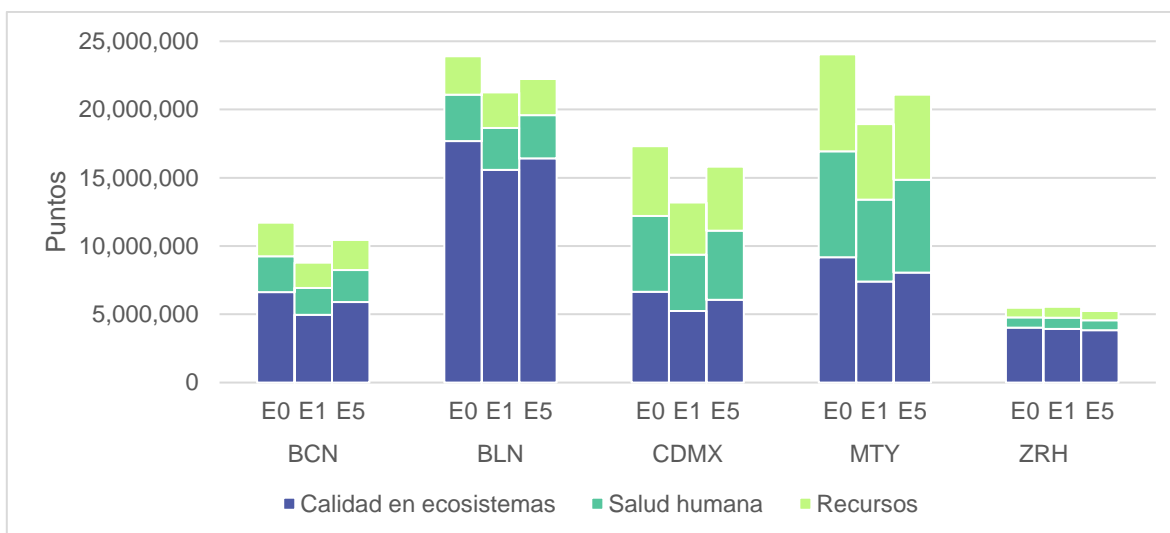


Figura 65. Síntesis de los impactos ambientales de punto final a la calidad de ecosistemas, salud humana y recursos, en puntos, por ciudad. Evaluación de las propiedades termocrómicas.

Tabla 46. Síntesis de los impactos ambientales de punto final, sumatoria total, en puntos, por ciudad. Evaluación de las propiedades termocrómicas.

Escenario	Barcelona (BCN)	Berlín (BLN)	Ciudad de México (CDMX)	Monterrey (MTY)	Zúrich (ZRH)
E0	11,717,540	23,905,669	17,318,682	24,043,151	5,477,134
E1	8,789,078	21,249,941	13,181,985	18,923,155	5,540,592
E5	10,453,139	22,231,886	15,802,201	21,095,610	5,234,068

4.6.1 AGOTAMIENTO DE RECURSOS HÍDRICOS (ARH)

En la Figura 66 y en la Tabla 47 se presentan los impactos por ciudad para la categoría de ARH. Se observa que, en el caso de Zúrich, los impactos generados para la categoría de impacto de ARH son mucho más grandes que los impactos generados en cualquiera de las otras ciudades evaluadas. Esto se debe a que el mix eléctrico de suiza tiene un alto porcentaje de producción de energía eléctrica a partir de plantas hidroeléctricas, dado que en este país existe una abundancia de

agua. Esto concuerda con lo reportado por Stephan Pfister et. al. [108], quienes reportan que en países con abundancia de agua (como Brasil, Canadá, Congo o Suiza), presentan los mayores consumos de agua para sus plantas hidroeléctricas, sin embargo, los daños ambientales se presentan en mayor escala en países que cuentan con centrales hidroeléctricas y simultáneamente tienen alto estrés hídrico (como Pakistán, Afganistán, Egipto y Perú). Para las ciudades de Monterrey y Ciudad de México, el módulo de Ecoinvent 3.6 para el mix eléctrico mexicano no cuenta con un porcentaje de producción eléctrica a partir de centrales hidroeléctricas tan alto como suiza (en 2014, México tuvo un consumo energético proveniente de fuentes hidroeléctricas del 4.9%, mientras que en suiza este fue de hasta el 30% [120]), sin embargo, según lo reportado en la literatura, al considerar el estrés hídrico de cada localidad, México muestra mayores riesgos que Suiza.

Para esta categoría, el escenario que muestra los mejores resultados en todas las ciudades evaluadas es el escenario E1, el cual representa a las ventanas aislantes. Esto es debido a la menor demanda energética que presenta este escenario en comparación con el escenario termocrómico y el escenario base, calculada previamente mediante los modelos de flujo de energía en edificios. Para todas las ciudades analizadas, el escenario termocrómico E5 presenta un mejor rendimiento ambiental que el escenario base E0, pero menor que el escenario E1.

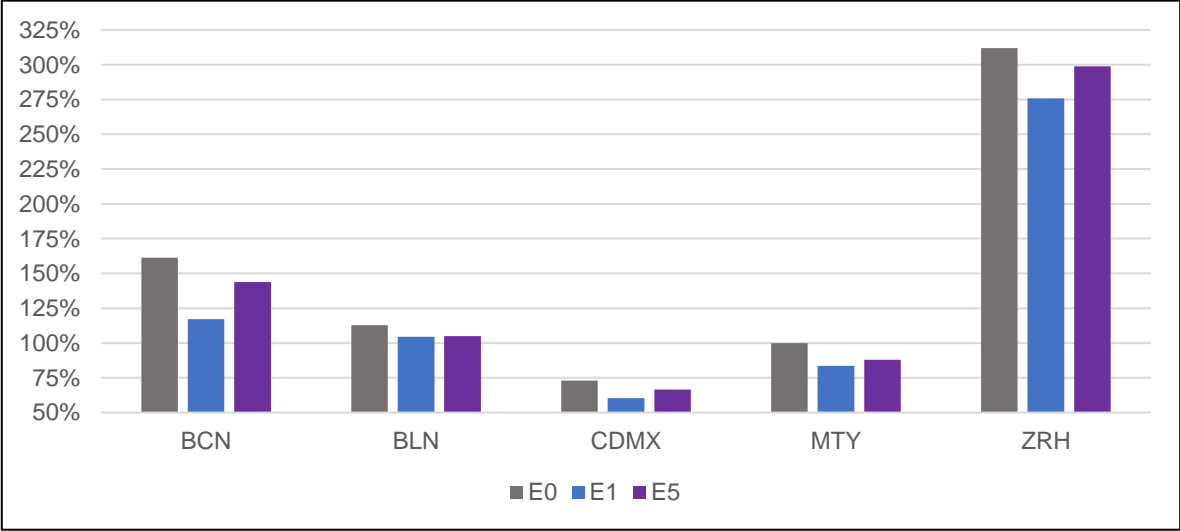


Figura 66. Impactos normalizados para la categoría de impacto de agotamiento de recursos hídricos, por ciudad. Evaluación de las propiedades termocrómicas.

Tabla 47. Impactos absolutos en [m³ agua eq.] para la categoría de impacto de agotamiento de recursos hídricos, por ciudad. Evaluación de las propiedades termocrómicas.

Escenario	Barcelona (BCN)	Berlín (BLN)	Ciudad de México (CDMX)	Monterrey (MTY)	Zúrich (ZRH)
E0	573,874	401,030	259,277	355,789	1,110,020
E1	416,964	371,373	214,739	297,138	981,414
E5	511,888	373,117	236,903	312,876	1,063,532

4.6.2 TOXICIDAD HUMANA (TH)

En la Figura 67 y en la Tabla 48 se muestran los impactos para las distintas ciudades para la categoría de toxicidad humana. En comparación a la categoría anterior (y similarmente a todas las categorías siguientes), se observa que los impactos para los tres escenarios evaluados en el caso de Zúrich son menores que los de las otras cuatro ciudades. Esto refleja las ventajas que muestra el uso de la energía hidroeléctrica en comparación a otras fuentes no renovables. En 2014, alrededor del 80% del consumo energético de Alemania provenía de fuentes fósiles: 36% del petróleo, 26% del carbón y 21% del gas natural. En comparación, para el caso de México, estos porcentajes fueron 49% petróleo, 7% carbón y 37% gas natural. Para el caso de España, 44% petróleo, 9% carbón y 18% gas natural. Por otro lado, en Suiza estos porcentajes fueron alrededor del 38% para petróleo, 0.5% para el carbón y 9% para el gas natural [124].

La Comisión Europea de Economía de Naciones Unidas (UNECE), reportó en 2021 mediante un Análisis de Ciclo de Vida comparativo de distintos métodos de generación de energía [125] que, para la categoría de toxicidad humana, la quema de carbón genera grandes emisiones de arsénicos provenientes de los relaves

mineros relacionados con la extracción del carbón y el cobre. Estas mismas emisiones se muestran dominantes especialmente en los escenarios modelados en Berlín.

Dentro de todas las ciudades evaluadas, los escenarios muestran los mejores rendimientos ambientales para Zúrich, en donde los tres escenarios generan únicamente el 20% de los impactos en comparación al escenario base localizado en Monterrey. Para el caso de Berlín, y debido a la superior demanda de carbón para la producción de energía eléctrica, los escenarios E0 y E5 generan mayores impactos que el escenario base en Monterrey.

Se aprecia que el uso de tecnologías termocrómicas y de ventanas aislantes es más conveniente en México, esto debido a la combinación de que el mix eléctrico mexicano tiene una baja contribución de energías renovables y a que debido a la latitud y clima en el que se encuentran las ciudades de México y Monterrey, la disminución de radiación solar y aislamiento térmico generan mayores diferencias que en otros países.

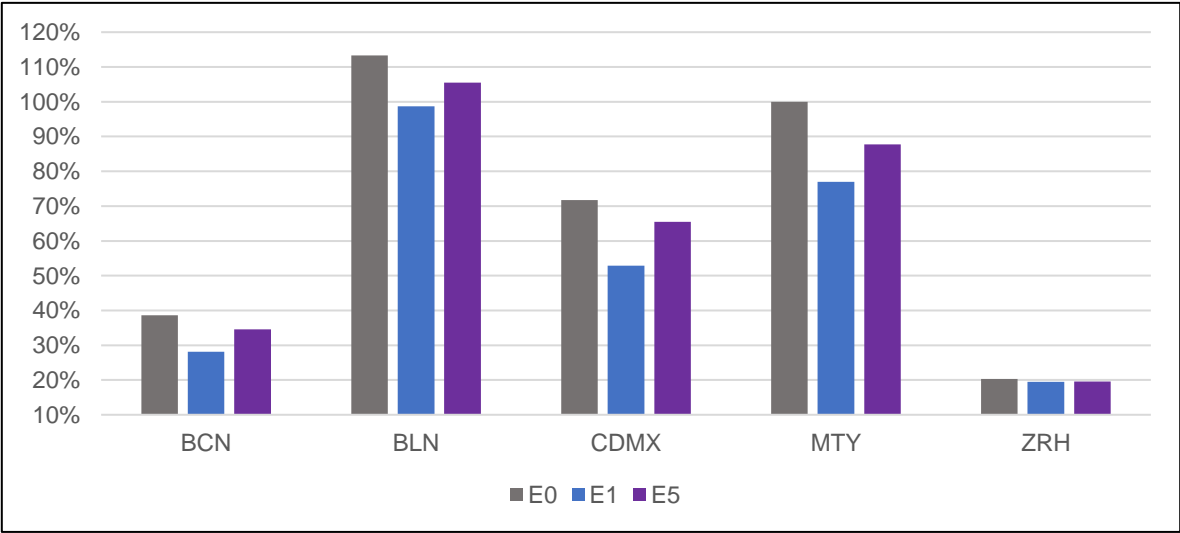


Figura 67. Impactos normalizados para la categoría de impacto de toxicidad humana, por ciudad. Evaluación de las propiedades termocrómicas.

Tabla 48. Impactos absolutos en [kg 1.4-DB eq.] para la categoría de impacto de toxicidad humana, por ciudad. Evaluación de las propiedades termocrómicas.

Escenario	Barcelona (BCN)	Berlín (BLN)	Ciudad de México (CDMX)	Monterrey (MTY)	Zúrich (ZRH)
E0	23,679,954	69,480,393	43,970,031	61,312,010	12,459,425
E1	17,214,911	60,534,927	32,407,077	47,213,190	11,919,763
E5	21,169,247	64,675,610	40,164,418	53,815,784	11,980,920

4.6.3 FORMACIÓN DE MATERIA PARTICULADA (FMP)

En la Figura 68 y la Tabla 49 se muestran los impactos por ciudad para la categoría de impacto de formación de materia particulada, considerando solamente las propiedades aislantes y termocrómicas de los escenarios E1 y E5, respectivamente en comparación al escenario base E0. Se observa que, comparando entre ciudades, los impactos generados por los tres escenarios para la Ciudad de México y Monterrey son mayores que las otras ciudades. Como se discutió anteriormente, el mix eléctrico mexicano proviene aproximadamente en un 49% de la quema de petróleo para la producción de energía. En comparación a todas las emisiones directas e indirectas (dentro del ciclo de vida) de distintas fuentes de energía, la quema de petróleo genera las mayores cantidades de emisiones de material particulado, seguido de la quema de carbón [106]. Este mismo comportamiento se refleja en los resultados de los distintos modelos de Ciclo de Vida, mostrando que dentro del proceso de producción eléctrica de bajo voltaje para México, el 54% de los impactos del módulo para esta categoría provienen de la emisión de partículas $PM_{2.5}$.

Por otro lado, se observa que para el caso de Zúrich, el escenario que muestra el mejor desempeño ambiental es el escenario termocrómico E5, mientras que el escenario aislante E1 muestra mayores impactos incluso que el escenario base E0. Dado que la energía eléctrica del mix suizo es la que mayor contribución de energías renovables tiene, las emisiones de material particulado por el uso energético son mucho menores que en otros países, por lo que la diferencia entre los tres escenarios evaluados es muy pequeña. Debido a esto, las emisiones de materia particulada que se producen durante la producción del vidrio y del marco de aluminio provocan que el escenario E1 tenga un peor rendimiento ambiental.

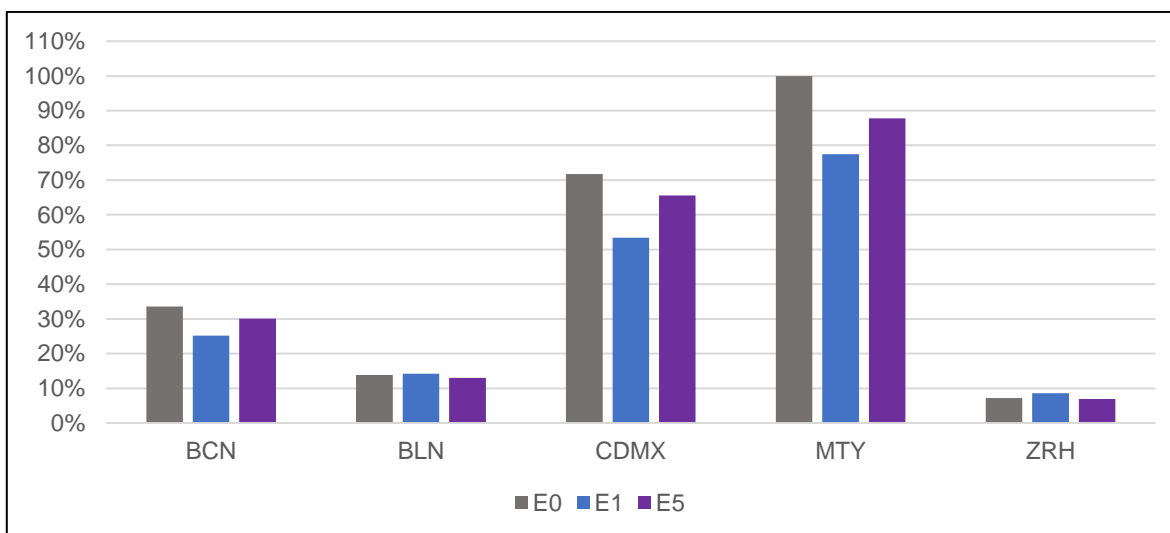


Figura 68. Impactos normalizados para la categoría de impacto de formación de materia particulada, por ciudad. Evaluación de las propiedades termocrómicas.

Tabla 49. Impactos absolutos en [kg PM10 eq.] para la categoría de impacto de formación de materia particulada, por ciudad. Evaluación de las propiedades termocrómicas.

Escenario	Barcelona (BCN)	Berlín (BLN)	Ciudad de México (CDMX)	Monterrey (MTY)	Zúrich (ZRH)
E0	139,699	57,727	298,350	415,590	29,910
E1	104,576	59,261	221,791	321,888	35,640
E5	124,929	54,008	272,481	364,771	28,834

4.6.4 ECOTOXICIDAD EN AGUA DULCE (EAD)

En la Figura 69 y en la Tabla 50 se muestran los impactos de las propiedades aislantes y termocrómicas para distintas ciudades en la categoría de impacto de ecotoxicidad en agua dulce. Se observa que, al comparar los impactos de los distintos países, Monterrey presenta los mayores impactos para esta categoría. Para el caso de MTY, CDMX y BCN, el escenario E1 tiene un peor rendimiento ambiental que el escenario E5, y para el caso de BLN y ZRH, este escenario

presenta mayores impactos incluso que el escenario base E0. Para la categoría de impacto de EAD, y como se discutió en la sección “4.5.4.1 Ecotoxicidad en agua dulce (EAD)”, el consumo energético no es lo único que provoca potencial de ecotoxicidad en agua dulce. El proceso de tratamiento del aluminio residual en la etapa de disposición final genera impactos relevantes para esta categoría. Para el caso de BCN, CDMX y MTY, los ahorros energéticos que genera el escenario E1 disminuyen los impactos de este lo suficiente para mostrar mejores resultados que el escenario base, debido a que en España y en México, las emisiones de iones de cobre y níquel provenientes de la infraestructura de la red eléctrica son mayores que para Alemania y Suiza. En estos últimos, debido a la limpieza del mix eléctrico y menores emisiones de iones de cobre y níquel dentro del módulo de producción de energía de bajo voltaje, la disminución del requerimiento energético no contrarresta los impactos generados por el incremento en el uso de aluminio al final de su vida útil. Esto es especialmente relevante para el caso de Zúrich, en donde los impactos generados por el escenario E1 son 1.65 veces más grandes que aquellos generados por el escenario E5.

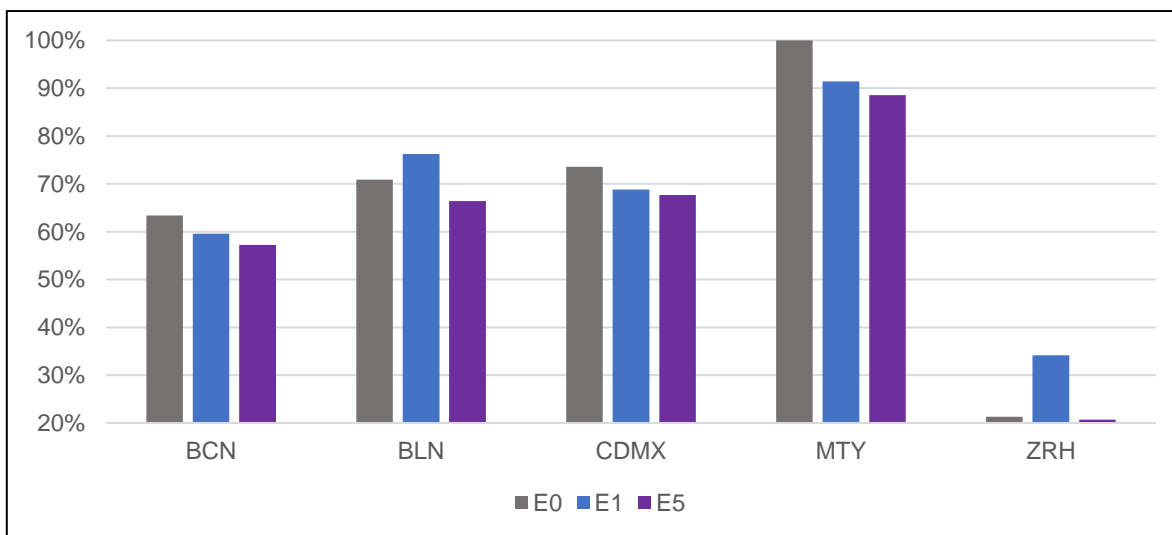


Figura 69. Impactos normalizados para la categoría de impacto de ecotoxicidad en agua dulce, por ciudad. Evaluación de las propiedades termocrómicas.

Tabla 50. Impactos absolutos en [kg P eq.] para la categoría de impacto de ecotoxicidad en agua dulce, por ciudad. Evaluación de las propiedades termocrómicas.

Escenario	Barcelona (BCN)	Berlín (BLN)	Ciudad de México (CDMX)	Monterrey (MTY)	Zúrich (ZRH)
E0	5,191,516	5,805,554	6,024,304	8,193,118	1,746,632
E1	4,881,716	6,246,108	5,639,965	7,491,639	2,795,159
E5	4,687,268	5,439,567	5,544,993	7,252,253	1,698,124

4.6.5 AGOTAMIENTO DE METALES (AM)

En la Figura 70 y en la Tabla 51 se observan los impactos por ciudad para la categoría de agotamiento de metales, evaluando únicamente las propiedades aislantes y termocrómicas de los escenarios en comparación al escenario base. Como se mencionó en la sección “4.5.1.5 Agotamiento de metales (AM)”, el proceso de la operación de la mina de zinc de donde se extrae la cal necesaria para la manufactura del vidrio tiene una demanda inflada de oro. Debido a que el uso de oro genera un gran potencial de agotamiento de metales, el escenario E1 muestra grandes impactos en esta categoría en comparación a los otros escenarios debido a su demanda superior de vidrio. Aunado a esto, la demanda de aluminio para la fabricación del marco de ventana del escenario E1 genera también relevantes impactos para esta categoría.

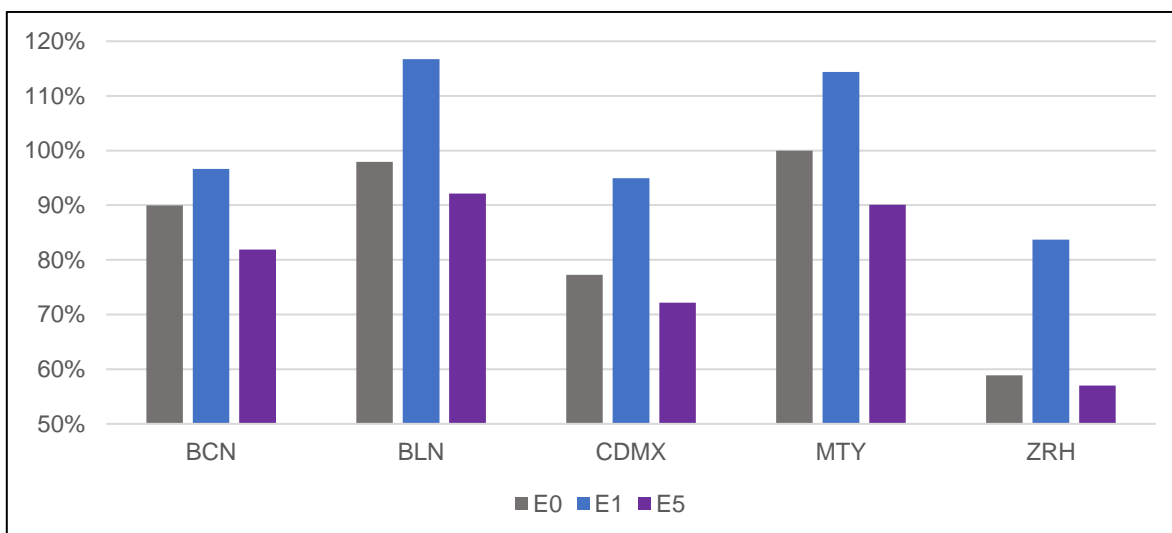


Figura 70. Impactos normalizados para la categoría de impacto de agotamiento de metales, por ciudad. Evaluación de las propiedades termocrómicas.

Tabla 51. Impactos absolutos en [kg Fe eq.] para la categoría de impacto de agotamiento de metales, por ciudad. Evaluación de las propiedades termocrómicas.

Escenario	Barcelona (BCN)	Berlín (BLN)	Ciudad de México (CDMX)	Monterrey (MTY)	Zúrich (ZRH)
E0	3,704,222	4,031,559	3,181,891	4,117,510	2,423,590
E1	3,978,149	4,806,227	3,910,293	4,709,100	3,445,443
E5	3,370,894	3,793,839	2,972,138	3,708,644	2,348,019

4.6.6 FORMACIÓN DE OXIDANTES FOTOQUÍMICOS (FOF)

En la Figura 71 y en la Tabla 52 se muestran los impactos por ciudad para la categoría de formación de oxidantes fotoquímicos, considerando únicamente las propiedades aislantes y termocrómicas de las ventanas. Se aprecia que los mayores impactos los muestran las ciudades de MTY y CDMX, lo cual se atribuye tanto al incremento de la demanda energética del modelo de flujo de energía como al alto porcentaje de producción energética de fuentes fósiles para México. La quema de

petróleo genera un mayor potencial de formación de oxidantes fotocatalíticos que la quema de carbón [106], por lo cual los impactos generados por los escenarios en el caso de BLN son menores a los de las ciudades mexicanas evaluadas. Debido a que los impactos del mix eléctrico suizo y alemán son relativamente bajos para esta categoría de impacto en comparación con las otras ciudades evaluadas, los impactos generados tanto por la producción del aluminio como el vidrio propician que el escenario E1 tenga un peor rendimiento ambiental que el escenario que representa a las ventanas termocrómicas para el caso de las ciudades de BLN y ZRH.

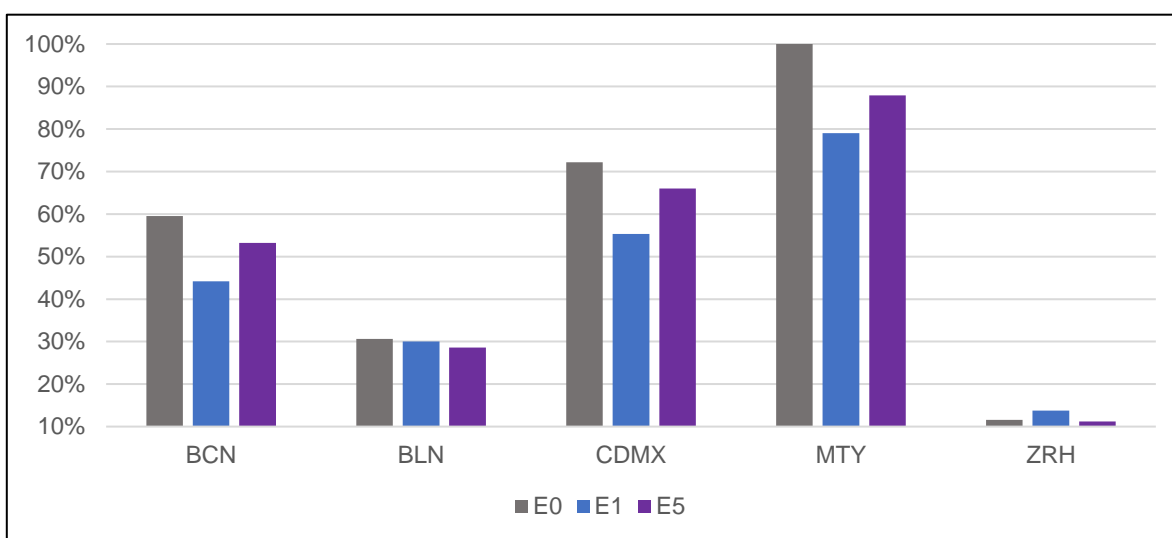


Figura 71. Impactos normalizados para la categoría de impacto de formación de oxidantes fotoquímicos, por ciudad. Evaluación de las propiedades termocrómicas.

Tabla 52. Impactos absolutos en [en kg NMCOV eq.] para la categoría de impacto de formación de oxidantes fotoquímicos, por ciudad. Evaluación de las propiedades termocrómicas.

Escenario	Barcelona (BCN)	Berlín (BLN)	Ciudad de México (CDMX)	Monterrey (MTY)	Zúrich (ZRH)
E0	222,258	114,345	269,494	373,522	43,261
E1	165,087	112,043	206,506	295,322	51,538

E5	198,833	106,892	246,477	328,366	41,743
-----------	---------	---------	---------	---------	--------

4.6.7 ACIDIFICACIÓN TERRESTRE (AT)

En la Figura 72 y en la Tabla 53 se muestran los impactos por ciudad para la categoría de acidificación terrestre, considerando únicamente las propiedades aislantes y termocrómicas de los escenarios propuestos. Se observa que las ciudades con los mayores impactos en esta categoría son CDMX y MTY. Se aprecia que los impactos generados por los escenarios modelados en las ciudades de CDMX y MTY son mayores que para las otras ciudades. Como se discutió previamente, la emisión de SO₂ a la atmósfera debido a la quema de combustibles fósiles para la generación de energía es el principal causante del potencial de acidificación terrestre que presentan los escenarios evaluados. Dado que la producción energética en Suiza no depende en tan alto grado de los combustibles fósiles, su impacto es menor al de todas las otras ciudades. Debido a esta misma razón, las ventajas ambientales que trae consigo el uso de ventanas aislantes de doble capa no logra contrarrestar los impactos generados por la fabricación del vidrio y el aluminio para las ventanas, así como el manejo que se le debe de aportar a los residuos en el fin de su ciclo de vida. En el caso de Berlín, los impactos generados por el escenario E1 son mayores que los del escenario termocrómico E5, pero menores que el escenario base E0.

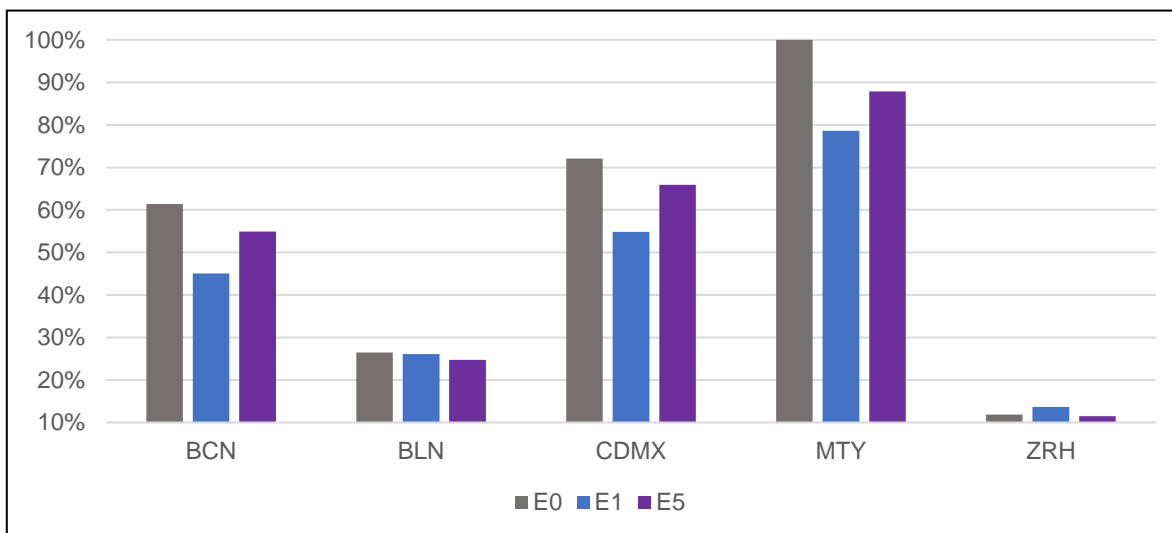


Figura 72. Impactos normalizados para la categoría de impacto de acidificación terrestre, por ciudad. Evaluación de las propiedades termocrómicas.

Tabla 53. Impactos absolutos en [kg SO₂ eq.] para la categoría de impacto de acidificación terrestre, por ciudad. Evaluación de las propiedades termocrómicas.

Escenario	Barcelona (BCN)	Berlín (BLN)	Ciudad de México (CDMX)	Monterrey (MTY)	Zúrich (ZRH)
E0	389,729	167,716	457,494	634,603	75,347
E1	286,093	165,411	347,954	499,164	86,861
E5	348,577	156,934	418,408	557,826	72,745

4.6.8 CAMBIO CLIMÁTICO (CC)

En la Figura 73 y en la Tabla 54 se observan los impactos por ciudad para la categoría de cambio climático. Esta categoría es de alta importancia ya que afecta tanto a la salud humana como a la calidad de los ecosistemas. Se aprecia que comparando los impactos de los escenarios entre las distintas ciudades evaluadas, Zúrich muestra el mejor rendimiento ambiental. El peor rendimiento ambiental lo muestra la ciudad de Monterrey, lo cual se debe al elevado requerimiento energético para climatización, el cual fue modelado en la sección “4.3.3.4 Modelación de flujos de energía en edificios”. Aunado a las diferencias en la demanda energética de cada país (debidas a las variaciones en temperatura y radiación solar presentes en cada ubicación), el mix eléctrico de cada país afecta significativamente los resultados en esta categoría de impacto. Se observa que, en el caso de México, debido a su alto porcentaje de quema de petróleo para la producción energética, el potencial de calentamiento global generado por el uso de energía eléctrica de bajo voltaje para climatización es muy alto. Para el caso de Berlín, a pesar que tienen un porcentaje de producción de energía proveniente de fuentes fósiles parecido a México, Alemania utiliza menos petróleo y más carbón y gas natural, lo cual se refleja con

un menor potencial de CC. En el caso de Suiza, se observa que el rendimiento ambiental del escenario que representa a la ventana aislante E1 es peor que el del escenario E5 y que el escenario base E0, lo cual se debe a los impactos generados por las etapas de fabricación y disposición final relacionadas al incremento en el uso de vidrio y aluminio para este escenario. Se aprecia que el uso de energías renovables afecta de gran manera los impactos ambientales generados por el ciclo de vida de los escenarios para los distintos tipos de ventana evaluados.

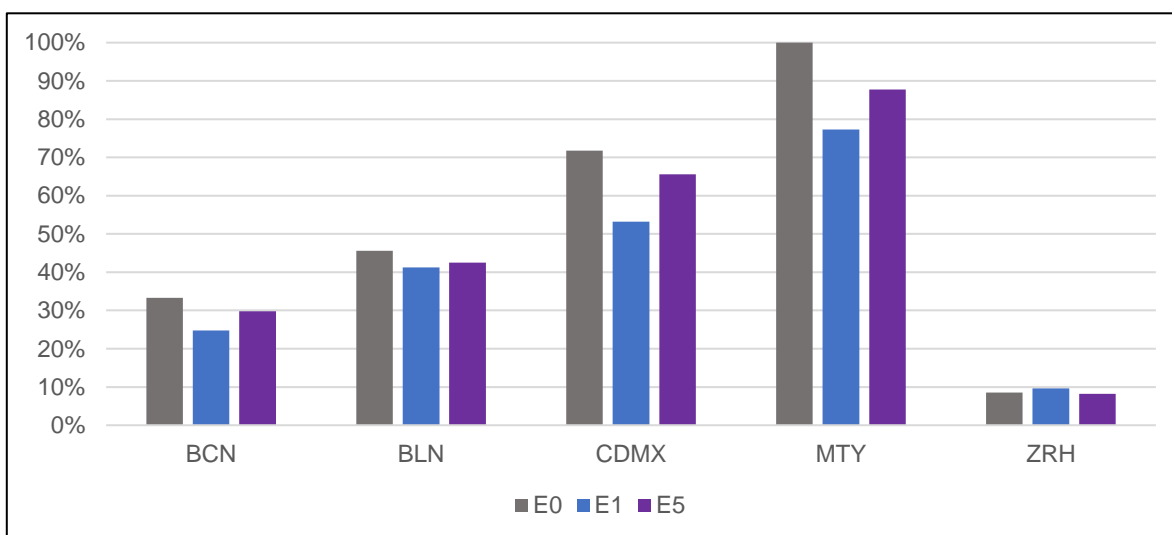


Figura 73. Impactos normalizados para la categoría de impacto de cambio climático, por ciudad. Evaluación de las propiedades termocrómicas.

Tabla 54. Impactos absolutos en [kg CO₂ eq.] para la categoría de impacto de cambio climático, por ciudad. Evaluación de las propiedades termocrómicas.

Escenario	Barcelona (BCN)	Berlín (BLN)	Ciudad de México (CDMX)	Monterrey (MTY)	Zúrich (ZRH)
E0	55,290,376	75,805,407	119,323,018	166,205,347	14,210,561
E1	41,227,396	68,484,330	88,437,955	128,464,820	15,963,886
E5	49,452,627	70,632,384	108,977,381	145,882,500	13,688,136

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES

En esta sección se presentan las conclusiones de este trabajo divididas en las dos secciones que lo compusieron: la parte experimental, en donde se realizó el depósito y caracterización de los materiales y la parte ambiental, en donde se realizó el estudio de impacto ambiental mediante la metodología de Análisis de Ciclo de Vida.

5.1 Conclusiones de la caracterización de los materiales

Las conclusiones de la parte experimental del trabajo se pueden resumir en los siguientes puntos:

1. Mediante la técnica de depósito de Sol-Gel, se logró depositar con éxito películas delgadas de SiO_2 , VO_2 , TiO_2 y ZnO . Este procedimiento proporcionó una forma efectiva y escalable de crear estas películas delgadas y marcó un paso significativo en la investigación.
2. Se realizó una caracterización detallada de las propiedades estructurales y ópticas de las películas delgadas de SiO_2 , VO_2 , TiO_2 y ZnO , así como de su hidrofobicidad. Adicionalmente, se evaluaron los efectos de la variación en las condiciones de depósito en la hidrofobicidad. Los resultados obtenidos ofrecen una visión valiosa de cómo los cambios en las condiciones de depósito pueden influir en las propiedades hidrofóbicas de estas películas.
3. A continuación, se procedió a depositar multicapas de SiO_2 , VO_2 , TiO_2 y ZnO , logrando satisfactoriamente su realización. Se llevó a cabo un análisis de las propiedades estructurales, ópticas e hidrofóbicas de estas multicapas, proporcionando una visión detallada de su comportamiento y características.
4. Finalmente, se evaluó la durabilidad de las películas delgadas y multicapas a través de pruebas de intemperismo acelerado. Esta evaluación demostró que la simulación de las condiciones climáticas ordinarias propició mayores ángulos de contacto para la mayoría de las

muestras analizadas, sugiriendo una mayor durabilidad y robustez de estas películas bajo aplicaciones reales.

Por lo tanto, estos resultados representan un progreso significativo en el desarrollo y comprensión de películas delgadas y multicapas de SiO₂, VO₂, TiO₂ y ZnO, y ofrecen una sólida base para futuras investigaciones en este campo.

5.2 Conclusiones del Análisis de Ciclo de Vida

Las conclusiones de la parte de evaluación de impacto ambiental del trabajo se pueden resumir en los siguientes puntos:

1. Al considerar todas las cualidades al mismo tiempo, el empleo de ventanas inteligentes, con atributos hidrofóbicos, fotocatalíticos y termocrómicos, demuestra una disminución promedio del 10% en todas las categorías evaluadas, en comparación con el escenario base E0, el cual representa a una ventana tradicional sin revestimientos.
2. Al analizar de manera independiente las propiedades hidrofóbicas, se observa una disminución de hasta el 80% en los impactos generados en la categoría de agotamiento de recursos hídricos, debido a los ahorros en el uso de agua y jabón para limpieza de la fachada.
3. Se observa que, en la mayoría de los casos, la solución a un problema ambiental específico implica ciertos compromisos. En el caso de este trabajo, el uso de películas fotocatalíticas para la degradación de contaminantes mejora la calidad del aire, pero contribuye más al cambio climático; la utilización de películas hidrofóbicas reduce los impactos en el agotamiento de recursos hídricos, aunque este beneficio se debe más al ahorro de jabón que al de agua; y las ventanas aislantes disminuyen los impactos ambientales en la mayoría de las categorías evaluadas, pero generan un mayor potencial de agotamiento de metales.
4. Tal como se observa en la categoría de formación de oxidantes fotoquímicos, es más favorable reducir la emisión de contaminantes al generar ahorros energéticos mediante las propiedades aislantes y termocrómicas de las ventanas, en lugar de degradar los contaminantes ya emitidos mediante

fotocatálisis. Al considerar todas las categorías de impacto evaluadas, se puede ver que los materiales termocrómicos muestran los mejores rendimientos ambientales en comparación con las otras dos propiedades de los materiales semiconductores utilizados.

5. En general, al analizar las tres cualidades en conjunto, la que ofrece el mejor rendimiento ambiental es la termocromicidad, seguida de la hidrofobicidad y, en último lugar, la fotocatalisis. Esta última solo afecta positivamente a las categorías de formación de oxidantes fotoquímicos y acidificación terrestre, e incluso genera un poco más de potencial de cambio climático que el escenario base, debido a la demanda energética necesaria para depositar los materiales.
6. Los flujos de energía en edificios muestran que, en el caso del modelo de Torre TOP, es más conveniente tener una transmitancia solar menor y cubrir las necesidades de iluminación con lámparas LED, dada la gran superficie de ventana del proyecto.
7. En el análisis de sensibilidad, la producción de energía eléctrica a través de centrales hidroeléctricas en Suiza hace que los escenarios modelados en Zúrich generen un mayor impacto en la categoría de agotamiento de recursos hídricos en comparación con otros escenarios evaluados. Sin embargo, debido a la baja dependencia de la quema de combustibles fósiles para la generación de electricidad en este país, los impactos de los escenarios en todas las demás categorías de impacto evaluadas muestran un desempeño ambiental mucho mejor que en las demás ciudades.
8. La tecnología termocrómica genera mayores ahorros energéticos y reduce los impactos del ciclo de vida del edificio en climas cálidos como los que se presentan en la Ciudad de México y Monterrey. Sin embargo, el uso de ventanas aislantes reduce los impactos medioambientales de las ventanas en un grado mayor.
9. Debido a que el uso de electricidad procedente de fuentes renovables no es tan perjudicial, en el caso de la ciudad de Zúrich, el uso de las ventanas aislantes con grandes demandas de vidrio y aluminio muestra un peor rendimiento medioambiental que el uso de ventanas termocrómicas. Esto se debe a que, en

este modelo de edificio, en el que todas sus fachadas están hechas de vidrio, no se requiere mucha energía para calentar los espacios, ya que la radiación solar se encarga de ello cuando las temperaturas son bajas.

Por todas estas razones, se concluye que el uso de ventanas inteligentes a base de tecnologías semiconductoras depositadas mediante Sol-Gel provee beneficios ambientales con una menor inversión energética y de materias primas que las ventanas aislantes, las cuales no son manufacturadas en México.

La hipótesis se cumple, ya que el uso de las películas delgadas en las ventanas inteligentes muestra un mejor rendimiento ambiental que el uso de ventanas tradicionales sin recubrimiento alguno.

5.3 Limitaciones, recomendaciones y futuras líneas de estudio

En el marco de la presente tesis, se ha realizado un exhaustivo Análisis del Ciclo de Vida (ACV) de las ventanas inteligentes. Sin embargo, algunas limitaciones y potenciales áreas de estudio para futuras investigaciones han surgido durante este proceso. Es importante tener en cuenta que estas limitaciones no invalidan los hallazgos presentados, pero deben ser tenidas en cuenta al interpretar y aplicar los resultados.

Las limitaciones principales incluyen la falta de cuantificación experimental de los rendimientos de las propiedades fotocatalíticas y termocrómicas de las películas, por lo que se recurrió a un análisis bibliográfico y generación de modelos para suplir los inventarios del ciclo de vida de los escenarios con estas propiedades. Asimismo, las emisiones de contaminantes durante el proceso de depósito de las películas no fueron cuantificadas. No obstante, se considera que, dado el uso limitado de reactivos y solventes, estas emisiones probablemente no representan una contribución significativa a los impactos de todo el ciclo de vida de las ventanas.

Además, se trabajó con la base de datos Ecoinvent 3.6 y, en ausencia de un módulo específico para detergente líquido, utilizamos el módulo para el jabón para modelar el uso de detergente para la limpieza de la fachada de la torre. Adicionalmente, dentro de la categoría de agotamiento de metales, el módulo de operación de la

mina de Zinc presenta un requerimiento de oro que fue disminuido en versiones posteriores de la base de datos. Esta tesis se basa en un ACV prospectivo, lo que implicó la cuantificación de los requerimientos energéticos y la eficiencia de los equipos a escala de laboratorio y la posterior extrapolación a sus equivalentes industriales. Esto se llevó a cabo considerando el equipo industrial para el depósito de un vidrio de ventana con dimensiones de 2.44m x 3.3m y 10mm de grosor.

En términos de los requisitos energéticos para la instalación de los vidrios en el edificio utilizando una grúa torre, estos sólo fueron relevantes para ciertos escenarios y por lo tanto no se consideraron en la evaluación aislada de las propiedades hidrofóbicas ni fotocatalíticas. Del mismo modo, el proceso de templado del vidrio fue cuantificado en la etapa de manufactura en ciertos escenarios, pero se unificó con el tratamiento térmico en los escenarios propuestos para las películas delgadas. Para evaluar la afectación a la hidrofobicidad de la superficie de los diferentes tipos de películas delgadas y sus multicapas, se realizaron pruebas de intemperismo conforme al estándar ASTM G155-13, en donde se estima que el comportamiento simulado dentro de la cámara de intemperismo corresponde a las condiciones climáticas a las que la fachada de vidrio de la torre estaría expuesta durante su vida útil.

El análisis de sensibilidad no se ajustó la distancia de transporte dependiendo de cada país, dado que se observa que no genera cambios relevantes en el impacto de todo el ciclo de vida de los escenarios evaluados.

Dado que se observa que el uso de ventanas termocrómicas en las ciudades de México y Monterrey generan buenos rendimientos ambientales, se recomienda realizar un análisis económico en comparación con las ventanas aislantes para evaluar si su implementación pudiera generar ahorros monetarios a corto, mediano y largo plazo.

Mirando hacia el futuro, sería beneficioso abordar también los componentes económicos y sociales del Análisis de Ciclo de Vida de las ventanas inteligentes. En este sentido, es posible que los escenarios de las ventanas termocrómicas, a pesar de mostrar en promedio un rendimiento ambiental inferior al de las ventanas

aislantes, pudieran presentar importantes beneficios ambientales a un costo de inversión menor que el de las ventanas aislantes. Esto tendría el beneficio adicional de disminuir el riesgo laboral que representa la limpieza de las fachadas de rascacielos. En general, estos resultados resaltan la importancia de seguir desarrollando y profundizando la investigación en el campo de las ventanas inteligentes para optimizar su implementación y uso.

REFERENCIAS

- [1] SEMARNAT, “Precipitación media histórica por entidad federativa”, 2022. http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D3_AGU A01_01&IBIC_user=dgeia_mce&IBIC_pass=dgeia_mce&NOMBREENTIDAD=* &NOMBREANIO=* (consultado el 26 de enero de 2023).
- [2] INEGI, “Carta de climas Nuevo León”. <https://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/nl/territorio/clima.aspx?tema=me&e=19> (consultado el 27 de enero de 2023).
- [3] CONAGUA, “Monitor de Sequía en México”, 2023. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/monitor-de-sequia/monitor-de-sequia-en-mexico> (consultado el 27 de enero de 2023).
- [4] I. Navarro-De León, H. De León-Gómez, J. H. Werner-Paulus, y C. Pola-Símuta, “Impacto de las discontinuidades litológicas y estructurales en la presa El Cuchillo Solidaridad, China, Nuevo León, México”, *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, vol. 16, núm. 2. pp. 121–131, 1999.
- [5] Comisión Nacional del Agua, “Estadísticas del Agua en México 2019”, *Segob*, pp. 1–303, 2019, [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.mx/conagua>
- [6] Performance Services Inc., “Everything You Need to Know About High-Rise Window Cleaning”. <https://psi-info.net/about/high-rise-window-cleaning-faq.php> (consultado el 8 de noviembre de 2022).
- [7] IMSS, *Reglamento para la clasificación de empresas y determinación de la prima en el seguro de riesgos de trabajo*. 1998.
- [8] A. Piccolo y F. Simone, “Energy Performance of an All Solid State Electrochromic Prototype for Smart Window Applications”, *Energy Procedia*, vol. 78, pp. 110–115, nov. 2015, doi: 10.1016/J.EGYPRO.2015.11.123.
- [9] S. S. Lin, S. Y. Fan, y Y. S. Tsai, “Effects of annealing on wettability and physical properties of SnO thin films deposited at low RF power densities”,

- Ceram Int*, vol. 43, núm. 2, pp. 1802–1808, 2017, doi: 10.1016/j.ceramint.2016.10.138.
- [10] D. H. Kim, J. H. Park, T. Il Lee, y J. M. Myoung, “Superhydrophobic Al-doped ZnO nanorods-based electrically conductive and self-cleanable antireflecting window layer for thin film solar cell”, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 150, núm. 3, pp. 65–70, 2016, doi: 10.1016/j.solmat.2016.01.041.
- [11] Y. Fan, C. Li, Z. Chen, y H. Chen, “Study on fabrication of the superhydrophobic sol–gel films based on copper wafer and its anti-corrosive properties”, *Appl Surf Sci*, vol. 258, núm. 17, pp. 6531–6536, jun. 2012, doi: 10.1016/J.APSUSC.2012.03.072.
- [12] E. Kusmierek, “A CeO₂ semiconductor as a photocatalytic and photoelectrocatalytic material for the remediation of pollutants in industrial wastewater: A review”, *Catalysts*, vol. 10, núm. 12, pp. 1–54, 2020, doi: 10.3390/catal10121435.
- [13] Z. Liang *et al.*, “Tungsten-doped vanadium dioxide thin films as smart windows with self-cleaning and energy-saving functions”, *J Alloys Compd*, vol. 694, pp. 124–131, 2017, doi: 10.1016/j.jallcom.2016.09.315.
- [14] M. Saif *et al.*, “Synthesis of highly active thin film based on TiO₂ nanomaterial for self-cleaning application”, *Spectrochim Acta A Mol Biomol Spectrosc*, vol. 112, pp. 46–51, 2013, doi: 10.1016/j.saa.2013.04.011.
- [15] S. S. Lin, C. K. Peng, y C. W. Li, “Wettability and optical properties of SnO–SnO₂–Sb₂O₃ thin films deposited by simultaneous RF and DC magnetron sputtering”, *J Alloys Compd*, vol. 770, pp. 433–440, 2019, doi: 10.1016/j.jallcom.2018.08.110.
- [16] E. Villegas y R. P. L. Ramajo, “Métodos de medición de espesores de películas delgadas óxidos semiconductores”, vol. 64, núm. August, pp. 364–367, 2018, [En línea]. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0035-001X2018000400364&lng=es&tlng=es

- [17] T. Mendivil Reynoso, "Fabricación de transistores FET a base de una película delgada de óxido de Zinc", Universidad de Sonora, Hermosillo, 2010. Consultado: el 13 de febrero de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://www.bidi.uson.mx/TesisIndice.aspx?tesis=21199>
- [18] E. Acosta, "Thin Films/Properties and Applications", *Thin Films*, oct. 2021, doi: 10.5772/INTECHOPEN.95527.
- [19] A. I. Mendoza, R. Moriana, H. Hillborg, y E. Strömberg, "Super-hydrophobic zinc oxide/silicone rubber nanocomposite surfaces", *Surfaces and Interfaces*, vol. 14, núm. May 2018, pp. 146–157, 2019, doi: 10.1016/j.surfin.2018.12.008.
- [20] J. Rodríguez-Torres, C. Gómez-Solís, L. M. Torres-Martínez, y I. Juárez-Ramírez, "Synthesis and characterization of Au-Pd/NaTaO₃ multilayer films for photocatalytic hydrogen production", *J Photochem Photobiol A Chem*, vol. 332, pp. 208–214, 2017, doi: 10.1016/j.jphotochem.2016.08.026.
- [21] M. Pan *et al.*, "Properties of VO₂ thin film prepared with precursor VO(acac)₂", *J Cryst Growth*, vol. 265, núm. 1–2, pp. 121–126, abr. 2004, doi: 10.1016/J.JCRYSGRO.2003.12.065.
- [22] H. Q. Jiang, J. Che, y X. Yao, "Photoluminescence properties of ZnSe/SiO₂ composite thin films prepared by sol-gel method", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, vol. 16, núm. SUPPL., 2006, doi: 10.1016/S1003-6326(06)60188-X.
- [23] L. Znaidi, "Sol-gel-deposited ZnO thin films: A review", *Mater Sci Eng B Solid State Mater Adv Technol*, vol. 174, núm. 1–3, pp. 18–30, 2010, doi: 10.1016/j.mseb.2010.07.001.
- [24] T. Young, "III. An essay on the cohesion of fluids", *Philos Trans R Soc Lond*, vol. 95, pp. 65–87, oct. 1805, doi: 10.1098/rstl.1805.0005.
- [25] J. T. Simpson, S. R. Hunter, y T. Aytug, "Superhydrophobic materials and coatings: A review", *Reports on Progress in Physics*, vol. 78, núm. 8, 2015, doi: 10.1088/0034-4885/78/8/086501.

- [26] N. Nuraje, W. S. Khan, Y. Lei, M. Ceylan, y R. Asmatulu, "Superhydrophobic electrospun nanofibers", *J Mater Chem A Mater*, vol. 1, núm. 6, pp. 1929–1946, ene. 2013, doi: 10.1039/C2TA00189F.
- [27] R. N. Wenzel, "RESISTANCE OF SOLID SURFACES TO WETTING BY WATER", *Ind Eng Chem*, vol. 28, núm. 8, pp. 988–994, ago. 2002, doi: 10.1021/IE50320A024.
- [28] A. B. D. Cassie y S. Baxter, "Wettability of porous surfaces", *Transactions of the Faraday Society*, vol. 40, núm. 0, pp. 546–551, ene. 1944, doi: 10.1039/tf9444000546.
- [29] Z. Duan *et al.*, "Fabrication of micro-patterned ZrO₂/TiO₂ composite surfaces with tunable super-wettability via a photosensitive sol-gel technique", *Appl Surf Sci*, vol. 529, p. 147136, nov. 2020, doi: 10.1016/J.APSUSC.2020.147136.
- [30] R. M. B. Cerón, H. G. Padilla, R. D. Belmont, M. C. B. Torres, R. M. García, y A. P. Báez, "Rainwater chemical composition at the end of the mid-summer drought in the Caribbean shore of the Yucatan Peninsula", *Atmos Environ*, vol. 36, núm. 14, pp. 2367–2374, may 2002, doi: 10.1016/S1352-2310(02)00169-3.
- [31] A. P. Báez, R. D. Belmont, R. M. García, M. C. B. Torres, y H. G. Padilla, "Rainwater chemical composition at two sites in Central Mexico", *Atmos Res*, vol. 80, núm. 1, pp. 67–85, abr. 2006, doi: 10.1016/J.ATMOSRES.2005.06.008.
- [32] R. García *et al.*, "Measurement of chemical elements in rain from Rancho Viejo, a rural wooded area in the State of Mexico, Mexico", *Atmos Environ*, vol. 40, núm. 32, pp. 6088–6100, oct. 2006, doi: 10.1016/J.ATMOSENV.2006.05.048.
- [33] H. Padilla, M. C. Torres, R. Belmont, R. García, E. Mendoza, y A. Báez, "Total peroxides in rainwater at two mountainous sites and in Mexico City, Mexico", <http://dx.doi.org/10.1080/02757540701497147>, vol. 23, núm. 4, pp. 325–333, ago. 2007, doi: 10.1080/02757540701497147.

- [34] A. Báez, R. Belmont, R. García, H. Padilla, y M. C. Torres, “Chemical composition of rainwater collected at a southwest site of Mexico City, Mexico”, *Atmos Res*, vol. 86, núm. 1, pp. 61–75, oct. 2007, doi: 10.1016/J.ATMOSRES.2007.03.005.
- [35] R. García *et al.*, “Concentrations of Mercury and Other Inorganic Ions in Wet Precipitation Collected from a Mountain Mining Zone and an Urban Area in Central Mexico”, *Bull Environ Contam Toxicol*, vol. 101, núm. 2, pp. 145–152, ago. 2018, doi: 10.1007/S00128-018-2393-6/TABLES/7.
- [36] L. Jiang, Y. Zhao, y J. Zhai, “A Lotus-Leaf-like Superhydrophobic Surface: A Porous Microsphere/Nanofiber Composite Film Prepared by Electrohydrodynamics”, *Angewandte Chemie International Edition*, vol. 43, núm. 33, pp. 4338–4341, ago. 2004, doi: 10.1002/ANIE.200460333.
- [37] Z. Hu, X. Zen, J. Gong, y Y. Deng, “Water resistance improvement of paper by superhydrophobic modification with micro-sized CaCO₃ and fatty acid coating”, *Colloids Surf A Physicochem Eng Asp*, vol. 351, núm. 1–3, pp. 65–70, 2009, doi: 10.1016/j.colsurfa.2009.09.036.
- [38] INEGI, “Cuantificando la clase media en México: un ejercicio exploratorio.”, may 2013. Consultado: el 25 de octubre de 2021. [En línea]. Disponible en: https://www.inegi.org.mx/contenidos/investigacion/cmmedia/doc/cmmedia_resumen.pdf#page=12&zoom=auto,-265,560
- [39] C. Zhang, C. Kang, H. Zong, S. Liang, C. Geng, y M. Li, “Roles of TiO₂ buffer layer for preparation of high performance VO₂ thin films with Monoclinic polymorph”, *Results Phys*, vol. 10, núm. May, pp. 628–632, 2018, doi: 10.1016/j.rinp.2018.07.003.
- [40] M. Li, H. Shen, L. Zhuang, D. Chen, y X. Liang, “SiO₂ antireflection coatings fabricated by electron-beam evaporation for black monocrystalline silicon solar cells”, *International Journal of Photoenergy*, vol. 2014, 2014, doi: 10.1155/2014/670438.

- [41] D. Li, Y. Shan, F. Huang, y S. Ding, "Sol-gel preparation and characterization of SiO₂ coated VO₂ films with enhanced transmittance and high thermochromic performance", *Appl Surf Sci*, vol. 317, pp. 160–166, 2014, doi: 10.1016/j.apsusc.2014.08.042.
- [42] H. Ennaceri *et al.*, "Water-resistant surfaces using zinc oxide structured nanorod arrays with switchable wetting property", *Surf Coat Technol*, vol. 299, pp. 169–176, 2016, doi: 10.1016/j.surfcoat.2016.04.056.
- [43] H. M. Shang, Y. Wang, S. J. Limmer, T. P. Chou, K. Takahashi, y G. Z. Cao, "Optically transparent superhydrophobic silica-based films", *Thin Solid Films*, vol. 472, núm. 1–2, pp. 37–43, 2005, doi: 10.1016/j.tsf.2004.06.087.
- [44] J. Lin, H. Chen, T. Fei, y J. Zhang, "Highly transparent superhydrophobic organic-inorganic nanocoating from the aggregation of silica nanoparticles", *Colloids Surf A Physicochem Eng Asp*, vol. 421, pp. 51–62, 2013, doi: 10.1016/j.colsurfa.2012.12.049.
- [45] A. V. Rudakova, A. V. Emeline, K. M. Bulanin, L. V. Chistyakova, M. V. Maevskaya, y D. W. Bahnemann, "Self-cleaning properties of zirconium dioxide thin films", *J Photochem Photobiol A Chem*, vol. 367, núm. September, pp. 397–405, 2018, doi: 10.1016/j.jphotochem.2018.08.037.
- [46] A. A. Ahmad, Q. M. Al-Bataineh, A. M. Alsaad, T. O. Samara, y K. A. Al-izzy, "Optical properties of hydrophobic ZnO nano-structure based on antireflective coatings of ZnO/TiO₂/SiO₂ thin films ", *Physica B Condens Matter*, vol. 593, núm. March, p. 412263, 2020, doi: 10.1016/j.physb.2020.412263.
- [47] A. Fujishima, X. Zhang, y D. A. Tryk, "TiO₂ photocatalysis and related surface phenomena", *Surf Sci Rep*, vol. 63, núm. 12, pp. 515–582, 2008, doi: 10.1016/j.surfrep.2008.10.001.
- [48] L. P. Güereca-Hernández, "Desarrollo de una metodología para la valoración en el análisis de ciclo de vida aplicada a la gestión integral de residuos municipales", Universidad Politécnica de Cataluña, 2006.

- [49] ISO, "ISO 14040-Environmental management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework", *International Organization for Standardization*, vol. 3, p. 20, 2006, doi: 10.1016/j.ecolind.2011.01.007.
- [50] J. Salazar, "Life cycle assessment (LCA) of windows and window materials", *Eco-Efficient Construction and Building Materials: Life Cycle Assessment (LCA), Eco-Labeling and Case Studies*, pp. 502–527, 2013, doi: 10.1533/9780857097729.3.502.
- [51] J. Salazar y T. Sowlati, "A review on life cycle assessment of windows", *For Prod J*, vol. 58, núm. 10, pp. 91–96, 2008, Consultado: el 31 de octubre de 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.envirology.co.nz/a-review-of-life-cycle-assessment-of-windows/>
- [52] D. Papadaki *et al.*, "Life cycle assessment of facile microwave-assisted zinc oxide (ZnO) nanostructures", *Science of the Total Environment*, vol. 586, pp. 566–575, 2017, doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.02.019.
- [53] T. Ibn-Mohammed *et al.*, "Perovskite solar cells: An integrated hybrid lifecycle assessment and review in comparison with other photovoltaic technologies", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 80, núm. November 2015, pp. 1321–1344, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.05.095.
- [54] S. Resalati, T. Okoroafor, A. Maalouf, E. Saucedo, y M. Placidi, "Life cycle assessment of different chalcogenide thin-film solar cells", *Appl Energy*, vol. 313, p. 118888, may 2022, doi: 10.1016/J.APENERGY.2022.118888.
- [55] D. A. Eisenberg, M. Yu, C. W. Lam, O. A. Ogunseitan, y J. M. Schoenung, "Comparative alternative materials assessment to screen toxicity hazards in the life cycle of CIGS thin film photovoltaics", *J Hazard Mater*, vol. 260, pp. 534–542, sep. 2013, doi: 10.1016/J.JHAZMAT.2013.06.007.
- [56] M. Rumayor, J. Corredor, M. J. Rivero, y I. Ortiz, "Prospective life cycle assessment of hydrogen production by waste photoreforming", *J Clean Prod*, vol. 336, p. 130430, 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.130430.

- [57] M. Krebs-Moberg, M. Pitz, T. L. Dorsette, y S. H. Gheewala, “Third generation of photovoltaic panels: A life cycle assessment”, *Renew Energy*, vol. 164, pp. 556–565, feb. 2021, doi: 10.1016/J.RENENE.2020.09.054.
- [58] M. D. Chatzisideris, N. Espinosa, A. Laurent, y F. C. Krebs, “Ecodesign perspectives of thin-film photovoltaic technologies: A review of life cycle assessment studies”, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 156, pp. 2–10, nov. 2016, doi: 10.1016/J.SOLMAT.2016.05.048.
- [59] P. Sirvent, A. Tanguy, G. Pérez, R. Charriere, y J. Faucheu, “Environmental Benefits of Thermochromic VO₂ Windows: Life Cycle Assessment from Laboratory Scale to Industrial Scale”, *Adv Eng Mater*, vol. 24, núm. 4, pp. 1–10, 2022, doi: 10.1002/adem.202101547.
- [60] E. Syrrakou, S. Papaefthimiou, y P. Yianoulis, “Eco-efficiency evaluation of a smart window prototype”, *Science of the Total Environment*, vol. 359, núm. 1–3, pp. 267–282, 2006, doi: 10.1016/j.scitotenv.2005.10.023.
- [61] H. Babaizadeh y M. Hassan, “Life cycle assessment of nano-sized titanium dioxide coating on residential windows”, *Constr Build Mater*, vol. 40, pp. 314–321, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.09.083.
- [62] A. Pierucci, A. Cannavale, F. Martellotta, y F. Fiorito, “Smart windows for carbon neutral buildings: A life cycle approach”, *Energy Build*, vol. 165, pp. 160–171, 2018, doi: 10.1016/j.enbuild.2018.01.021.
- [63] Z. Li *et al.*, “Life cycle assessment of semi-transparent photovoltaic window applied on building”, *J Clean Prod*, vol. 295, p. 126403, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.126403.
- [64] G. Wernet, C. Bauer, B. Steubing, J. Reinhard, E. Moreno-Ruiz, y B. Weidema, “The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology”, *International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 21, núm. 9, pp. 1218–1230, sep. 2016, doi: 10.1007/S11367-016-1087-8/FIGURES/7.

- [65] LENNTECH, “¿Qué es el vidrio y cómo se produce?” <https://www.lenntech.es/library/glass.htm> (consultado el 14 de noviembre de 2022).
- [66] C. E. Caballero-Güereca, M. R. A. Cruz, E. Luévano-Hipólito, y L. M. Torres-Martínez, “Transparent ZnO thin films deposited by dip-coating technique: Analyses of their hydrophobic properties”, *Surfaces and Interfaces*, vol. 37, núm. February, p. 102705, abr. 2023, doi: 10.1016/j.surfin.2023.102705.
- [67] C. S. Barrett y T. B. Massalski, “Structure of Metals”, *Kristall und Technik*, vol. 16, núm. 9, pp. 982–982, ene. 1981, doi: 10.1002/CRAT.19810160904.
- [68] M. R. Islam, M. Rahman, S. F. U. Farhad, y J. Podder, “Structural, optical and photocatalysis properties of sol–gel deposited Al-doped ZnO thin films”, *Surfaces and Interfaces*, vol. 16, núm. May, pp. 120–126, 2019, doi: 10.1016/j.surfin.2019.05.007.
- [69] A. L. Patterson, “The Scherrer Formula for I-Ray Particle Size Determination”, *REVIEW*, vol. 56, 1939.
- [70] T. C. Paul, J. Podder, y M. H. Babu, “Optical constants and dispersion energy parameters of Zn-doped TiO₂ thin films prepared by spray pyrolysis technique”, *Surfaces and Interfaces*, vol. 21, núm. August, p. 100725, 2020, doi: 10.1016/j.surfin.2020.100725.
- [71] N. Yoshikawa, T. Igarashi, H. Taguchi, A. Nagata, y S. Komarov, “Surface roughness variation and microstructural evolution of Au thin films in rapid annealing by microwave and electric furnace heating”, *Thin Solid Films*, vol. 713, núm. September, p. 138352, 2020, doi: 10.1016/j.tsf.2020.138352.
- [72] C. S. Chang y M. H. Hon, “Texture effect of hot-pressed magnesium fluoride on optical transmittance”, *Mater Chem Phys*, vol. 81, núm. 1, pp. 27–32, jul. 2003, doi: 10.1016/S0254-0584(02)00460-1.
- [73] P. P. González-Borrero *et al.*, “Optical band-gap determination of nanostructured WO₃ film”, *Appl Phys Lett*, vol. 96, núm. 6, p. 061909, feb. 2010, doi: 10.1063/1.3313945.

- [74] Z. L. Wang, "Zinc oxide nanostructures: growth, properties and applications", *Journal of Physics: Condensed Matter*, vol. 16, núm. 25, p. R829, jun. 2004, doi: 10.1088/0953-8984/16/25/R01.
- [75] I. P. Parkin y T. D. Manning, "Intelligent Thermo-chromic Windows", *J Chem Educ*, vol. 83, núm. 3, p. 393, mar. 2006, doi: 10.1021/ed083p393.
- [76] D. J. Osborn, "Quantification of NO_x reduction via nitrate accumulation on a TiO₂ photocatalytic concrete pavement", *LSU Master's Theses*, ene. 2012, doi: 10.31390/gradschool_theses.4264.
- [77] W. Fan, K. Y. Chan, C. Zhang, K. Zhang, Z. Ning, y M. K. H. Leung, "Solar photocatalytic asphalt for removal of vehicular NO_x: A feasibility study", *Appl Energy*, vol. 225, pp. 535–541, sep. 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.04.134.
- [78] N. Wang, S. Magdassi, D. Mandler, y Y. Long, "Simple sol-gel process and one-step annealing of vanadium dioxide thin films: Synthesis and thermo-chromic properties", *Thin Solid Films*, vol. 534, pp. 594–598, 2013, doi: 10.1016/j.tsf.2013.01.074.
- [79] G. Xu, P. Jin, M. Tazawa, y K. Yoshimura, "Optimization of antireflection coating for VO₂-based energy efficient window", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 83, núm. 1, pp. 29–37, jun. 2004, doi: 10.1016/J.SOLMAT.2004.02.014.
- [80] S. M. Babulanam, T. S. Eriksson, G. A. Niklasson, y C. G. Granqvist, "Thermo-chromic VO₂ films for energy-efficient windows", *Solar Energy Materials*, vol. 16, núm. 5, pp. 347–363, nov. 1987, doi: 10.1016/0165-1633(87)90029-3.
- [81] P. Jin, G. Xu, M. Tazawa, y K. Yoshimura, "Design, formation and characterization of a novel multifunctional window with VO₂ and TiO₂ coatings", *Appl Phys A Mater Sci Process*, vol. 77, núm. 3–4, pp. 455–459, 2003, doi: 10.1007/s00339-002-1460-2.

- [82] Vitro, “Casos de éxito - Torre TOP”, 2018. <https://www.vitro.com/es/nuestra-compa%C3%B1%C3%ADa/historias-de-%C3%A9xito/torre-top/> (consultado el 26 de abril de 2023).
- [83] O. Peralta, A. Ortínez-Alvarez, R. Torres-Jardón, M. Suárez-Lastra, T. Castro, y L. G. Ruíz-Suárez, “Ozone over Mexico City during the COVID-19 pandemic”, *Science of the Total Environment*, vol. 761, mar. 2021, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.143183.
- [84] L. Benini, S. Sala, S. Manfredi, y M. G. Deliverable, “Indicators and targets for the reduction of the environmental impact of EU consumption: Overall environmental impact (resource) indicators”, 2014.
- [85] M. Wolfova, A. Estokova, M. Ondova, y A. Monokova, “Comparing of the external bearing wall using three cultural perspectives in the life cycle impact assessment”, en *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Institute of Physics Publishing, jul. 2018. doi: 10.1088/1757-899X/385/1/012064.
- [86] Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich, *SIA 380/1 / 2016 D - Heizwärmebedarf*. 2016, pp. 0–60. Consultado: el 5 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: http://shop.sia.ch/normenwerk/architekt/380-1_2016_d/D/Product
- [87] L. Saikia, D. Bhuyan, M. Saikia, B. Malakar, D. K. Dutta, y P. Sengupta, “Photocatalytic performance of ZnO nanomaterials for self sensitized degradation of malachite green dye under solar light”, *Appl Catal A Gen*, vol. 490, núm. April 2019, pp. 42–49, 2015, doi: 10.1016/j.apcata.2014.10.053.
- [88] G. Ortiz Rabell, M. R. Alfaro Cruz, y I. Juárez-Ramírez, “Photochemistry of ZnO/GeO₂ film for H₂ production”, *J Photochem Photobiol A Chem*, vol. 433, núm. July, 2022, doi: 10.1016/j.jphotochem.2022.114185.
- [89] M. R. Alfaro Cruz, L. F. Garay-Rodríguez, y L. M. Torres-Martínez, “Analysis of the photocatalytic efficiency of ZnO–ZnO nanorods films deposited by two-

- step chemical methods in hydrogen generation”, *J Solgel Sci Technol*, vol. 103, núm. 1, pp. 267–279, 2022, doi: 10.1007/s10971-022-05804-1.
- [90] M. R. Alfaro Cruz, O. Ceballos-Sanchez, E. Luévano-Hipólito, y L. M. Torres-Martínez, “ZnO thin films deposited by RF magnetron sputtering: Effects of the annealing and atmosphere conditions on the photocatalytic hydrogen production”, *Int J Hydrogen Energy*, vol. 43, núm. 22, pp. 10301–10310, 2018, doi: 10.1016/j.ijhydene.2018.04.054.
- [91] M. R. Alfaro Cruz, L. F. Vázquez G., L. F. Garay-Rodríguez, y L. M. Torres-Martínez, “Hierarchical V2O5 thin films and its photocatalytic performance”, *Mater Lett*, vol. 324, núm. January, pp. 1–4, 2022, doi: 10.1016/j.matlet.2022.132751.
- [92] B. Mull, L. Möhlmann, y O. Wilke, “Photocatalytic Degradation of Toluene, Butyl Acetate and Limonene under UV and Visible Light with Titanium Dioxide-Graphene Oxide as Photocatalyst”, *Environments 2017, Vol. 4, Page 9*, vol. 4, núm. 1, p. 9, ene. 2017, doi: 10.3390/ENVIRONMENTS4010009.
- [93] Glass on Web, “What is the shading coefficient?”, 2016. <https://www.glassonweb.com/news/what-shading-coefficient> (consultado el 5 de mayo de 2023).
- [94] Y. Tong, Y. Chen, y W. Shao, “Study on Energy Saving Application Strategy of New Residential Houses Envelope Structure in Sanjiangyuan Area Based on Dest Orthogonal Simulation”, *E3S Web of Conferences*, vol. 136, p. 02036, dic. 2019, doi: 10.1051/e3sconf/201913602036.
- [95] M. Aburas *et al.*, “Smart windows – Transmittance tuned thermochromic coatings for dynamic control of building performance”, *Energy Build*, vol. 235, mar. 2021, doi: 10.1016/j.enbuild.2021.110717.
- [96] “Renewables.ninja”. <https://www.renewables.ninja/> (consultado el 10 de mayo de 2023).

- [97] S. Pfenninger y I. Staffell, “Long-term patterns of European PV output using 30 years of validated hourly reanalysis and satellite data”, *Energy*, vol. 114, pp. 1251–1265, nov. 2016, doi: 10.1016/J.ENERGY.2016.08.060.
- [98] I. Staffell y S. Pfenninger, “Using bias-corrected reanalysis to simulate current and future wind power output”, *Energy*, vol. 114, pp. 1224–1239, nov. 2016, doi: 10.1016/J.ENERGY.2016.08.068.
- [99] Meteored, “Histórico del Clima en Monterrey”, Monterrey, 2021. Consultado: el 5 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.meteored.mx/monterrey/historico>
- [100] ASHRAE, “ANSI/ASHRAE Addendum p to ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2013”, 2015. [En línea]. Disponible en: www.ashrae.org
- [101] Secretaría de Gobernación, *NOM-001-STPS-1993*. Distrito Federal: Diario Oficial de la Federación, 1994. Consultado: el 10 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4701489&fecha=08/06/1994#gsc.tab=0
- [102] C. Reinhart, “4.401/4.464 Environmental Technologies in Buildings”.
- [103] HVAC Systems, “Understanding COP: Coefficient Of Performance Of Heat Pumps”. <https://learnmetrics.com/coefficient-of-performance/> (consultado el 10 de mayo de 2023).
- [104] I. Torres y J. Niewöhner, “Whose energy sovereignty? Competing imaginaries of Mexico’s energy future”, *Energy Res Soc Sci*, vol. 96, p. 102919, feb. 2023, doi: 10.1016/J.ERSS.2022.102919.
- [105] IEA, “World energy statistics (Edition 2016)”, *IEA World Energy Statistics and Balances (database)*, 2016. https://www.oecd-ilibrary.org/energy/data/iea-world-energy-statistics-and-balances/world-energy-statistics-edition-2016_03a28cba-en (consultado el 24 de mayo de 2023).

- [106] E. Santoyo-Castelazo, H. Gujba, y A. Azapagic, “Life cycle assessment of electricity generation in Mexico”, *Energy*, vol. 36, núm. 3, pp. 1488–1499, mar. 2011, doi: 10.1016/J.ENERGY.2011.01.018.
- [107] BP, “Electricity consumption from fossil fuels, nuclear and renewables, Mexico, 2014”, *BP Statistical Review of World Energy; Ember*, el 8 de julio de 2022. <https://ourworldindata.org/grapher/elec-mix-bar?time=2014&country=~MEX> (consultado el 24 de mayo de 2023).
- [108] S. Pfister, D. Saner, y A. Koehler, “The environmental relevance of freshwater consumption in global power production”, *International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 16, núm. 6, pp. 580–591, jul. 2011, doi: 10.1007/S11367-011-0284-8.
- [109] L. Chen, S. A. Miller, y B. R. Ellis, “Comparative Human Toxicity Impact of Electricity Produced from Shale Gas and Coal.”, *Environ Sci Technol*, vol. 51, núm. 21, pp. 13018–13027, nov. 2017, doi: 10.1021/acs.est.7b03546.
- [110] M. P. S. Thind, C. W. Tessum, I. L. Azevedo, y J. D. Marshall, “Fine Particulate Air Pollution from Electricity Generation in the US: Health Impacts by Race, Income, and Geography”, *Environ Sci Technol*, vol. 53, núm. 23, pp. 14010–14019, dic. 2019, doi: 10.1021/ACS.EST.9B02527/SUPPL_FILE/ES9B02527_SI_002.XLSX.
- [111] EAA y OEA, “Aluminium Recycling in Europe The Road to High Quality Products”, 2008. Consultado: el 25 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en:
https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwj_3MSW1ZD_AhWY9LsIHQEhCHwQFnoECAkQAQ&url=https%3A%2F%2Frecycling.world-aluminium.org%2Ffileadmin%2F_migrated%2Fcontent_uploads%2Ff10000217_04.pdf&usg=AOvVaw3IV8U93QYFcOoNdE6gCJUK

- [112] M. Bertram, K. J. Martchek, y G. Rombach, “Material flow analysis in the aluminum industry”, *J Ind Ecol*, vol. 13, núm. 5, pp. 650–654, oct. 2009, doi: 10.1111/j.1530-9290.2009.00158.x.
- [113] M. Classen *et al.*, “Life Cycle Inventories of Metals. Final report ecoinvent data v2.1, No 10”, Dübendorf, CH, 2009. [En línea]. Disponible en: www.ecoinvent.ch
- [114] V. C. Usbeck, J. Pflieger, y T. Sun, “Life Cycle Assessment of Float Glass Client: Glass for Europe”, Echterdingen, 2011. [En línea]. Disponible en: www.pe-international.com
- [115] P. A. Wäger, R. Hischer, y R. Widmer, “The material basis of ICT”, *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 310, pp. 209–221, 2015, doi: 10.1007/978-3-319-09228-7_12/FIGURES/5.
- [116] E. Moreno Ruiz, D. FitzGerald, A. Symeonidis, y G. Wernet, “Technical report of changes implemented in the ecoinvent database between v3.7 & v3.7.1”, Zürich, Switzerland, dic. 2020. Consultado: el 29 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: https://ecoinvent.org/wp-content/uploads/2021/01/technical-report_v3-7-1_20201217.pdf
- [117] A. Sinha y A. Kutnar, “Carbon Footprint versus Performance of Aluminum, Plastic, and Wood Window Frames from Cradle to Gate”, *Buildings 2012, Vol. 2, Pages 542-553*, vol. 2, núm. 4, pp. 542–553, dic. 2012, doi: 10.3390/BUILDINGS2040542.
- [118] Competence Centre of the Swiss Federal Institute of Technology, “Ecoinvent version 2.2”, 2012. <https://ecoinvent.org/> (consultado el 26 de mayo de 2023).
- [119] A. Arvesen, I. B. Hauan, B. M. Bolsøy, y E. G. Hertwich, “Life cycle assessment of transport of electricity via different voltage levels: A case study for Nord-Trøndelag county in Norway”, *Appl Energy*, vol. 157, pp. 144–151, nov. 2015, doi: 10.1016/J.APENERGY.2015.08.013.

- [120] H. Ritchie, "Which sources does our global energy come from? How much is low-carbon? - Our World in Data", 2020. <https://ourworldindata.org/sources-global-energy> (consultado el 24 de mayo de 2023).
- [121] M. Prashantsinh, G. Bhagchandani, y M. A. Gupta, "Environmental Impact of Soda Ash using LCA Tool", *IJIRST-International Journal for Innovative Research in Science & Technology*, vol. 1, 2015, [En línea]. Disponible en: www.ijirst.org
- [122] I. C. M. Francke y J. F. W. Castro, "Carbon and water footprint analysis of a soap bar produced in Brazil by Natura Cosmetics", *Water Resour Ind*, vol. 1–2, pp. 37–48, 2013, doi: 10.1016/j.wri.2013.03.003.
- [123] Saidykhan J, Secka P, Adjivon, y Acquaye HB, "Assessment of the Level of Mercury Present in Soaps by the Use of Cold Vapour Atomic Fluorescence Spectrometric Analysis-A Gambian Case Study 1* Oyelakin O", 2010.
- [124] BP, "Statistical Review of World Energy | Energy economics", el 26 de junio de 2023. <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html> (consultado el 16 de junio de 2023).
- [125] UNECE, "Life Cycle Assessment of Electricity Generation Options", 2021.
- [126] GLASSTECH, "Tipos de cristales", Consultado: el 21 de septiembre de 2022. [En línea]. Disponible en: https://neufert-cdn.archdaily.net/uploads/product_file/file/282/Glasstech_Tipos_de_Cristales.pdf
- [127] M. R. A. Cruz, C. E. C. Güereca, E. L. Hipólito, y L. M. T. Guerra, "Importancia de los edificios inteligentes para el medio ambiente", *Revista Digital Universitaria*, vol. 24, núm. 1, feb. 2023, Consultado: el 29 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.revista.unam.mx/ojs/index.php/rdu/article/view/2207>

[128] HUB UANL, “HUB UANL by hubuanl - Issuu”, *HUB UANL*, Monterrey, NL, diciembre de 2022. Consultado: el 29 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: https://issuu.com/hubuanl/docs/revista_hub-2022/34